

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y
ELECTRÓNICA**

**DISEÑO DEL APANTALLAMIENTO CONTRA DESCARGAS
ATMOSFÉRICAS EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN CON AYUDA
COMPUTACIONAL.**

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

**NATALY MERCEDES CORREA VALLEJO
(naty_meche@hotmail.com)**

**DIRECTOR: ING. PAUL AYORA G.
(paul.ayora@epn.edu.ec)**

Quito, Septiembre de 2011

CONTENIDO

DECLARACIÓN.....	I
CERTIFICACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
DEDICATORIA.....	IV
RESUMEN.....	V
PRESENTACIÓN.....	VII
CAPÍTULO 1: ASPECTOS PRELIMINARES.....	1
1.1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.2 OBJETIVOS.....	2
1.2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	2
1.3 ALCANCE.....	3
1.4 JUSTIFICACIÓN.....	4
1.5 GENERALIDADES.....	5
1.5.1 ASPECTOS BÁSICOS DE LAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS.....	5
1.5.1.1 DESCRIPCIÓN DE LA DESCARGA.....	7
1.5.1.2 POLARIDAD DE LA DESCARGA	9
1.5.2 NIVELES CERÁUNICOS.....	10
1.6 ANÁLISIS DE LOS MÉTODOS EXISTENTES PARA EL DISEÑO DEL APANTALLAMIENTO EN LÍNEAS.....	11
1.6.1 DEFINICIÓN DE HILO DE GUARDA.....	11
1.6.2 MÉTODOS CLÁSICOS DE UBICACIÓN DEL HILO DE GUARDA.....	12
1.6.2.1 CHARLES.....	13
1.6.2.2 WAGNER Y MAC CAN.....	15
1.6.2.3 SCHWAIGER.....	18
1.6.2.4 LANGREHR.....	20
1.6.3 MODELO ELECTROGEOMÉTRICO	22
1.6.4 COMPARACIÓN ENTRE LOS MÉTODOS CLÁSICOS Y EL MODELO ELECTROGEOMÉTRICO.....	25

CAPÍTULO 2: FORMULACIÓN DEL MODELO PARA EL APANTALLAMIENTO DE LAS LÍNEAS DE TRANSMISIÓN.....	27
2.1 CONSIDERACIONES GENERALES.....	27
2.1.1 COMO MEDIR LOS PARÁMETROS DEL RAYO.....	28
2.1.2 FORMA TEÓRICA DEL IMPULSO DE CORRIENTE EN DESCARGAS ATMOSFÉRICAS.....	30
2.2 MODELO ELECTROGEOMÉTRICO	35
2.2.1 DISTANCIA CRÍTICA DE ARQUEO	37
2.2.2 INTERCEPCIÓN DEL RAYO, PUNTO DE INCIDENCIA DE LA DESCARGA.....	39
2.2.3 PERIODO DE PROTECCIÓN DEL APANTALLAMIENTO.....	43
2.3 NIVEL CERÁUNICO	45
2.4 LOCALIZACIÓN DE LA DESCARGA	46
2.4.1 IMPACTO DIRECTO SOBRE LAS TORRES O EL CABLE DE GUARDA.....	46
2.4.1.1 IMPACTO DIRECTO EN LAS TORRES.....	47
2.4.1.2 IMPACTO EN EL VANO DEL CABLE DE GUARDA.....	48
2.4.2 DESCARGAS DIRECTAS AL CONDUCTOR DE FASE	48
2.4.3 DESCARGAS PRÓXIMAS A LA LÍNEA.....	49
2.5 TORRES DE TRANSMISIÓN.....	49
CAPÍTULO 3: APLICACIÓN PRÁCTICA “PROGRAMA COMPUTACIONAL”	57
3.1 SOFTWARE COMPLEMENTARIO PARA EL DISEÑO DE APANTALLAMIENTO DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN.....	57
3.1.1 CONSIDERACIONES GENERALES.....	57
3.1.2 MÉTODO DEL “MODELO ELECTROGEOMÉTRICO”.....	58
3.1.2.1 SISTEMA DE COORDENADAS.....	58

3.1.2.2 CÁLCULO DEL PERIODO DE PROTECCIÓN DEL APANTALLAMIENTO	60
3.1.2.3 FUNCIÓN DE DENSIDAD DE PROBABILIDAD PARA CORRIENTE DE RAYOS A TIERRA.....	67
3.1.2.3.1 CURVA PRESENTADA POR UMAN.....	68
3.1.2.3.2 CURVA PRESENTADA POR LA CIGRÈ.....	68
3.1.2.3.3 CURVA EXPONENCIAL POR HERODOTOU.....	68
3.1.2.4 ANÁLISIS DE LA DISTANCIA PROTEGIDA.....	69
3.2 ANÁLISIS DEL PROGRAMA DIGITAL, DETERMINAR EN FORMA PROBABILÍSTICA LAS POSIBLES SALIDAS POR FALLA DEL APANTALLAMIENTO Y EL POTENCIAL PUNTO DE INCIDENCIA DE LAS DESCARGAS QUE LAS PROVOCARON.....	70
3.2.1 GENERALIDADES.....	70
3.2.2 FORMULACIÓN DEL MODELO.....	72
3.2.3 FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN DE CORRIENTE DE PROBABILIDADES PARA LA MAGNITUD DE CORRIENTES DE LAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS.....	73
3.2.4 ALGORITMOS DE SOLUCIÓN.....	78
3.2.4.1 INGRESO DE DATOS.....	78
3.2.4.2 CÁLCULO ÁREA PROTEGIDA	79
3.2.4.3 NÚMERO DE PERFORACIONES EN EL APANTALLAMIENTO (FALLAS).....	80
3.2.4.4 PUNTO DE INCIDENCIA	80
3.2.4.4.1 LECTURA Y ASIGNACIÓN DE DATOS GENERALES.....	80
3.2.4.4.2 HILO DE GUARDA COMO ELEMENTO DE PROTECCIÓN...81	
3.2.4.4.3 ALEATORIEDAD.....	81
3.2.5 DIAGRAMA DE BLOQUES.....	84
3.2.5.1 CONSIDERACIONES GENERALES DEL PROGRAMA.....	84
3.2.5.2 PUNTO DE INCIDENCIA.....	86
3.2.6 RESTRICCIONES.....	87

CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE SENSITIVIDAD.....	89
4.1 GENERALIDADES.....	89
4.2 INFLUENCIA DE LA DISPOSICIÓN DE LAS FASES.....	90
4.2.1 EJEMPLO 1.....	90
4.2.2 EJEMPLO 2.....	96
4.2.3 EJEMPLO 3.....	102
4.2.4 EJEMPLO 4.....	108
4.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	110
4.3.1 EJEMPLO 1.....	111
4.3.2 EJEMPLO 2.....	111
4.3.3 EJEMPLO 2.....	107
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	113
5.1.1 CONCLUSIONES.....	113
5.1.2 RECOMENDACIONES.....	115
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	117

ANEXOS

ANEXO 1: RESULTADOS EJEMPLO 1	
ANEXO 2: RESULTADOS EJEMPLO 2	
ANEXO 3: RESULTADOS EJEMPLO 3	
ANEXO 4: RESULTADOS EJEMPLO 4	
ANEXO 5: MANUAL DE USUARIO	

FIGURAS Y TABLAS

CAPÍTULO1: ASPECTOS PRELIMINARES

FIGURA 1.1 UNA DE LAS MÚLTIPLES PRESENTACIONES QUE TIENE EL RAYO.....	6
FIGURA 1.2 PASO PRELIMINAR ANTES DE QUE SE FORME EL RAYO.....	7
FIGURA 1.3 FENÓMENO DE LA DESCARGA.....	8
FIGURA 1.4 ZONA DE PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS DIRECTAS SEGÚN CHARLES.....	14
FIGURA 1.5 ZONA DE PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS DIRECTAS SEGÚN CHARLES PARA SIMPLE Y DOBLE CABLE.....	15
FIGURA 1.6 ZONA DE PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS DIRECTAS SEGÚN WAGNER Y MAC CANN.....	16
FIGURA 1.7 REUBICACIÓN DEL CABLE DE GUARDA SEGÚN WAGNER Y MAC CANN. EN LA PARTE SUPERIOR DE LA TORRE SE INDICA CON LÍNEA PUNTEADA LA UBICACIÓN ORIGINAL DEL HILO DE GUARDA.....	17
FIGURA 1.8 CRITERIO SCHWAIGER, CONSTRUCCIÓN TEÓRICA.....	18
FIGURA 1.9 ZONA DE PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS DIRECTAS SEGÚN SCHWAIGER.....	19
FIGURA 1.10 ZONA DE PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS DIRECTAS SEGÚN LANGREHR.....	21
FIGURA 1.11 REUBICACIÓN DEL CABLE DE GUARDA SEGÚN LANGREHR, SE MUESTRA EL DESPLAZAMIENTO REALIZADO Y UNA NUEVA ESTRUCTURA DE SOPORTE.....	22
FIGURA 1.12 MODELO ELECTROGEOMÉTRICO PARA UN SOLO CABLE.....	23
FIGURA 1.13 IDENTIFICACIÓN DE LA FLECHA.....	

CAPÍTULO2: FORMULACIÓN DEL MODELO PARA EL APANTALLAMIENTO

DE LAS LÍNEAS DE TRANSMISIÓN

FIGURA 2.1 CAMPO MAGNÉTICO GENERADO POR LA CORRIENTE DEL RAYO.....	28
FIGURA 2.2 IMPULSO DE CORRIENTE (TEÓRICO).....	30
FIGURA 2.3 CURVA DE DISTRIBUCIÓN ACUMULATIVA (CIGRÉ).....	31
FIGURA 2.4 CURVA DE DISTRIBUCIÓN ACUMULATIVA PENDIENTE MÁXIMA (ANDERSON Y ERIKSON).....	32
FIGURA 2.5 CURVA DE DISTRIBUCIÓN ACUMULATIVA (IEEE).....	33
FIGURA 2.6 CURVA DE DISTRIBUCIÓN ACUMULATIVA PENDIENTE MÁXIMA (IEEE).....	34
FIGURA 2.7 LUGAR GEOMÉTRICO PARA UN CABLE “G”.....	38
FIGURA 2.8 ANÁLISIS DE DISTANCIAS Y ZONAS PROTEGIDAS.....	40
FIGURA 2.9 ANÁLISIS APANTALLAMIENTO SIN SUPERFICIE EXPUESTA.....	41
FIGURA 2.10 ANÁLISIS APANTALLAMIENTO CON SUPERFICIE EXPUESTA...	42
FIGURA 2.11 DISTRIBUCIÓN DE LA DESCARGA CUANDO EL RAYO IMPACTA UNA TORRE.....	46
FIGURA 2.12 DISTRIBUCIÓN DE LA DESCARGA CUANDO EL RAYO IMPACTA CABLE DE GUARDA.....	47
FIGURA 2.13 ALTURA TORRES TRANSMISIÓN SEGÚN NIVEL DE VOLTAJE..	49
FIGURA 2.14 GEOMETRÍA TIPO PARA TORRES DE ALTA TENSIÓN.....	50
FIGURA 2.15 TORRE DE SUSPENSIÓN CIRCUITO SIMPLE DE 38.1 [m]	51
FIGURA 2.16 TORRE DE SUSPENSIÓN CIRCUITO DOBLE DE 33.1 [m].....	52
FIGURA 2.17 TORRE DE RETENCIÓN CIRCUITO DOBLE DE 33.1 [m].....	52
FIGURA 2.18 TORRE TERMINAL CIRCUITO SIMPLE DE 30.5 [m].....	53
FIGURA 2.19 TORRE DE SUSPENSIÓN CIRCUITO SIMPLE DE 33.5 [m].....	53
FIGURA 2.20 TORRE DE RETENCIÓN CIRCUITO DOBLE DE 48 [m].....	54
FIGURA 2.21 TORRE DE SUSPENSIÓN CIRCUITO DOBLE DE 52.4 [m].....	54
FIGURA 2.22 TORRE DE SUSPENSIÓN CIRCUITO SIMPLE DE 53.6 [m].....	55
FIGURA 2.23 TORRE DE SUSPENSIÓN CIRCUITO SIMPLE DE 60.5 [m].....	55

CAPÍTULO 3: APLICACIÓN PRÁCTICA “PROGRAMA COMPUTACIONAL”

FIGURA 3.1 SISTEMA DE COORDENADAS CARTESIANAS PARA EL ANÁLISIS DEL MODELO.....	58
FIGURA 3.2 MODELO ANALÍTICO PARA CALCULO "XP" CUANDO, $S_e > H$	59
FIGURA 3.3 MODELO ANALÍTICO PARA CALCULO "XP" CUANDO, $S_e < H$	60
FIGURA 3.4 ANÁLISIS PARA CONDUCTOR HORIZONTAL.....	62
FIGURA 4.4A ANÁLISIS DE BLINDAJE.....	62
FIGURA 3.5 HISTOGRAMA DE LA FRECUENCIA DE DISTRIBUCIÓN DE LA CORRIENTE DE RAYOS: DATOS DE UMAN.....	74
FIGURA 3.6 HISTOGRAMA DE LA FRECUENCIA DE DISTRIBUCIÓN DE LA CORRIENTE DE RAYOS: DATOS DE HERODOTOU Y OTRO.....	75
FIGURA 3.7 HISTOGRAMA DE LA FRECUENCIA DE DISTRIBUCIÓN DE LA CORRIENTE DE RAYOS: DATOS DE LA CIGRÈ.....	76

CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE SENSITIVIDAD

FIGURA 4.1 ESTRUCTURA TIPO, EJEMPLO 1 PLANTEADO.....	89
FIGURA 4.2 ANÁLISIS DE LA GEOMETRÍA DE LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN A MODELARSE (EJEMPLO 1).....	90
FIGURA 4.3 ANÁLISIS DEL PLANO DE EXPOSICIÓN.....	92
FIGURA 4.4 ESTRUCTURAS TIPO PARA EJEMPLO 2.....	94
FIGURA 4.5 ANÁLISIS DE LA GEOMETRÍA DE LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN A MODELARSE (EJEMPLO 2).....	96
FIGURA 4.5 ANÁLISIS DE LA GEOMETRÍA DE LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN A MODELARSE (EJEMPLO 3).....	102
FIGURA A.1 RESULTADOS 1.1.....	116
FIGURA A.2 RESULTADOS 1.2.....	116
FIGURA A.3 RESULTADOS 2.1.....	128
FIGURA A.4 RESULTADOS 2.2.....	129
FIGURA A.5 RESULTADOS 3.1.1.....	128
FIGURA A.6 RESULTADOS 3.1.2.....	129

TABLA 4.1 TABLA DE COORDENADAS DE UBICACIÓN DE LOS CONDUCTORES (EJEMPLO 1).....	93
TABLA 4.2 TABLA DE COORDENADAS DE UBICACIÓN DE LOS CONDUCTORES (EJEMPLO 2).....	98
TABLA 4.3 TABLA DE COORDENADAS DE UBICACIÓN DE LOS CONDUCTORES (EJEMPLO 3).....	103

DECLARACIÓN

Yo Nataly Mercedes Correa Vallejo, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis 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.

Nataly M. Correa V.

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Nataly Mercedes Correa Vallejo, bajo mi supervisión.

ING. PAUL AYORA G.

AGRADECIMIENTOS

En primera instancia agradezco a Dios, porque sé que fue él quien me dio la fuerza, el ánimo y la fortaleza para terminar una más de mis metas, además que nunca me ha desamparado, siempre que sentí desmayar el estuvo ahí brindándome su mano para darme el impulso que necesitaba y seguir adelante.

Un agradecimiento infinito a mis padres, Egidio y Mercedes, quienes nunca dejaron de confiar en mí y me han apoyado en todas y cada una de las etapas de mi vida. Gracias papitos.

De manera especial agradezco a mi Director de tesis, Ing. Paul Ayora, por su apoyo, por la paciencia que supo tenerme, y sobre todo por haberme permitido cumplir una de mis metas junto con su guía y compartiendo su conocimiento, sin restricción alguna, para el desarrollo de este proyecto.

No puedo dejar de agradecer a mis hermanos, gracias por el apoyo brindado y sobre todo por la paciencia en todo lo que tuvimos que pasar mientras desarrollé este proyecto. A mi familia, a mis tíos y tías, agradezco el ánimo que siempre me han dado y la preocupación que tienen en cuanto a mi bienestar, así como también agradezco a mis primos y primas que bastaba una palabra de aliento para saber que cuento con ellos.

A mis amigos, a todos y cada uno de ellos les extiendo un agradecimiento fraterno, porque ellos siempre creyeron en mí y me estuvieron dando ánimos, apoyándome y ayudándome, cada uno puso su granito de arena a su debido tiempo.

Y para cerrar con broche de oro, agradezco a mis cuatro abuelitos, porque tanto en ausencia como en presencia estuvieron apoyándome y pidiendo por mi bienestar, ellos siempre tuvieron fe en mí y nunca me desampararon.

DEDICATORIA

Este esfuerzo va dedicado sólo para mis Padres, porque más que por mí, fue por ellos que luche día a día, procurando no defraudarlos y así se sientan orgullosos de mí.

Creo esta es una pequeña recompensa a todo el esfuerzo, el trabajo y la lucha que han tenido a lo largo de su vida para sacarnos adelante y ver que sus hijos lleguen lejos, acabo de dar el primer paso.

Por ustedes y para ustedes papitos, les quiero como no tienen idea.

RESUMEN

En este trabajo se va a tratar los siguientes temas: En el capítulo 1 se inicia con una breve introducción, y ciertos análisis en cuanto al planteamiento y justificación del proyecto; a continuación se trata las consideraciones generales en cuanto a descargas atmosféricas (rayos), puesto que el apantallamiento de una L/T va ligado directamente con el comportamiento de los rayos, aquí se tomaron en cuenta las definiciones e investigaciones de los factores que de alguna manera influyen en el comportamiento del rayo, así como también se habla de los niveles cerámicos que en cierta forma es el valor, estadístico, que permite conocer el número de días de tormenta al año determinados mediante la observación; luego se va a tratar la definición de hilo de guarda, que viene a ser el elemento que protege a la L/T, así como también se mencionan los métodos empleados para definir la ubicación del hilo de guarda, cerrando este capítulo con una comparación de los métodos expuestos para así justificar el haber escogido el modelo electrogeométrico como método base para el desarrollo de este trabajo.

En el capítulo 2 se presenta la formulación del modelo para el apantallamiento de L/T, en este capítulo también se mencionan ciertos aspectos de las descargas como son las formas de corriente que presentan las descargas, tanto teóricamente como experimentalmente (datos de laboratorio), luego se procede a presentar al modelo electrogeométrico de una manera más amplia para así poder seguir con los análisis necesarios para el desarrollo de este trabajo, luego se presenta las fórmulas para calcular la distancia crítica de arqueo; a continuación se explica cómo se determina el punto de incidencia de la descarga y las diferentes zonas que se pueden distinguir al analizar el apantallamiento; el período de protección es otro tema que se trata en este capítulo así como también la influencia del nivel

cerámico en el análisis del apantallamiento; para finalizar el capítulo se presenta un pequeño análisis sobre la influencia que tiene la localización del punto de impacto del rayo en la L/T y se presenta de manera rápida ciertos ejemplos de geometrías de torres de transmisión, con sus medidas respectivas, según su voltaje y número de circuitos que va a soportar.

En el capítulo 3 será presentado el programa computacional para diseño de apantallamiento de líneas de transmisión "D.A.L.T", aquí se presentan todos y cada uno de los parámetros que serán considerados en el empleo del modelo, tales como el período de protección de apantallamiento, distancia crítica, cálculo de la distancia protegida, punto de incidencia de las descargas, el sistema de coordenadas con el que se va a trabajar en el desarrollo del programa, así como también los respectivos análisis, aquí se trata tomar en cuenta todos aquellos factores que intervienen en el desarrollo del programa, así como se menciona una pequeña guía con los pasos a seguir para el diseño de apantallamiento; también se tiene un algoritmo de la solución planteada y las restricciones que posee el programa.

En el capítulo 4 se tiene planteados unos ejemplos con sus debidos análisis, para tener una idea más clara del funcionamiento y orientación del programa.

El capítulo 5 corresponde a las conclusiones y recomendaciones; en los anexos tenemos la guía de usuario para el programa "D.A.L.T" y la presentación de las tablas de resultados de los ejemplos planteados.

PRESENTACIÓN

El apantallamiento en líneas de transmisión está ligado directamente a la caída de descargas atmosféricas sobre la L/T, ya que sin la existencia de descargas no existiría la necesidad de proteger las líneas, en este trabajo se maneja el criterio que falla de apantallamiento son todas aquellas perforaciones que existan en el blindaje o escudo, sin necesidad de que esta cause una salida de la L/T, así como también no necesariamente una salida de una L/T será causada por la falla del apantallamiento ya que podría darse el caso que el apantallamiento haya funcionado perfectamente y haya atrapado una descarga para enviarla a tierra, pero si la coordinación de aislamiento se encuentra mal dimensionada esto inevitablemente causará una salida de la línea por arco eléctrico entre la fase y la torre, así que en este trabajo no se considera como fallas de apantallamiento a todas las salidas de la L/T causadas por descargas atmosféricas.

Este trabajo está orientado al estudio del apantallamiento como tal y se escogió al Modelo Electrogeométrico ya que se cree que es uno de los métodos más versátiles que permite tener una idea más clara de la influencia de las corrientes de descarga en las fallas de apantallamiento, al utilizar la aleatoriedad se presentan una gama de soluciones para hacer más efectivo el apantallamiento frente a ciertos valores de corrientes de descargas, dejando así abierta la posibilidad de que el usuario juegue con los datos de ingreso y saque sus propias conclusiones con respecto al comportamiento del apantallamiento frente a las descargas atmosféricas.

CAPÍTULO 1

ASPECTOS PRELIMINARES

1.1 INTRODUCCIÓN.

El presente proyecto está orientado a la protección de las líneas de transmisión ante las descargas atmosféricas. Como bien es sabido para eliminar totalmente la influencia del campo electrostático atmosférico sobre los conductores habría que construir alrededor de ellos una jaula de Faraday, lo que es económica y técnicamente imposible, por lo cual basándose en la experiencia se emplea el sistema de apantallamiento que está constituido por un hilo de guarda, el cual necesita una serie de parámetros que cumplir en cuanto a geometría de las torres y distribución de fases, para funcionar de manera adecuada.

La labor del hilo de guarda es proteger a todas y cada una de las fases que conforman la línea, ya sea esta de uno o dos circuitos, por esto en una línea pueden existir uno, dos o tres hilos de guarda; la eficiencia de la protección con hilos de guarda depende de la posición de los hilos respecto de los conductores, pero siendo las relaciones muy complicadas ya que existen varios factores independientes que influyen, como la corriente del rayo, el nivel cerámico, por esto no se puede hablar de la existencia de una solución analítica al problema, sino solamente aproximaciones experimentales.

Es importante mencionar el criterio que se tomará en cuenta con respecto a las consideradas fallas del sistema eléctrico. En la mayoría de ámbitos que alberga la Ingeniería Eléctrica, una falla es considerada toda aquella que hace que cierto sistema salga de funcionamiento y en cuanto a líneas de transmisión no podría ser

la excepción, respecto al criterio que se está manejando hay que aclarar que una falla de apantallamiento no siempre provocará una salida de alguna línea, por lo cual, este trabajo está basado en fallas estrictamente de apantallamiento, esto quiere decir que cualquier perforación que exista en el apantallamiento, provocada por una descarga atmosférica, será considerada como falla sin que esto involucre una salida del sistema. El planteamiento de alturas y demás elementos que constituyen el apantallamiento será considerado a partir del modelo electrogeométrico, el cual está basado en un volumen de protección, el mismo que deberá cubrir todas las fases de la línea. Esta teoría será explicada con mayor detenimiento en el siguiente capítulo de este proyecto.

1.2 OBJETIVOS.

Implementar un programa digital que facilite el diseño del apantallamiento contra rayos en líneas de transmisión y encontrar una razonable precisión en la evaluación del verdadero riesgo de falla de apantallamiento de líneas de transmisión.

1.2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.-

Profundizar conocimientos en cuanto a apantallamiento, tomando en cuenta los diferentes factores que influyen y el comportamiento de líneas aéreas de acuerdo al medio expuesto.

Desarrollar el modelo matemático para la elaboración del programa digital que permite calcular el nivel de apantallamiento de una línea contra descargas atmosféricas directas.

Calcular las distancias precisas de los hilos de guarda de las líneas para otorgar máxima protección contra descargas atmosféricas directas.

Elaborar un programa digital que ayude al diseño del apantallamiento de las líneas y evalúe la calidad de ese u otros apantallamientos.

Incrementar la confiabilidad de las líneas de transmisión minimizando el número de salidas que puedan ser provocadas debido a una descarga atmosférica.

1.3 ALCANCE.

Este trabajo se enfoca en proporcionar una herramienta digital para que el Ingeniero diseñador tenga una visión más clara sobre el comportamiento de las líneas de transmisión en presencia de descargas atmosféricas, para que de esta manera sean mejor consideradas las distancias de los hilos de guarda sobre las líneas.

Cabe mencionar que no existe manera exacta de determinar donde podrá caer una descarga, pero sí existen metodologías para crear una pantalla (apantallamiento) sobre la trayectoria de las líneas para que atraiga a todas las descargas que atenten contra la seguridad del sistema.

Con el mencionado programa se podrá ingresar las distancias (geometría) que tenga la estructura dependiendo del voltaje al que esté sometida, pues de estas dependen todos los cálculos que deberá elaborar el programa.

El programa podrá utilizarse para simular la protección de las líneas a varios voltajes, incluyendo 500kV ya que lo único que varía, dependiendo el voltaje de aplicación, son las distancias, por lo tanto al conocer las estructuras muy fácilmente se podrá ingresar las medidas requeridas y proceder a la simulación.

1.4 JUSTIFICACIÓN.

El Ecuador, ~~por ser un país andino~~, tiene un alto índice de descargas atmosféricas, además que cuenta con 4 regiones bien diferenciadas y por tanto el comportamiento de las descargas no es el mismo, ni siquiera en la misma región, por lo que es necesario un programa que permita aplicar un nivel cerámico variable para poder obtener una mayor confiabilidad en el diseño del apantallamiento.

Nuestro país no cuenta con un sistema de transmisión totalmente mallado, por lo cual la salida de servicio de una de las líneas de este sistema se vuelve crítica. Por otra parte, es un país con un alto índice de descargas atmosféricas, siendo el impacto de éstas en las líneas una de las causas principales para que salgan del servicio. Además está en los planes la construcción de líneas de transmisión a 500kV.

Cuando se habla de falla de apantallamiento, la mayoría de personas recaen la responsabilidad a la conexión a tierra, y esto no es del todo cierto, el apantallamiento está ligado a la malla de puesta a tierra, pero si este se encuentra mal ubicado no hará bien su trabajo y fácilmente los rayos caerán sobre las líneas haciendo que la línea salga de servicio y la malla de tierra no tendrá 100% la culpa de eso ya que primero falló el apantallamiento, por esto con este estudio podrá determinarse que si el apantallamiento (hilo de guarda) se encuentra bien ubicado y las probabilidades de salida de servicio disminuirán notablemente y tanto apantallamiento como malla de puesta a tierra harán el trabajo que les corresponde mejorando de esta manera el servicio.

El conjunto de estas circunstancias hace que se vea necesario estudiar el fenómeno físico del apantallamiento de las líneas de transmisión contra rayos, razón por la cual se plantea el presente tema de estudio, el cual además permita

disponer de una herramienta idónea para el diseño y evaluación de los apantallamientos nuevos y de los existentes actualmente.

1.5 GENERALIDADES

1.5.1 ASPECTOS BÁSICOS DE LAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

La descarga eléctrica atmosférica, popularmente conocida como “rayo”, es un fenómeno natural observado y temido por el ser humano desde el mismo comienzo del uso de la razón por parte de la especie. Por el ambiente donde ocurren los rayos, la atmósfera terrestre y por las causas que les dan origen, ellos presentan las características propias de un fenómeno climático, es decir con estacionalidad del momento del año en el que pueden ocurrir con mayor probabilidad, pero con mucha variabilidad en cuanto a tipo, cantidad o intensidad de sus descargas.

En términos generales podemos afirmar que el rayo es un fenómeno frecuente e inevitable como el viento, la lluvia o la nevada. Si bien existen síntomas claros que preceden la ocurrencia de descargas atmosféricas, no resulta posible predecir con certeza, el momento, el lugar de impacto ni la intensidad de sus parámetros.

Todas las mediciones realizadas sirven para ser acumuladas y analizadas en términos estadísticos, permitiendo luego hablar sobre probabilidad de la ocurrencia de tal o cual tipo de descarga. El fenómeno rayo está estudiado seriamente desde hace más de un siglo, habiéndose llegado a determinar y medir, en los últimos treinta años, con un alto grado de minuciosidad, las características de las descargas eléctricas en la atmósfera. Aunque todos se parecen, no existen dos rayos que sean iguales, y son muchos los que ocurren sobre el planeta tierra. A modo de ejemplo se puede citar [Charoy 1992] que en el territorio de Francia ocurren (estimativamente, según el modo de conteo) 1,6 millones de descargas anuales, algo así como 3 descargas por kilómetro cuadrado y por año. Debe

señalarse sin embargo que existe una enorme dispersión en los valores, respecto de este promedio, para las diferentes regiones del país. (*1)

FIGURA 1.1

UNA DE LAS MÚLTIPLES PRESENTACIONES QUE TIENE EL RAYO



Fuente: Referencia (*1)

Elaborado por: Referencia (*1)

Las turbulencias atmosféricas y las fuertes diferencias de temperaturas (de hasta -60°C a 10 km. de altura) engendran una separación de las cargas de la nube: su parte superior se constituye de cristales de hielo cargados positivamente y su base de gotas de agua cargadas negativamente (figura 1.2).

La base de la nube influye localmente sobre la carga del suelo en superficie atrayendo una cantidad equivalente de cargas eléctricas de polaridad opuesta. Cuando la nube está demasiado cargada, la nube se esfuerza por despejar esta carga "explotando": se descarga por cambio de cargas con la tierra (rayo), o con otras nubes o zonas de nubes (rayos intra o inter-nubes).

Mil millones de cargas eléctricas son disipadas causando corrientes que pueden alcanzar 500.000 A y tensiones de varios millones de voltios. Es importante tomar en cuenta que corrientes del orden de 30 milésimas de Amperios (mA) bajo

tensiones de solamente 50 Voltios pueden ser peligrosas para el hombre, y mortal por valores superiores a 1 Amper! (*4)

FIGURA 1.2

PASO PRELIMINAR ANTES DE QUE SE FORME EL RAYO



Fuente: Referencia (*4)

Elaborado por: Referencia (*4)

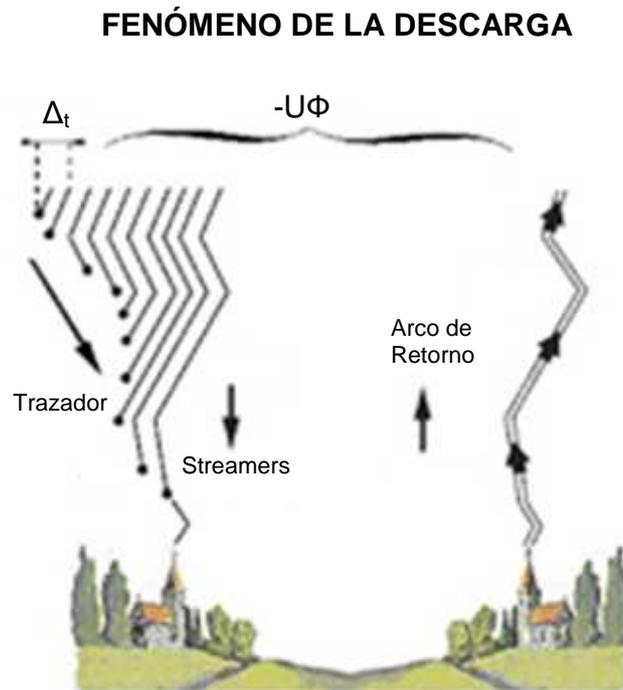
1.5.1.1 Descripción de la descarga

Considerando la nube cargada negativamente con respecto al suelo, una vez alcanzados los valores suficientemente altos de la intensidad de campo eléctrico en V/m, dentro de la nube de tormenta se inicia una descarga precursora (leader), poco luminosa, con débil corriente eléctrica, que progresa a saltos de algunas decenas de metros, siguiendo caminos erráticos pero con avance neto hacia el suelo.

El campo eléctrico a nivel del suelo aumenta, siendo más intenso (hasta 500kV/m) en las partes sobresalientes de la superficie, edificio en altura, árbol, antena, etc.,

por el “efecto de punta”. Desde allí parte una descarga ascendente también débil inicialmente (figura 1.3).

FIGURA 1.3



Cuando la distancia entre ambos precursores llega a valores entre 50 y 100 metros se establece el contacto entre ambos por ruptura de la rigidez dieléctrica del aire iniciándose la conducción por corriente intensa, las cargas fluyen bruscamente al suelo a través del “canal ionizado” que vincula eléctricamente la nube con el suelo, como camino conductor. Este canal ionizado es de una trayectoria bastante rectilínea. Resulta muy visible por su luminosidad y muy audible por el estruendo ensordecedor que produce.

Los autores mencionan velocidades de progreso de la descarga dentro del canal ionizado del orden de 105 m/s con temperaturas que llegarían a valores de 15.000 ó 20.000°C. Con estos indicadores se puede considerar al proceso dentro del

canal ionizado como una expansión adiabática, es decir sin intercambio de calor con el medio que lo rodea.

La brusca expansión del aire sería responsable de la onda mecánica audible como trueno, que llega a nuestros oídos con posterioridad a la percepción del destello luminoso. Tanto mayor es el tiempo de retardo entre ambas percepciones, cuanto mayor sea la distancia entre el observador y el lugar de caída del rayo.

Esta primera descarga negativa tiene una duración tal que, en el orden de $10\mu\text{s}$, la corriente alcanza su valor máximo y luego decae más lentamente para llegar a un 50 % del valor pico en un tiempo de aproximadamente $50\mu\text{s}$ contados desde el inicio.

La corriente luego decae a cero o mantiene un valor continuo del orden de una centena de amperes. Esta corriente persistente, por su duración de algunas decenas de milisegundos transporta más carga que el impulso de corriente inicial.

1.5.1.2 Polaridad de la descarga

El estudio de un rayo puede ser visto como una fuente de corriente que puede tener polaridad positiva, negativa o ambas en una misma descarga, lo que se conoce como onda bipolar. Entre las descargas monopolares se puede tener cuatro tipos:

- a) *Descendente negativo*, predomina en las construcciones de altura inferior a 100m. Entre el 85 y el 95% de los rayos que caen sobre estas construcciones son negativos y descendentes, la corriente media es aproximadamente 33kA.

- b) Ascendente *negativo*, los primeros rayos de este tipo fueron observados en el Empire State de Nueva York. Estos predominan en las construcciones altas, y tiene una corriente media inferior a los 25kA.
- c) Ascendente *positivo*, también conocido como “súper rayo”, aproximadamente el 14% de los rayos son de este tipo. Las magnitudes de la corriente son aproximadamente de 1,2 a 2,2 veces superior a la del rayo negativo descendente, sólo del 2 al 10% de los rayos tienen polaridad positiva.
- d) Descendente *positivo*, una minoría apreciable de rayos lleva la carga positiva a la tierra. Estos ocurren en la fase de disipación de una tormenta. Los rayos descendentes positivos son comunes durante los meses de invierno.

Según un estudio realizado en Estados Unidos aproximadamente del 85 al 95% de los rayos que caen sobre construcciones de altura inferior a los 100m. y situadas sobre terrenos planos u ondulados, son rayos negativos descendentes.

Todos los rayos procedentes de una nube tienden a impactar en tierra dentro de un área circular de aproximadamente 10km de diámetro, dentro de esta área el impacto es aleatorio. Existe una probabilidad alrededor de un 20% de que una segunda descarga caiga a unos 8km. o más de la primera. El valor medio de la distancia entre sucesivos puntos de impacto se encuentra en unos 3,5km. El comportamiento de las descargas atmosféricas tiene un marcado carácter aleatorio, por lo que generalmente es necesario en elevado número de medidas para determinar con precisión su distribución. (*2)

1.5.2 NIVELES CERÁUNICOS

El nivel ceráunico se define como el número de días de tormenta año en una región y un día de tormenta es un día en el cual por lo menos se oye un trueno.

Esta definición hace que el nivel se determine en las estaciones meteorológicas por medio de observaciones y no por mediciones.

Con base en el nivel cerámico de la zona donde se proyecta construir la línea se debe determinar si es necesario protegerla contra los efectos de las descargas atmosféricas.

Los rangos de los niveles cerámicos se pueden clasificar como:

NIVEL CERAÚNICO [días de tormenta/año]	CATEGORIA
30 a 50	Bajo
50 a 70	Medio
70 a 100	Alto
Mayor que 100	Muy Alto

Debido a que los registros de día de tormenta observados en las estaciones meteorológicas es bastante impreciso, en lugar del nivel cerámico, a nivel mundial se está utilizando la densidad de descargas a tierra, la cual se obtiene por medición directa con la utilización de registradores electrónicos. Con el objeto de obtener la densidad de descarga a tierra (N_g) con base en el nivel cerámico (T_d) se ha adoptado la siguiente relación(*3):

$$N_g = 0.04 \cdot T_d^{1.25} \quad (1.1)$$

Donde: N_g = Densidad de descargas [rayos/km²/año]

T_d = Nivel cerámico [días de tormenta/año]

1.6 ANÁLISIS DE LOS MÉTODOS EXISTENTES PARA EL DISEÑO DEL APANTALLAMIENTO EN LÍNEAS.

1.6.1 DEFINICIÓN DE HILO DE GUARDA

El hilo de guarda es una protección muy necesaria, para el propósito de disminuir los riesgos de disparo de las líneas por descargas atmosféricas, producidas por las inducciones de sobretensiones de cargas estáticas producidas por tormentas eléctricas.

De lo dicho resulta que la mejor solución para proteger líneas aéreas contra descargas atmosféricas sería impedir que estas entren en los conductores de líneas aéreas.

Los hilos de guarda se colocan por encima de los conductores de fase y están unidos a tierra en los apoyos de la línea. De esta manera se reduce el riesgo de caída directa del rayo sobre los conductores (*7).

Si el rayo cae sobre un apoyo, la corriente que circula por la estructura metálica de apoyo y a través de su toma de tierra da lugar a la aparición de una tensión o diferencia de potencial importante entre la estructura y los conductores de fase. Esta tensión depende de la intensidad del rayo y de la impedancia que presenta el conjunto apoyo-hilos de guarda-toma de tierra para la onda de frente escarpado correspondiente.

Si esta tensión supera el valor de la tensión de cebado de aislamiento conductor-apoyo, se produce una falla de aislamiento correspondiente, que se denomina cebado inverso o descarga inversa (*7).

1.6.2 MÉTODOS CLÁSICOS DE UBICACIÓN DEL HILO DE GUARDA (*5)

Existen diferentes métodos para ubicar los cables de guarda y cada uno de ellos proporciona una zona de protección contra descargas directas diferente.

Los métodos clásicos se basan principalmente en criterios geométricos sin mayores fundamentos teóricos que los resultados obtenidos de su aplicación. Los métodos clásicos que se utilizan en este trabajo son:

- Charles.
- Wagner y Mac Cann.
- Schwaiger.
- Langrehr.

También existen métodos modernos que se basan en modelos teóricos del fenómeno de descargas atmosféricas. En este trabajo se utiliza en particular un método basado en el denominado Modelo Electro-geométrico.

A continuación se analiza la protección brindada por los cables de guarda de las líneas de transmisión según los diferentes métodos que han sido tomados en cuenta en este trabajo, sin embargo existen un sin número de métodos con los que se pueden realizar los cálculos para determinar el grado de protección de una línea de transmisión.

En algunos casos se indica también la ubicación que deberían tener los cables de guarda para brindar una protección óptima según cada criterio. Cabe mencionar que no existe ningún método que asegure que el apantallamiento nunca fallara, puesto que una descarga atmosférica no tiene un comportamiento uniforme.

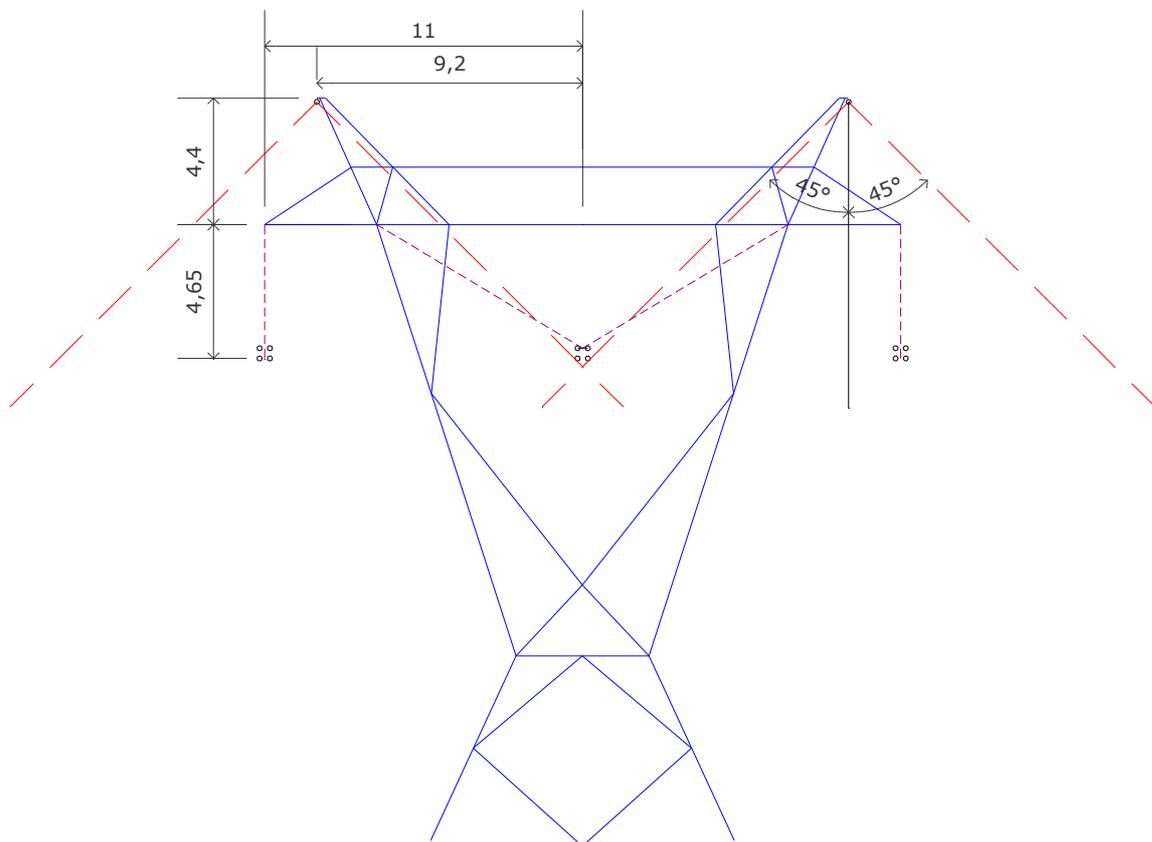
1.6.2.1 Charles

Este criterio establece un ángulo de apantallamiento $\alpha = 45^\circ$ con la vertical, de modo tal que la descarga atmosférica no caerá sobre ningún objeto que se encuentre dentro del cono delimitado por dicho ángulo.

Este criterio es poco severo y permite ubicar el cable de guarda a menor altura. El apantallamiento que brindan los cables de guarda de la línea según este criterio se puede ver en el ejemplo, figura 1.4, se observa que las fases exteriores tienen un apantallamiento excesivo mientras que la fase central no resulta protegida.

FIGURA 1.4

ZONA DE PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS DIRECTAS SEGÚN CHARLES



Fuente: Referencia (*5)

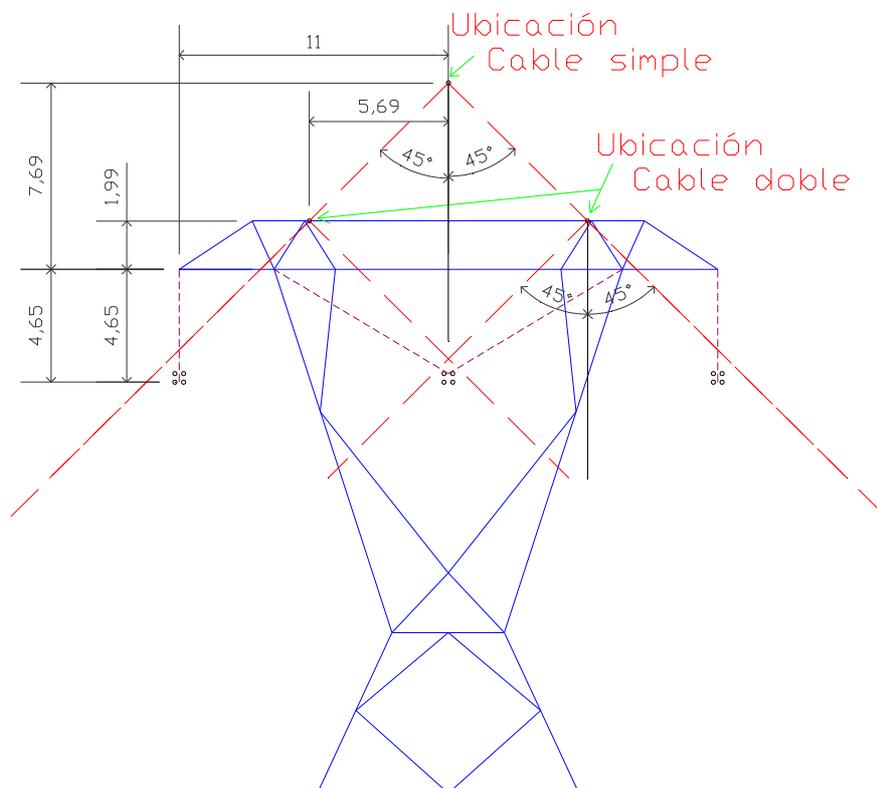
Elaborado por: Nataly Correa

Reubicando los cables de guarda, según este criterio se logran dos alternativas, simple o doble cable de guarda.

La ubicación resultante puede ser la que se muestra en la figura 1.5.

FIGURA 1.5

ZONA DE PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS DIRECTAS SEGÚN CHARLES PARA SIMPLE Y DOBLE CABLE.



Fuente: Referencia (*5)

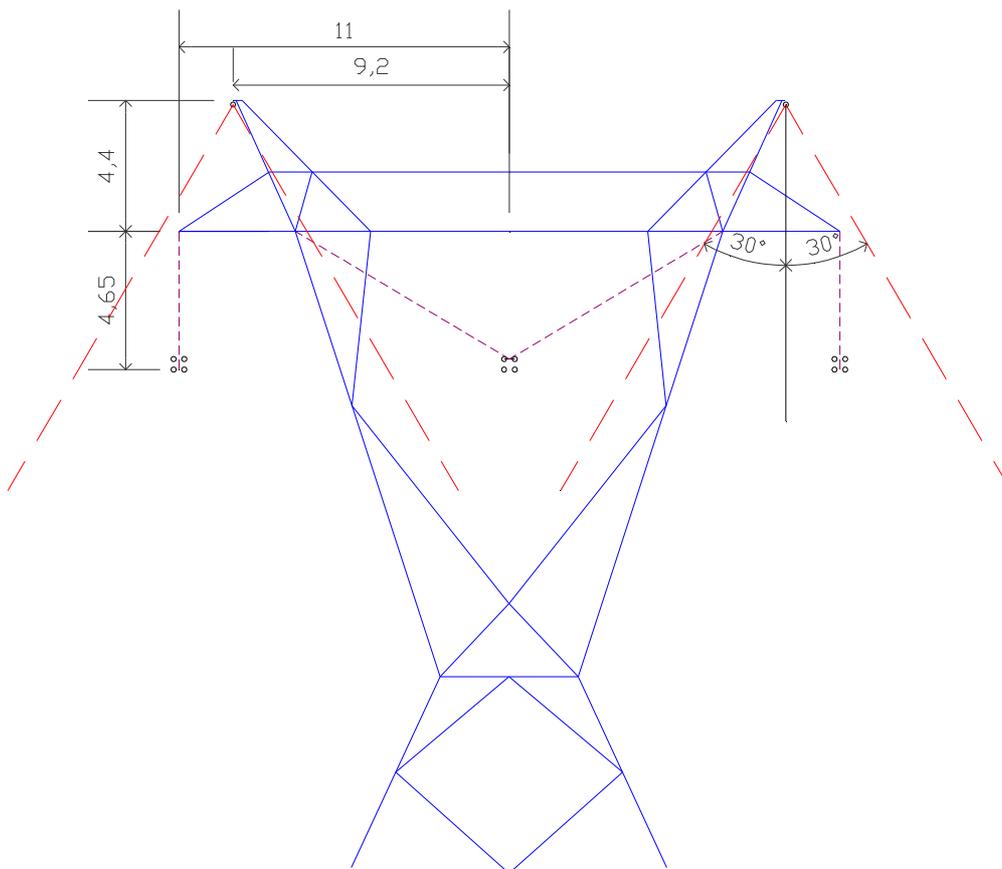
Elaborado por: Nataly Correa

Es interesante destacar que según este método, se evita colocar una estructura adicional para soportar los cables de guarda. Esto reafirma que el criterio es muy poco severo.

1.6.2.2 Wagner y Mac Cann

De forma similar al criterio anterior, ciertos autores consideran que los cables de guarda protegen un ángulo $\alpha = 30^\circ$ con la vertical, esto resulta en una ubicación más elevada del cable de guarda. El apantallamiento que brindan los cables de guarda según este criterio se puede ver en la figura 1.6, se observa que solamente las fases laterales resultan protegidas.

FIGURA 1.6
ZONA DE PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS DIRECTAS SEGÚN WAGNER Y MAC CANN



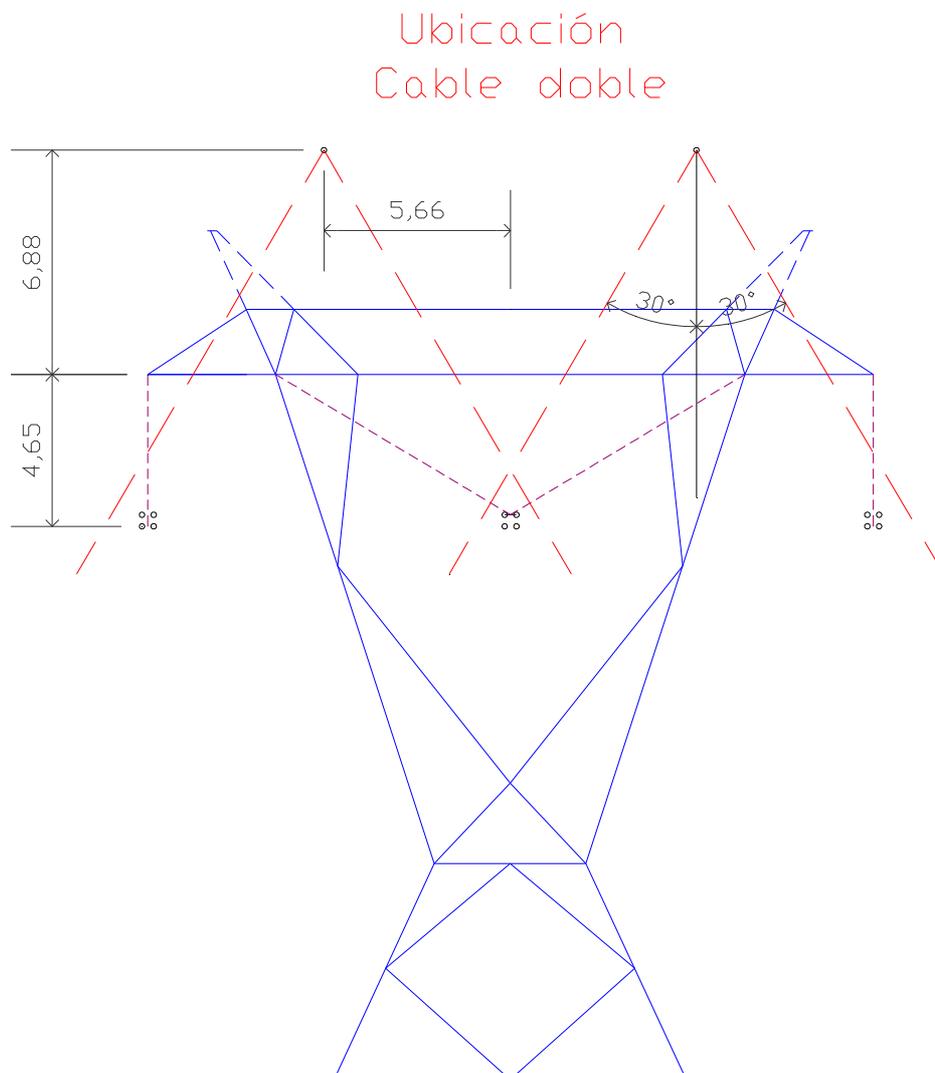
Fuente: Referencia (*5)

Elaborado por: Nataly Correa

Aplicando este criterio se podría reubicar los cables de guarda, para que resulten protegidos todos los conductores, tal y como se muestra en la figura 1.7.

FIGURA 1.7

REUBICACIÓN DEL CABLE DE GUARDA SEGÚN WAGNER Y MAC CANN. EN LA PARTE SUPERIOR DE LA TORRE SE INDICA CON LÍNEA PUNTEADA LA UBICACIÓN ORIGINAL DEL HILO DE GUARDA



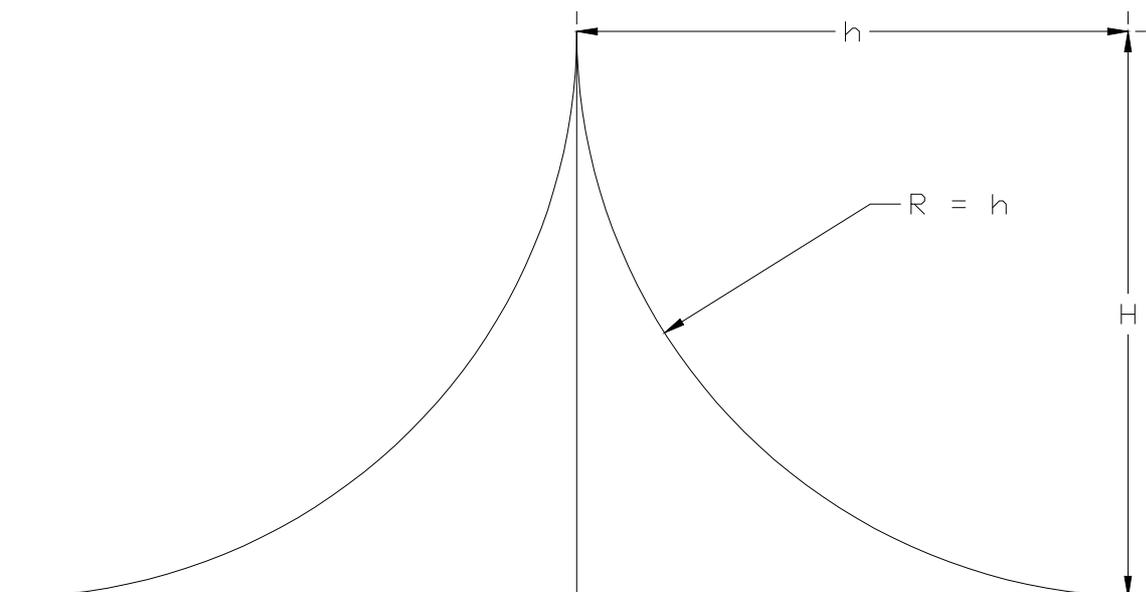
Fuente: Referencia (*5)
 Elaborado por: Nataly Correa

1.6.2.3 Schwaiger

Este método considera que cuando una descarga atmosférica se aproxima a la tierra, este alcanza una altura H (medida desde el suelo), la cual elige para caer el punto conectado a tierra más cercano. Teniendo en cuenta la afirmación anterior se puede determinar una altura h a la cual instalar un elemento captador, de forma tal de proporcionar una zona de protección.

FIGURA 1.8

CRITERIO SCHWAIGER, CONSTRUCCIÓN TEÓRICA



Fuente: Referencia (*5)
 Elaborado por: Nataly Correa

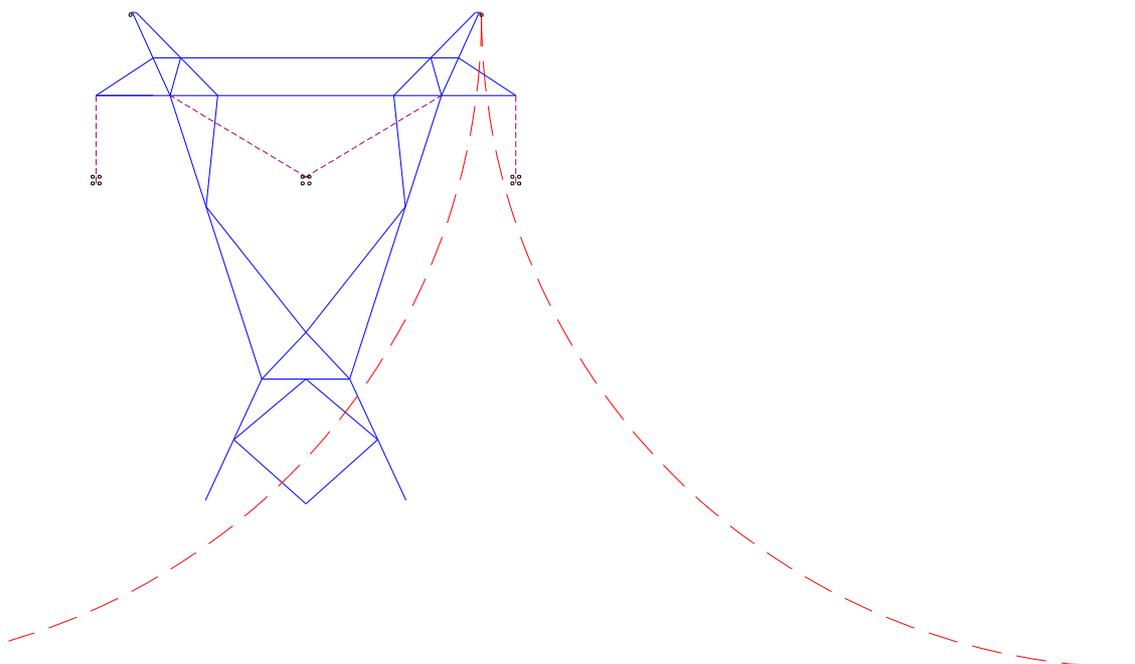
El autor del método toma la relación $H/h = 1$ siendo H el punto donde se encuentra la punta del rayo, y h la altura del cable de guarda. La zona de protección resultante queda determinada por un cuarto de circunferencia de radio h , como se

puede ver en la figura 1.8, de modo tal que resultará protegido lo que se encuentre por debajo de esta.

Según este criterio los cables de guarda de las líneas de transmisión, protegen una zona delimitada por una circunferencia con un radio igual a la altura del hilo de guarda, tal y como se puede ver en la figura 1.9, los conductores de potencia no se encuentran protegidos.

FIGURA 1.9

**ZONA DE PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS DIRECTAS SEGÚN
SCHWAIGER**



Fuente: Referencia (*5)

Elaborado por: Nataly Correa

Se puede determinar la altura a la que deberían instalarse los cables de guarda, según este criterio, para lograr que los conductores de potencia resulten protegidos. Para esto se calcula la altura mediante la siguiente ecuación:

$$(y_c - h)^2 + (x_c - h)^2 = h^2 \quad (1.2)$$

Donde: y_c = Altura del conductor de fase;
 h = Altura del cable de guarda;
 x_c = distancia media entre conductores de fase.

El resultado indica que el cable de guarda se debe instalar a una altura bastante superior a la indicada en la figura 1.9.

1.6.2.4 Langrehr

Este criterio hace exactamente las mismas consideraciones teóricas que el anterior (Schwaiger), pero toma la relación $H/h=2$, siendo H el punto donde se encuentra la punta del rayo, y h la altura del cable de guarda. De esta manera la zona de protección resulta delimitada por un cuarto de circunferencia de radio $2h$.

Aplicando este criterio, la zona de protección resulta delimitada por una circunferencia de $2h$ [m] y como se puede ver en la Figura 1.10, solamente resultan protegidas las fases exteriores.

Un resultado curioso se obtiene al determinar la altura a la que deberían instalarse los cables de guarda según este criterio para lograr que los conductores de potencia resulten protegidos. Para esto se utiliza la siguiente ecuación:

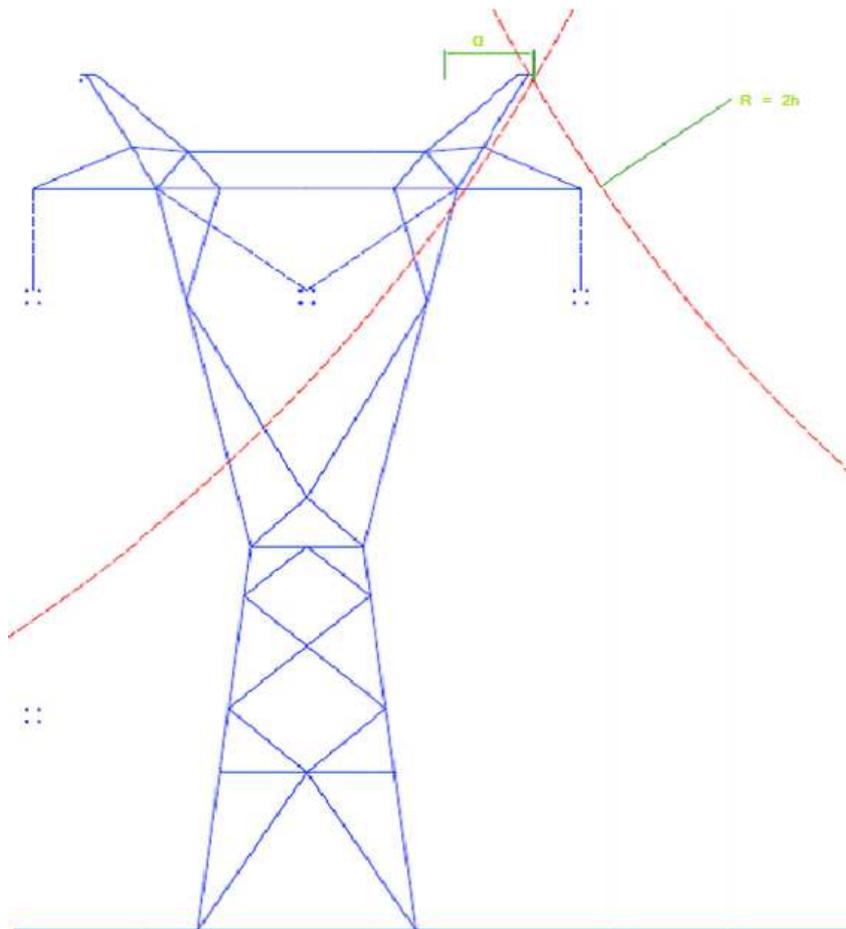
$$(y_c - 2 \cdot h)^2 + (x_c - \sqrt{3} \cdot h)^2 = (2 \cdot h)^2 \quad (1.3)$$

Donde: y_c = Altura del conductor;
 h = Altura del cable de guarda;
 x_c = distancia media entre conductores de fase.

El resultado indica que el cable de guarda se debe instalar a una altura 10cm. por debajo de su ubicación real. De modo tal que para proteger a la línea según este criterio solamente se deberían desplazar los cables de guarda un valor a hacia el centro de la torre. Esto está indicado en la Figura 1.11. Otro aspecto interesante a destacar, es la similitud de este criterio con el de Wagner y Mac Cann (30°), ya que ambos proporcionan una zona de protección muy parecida.

FIGURA 1.10

ZONA DE PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS DIRECTAS SEGÚN LANGREHR.

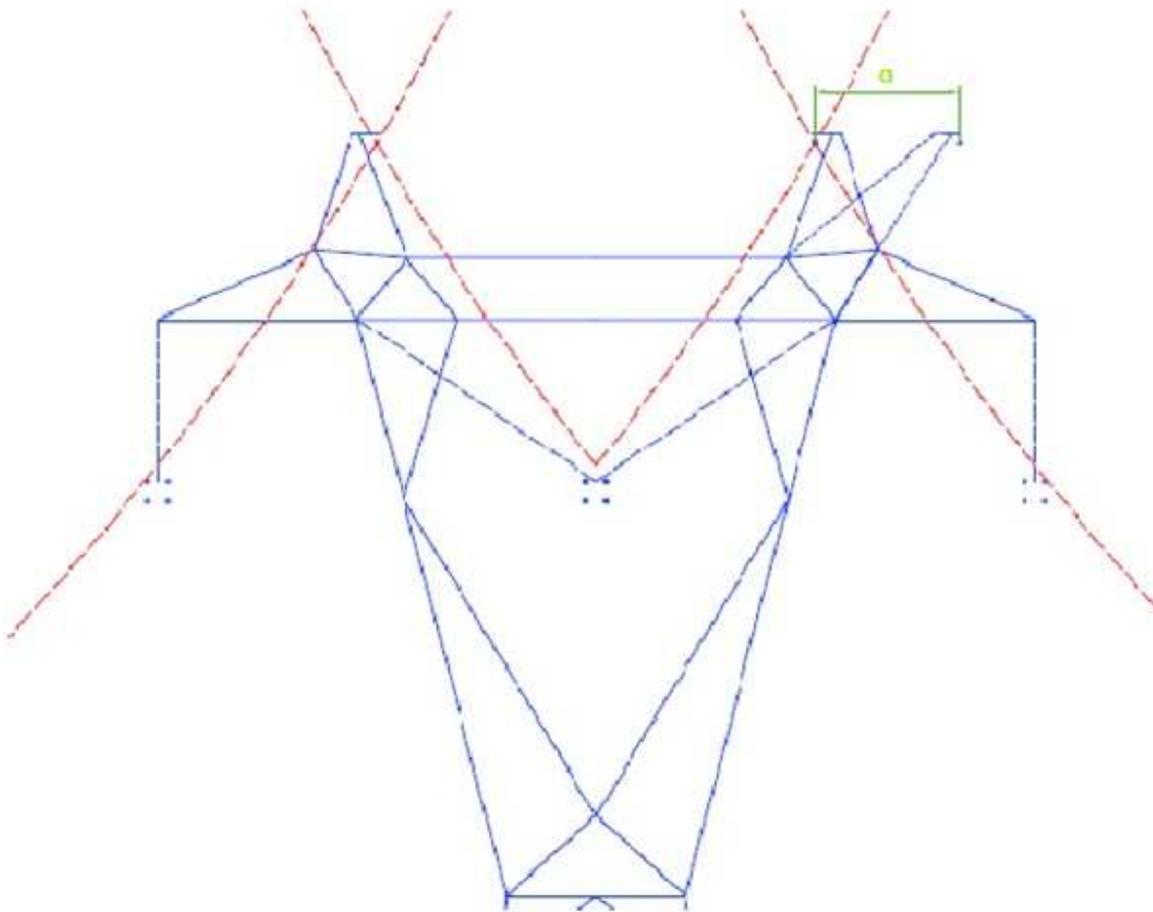


Fuente: Referencia (*5)

Elaborado por: Referencia (*5)

FIGURA 1.11

REUBICACIÓN DEL CABLE DE GUARDA SEGÚN LANGREHR,
SE MUESTRA EL DESPLAZAMIENTO REALIZADO Y UNA NUEVA
ESTRUCTURA DE SOPORTE.



Fuente: Referencia (*5)

Elaborado por: Referencia (*5)

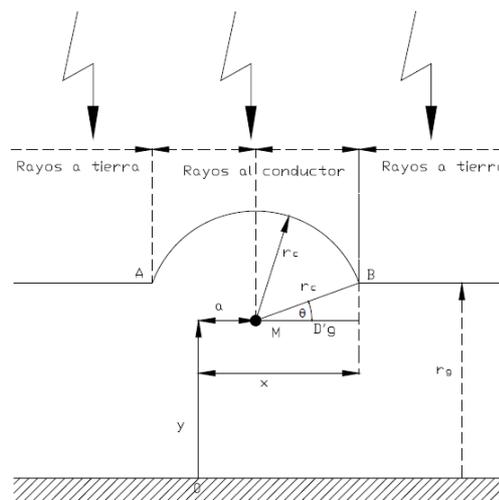
1.6.3 MODELO ELECTROGEOMÉTRICO (*6)

El objetivo de este modelo es determinar el punto de impacto de una descarga teniendo en cuenta su intensidad máxima de corriente y la localización del canal de esta descarga, que se supone tiene una trayectoria vertical. Al acercarse una descarga a tierra hay un momento en que se supera la rigidez dieléctrica del aire y se produce el salto hacia el objeto más cercano, que puede ser un árbol, una línea o la misma tierra.

La distancia de ruptura, o distancia a la que salta el arco, depende de la magnitud de la corriente de la descarga. Sin embargo, en general la distancia de ruptura de un conductor en la cima de una torre difiere de la distancia de ruptura a la tierra. Esto es obvio dado que la pendiente de una descarga con electrodos punta-plano (líder descendente que conecta con la tierra) difiere de la pendiente de una descarga con electrodos punta-punta (el líder descendente conecta a la torre). Así, en general, existen al menos dos distancias de ruptura, una a los conductores de fase o los cables de tierra r_c , y otra a la tierra r_g , ver Figura 1.12.

FIGURA 1.12

MODELO ELECTROGEOMÉTRICO PARA UN SOLO CABLE.



Fuente: Referencia (*6)

Elaborado por: Referencia (*6)

Nótese que las distancias de atracción al conductor de fase y al cable de guarda son supuestas iguales. En la realidad, la intensificación del campo eléctrico entre nube y tierra produce distancias de atracción diferentes para el plano de tierra con respecto a las de los conductores, e IEEE ha sugerido utilizar las siguientes ecuaciones para calcular estas distancias en los dos casos:

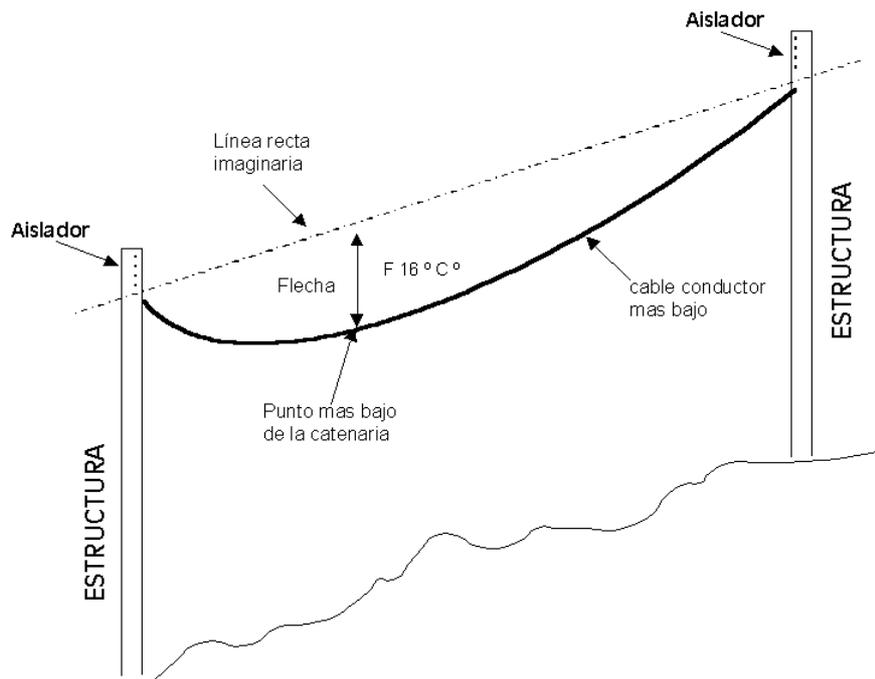
$$r_c = 10 \cdot I^{0,65} \quad (1.4)$$

$$r_g = \begin{cases} [3,6 + 1,7 \cdot \ln(43 - y_c)] \cdot I^{0,65} & y_c < 40 [m] \\ 5,5 \cdot I^{0,65} & y_c \geq 40 [m] \end{cases} \quad (1.5)$$

Donde y_c es la altura promedio del conductor en metros, dada por la altura de la torre menos dos tercios de la flecha a medio claro.

FIGURA 1.13

IDENTIFICACIÓN DE LA FLECHA.



Fuente: <http://natlaw.com/interam/ar/en/ts/tsaren41.htm>

Elaborado por: <http://natlaw.com/interam/ar/en/ts/tsaren41.htm>

Estas ecuaciones son las que mejor se aproximan a la realidad puesto que, toma muy en consideración la distancia o altura de la torre y esta a su vez depende del nivel de voltaje de transmisión.

El sobrevoltaje originado por una descarga origina contorneo si su valor es superior al nivel de aislamiento. Al menor valor de la intensidad de corriente que causa contorneo se le denomina intensidad de corriente crítica (I_c). Según CIGRE, la descarga de corriente más baja es 3 kA. Sin embargo, otros investigadores creen más razonable bajar hasta valores de 1 o 2 kA. Sin embargo, el número de descargas con corrientes de cresta entre 0 y 3 kA. es muy reducido frente al número de descargas totales que impactan en una línea aérea.

1.6.4 COMPARACIÓN ENTRE LOS MÉTODOS CLÁSICOS Y EL MODELO ELECTROGEOMÉTRICO

Ya habiendo revisado, a breves rasgos, las características de cada uno de los métodos para el cálculo de la ubicación del hilo de guarda se puede tener claro que los métodos convencionales o clásicos tienen un criterio de ángulos poco respaldado y no toman en cuenta variables significativas como la corriente de descarga.

Así también en cada uno de los métodos se puede destacar algunas falencias:

Charles.- Este es un criterio poco severo, ya que permite ubicar al cable de guarda a una menor altura lo cual podría ocasionar una falla en el apantallamiento, dependiendo de la corriente de la descarga.

Wagner y Mac Cann.- A pesar de que este criterio recomienda un menor ángulo (30°) y por tanto una mayor altura en cuanto a ubicación del hilo de guarda y muchas veces podría ser un desperdicio en altura, su cono de protección es menor, sin embargo no se garantiza que las líneas se encuentren protegidas ante todas las descargas.

Schwaiger.- En cuanto a este criterio no se podría determinar a ciencia cierta el punto de desfogue a tierra del rayo, considerando que este punto se encuentra a una altura bastante elevada por lo que este método resulta impracticable desde un punto de vista técnico económico.

Langrehr.- Este criterio tiene similitud con el criterio de Wagner y Mac Cann, por lo cual las consideraciones antes mencionadas son aplicables en este método también.

En cuanto al **Modelo Electrogeométrico**, se ha considera un método más seguro en cuanto a protección de líneas, ya que este involucra ciertas características de

las descargas atmosféricas como son la corriente y el nivel cerámico, este método está basado en extrapolación de resultados de ensayos de laboratorio, con métodos teóricos dando así una expresión matemática para verificar que la ubicación del hilo de guarda sea la apropiada.

CAPÍTULO 2

1.6.5

FORMULACIÓN DEL MODELO PARA EL APANTALLAMIENTO DE LAS LÍNEAS DE TRANSMISIÓN

2.1 CONSIDERACIONES GENERALES

En el análisis expuesto en el capítulo 1, se han considerado los métodos existentes para el cálculo de apantallamiento, así como también de por qué se escogió el modelo Electrogeométrico, tomando en cuenta esos criterios es que se puede arrancar con el análisis del modelo antes mencionado.

El modelo Electrogeométrico está basado en la construcción de arcos con centro en los hilos de guarda y los hilos de fase, dando una similitud de “paraguas” ubicados a lo largo de toda la trayectoria de la línea, considerado para esto una distancia de arqueado (que se mencionará más adelante), la intersección formada entre los “paraguas” o escudos de cada hilo indica si las fases se encuentran protegidas o por el contrario expuestas, el objetivo del apantallamiento, en este caso hilo de guarda, es cubrir, con el escudo, a todas y cada una de las fases existentes, con esto se consigue que toda descarga que caiga y pase junto a estas o intente impactarlos sea atrapada por el hilo de guarda para luego ser dirigida a tierra.

2.1.1 COMO MEDIR LOS PARÁMETROS DEL RAYO (*1)

El rayo por ser una corriente eléctrica variable produce un campo electromagnético irradiado. Este campo aparece como perturbador de los sistemas que presentan lazos o bucles de conducción.

La frecuencia equivalente del campo se ubica en la gama de las ondas de gran amplitud por tal motivo es difícil de producir un blindaje para evitar su acción. Los receptores de radio, de amplitud modulada (kHz), reciben las ondas de este campo aún dentro de los edificios.

Una forma de medir los parámetros del rayo es aprovechar este campo electromagnético, captándolo y registrándolo como oscilograma con una base de tiempo exacta y precisa que permita la discriminación de variaciones en una décima de microsegundo (10^{-7} s).

La antena de donde parte el campo electromagnético es el canal ionizado, que en el caso de las descargas nube–suelo, se puede asimilar a un conductor rectilíneo aproximadamente vertical de gran longitud (3 ó 4 km).

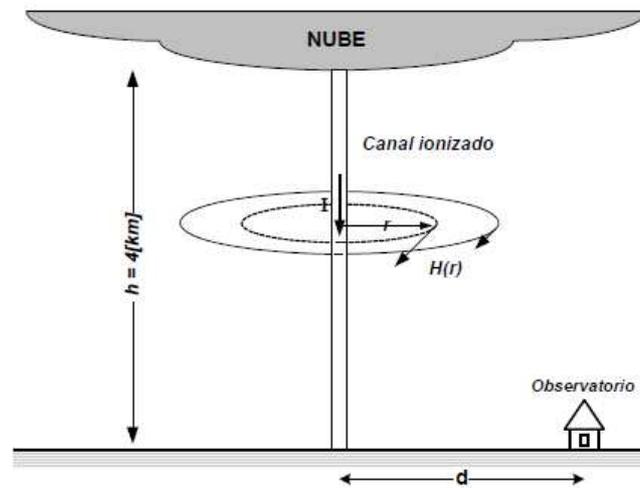
En una aproximación simplificada, podemos aceptar que para una distancia “d” suficientemente alejada del lugar de impacto, la intensidad de campo magnético H [A/m] está dada por la ley de Ampère.

$$H = \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot r}, \quad (2.1)$$

a una distancia r [m] de un alambre rectilíneo infinitamente largo, por el que circula la corriente I [A].

FIGURA 2.1

CAMPO MAGNÉTICO GENERADO POR LA CORRIENTE DEL RAYO



Fuente: Referencia (*1)

Elaborado por: Referencia (*1)

Si la descarga es vertical, el campo será esencialmente horizontal. El lazo o espira que concatene las líneas de este campo debe ser vertical. En esta condición la tensión inducida según la ley de Lenz será: (*1)

$$U = \frac{200 \cdot S}{r} \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t} \quad (2.2)$$

Donde: U = tensión inducida [V]

S = superficie de la espira en [m²]

r = distancia de la espira al canal ionizado en [m]

t = pendiente máx. de la corriente del rayo en [kA/μs]

Debemos tener en cuenta que en tiempo tormentoso las nubes se cargan y se desplazan caprichosamente a merced del viento, los campos eléctricos pueden crecer de tal modo que ocasionen descargas verticales, horizontales o inclinadas en cualquier dirección con respecto al plano horizontal donde se ubica la estación observadora.

Para poder discernir el tipo de descarga ocurrida debemos disponer mínimamente de tres elementos receptores orientados según un sistema de ejes coordenados para captar en ellos la información simultáneamente, procesando luego cada información como una componente para obtener la resultante.

2.1.2 FORMA TEÓRICA DEL IMPULSO DE CORRIENTE EN DESCARGAS ATMOSFÉRICAS (*1)

En ingeniería para el análisis del comportamiento de fenómenos naturales se trata de establecer un modelo, siempre de validez restringida y resulta muy agradable finalmente poder explicitar el comportamiento de ese modelo mediante una expresión matemática. El modelo servirá finalmente de simulador para sacar conclusiones y adoptar medidas que permitan aprovechar las buenas consecuencias del fenómeno y evitar o atenuar las malas consecuencias.

En el caso de la corriente de impulso en una descarga atmosférica, la expresión matemática propuesta para graficar sus valores en función del tiempo es:

$$I = \frac{\left(\frac{I_{MAX}}{\eta}\right)\left(\frac{t}{T}\right)^{10}}{1 + \left(\frac{t}{T}\right)^{10}} e^{-t/\tau} [A] \quad (2.3)$$

Donde I_{MAX} = valor máximo de la corriente en [A]

h = constante adimensional

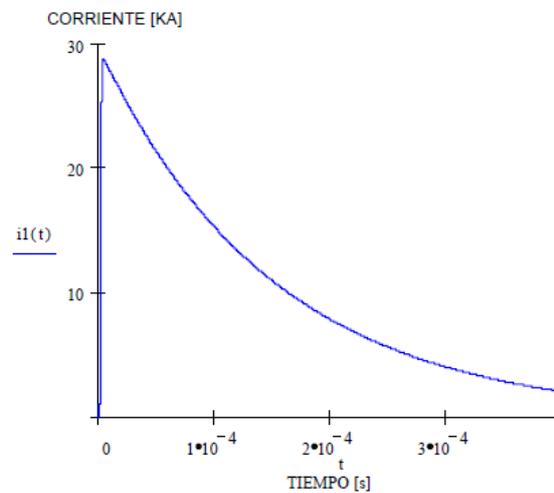
T = constante de tiempo del frente en [s]

τ = constante de tiempo de la cola en [s]

Esta expresión sirve para graficar tanto el impulso positivo como el negativo y los impulsos subsiguientes.

FIGURA 2.2

IMPULSO DE CORRIENTE (TEÓRICO)



Fuente: Referencia (*1)

Elaborado por: Referencia (*1)

Por supuesto que la forma real de la corriente debido a una descarga atmosférica difiere de este modelo matemático, pudiéndose constatar en los registros oscilográficos la superposición de oscilaciones de mayor frecuencia y amplitud variable sobre esta forma pura exponencial con doble constante de tiempo. Sin tener en cuenta las oscilaciones de alta frecuencia se puede apreciar un primer frente de elevada pendiente de la corriente, con una duración de algunos μs (hasta $20 \mu\text{s}$ como máximo).

Una vez alcanzado el valor máximo la corriente decrece en forma exponencial con una constante de tiempo mayor, durante un tiempo de algunas decenas de microsegundos (hasta 100 ó $150 \mu\text{s}$ como máximo). Dada la gran variabilidad de cada uno de los parámetros eléctricos de una descarga, se recurre a representaciones que indican el % de probabilidad que tal valor sea superado en función de una escala de valores.

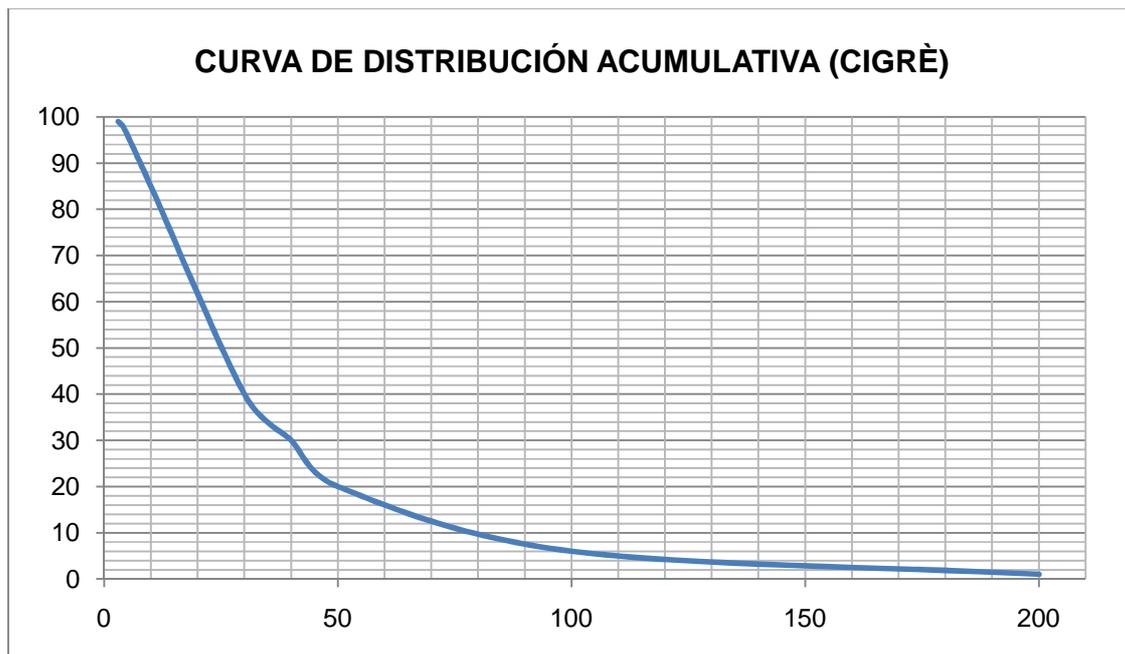
Tomamos como ejemplo los valores que propone la CIGRE (Conferencia Internacional de Grandes Redes Eléctricas), y el IEEE, para dos magnitudes muy significativas en la “caída de un rayo”:

a) El valor máximo de la corriente I_{CRESTA} [kA]

I_k [kA]	3	4	5	10	30	40	50	100	200
Probabilidad [%]	99	98	96	85	40	30	20	6	1

Ley de repartición de la corriente de cresta (Según CIGRE)

FIGURA 2.3



Fuente: Referencia (*1)

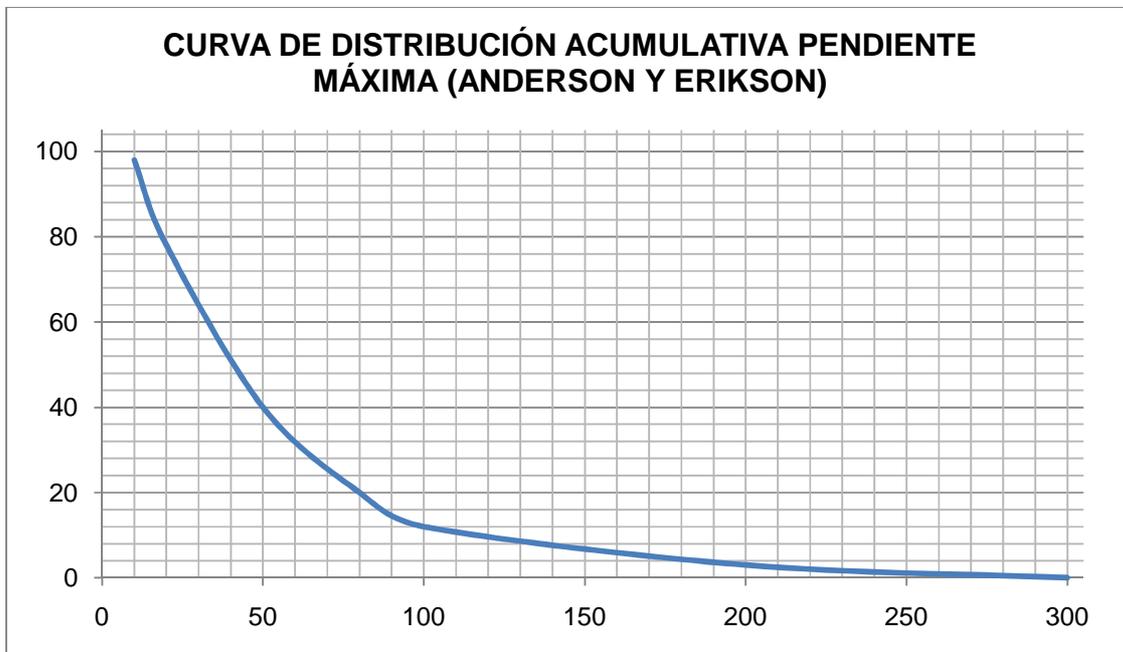
Elaborado por: Nataly Correa

b) La variación máxima de la corriente en el tiempo $\Delta I/\Delta t$, [kA/ μ s]

$(\Delta I/\Delta t)_{\max}$ [kA/ μ s]	10	20	50	80	100	200	300
Probabilidad [%]	98	78	40	20	12	3	< 1

Ley de repartición de la pendiente máxima de la corriente (Según Anderson y Erikson)

FIGURA 2.4



Fuente: Referencia (*1)

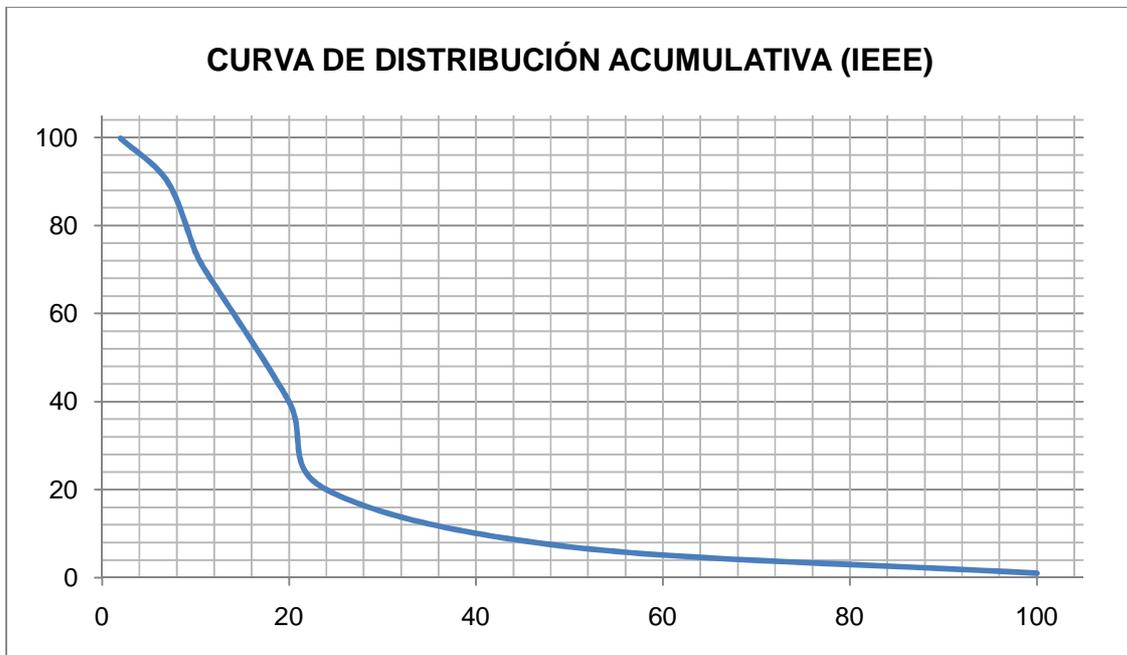
Elaborado por: Nataly Correa

c) El valor máximo de la corriente I_k [kA]

I_k [kA]	2	7	10	11	20	24	50	100
Probabilidad [%]	99,8	90	74	70	40	20	7	1

Ley de repartición de la corriente de cresta (Según IEEE)

FIGURA 2.5



Fuente: Referencia (*1)

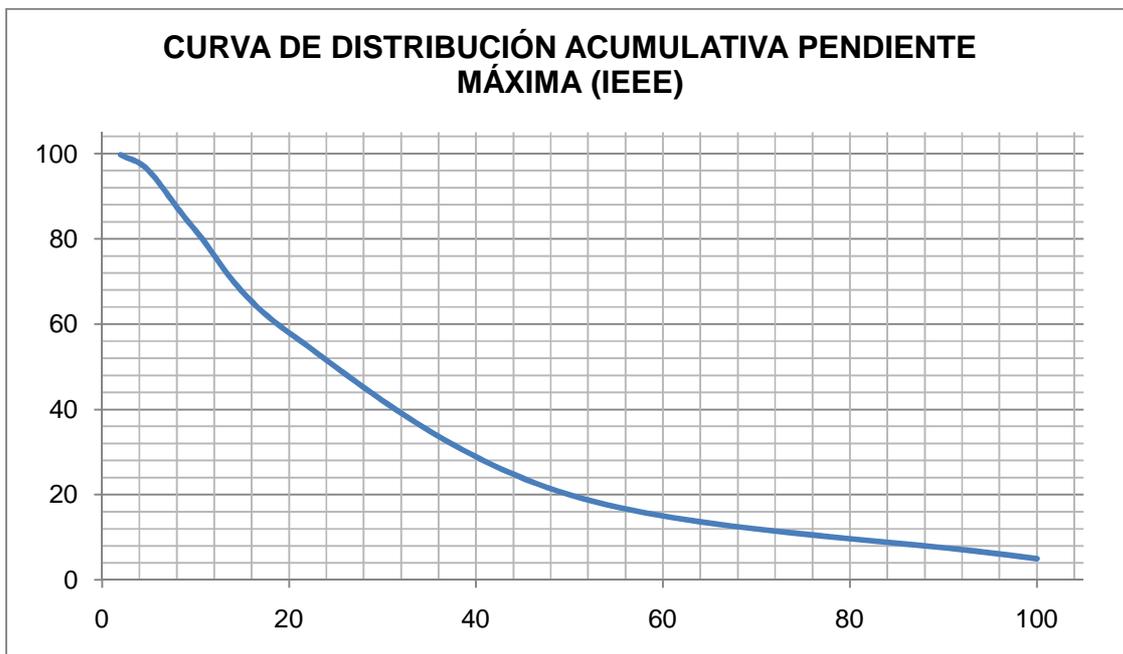
Elaborado por: Nataly Correa

d) La variación máxima de la corriente en el tiempo $\Delta I/\Delta t$, [kA/ μ s]

$(\Delta I/\Delta t)_{\max}$ [kA/ μ s]	2	5	10	20	50	100
Probabilidad [%]	99,7	96	82	58	20	5

Ley de repartición de la pendiente máxima de la corriente (Según IEEE)

FIGURA 2.6



Fuente: Referencia (*1)

Elaborado por: Nataly Correa

Se notan discrepancias entre valores propuestos por distintos autores, atribuibles muy posiblemente a las distintas experiencias que sirvieron como fuente de datos. De cualquier forma estos valores sirven como marco de referencia para aceptar valores, que uno mismo pueda obtener, en las mediciones que realice dentro de sus propias experiencias de campo.

2.2 MODELO ELECTROGEOMÉTRICO

El modelo electrogeométrico está basado en varios criterios y ha ido evolucionando con transcurso del tiempo para proporcionar resultados más eficientes y adecuados, este modelo ha sido utilizado y estudiado anteriormente por Max Molina (*8) y Freud Paredes (*9) pero para el diseño del apantallamiento de subestaciones, en este caso el modelo es aplicado para líneas de transmisión,

no obstante cabe mencionar que los criterios no cambian de una con respecto a la otra.

En 1945 Golde desarrolló la primera versión del modelo electrogeométrico para calcular el número de descargas recibidas por los objetos en tierra, pero desafortunadamente nunca fue aplicado para el diseño de sistemas de apantallamiento. No es sino hasta 1963, en que Young implementó un modelo preliminar para analizar la efectividad de los cables de guardia ubicados sobre las líneas de transmisión. (*10)

Sin embargo fue Whitehead y otros investigadores quienes se comprometieron a desarrollar un programa para registrar las fallas del apantallamiento provocadas sobre las líneas de transmisión, y gracias a cuya información presentaron una versión final del modelo electrogeométrico en 1973 seguida de unas pocas versiones intermedias. Poco después se levantaron serias dudas sobre la validez de este modelo, principalmente por las implicaciones que resultaban al considerar el efecto de la corriente media de las descargas atmosféricas sobre la altura de una estructura determinada. Varias versiones alternativas fueron sugeridas por algunos investigadores, que presentaban únicamente modelos más complejos pero que no resolvían al problema antes mencionado y que hasta ahora sigue siendo objeto de muchas investigaciones. (*10)

El número de descargas sobre una línea de transmisión de longitud media es mayor que el número de descargas a una subestación de tamaño medio, por lo tanto, el período de observación para una línea tendrá que ser considerablemente menor, pero procurando poder acumular datos lo suficientemente confiables sobre las fallas de apantallamiento. Por ejemplo si cada kilómetro de una línea de transmisión intercepta una descarga cada año, y si la exposición es del 1%, entonces una línea de 100km podría experimentar una falla de apantallamiento cada año. (*9)

2.2.1 DISTANCIA CRÍTICA DE ARQUEO

Examinando los registros fotográficos obtenidos mediante cámaras rotativas especiales, se ha comprobado que la naturaleza de los canales descendentes se desarrolla en un zigzag aleatorio que no se ve afectado por la existencia de los objetos en tierra, hasta que la punta del líder está lo suficientemente cerca como para generar un canal ascendente desde cualquier objeto ubicado sobre la tierra. Cuando esto ocurre, la condición para el “salto final” ha sido alcanzada y la distancia a la que se produce es llamada “**distancia crítica de arqueo (S)**”. El campo eléctrico a lo largo de esta distancia se ve gobernado por la carga del líder (q) y por lo tanto, la distancia crítica de arqueo es también una función de dicha carga. Cuando toma lugar la primera descarga de retorno, su trabajo es neutralizar el campo eléctrico originado, por lo que su amplitud de corriente “I” será de igual forma una función de la carga del líder (q). De esto se puede concluir que la distancia de choque dependerá entonces de la magnitud de corriente “I” de la primera descarga de retorno. Como puede notarse el lugar geométrico del apantallamiento, es una “geometría de parámetros” los cuales son funciones de una cantidad eléctrica: la amplitud de la descarga. De ahí el nombre: “Modelo Electrogeométrico”. (*9)

Con el transcurso del tiempo los investigadores han seguido con su trabajo para encontrar una relación que evalúe esta distancia de la mejor manera, así se tiene a continuación la siguiente ecuación: (*9)

$$S = B \cdot I^b \quad (2.4)$$

En la fórmula antes mencionada B y b dependen del objeto analizado, estos valores son obtenidos mediante experiencias empíricas, por otro lado, “I” es la magnitud de la corriente de descarga en [kA].

El objeto analizado en este caso es al hilo de guarda, ya que se refiere a la protección de líneas de transmisión, este trabajo está orientado solamente a la utilización de hilos de guarda, por lo que considerando los análisis realizados por la IEEE en 1993 se tiene la siguiente ecuación:

$$S = 10 \cdot I^{0,65} \quad (2.5)$$

Esta expresión sirve para calcular la distancia crítica de arqueo a cualquier objeto, sin embargo es de vital importancia para el modelo poder identificar la distancia crítica de arqueo a tierra y a conductores horizontales. Por lo cual se han obtenido las siguientes expresiones, considerando los coeficientes obtenidos por experiencias empíricas debidamente calibradas.

a) Distancia crítica de arqueo a tierra:

$$S_e = K_e \cdot S \quad (2.6)$$

Donde: $K_e = 1$

b) Distancia crítica de arqueo para conductores horizontales (hilos de guarda):

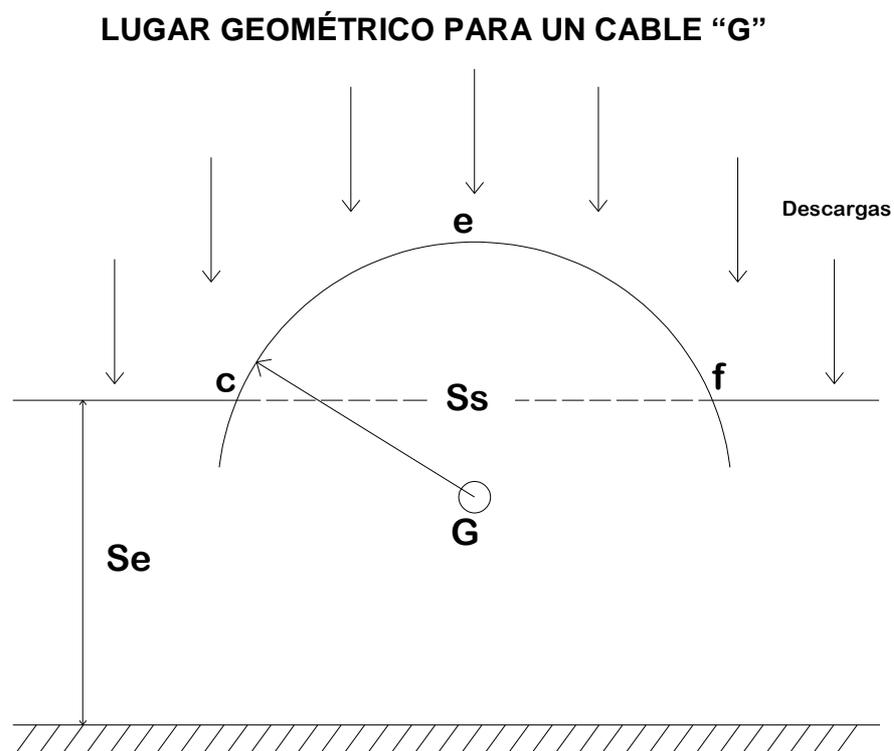
$$S_s = K_s \cdot S \quad (2.7)$$

Donde: $K_e = K_s = 1$

Con estas distancias se puede construir el lugar geométrico, el cual va a mostrar el plano de exposición, siendo este el que atraerá al rayo, este plano cumple las veces de un escudo protector, el cual debe garantizar que todos los rayos que puedan caer sobre la línea o sus alrededores, considerando el margen de seguridad, caerán sobre el debido apantallamiento, en este caso la línea de guarda, esta es la única manera en la que se puede considerar que la línea se encuentra protegida, para esto se verá a continuación la siguiente ilustración.

En la figura 2.7 se puede observar que, el cable "G" ubicado sobre el plano de tierra, donde se puede diferenciar, las descargas que terminarán sobre el cable y aquellas que terminarán sobre el plano de tierra. Las que arriben sobre la superficie curva "cef" (superficie expuesta), es decir dado por "Ss" acabarán sobre el cable, mientras que el resto de descargas se dirigirán al plano de tierra. (*9)

FIGURA 2.7



Fuente: Referencia (*10)

Elaborado por: Referencia (*10)

2.2.2 INTERCEPCIÓN DEL RAYO, PUNTO DE INCIDENCIA DE LA DESCARGA

El criterio de apantallamiento tiene las mismas bases, tanto en Subestaciones como en Líneas de Transmisión, por tanto se puede decir que al igual que en una Subestación, cuando una descarga se aproxima hacia una Línea de Transmisión

apantallada, ya sea por 1, 2, 3 o más conductores aéreos, esta terminará su trayectoria en aquel componente del sistema cuyo canal ascendente sea el primero en entrar en la zona de atracción generada por el líder.

Este proceso se desarrolla de una manera aleatoria y la mayor probabilidad de unión se dará con aquel canal que parta de la estructura (cable) más elevado sobre tierra.

Al estar claro el criterio antes mencionado, es más fácil darse cuenta de la función que cumple el apantallamiento, de tal manera que se entienda que la descarga debe ser interceptada por el elemento protector o hilo de guarda; al existir una falla en el elemento antes mencionado se dará paso para que la descarga caiga en la Línea de Transmisión, lo cual podrá ocasionar una falla en el sistema.

Pues bien, ahora cabe la pregunta, ¿Cuándo falla el apantallamiento? Una falla de apantallamiento se considera cuando existió una perforación en el escudo o blindaje, independientemente de que la línea quede o no fuera de servicio, la falla puede darse por cierto valor de corriente de descarga, considerado valor crítico, o porque la altura a la que se ubicó al hilo de guarda no es la suficiente para que proteja todas las fases de la línea (Figura 2.8).

En el momento en que la descarga cae en la zona no protegida (expuesta) esta será dirigida directamente a la fase ya que el campo de mayor atracción es el de la fase expuesta.

El que haya una falla en el apantallamiento por “mala ubicación” del hilo de guarda se comprende como que el plano expuesto es mayor al plano protegido, la diferencia de estos dos planos se denomina zona de falla.

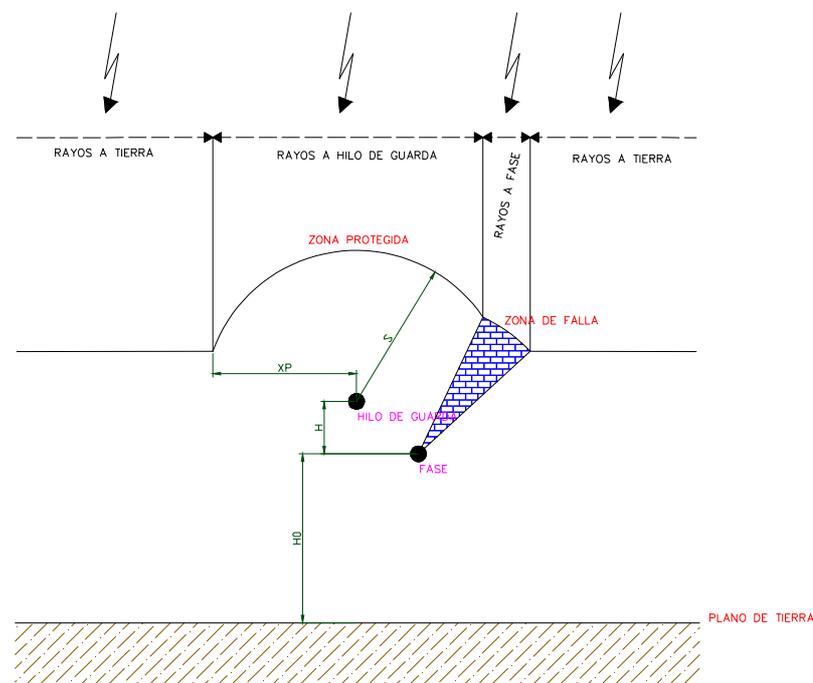
En la Figura 2.8 se distinguen dos factores importantes que determinan el riesgo de una posible falla:

H= “Altura efectiva del hilo de guarda”, que es la altura a la que está ubicada el hilo de guarda con respecto a la fase superior (en cuanto a altura).

X_P= “Distancia protegida”, es la distancia horizontal que abarca el elemento protector, en este caso el o los hilos de guarda.

FIGURA 2.8

ANÁLISIS DE DISTANCIAS Y ZONAS PROTEGIDAS



Fuente: Referencias (*6) y (*9)

Elaborado por: Nataly Correa

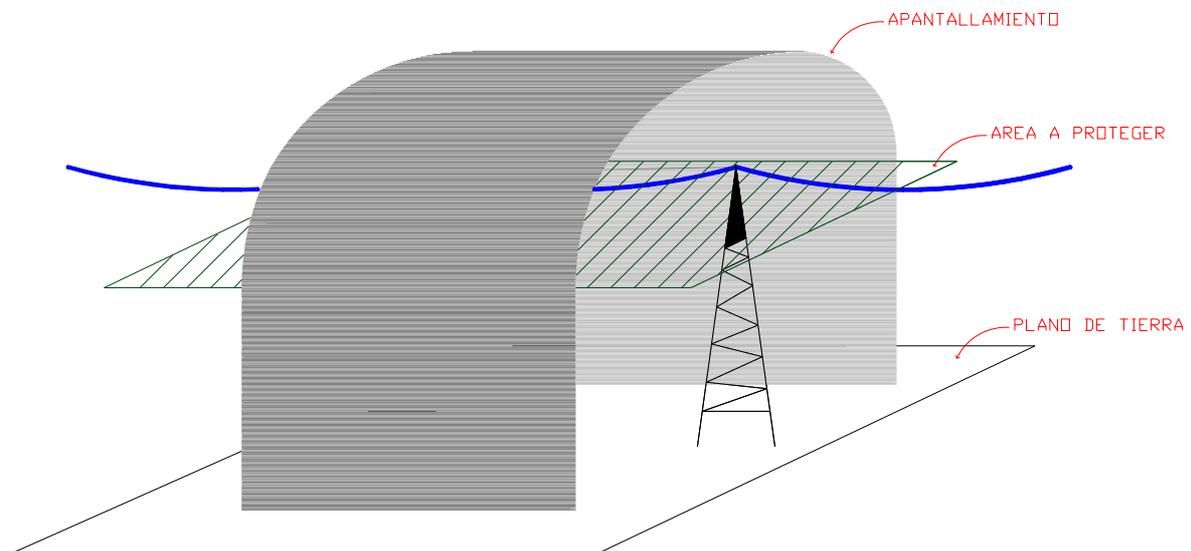
El “plano horizontal imaginario”, ubicado a una altura igual a la fase más elevada de la Línea de Transmisión (H_0), es considerado como el plano expuesto, ya que consta del plano comprendido por la fase o fases más elevadas existentes en la línea. A partir de este “plano” y hacia arriba se coloca el apantallamiento.

En las figuras 2.9 y 2.10 se puede visualizar en forma general el posible esquema geométrico que se presentará al analizar el probable punto de intersección de una descarga, donde se pueden apreciar claramente lo que se definirá como “**área a proteger**”.

Las zonas definidas por la presencia de los elementos de protección se entenderán como **pantalla o blindaje**, lo cual viene a ser la superficie interceptora o escudo; “**el plano expuesto**” como su nombre lo indica es la zona expuesta que no cuenta con ningún elemento protector, esta aparecerá cuando exista un mal diseño en el apantallamiento dejando así esta zona vulnerable por donde podrá darse una perforación o falla de blindaje.

FIGURA 2.9

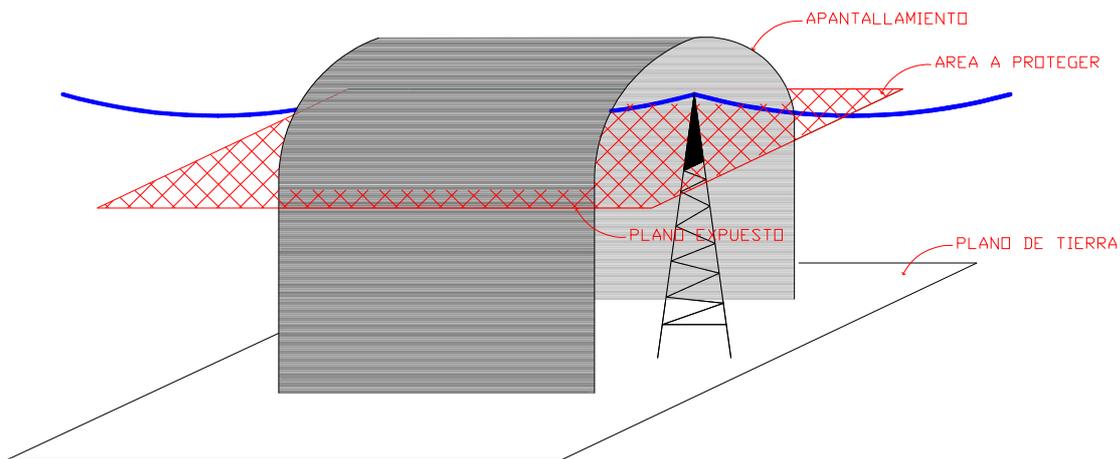
ANÁLISIS APANTALLAMIENTO SIN SUPERFICIE EXPUESTA



Fuente: Referencias (*9)
Elaborado por: Nataly Correa

FIGURA 2.10

ANÁLISIS APANTALLAMIENTO CON SUPERFICIE EXPUESTA



Fuente: Referencias (*9)

Elaborado por: Nataly Correa

2.2.3 PERIODO DE PROTECCIÓN DEL APANTALLAMIENTO

La probabilidad de que un rayo cause una falla del blindaje puede determinarse de varias maneras. En este método se emplea el “Período de Protección del blindaje” que significa el “número de años en los cuales se predice **una (sola) falla** del apantallamiento, parámetro con un significado muy práctico y que proporciona una medida más real del riesgo de falla del blindaje, posee un mayor significado frente al grado de exposición, que emplean los métodos convencionales de diseño. (*12)

El período de apantallamiento debe determinarse tomando como base la importancia de la instalación a proteger. En sistemas eléctricos de potencia puede tomarse este valor igual al período de vida útil de la instalación por un cierto factor de seguridad. (*9)

Todos los componentes de un sistema tienen el mismo grado de importancia, pues sin uno de ellos el ciclo no estaría completo, por tanto se podría decir que al igual que para una subestación el factor de seguridad de una línea podría variar entre 2, 3 ó incluso valores más altos, puesto que lo que siempre se amerita conseguir es un apantallamiento efectivo, es decir con menor probabilidad de perforación del mismo.

Cuando se requiera comprobar la efectividad de un esquema de apantallamiento mediante la simulación digital del sistema modelado en condiciones ciertamente reales, uno de los factores más importantes que se debe tomar en cuenta es el período de estudio, que no necesariamente será igual al período de protección del apantallamiento esperado, ya que por lo definición misma de este último término se deberá esperar que se produzca una falla del blindaje durante este tiempo, lo que involucra el hecho de que si se quiere garantizar un determinado período de protección necesariamente el tiempo de análisis tendrá que ser mucho mayor. (*9)

Por otro lado la técnica a utilizarse resulta ser la apropiada, ya que el modelo que se presenta permite considerar un ángulo de apantallamiento constante, es decir independientemente de la longitud de la línea, lo cual según la práctica convencional no es así, ya que si se considera por ejemplo el riesgo de una falla cada 100 años, este período involucraría que las líneas más largas requieren un blindaje más efectivo que las cortas, lo que a su vez implica que el ángulo de exposición debe reducirse conforme se incrementa la longitud de la línea analizada (*9).

Debe tomarse en consideración que con el número de fallas de blindaje directamente proporcional a la densidad de descargas a tierra, el período de protección es inversamente proporcional al nivel cerámico.

2.3 NIVEL CERÁUNICO

Cuando se requiere diseñar el apantallamiento de una línea de transmisión es importante determinar el nivel ceráunico que existe en los lugares por donde va a pasar dicha línea.

Debido a la geografía de este país existen niveles ceráunicos realmente variables entre si, por lo que es importante dividir a la línea, que será objeto de estudio, en tramos, esto facilitará el diseño del apantallamiento correspondiente.

Pues bien el nivel ceráunico de una zona determinada, se establece como el número promedio de días en el transcurso del año en los que existe caída de rayos o por lo menos se escucha un trueno en dicha zona.

Hace algunos años la única manera de poder medir este fenómeno era mediante los sentidos humanos, es decir, la vista y el oído, hoy en día existen aparatos que permiten medir con mayor exactitud dicho nivel, para poder apreciar los niveles existentes en el mundo existen mapas isoceráunicos, es decir, es un mapa que tiene la similitud con un mapa de curvas de nivel.

A la densidad de descargas a tierra (N_o), se la puede relacionar con el nivel ceráunico (N_c), con la siguiente ecuación: (*9)

$$N_o = C \cdot N_c \quad (2.8)$$

Donde: N_o = Densidad de descargas a tierra [$descargas/km^2 \cdot año$]
 C = Constante entre 0.1 y 0.2 (depende de la zona analizada)
 N_c = Nivel ceráunico

Resulta importante aclarar que la densidad de descargas a tierra, o en su defecto el nivel ceráunico, son parámetros definidos sobre áreas descubiertas, es decir,

sin considerar las posibles influencias y cambios a presentarse cuando se evalúa el efecto de estructuras u objetos ubicados sobre una determinada área (*9).

En este medio puede resultar más conveniente realizar cálculos a través de la densidad de descargas a tierra, en lugar del nivel cerámico, pues este último puede tener variaciones altas en áreas consideradas relativamente pequeñas como puede ser el tamaño de nuestras ciudades (*12).

2.4 LOCALIZACIÓN DE LA DESCARGA (*6)

Es importante distinguir entre localización del canal vertical de una descarga y su punto de impacto. La localización del canal vertical se obtiene de acuerdo con una función de probabilidad con distribución uniforme, es decir cualquier punto del área en la que está tendida la línea tiene la misma probabilidad. Sin embargo, el punto de impacto se determinará empleando el modelo electrogeométrico y la localización del canal vertical. Al acercarse una descarga a tierra hay un momento en que se supera la rigidez dieléctrica del aire y se produce el salto hacia el objeto más cercano. La distancia a la que salta el arco depende de la magnitud de la corriente de la descarga y la posición de esta como se vio en los literales anteriores. Es importante determinar la ubicación del punto de impacto final de una descarga atmosférica (un conductor de fase, una torre, un cable de tierra o tierra), ya que de este punto dependerá la magnitud del sobrevoltaje.

2.4.1 IMPACTO DIRECTO SOBRE LAS TORRES O EL CABLE DE GUARDA

La incidencia de una descarga atmosférica en los cables de guarda o en la torre de una línea de transmisión puede ocasionar su salida de servicio, debida al crecimiento del voltaje en el punto de incidencia del rayo.

La ocurrencia de fallas por sobrevoltajes en la línea a consecuencia del impacto directo de las descargas atmosféricas difícilmente es eliminada. Sin embargo estos efectos pueden ser minimizados a través de la optimización de las puestas a tierra de las estructuras y del ajuste de los elementos de la cabeza de la torre.

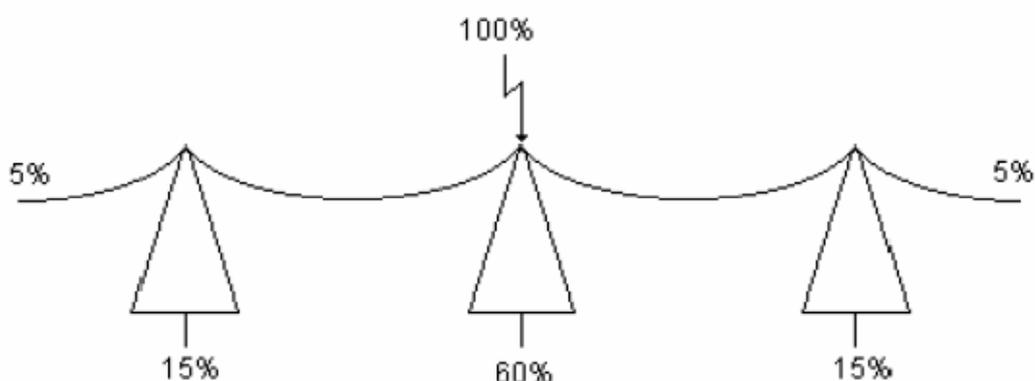
2.4.1.1 Impacto directo en las torres

Cuando un rayo impacta una torre se establece un proceso de propagación de ondas de voltaje y corriente a través de tres caminos, uno de ellos es por la propia torre y los otros dos por los cables de guarda adyacentes y estos a su vez en las torres próximas y en los sistemas de puesta a tierra con reflexiones según las impedancias características involucradas.

El voltaje resultante de la descarga atmosférica es el producto de la corriente del rayo por la impedancia de onda equivalente vista en este punto. Este voltaje tendrá variaciones de acuerdo por las reflexiones de la onda incidente en la resistencia de pie de torre y en las torres adyacentes. El siguiente gráfico muestra una distribución aproximada de la propagación de la descarga.

FIGURA 2.11

DISTRIBUCIÓN DE LA DESCARGA CUANDO EL RAYO IMPACTA UNA TORRE



Fuente: Referencia (*6)
Elaborado por: Referencia (*6)

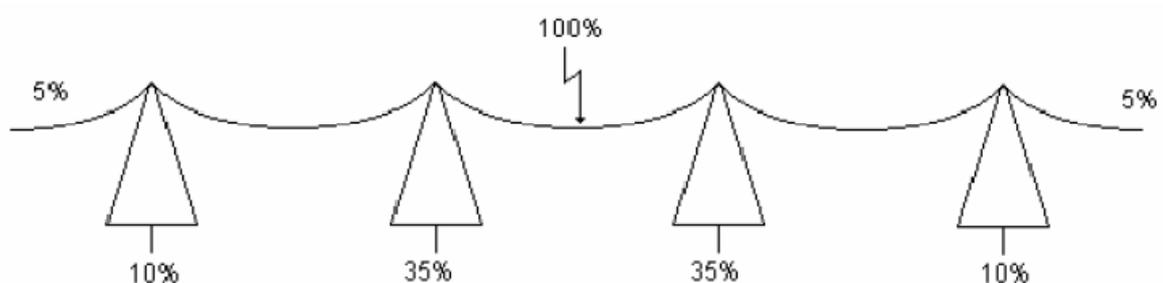
2.4.1.2 Impacto en el vano del cable de guarda

La incidencia de la descarga en los cables de guarda presenta como característica básica un voltaje en el punto de incidencia superior que el caso de impacto en la torre (por la distinta impedancia).

El rayo puede caer en cualquier punto del vano y el voltaje dependerá de la relación entre las distancias desde el punto de incidencia y las torres más próximas, siendo la descarga en la mitad del vano aquella que producirá el mayor valor del voltaje.

FIGURA 2.12

DISTRIBUCIÓN DE LA DESCARGA CUANDO EL RAYO IMPACTA AL CABLE DE GUARDA



Fuente: Referencia (*6)
Elaborado por: Referencia (*6)

2.4.2 DESCARGAS DIRECTAS AL CONDUCTOR DE FASE

Son aquellas descargas que impactan directamente al conductor de fase y son debidas a la falla de apantallamiento (en caso de tener cable de guarda). Estas descargas dependiendo de su intensidad pueden producir falla del aislamiento y por lo tanto contorneo en la línea. A través del modelo electrogeométrico se puede conocer la magnitud de la corriente máxima que puede provocar falla en el apantallamiento y contorneo.

2.4.3 DESCARGAS PRÓXIMAS A LA LÍNEA

Son todas las descargas que no impactan en la línea pero su incidencia es considerablemente cercana para producir un incremento de voltaje debido a la inducción que las descargas atmosféricas producen. Una descarga atmosférica próxima a la línea, puede inducir un voltaje que difícilmente excede los 500 kV.

Líneas blindadas con cables de guarda, de voltaje nominal superior a 69 kV generalmente tienen aislamiento suficiente para impedir la ocurrencia de contorneo por esta causa, por lo tanto los casos críticos ocurren en líneas (o redes) de distribución.

2.5 TORRES DE TRANSMISIÓN

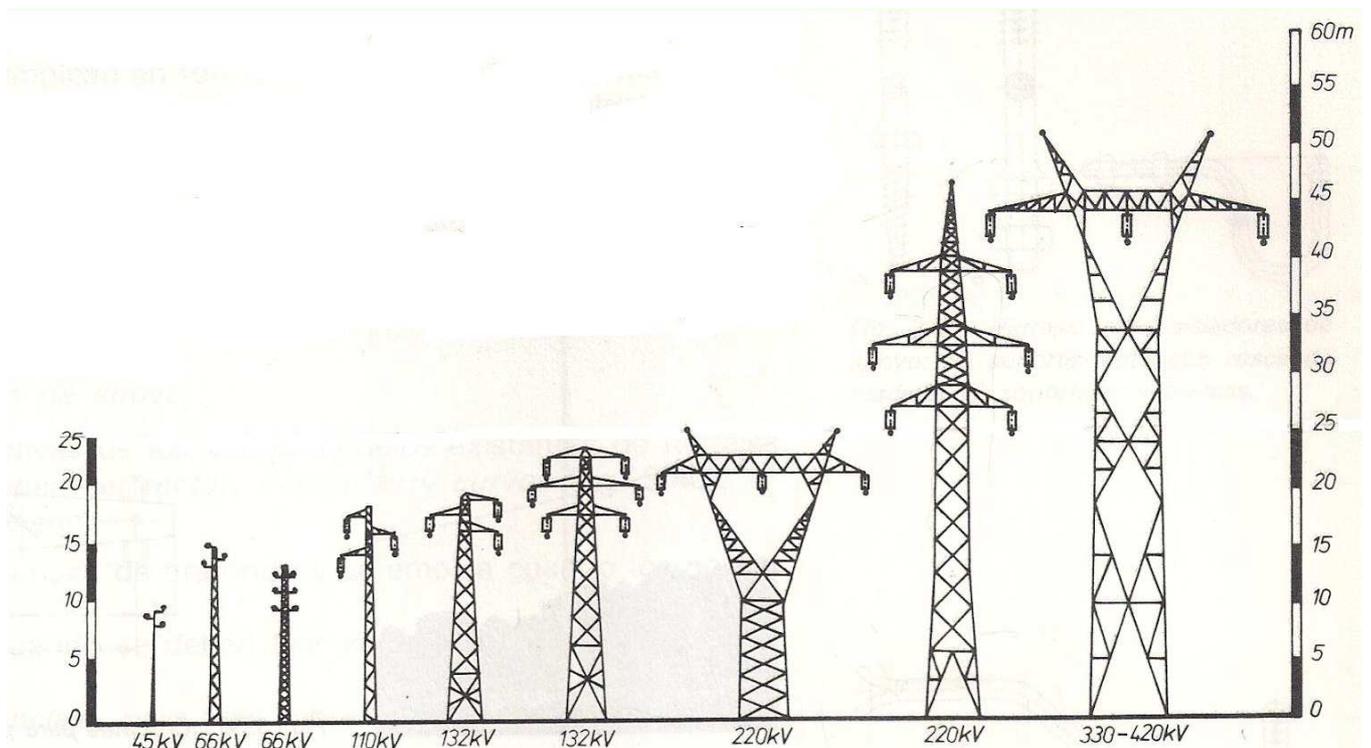
Los datos necesarios para el cálculo del apantallamiento vienen determinados por la geometría de la torre de transmisión, ya que esta determina las distancias entre fases y la altura y posición del o los hilos de guarda, por esto se va a proporcionar una pequeña información en cuanto a la geometría y alturas de algunas torres.

Se debe tener presente que esta no es una clasificación de torres, simplemente es una guía con algunos ejemplos de torres y geometrías, sin embargo esta información dará la pauta para poder tener una idea más clara de las distancias.

Primero se debe tener una idea en cuanto a alturas según el nivel de voltaje, en la figura 2.13 se puede observar la variación aproximada en cuanto a alturas; este dato es muy importante ya que dará la altura a la que podría ir el hilo de guarda y de esta manera se tendrá una idea al momento del diseño, tomando siempre en consideración que las torres para las líneas de transmisión se las construye dependiendo de los requerimientos del proyecto.

FIGURA 2.13

ALTURA TORRES TRANSMISIÓN SEGÚN NIVEL DE VOLTAJE



Fuente: Referencia (*14)

Elaborado por: Referencia (*14)

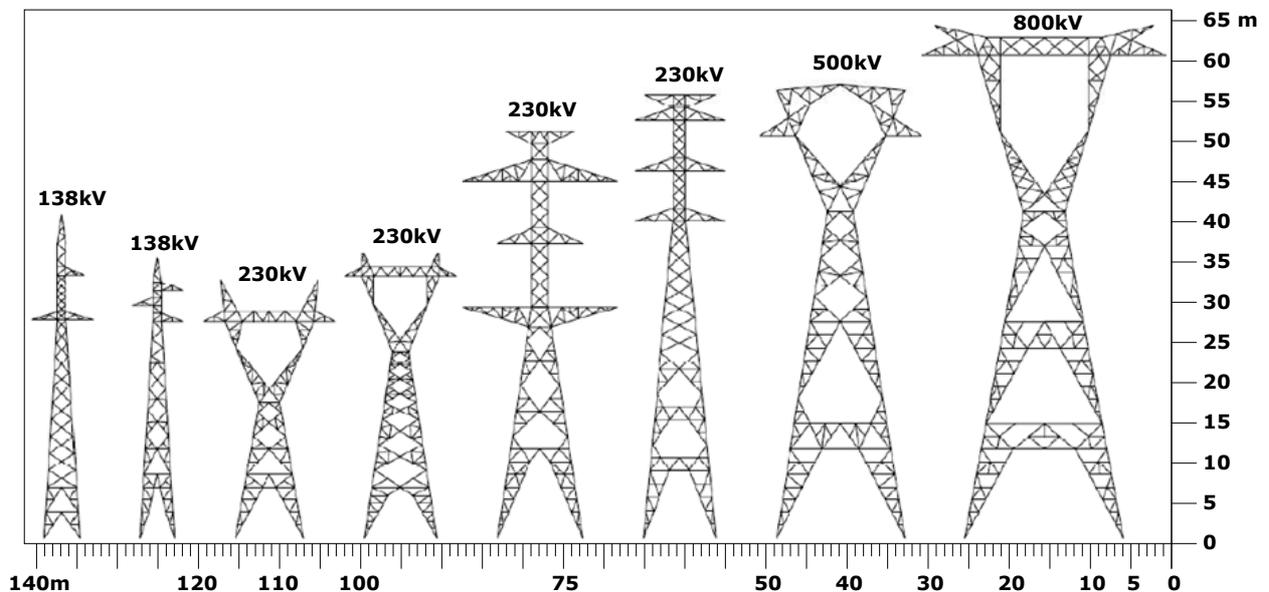
Ahora bien, se puede proseguir con algunos ejemplos de geometrías, esto servirá para que se tenga una idea más clara en cuanto a la distribución de fases y ubicación de hilo de guarda, ya que dependiendo la disposición de fases se podrá determinar cuántos hilos de guarda requerirá la Línea de Transmisión, es decir, si

las fases se encuentran con una separación demasiado amplia, podría requerir dos hilos de guarda. (Figura 2.14)

La geometría de las torres se basa en gran medida en la experiencia, la creatividad y la teoría que maneja el Ingeniero Proyectista, sin olvidar satisfacer los requerimientos del cliente. (*15)

FIGURA 2.14

GEOMETRÍA TIPO PARA TORRES DE ALTA TENSIÓN



Fuente: Referencia (*15)

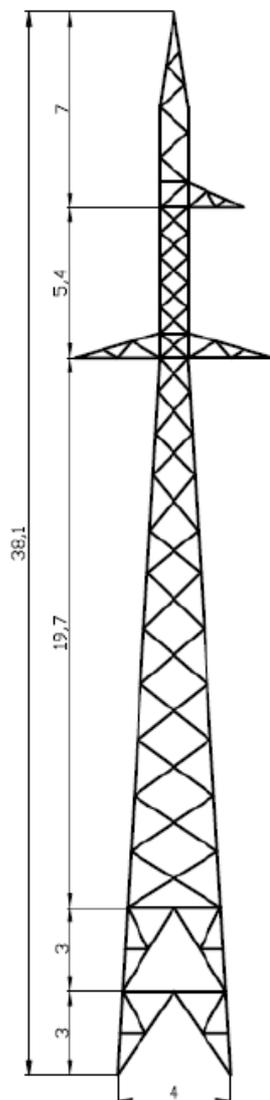
Elaborado por: Referencia (*15)

Las dimensiones de los elementos estructurales y algunos otros requisitos se definen a partir del estudio eléctrico de las torres, en la medida posible es aconsejable que la geometría de la torre presente formas sencillas y simétricas. (*15)

A continuación se presentan algunas geometrías tipo de torres autoportadas que son diseñadas de diferente manera de acuerdo a los requisitos y el criterio de los diferentes diseñadores, con esto se tiene una idea general en lo que se refiere a diseños en estructuras de esta índole. (*15)

FIGURA 2.15

TORRE DE SUSPENSIÓN CIRCUITO SIMPLE DE 38.1 [m]



CARACTERISTICAS GENERALES:

Voltaje de la Línea:

138Kv

Tipo de Estructura:

Autoportada

Función en la Línea:

Torre de Suspensión

Disposición de los Circuitos:

Circuito Simple Triangular vertical

Formato de la Torre:

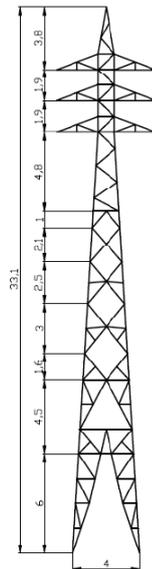
Tronco piramidal de celosía doble con extensión tipo pata

Fuente: Referencia (*15)

Elaborado por: Referencia (*15)

FIGURA 2.16

TORRE DE SUSPENSIÓN CIRCUITO DOBLE DE 33.1 [m]



CARACTERISTICAS GENERALES:

Voltaje de la Línea:

138Kv

Tipo de Estructura:

Autosoportada

Función en la Línea:

Torre de Suspensión

Disposición de los Circuitos:

Circuito Doble Triangular vertical

Formato de la Torre:

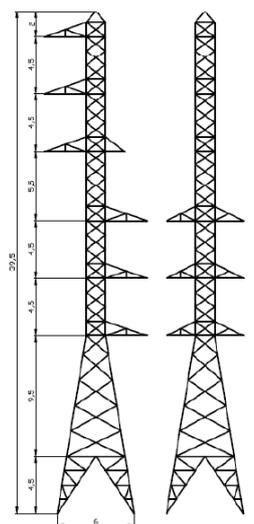
Tronco piramidal de celosía doble con elementos redundantes y extensión tipo pata

Fuente: Referencia (*15)

Elaborado por: Referencia (*15)

FIGURA 2.17

TORRE DE RETENCIÓN CIRCUITO DOBLE DE 33.1 [m]



CARACTERISTICAS GENERALES:

Voltaje de la Línea:

138Kv

Tipo de Estructura:

Autosoportada

Función en la Línea:

Torre de Retención Especial con Cruceas de Derivación

Disposición de los Circuitos:

Circuito Doble Triangular vertical

Formato de la Torre:

Tronco piramidal de celosía doble con elementos redundantes y extensión tipo pata

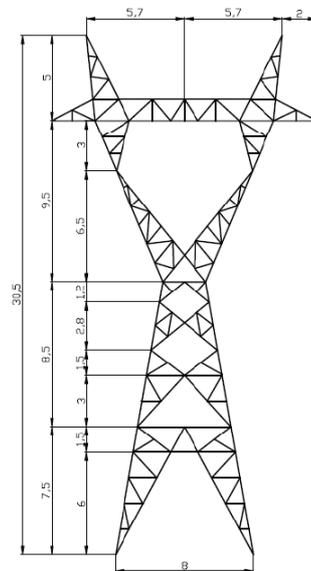
Vista Frontal Vista Lateral

Fuente: Referencia (*15)

Elaborado por: Referencia (*15)

FIGURA 2.18

TORRE TERMINAL CIRCUITO SIMPLE DE 30.5 [m]



CARACTERISTICAS GENERALES:

Voltaje de la Línea:

230Kv

Tipo de Estructura:

Autosoportada

Función en la Línea:

Torre Terminal o de Retención para ángulos grandes

Disposición de los Circuitos:

Circuito Simple Horizontal

Formato de la Torre:

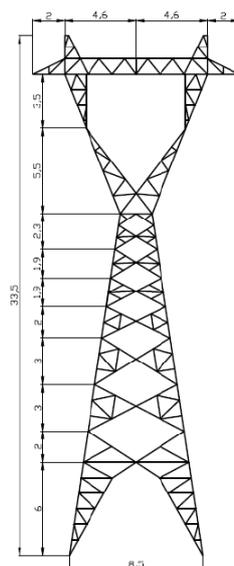
Tronco piramidal de celosía doble con elementos redundantes, cabeza tipo

Fuente: Referencia (*15)

Elaborado por: Referencia (*15)

FIGURA 2.19

TORRE DE SUSPENSIÓN CIRCUITO SIMPLE DE 33.5 [m]



CARACTERISTICAS GENERALES:

Voltaje de la Línea:

230Kv

Tipo de Estructura:

Autosoportada

Función en la Línea:

Torre Suspensión

Disposición de los Circuitos:

Circuito Simple Horizontal

Formato de la Torre:

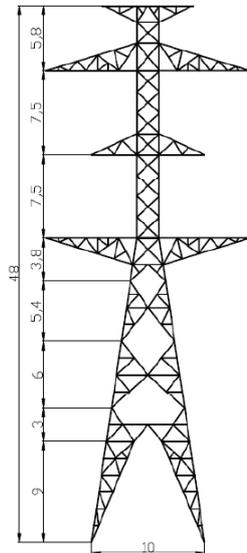
Tronco piramidal de celosía doble con elementos redundantes, cabeza tipo cara de gato y extensión tipo pata

Fuente: Referencia (*15)

Elaborado por: Referencia (*15)

FIGURA 2.20

TORRE DE RETENCIÓN CIRCUITO DOBLE DE 48 [m]



CARACTERISTICAS GENERALES:

Voltaje de la Línea:

230Kv

Tipo de Estructura:

Autosportada

Función en la Línea:

Torre Retención

Disposición de los Circuitos:

Circuito Doble Triangular Vertical

Formato de la Torre:

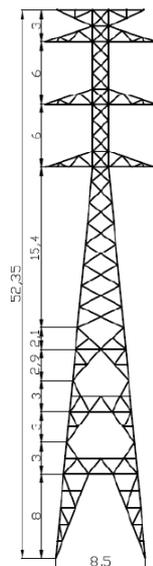
Tronco piramidal de celosía doble con elementos redundantes y extensión tipo pata

Fuente: Referencia (*15)

Elaborado por: Referencia (*15)

FIGURA 2.21

TORRE DE SUSPENSIÓN CIRCUITO DOBLE DE 52.4 [m]



CARACTERISTICAS GENERALES:

Voltaje de la Línea:

230Kv

Tipo de Estructura:

Autosportada

Función en la Línea:

Torre Suspensión

Disposición de los Circuitos:

Circuito Doble Triangular Vertical

Formato de la Torre:

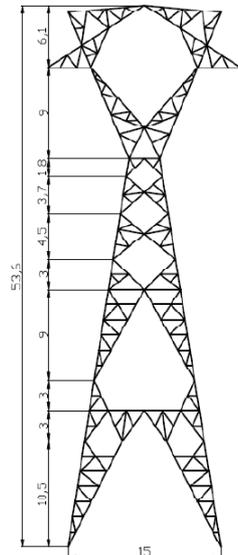
Tronco piramidal de celosía doble con elementos redundantes y extensión tipo pata

Fuente: Referencia (*15)

Elaborado por: Referencia (*15)

FIGURA 2.22

TORRE DE SUSPENSIÓN CIRCUITO SIMPLE DE 53.6 [m]



CARACTERISTICAS GENERALES:

Voltaje de la Línea:

500Kv

Tipo de Estructura:

Autosoportada

Función en la Línea:

Torre Suspensión

Disposición de los Circuitos:

Circuito Simple Horizontal

Formato de la Torre:

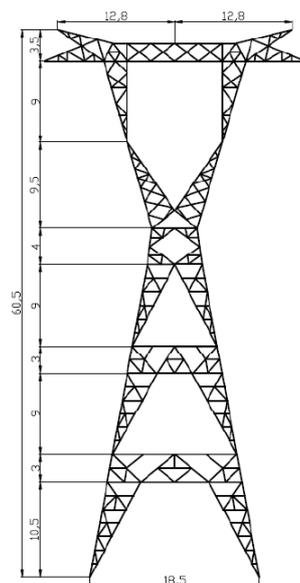
Tronco piramidal de celosía doble con elementos redundantes, cabeza tipo cara de gato y extensión tipo pata

Fuente: Referencia (*15)

Elaborado por: Referencia (*15)

FIGURA 2.23

TORRE DE SUSPENSIÓN CIRCUITO SIMPLE DE 60.5 [m]



CARACTERISTICAS GENERALES:

Voltaje de la Línea:

800Kv

Tipo de Estructura:

Autosoportada

Función en la Línea:

Torre Suspensión y Ángulos Pequeños

Disposición de los Circuitos:

Circuito Simple Horizontal

Formato de la Torre:

Tronco piramidal de celosía doble con elementos redundantes, cabeza tipo cara de gato y extensión tipo pata

Fuente: Referencia (*15)

Elaborado por: Referencia (*15)

CAPÍTULO 3

2.5.1

APLICACIÓN PRÁCTICA “PROGRAMA COMPUTACIONAL”

3.1 SOFTWARE COMPLEMENTARIO PARA EL DISEÑO DE APANTALLAMIENTO DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN.

3.1.1 CONSIDERACIONES GENERALES

3.1.2

Los conceptos mencionados en los capítulos anteriores serán de gran utilidad para el desarrollo del procedimiento necesario, para determinar la ubicación en que serán dispuestos el o los hilos de guarda (dependiendo del plano a proteger). El “cálculo del apantallamiento” será implementado, en un software, el cual arrojará resultados debidamente tabulados y con su respectivo gráfico, para que de esta manera el Ingeniero Diseñador tenga una herramienta que le permita apreciar los resultados de forma concisa y así al probar sus propuestas seleccione la mejor, la más confiable y económica posible.

El programa que se pretende implementar busca ser lo más amigable posible con el usuario, permitiendo que este manipule las variables con la mayor libertad posible, para así poder estudiar todos y cada uno de los resultados, dependiendo de la variable que se haya manipulado.

Es importante mencionar que las fórmulas necesarias para calcular el apantallamiento de líneas de transmisión serán tomadas de la tesis de “Análisis de

sensibilidad del apantallamiento contra rayos en subestaciones de potencia” del Ing. Freud Paredes, pero con el debido análisis y orientación hacia líneas de transmisión exclusivamente, ya que el modelo en el que está basada esta tesis es el mismo y por tanto sus principios.

3.1.3 MÉTODO DEL “MODELO ELECTROGEOMÉTRICO”

La mayoría de artículos y teorías han sido orientadas hacia el estudio de apantallamientos a subestaciones, sin embargo, para líneas de transmisión los principios son básicamente los mismos puesto que una línea es también un área a proteger pero conformada por las fases de esta ya sea de uno o dos circuitos; para determinar el área a proteger hay que tomar en consideración los hilos de fase que se encuentren ubicados hacia los extremos de las líneas (los más expuestos), y ya con estos se puede definir el “plano a proteger” para así dar paso al diseño del apantallamiento tomando en consideración las fórmulas, parámetros y criterios de una subestación, pues como se mencionó antes las dos son áreas que ameritan ser protegidas.

Al remontarse en la historia, se encuentra que el método electrogeométrico, desarrollado principalmente por Whitehead, en principio tiene su aplicación en el estudio del apantallamiento que proveen varillas verticales y conductores horizontales a edificios y *líneas de transmisión* respectivamente. La principal hipótesis en que se basa el método es que la carga espacial contenida en el líder escalonado del rayo, previo a la descarga de retorno, está relacionada con la magnitud de la corriente de la descarga, con base en estudios teóricos y experimentales del voltaje de ruptura dieléctrica de grandes espacios interelectrónicos. (*13)

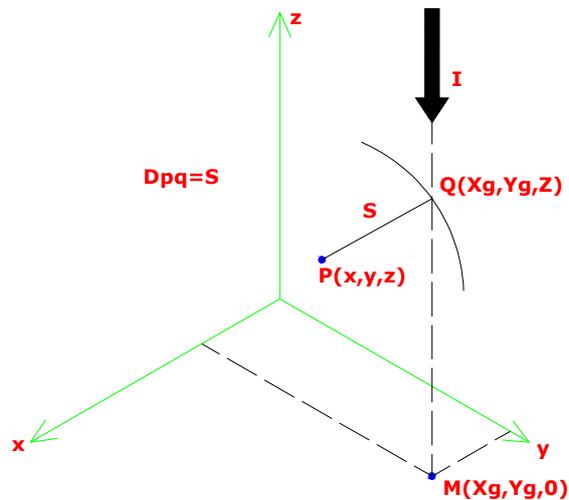
3.1.3.1 Sistema de Coordenadas

En el sistema de coordenadas cartesianas, ejemplificado en la figura 3.1, se tiene $P(x,y,z)$ que es un punto cualquiera del sistema que se va a analizar y $Q(Xg,Yg,Z)$ que es el punto sobre la trayectoria de la descarga, de la que se conoce la magnitud de la corriente "I" y el posible punto de impacto representado en la figura por $M(Xg,Yg,0)$. Con los datos mencionados se puede proceder a calcular "S", distancia crítica de arqueo, respecto del componente en referencia y que a su vez es igual a la distancia que existe entre los puntos $P(x,y,z)$ y $Q(Xg,Yg,Z)$. (*8)

Debido que el caso de estudio corresponde a un hilo de guarda como elemento protector, la superficie de exposición se puede representar por el lugar geométrico de un semicilindro, que tiene centro en el punto $P(x,y,z)$, y radio "S". Para el ejemplo se tiene que $Q(Xg,Yg,Z)$ está representando la intersección de la descarga con el lugar geométrico antes mencionado, y la coordenada "Z" del punto de intersección define la altura sobre el plano de tierra, en este caso $(X - Y)$, al cual el líder será atraído. Es necesario evaluar la altura del plano expuesto, para poder determinar de manera confiable el lugar donde terminará de caer la descarga, tomando en consideración que la mayor altura de intersección que se presente definirá aproximadamente el sitio donde dicha descarga terminará su trayectoria. (*8)

FIGURA 3.1

SISTEMA DE COORDENADAS CARTESIANAS PARA EL ANÁLISIS DEL MODELO



Fuente: Referencia (*9)

Elaborado por: Nataly Correa

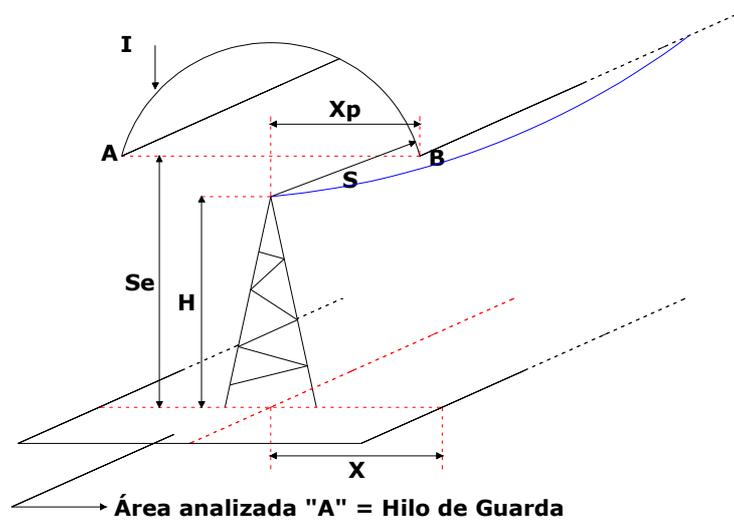
3.1.3.2 Cálculo del periodo de protección del apantallamiento

Tomando las ecuaciones desarrolladas para subestaciones, se va a determinar aquellas que son necesarias para Líneas de Transmisión, poniendo mayor atención, en aquellos lugares o situaciones en las cuales existe mayor sensibilidad en el apantallamiento, es decir los lugares donde las descargas pueden afectar mayormente al blindaje, esto no quiere decir que necesariamente algún lugar de la línea será el más afectado, sino que dependiendo del nivel cerámico al que se encuentre expuesta la línea podría darse que un tramo de L/T sea más afectado que otro.

En la figura 3.2 se puede observar que si el hilo de guarda se encuentra ubicado a una altura menor a la altura de la distancia crítica de tierra, la distancia de protección " X_p " será mayor a la distancia que se desea proteger, por tanto las fases se no se encuentran expuestas y se podría considerar que es un apantallamiento 100% efectivo pero para ese valor de corriente de descarga.

FIGURA 3.2

MODELO ANALÍTICO PARA CALCULO " X_p " CUANDO, $S_e > H$.



Considerando: $H < S_e$, $X_P > X$

Fuente: Referencia (*9)

Elaborado por: Nataly Correa

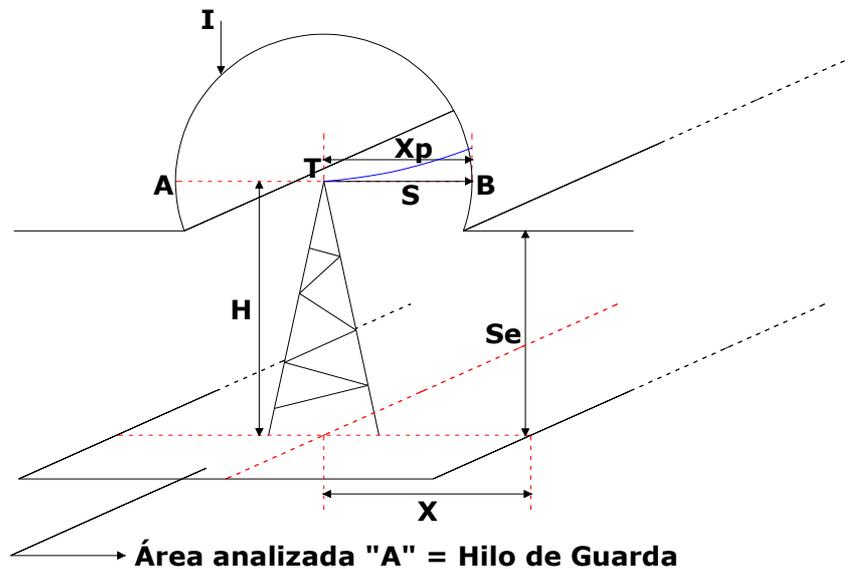
En la figura 3.3 en cambio se plantea el hecho de que la altura del hilo de guarda es mayor a la altura resultante de la distancia crítica de arqueo a tierra por tanto la distancia protegida disminuye dejando así una parte del plano protegido expuesto provocando de esta manera que el apantallamiento sea perforado por alguna descarga de un valor de corriente determinado.

Por lo tanto una descarga que descienda verticalmente podrá ser atraída por el hilo de guarda si ésta se aproxima dentro de una distancia definida así: (*11)

$$X_P = \begin{cases} \sqrt{S_s^2 - (S_e - H)^2} & \text{si: } H < S_e \\ S_s & \text{si: } H > S_e \end{cases} \quad (3.1)$$

FIGURA 3.3

MODELO ANALÍTICO PARA CALCULO "X_P" CUANDO, $S_e < H$.



Considerando: $H > Se$, $X_p < X$

Fuente: Referencia (*9)

Elaborado por: Nataly Correa

Las ecuaciones antes mencionadas muestran claramente la gran influencia de algunos parámetros sobre X_p , así como se puede observar en las figuras 3.2 y 3.3, por lo tanto se puede decir que $X_p = f(Se, Ss, H)$

Distancia crítica de arqueado para el hilo de guarda: (*9)

Según IEEE:	$S_s = S_e = S = 10 \cdot I^{0.65}$	
Según A. Mousa:	$S_s = S_e = S = 8 \cdot I^{0.65}$	(3.2)
Según Brown y Whitehead	$S_s = S_e = S = 7.1 \cdot I^{0.75}$	

Como se puede observar en las expresiones anteriores, según varios autores la distancia crítica de arqueado depende directamente de la magnitud de corriente de descarga, esto significa que X_p también depende de la misma.

Ahora bien, el área protegida (A_p) por el hilo de guarda se deriva de la siguiente expresión: (*11)

$$A_p = K_2 \cdot X_p^{K_1} \quad (3.3)$$

K_1 y K_2 toman valores que dependen del elemento de protección, por tanto para el caso de los hilos de guarda (según figura 3.4) toman los siguientes valores:

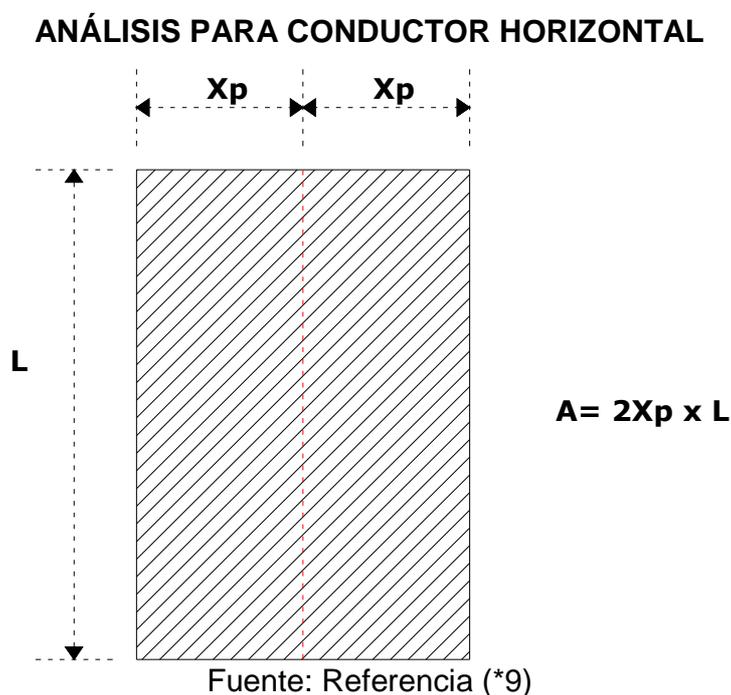
$$K_1 = 1$$

$$K_2 = 2 \cdot L$$

Entonces la ecuación de A_p (área protegida), queda de la siguiente manera:

$$A_p = 2 \cdot L \cdot X_p \quad (3.4)$$

FIGURA 3.4



Elaborado por: Nataly Correa

FIGURA 3.4A

ANÁLISIS DE BLINDAJE



Fuente: Nataly Correa

Elaborado por: Nataly Correa

Con la guía de las figuras 3.2, 3.3 y 3.4A, se puede hacer el siguiente análisis: El hilo de guarda crea el blindaje que protege un área que está constituida por el área bajo las fases más la cubierta por las distancias de seguridad. Si los rayos fueran sólo verticales bastaría con proteger el área bajo las fases, pero como pueden descender formando un ángulo con la vertical se escoge una “distancia de seguridad” hacia el exterior del área bajo las fases.

La magnitud de corriente de las descargas atmosféricas puede variar en un rango muy amplio, tal es el caso de las curvas de distribución acumulada presentadas por Uman, la CIGRÉ, y la curva que será llamada exponencial presentada por Herodotou y su grupo de trabajo (*16).

Para arcos $S_1, S_2, S_3, \dots, S_n$, y probabilidades de ocurrencia $P_1, P_2, P_3, \dots, P_n$; existirán máximas distancias $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ proyectadas desde el hilo de guarda hasta el plano expuesto, así dichas descargas sobrepasarán la protección. La suma de estas descargas que obviamente no han sido interceptadas por los

elementos de protección constituyen el número total de perforaciones en el blindaje causando una falla en el apantallamiento en el Área a proteger “A”. (*9)(*11)

El número de fallas de apantallamiento por año, es una función del número total de descargas anuales incidentes sobre el área “A”, así como la frecuencia de distribución para la magnitud de corriente de las descargas atmosféricas. Así se tiene: (*11)

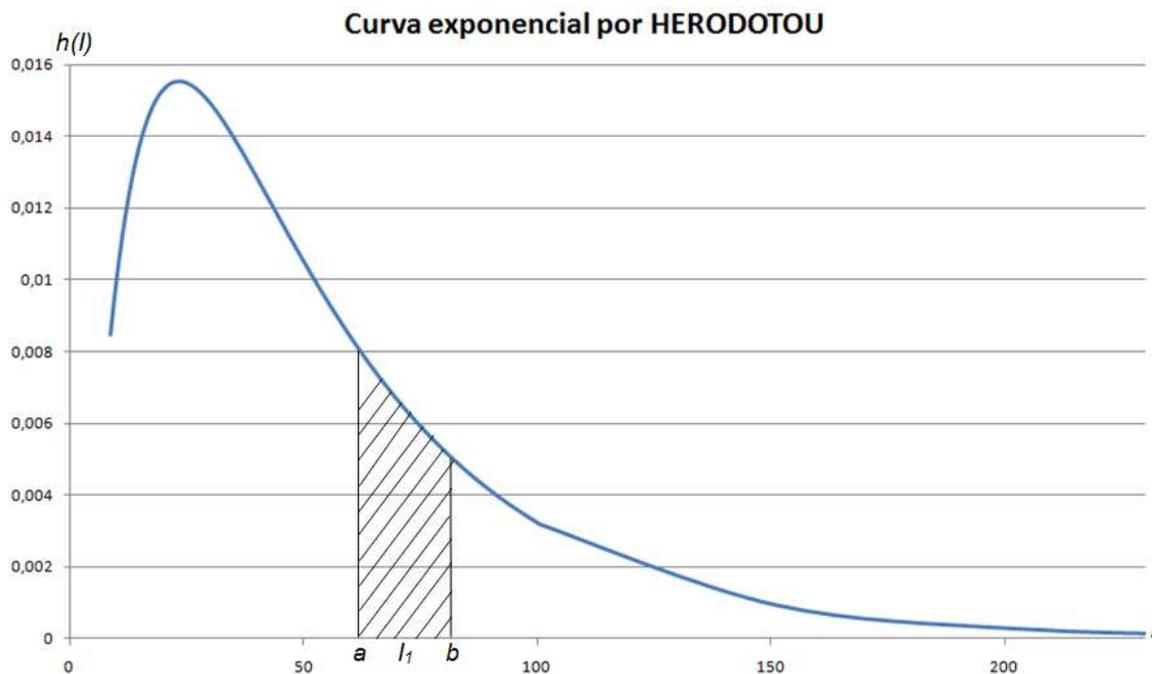
$$NA = No \cdot \frac{A}{Ao} \quad (3.5)$$

Así que, se puede determinar el número de fallas del apantallamiento por año “Ns” sobre el área “A”, en función de la magnitud de corriente, de la siguiente manera: (*11)

$$Ns = \frac{No}{Ao} \cdot [(A - A_{P1} \cdot P_1) + (A - A_{P2} \cdot P_2) + \dots + (A - A_{Pn} \cdot P_n)] \quad (3.6)$$

Donde: P_1, P_2, \dots, P_n = Probabilidad de que aproximadamente caiga una corriente de descarga I_1, I_2, \dots, I_n . Es decir, $P_1 = P(a \leq I_1 \leq b)$ mirar grafico abajo.

$A_{P1}, A_{P2}, \dots, A_{Pn}$ = Área protegida por el hilo de guarda para cada una de las descargas.



Al reemplazar la ecuación 3.4 en 3.6 se tiene la siguiente expresión:

$$Ns = \frac{No}{Ao} \cdot [(A - 2 \cdot L_1 \cdot X_{P1} \cdot P_1) + \dots + (A - 2 \cdot L_n \cdot X_{Pn} \cdot P_n)] \quad (3.7)$$

Al desarrollar se tiene:

$$Ns = \frac{No}{Ao} \cdot \sum_{m=1}^{m=n} L_n \cdot X_{Pn} \cdot P_n \quad (3.8)$$

La ecuación antes mencionada será resuelta por medio de una función de densidad de probabilidad que será obtenida considerando la aleatoriedad de dichas descargas, y cuya expresión se definirá en la siguiente sección, luego de lo cual será necesario integrar la expresión 3.9 entre un valor mínimo obtenido de la curva de distribución de corrientes (el valor que permite que “Se” sea igual a “H”) y un valor máximo que también será obtenido de la curva de frecuencia de distribución de corrientes (*8).

Así que la ecuación para evaluar quedará de la siguiente manera:

$$N_s = \frac{N_o}{A_o} \cdot \left[A - \int_{I_{min}}^I 2 \cdot L \cdot S_e \cdot h(I) \cdot dI - \int_I^{I_{max}} 2 \cdot L \cdot \sqrt{S_s^2 - (S_e - H)^2} \cdot h(I) \cdot dI \right] \times 10^{-6} \quad (3.9)$$

Donde: S, A y H = definidos por la figura 3.1 y 3.2

N_o = Densidad de descarga a tierra [*descargas/km²año*]

$h(I)$ = Función de probabilidad

Entonces de la expresión 3.9 se puede desprender el área protegida por el hilo de guarda:

$$A_p = \left[\int_{I_{min}}^I 2 \cdot L \cdot S_e \cdot h(I) \cdot dI + \int_I^{I_{max}} 2 \cdot L \cdot \sqrt{S_s^2 - (S_e - H)^2} \cdot h(I) \cdot dI \right] \quad (3.10)$$

Finalmente el período de protección del apantallamiento “TA” se definirá numéricamente por (*11) (*9):

$$TA = \frac{1}{N_s} [\text{años}] \quad (3.11)$$

Donde: N_s = Es el número de fallas del apantallamiento para un determinado período de estudio, y que para el caso del programa descrito en esta sección se determinará por año.

Para evaluar la efectividad del esquema de apantallamiento sobre el área que se desea proteger, durante un período de estudio establecido, se tiene la siguiente expresión.

$$EA = \frac{N_s}{N_A} \times 100[\%] \quad (3.12)$$

Donde: N_s = Es el número de fallas del apantallamiento durante el

período de análisis.

NA = Es el número total de descargas incidentes sobre el área protegida durante el mismo período.

Al emplear la siguiente ecuación se podrá hablar de la efectividad del hilo de guarda:

$$EP = \frac{NDI}{NAp} \times 100[\%] \quad (3.13)$$

Donde: NDI = Es el número de descargas interceptadas por el hilo de guarda.

NAp = Es el número total de descargas incidentes sobre el área que deberá ser protegida por el hilo de guarda.

3.1.3.3 Función de densidad de probabilidad para corriente de rayos a tierra. (*9)

Las probabilidades de ocurrencia de las descargas atmosféricas, serán representadas por una *función de densidad de probabilidad* de magnitudes de corriente que se ha obtenido considerando la aleatoriedad de dichas corrientes a lo largo del tiempo, a través de la siguiente ecuación (*11):

$$h(I) = K_1 \cdot e^{\frac{-I}{I_1}} + K_2 \cdot e^{\frac{-I}{I_2}} \quad (3.14)$$

Esta expresión ha sido calibrada para cada una de las curvas de frecuencia de distribución de corrientes presentadas en el capítulo anterior con el propósito de presentar un análisis de resultados comparativos entre la utilización de cada una de ellas:

3.1.3.3.1 Curva presentada por UMAN: (*9)

$$h(I) = -0.25953 \cdot e^{-I/12.45} + 0.2397 \cdot e^{-I/17.65} [\%] \quad (3.15)$$

Límites de integración: $I_{\min} = 7.33$ [kA]
 $I_{\max} = 185$ [kA]

3.1.3.3.2 Curva presentada por la CIGRÈ:

$$h(I) = -0.2905 \cdot e^{-I/16.59} + 0.28464 \cdot e^{-I/20.45} [\%] \quad (3.16)$$

Límites de integración: $I_{\min} = 3.74$ [kA]
 $I_{\max} = 200$ [kA]

3.1.3.3.3 Curva exponencial por HERODOTOU:

$$h(I) = -0.0493 \cdot e^{-I/10.733} + 0.03745 \cdot e^{-I/40.828} [\%] \quad (3.17)$$

Límites de integración: $I_{\min} = 8.8$ [kA]
 $I_{\max} = 480$ [kA]

El valor adecuado para la integración de la ecuación 3.9, como ya se mencionó estará dado por:

$$Se = Ke \cdot S = S = B \cdot (I^b)$$

En donde sí: $Se = S = H$ (fig. 3.1 y 3.2), se tiene:

$$I = \left(\frac{H}{B}\right)^{1/b} \quad (3.18)$$

El programa digital desarrollado en este trabajo, presenta como una alternativa durante la simulación el empleo de cualquier ecuación equivalente a las expresiones que permitan evaluar la distancia crítica de arqueo, así como el uso de cualquiera de las curvas de frecuencia de distribución de la corriente de rayos mostradas en el capítulo anterior, donde además se plantea la opción de editar una curva totalmente nueva, para lo cual será necesario ingresar durante la ejecución del programa los valores de K_1 y K_2 que calibren dicha curva a la función de densidad de probabilidad dada por (3.14), así como los límites de integración (valores de corriente máximo y mínimo) que presente la curva que se desea editar.

3.1.3.4 Análisis de la Distancia Protegida.

En las figuras 3.2 y 3.3 se pueden ver el lugar geométrico de los posibles puntos de intersección de una descarga, en las figuras está representado como un semicírculo, analizando los gráficos y tomando en cuenta la ecuación 3.11 se prueba que el período de protección depende de la diferencia en altura efectiva entre el hilo de guarda de los diferentes tramos para el apantallamiento ubicados sobre el punto "T" y la fase susceptible de ser interceptada por una descarga, así como la distancia horizontal " X_p " del hilo de guarda.

Lo que se pretende entonces es probar que con la incursión del modelo electrogeométrico (lo que implica definir una relación para la distancia crítica de arqueo) la distancia protegida puede también entenderse como una función del período de protección del apantallamiento lo que puede determinar que para una misma altura del hilo de guarda dicha distancia, varíe a medida que el período de protección aumente o disminuya. (*9)

" X_p " también depende directamente de la corriente del rayo que se haya tomado en consideración, así como también del criterio que se tome en cuenta para analizar "S" y por ende "Se" y "Ss".

3.2 ANÁLISIS DEL PROGRAMA DIGITAL, DETERMINAR EN FORMA PROBABILÍSTICA LAS POSIBLES SALIDAS POR FALLA DEL APANTALLAMIENTO Y EL POTENCIAL PUNTO DE INCIDENCIA DE LAS DESCARGAS QUE LAS PROVOCARON.

3.2.1 GENERALIDADES

Al obtener las posibles soluciones para los esquemas de apantallamiento, determinadas según el modelo adoptado lo más importante es desarrollar un mecanismo que permita predecir el comportamiento de la línea de transmisión bajo condiciones reales. Es decir, un método mediante el cual se pueda implementar en una etapa complementaria al diseño cada una de las posibilidades que se presenten para conseguir un blindaje efectivo.

Al presentar las curvas de distribución de probabilidad para las corrientes del rayo, lo que se quiere es simular una serie de rayos (sin ángulo de inclinación) con diferentes corrientes, para de esta manera poder conocer la zona más débil del apantallamiento, es decir, aquella zona que puede ser perforada.

El método planteado puede ser resuelto a través de un programa digital cuyos resultados permitan conocer en forma preliminar las zonas donde se ha detectado exceso de descargas incidentes o, por el contrario demuestren estar sobrepantalladas; lo que se trata es predecir el punto donde una descarga pueda culminar su trayectoria para determinar posibles correcciones a los esquemas de apantallamiento e incluso realizar nuevos diseños. (*9) Es muy importante tomar en cuenta que al trabajar con L/T uno de los factores que tiene mayor influencia sería la densidad de rayos a tierra en esa zona o al menos con el Nivel Cerámico, ya que, una L/T por la función que le corresponde desempeñar recorre varios

lugares y por ende el Nivel Cerámico entre sectores será diferente, por esto se recomienda que el usuario tome en consideración este factor para que haga su selección de tramos, es decir en cuantos tramos dividirá a la línea antes de ingresar los datos para la simulación, se puede decir que este es un factor con enorme influencia en el diseño del apantallamiento.

Ahora bien, cabe mencionar que hay que tomar en cuenta otras variables que también son importantes pero que van de la mano con el Nivel Cerámico que se mencionó anteriormente, la corriente de las descargas que puede variar aleatoriamente tanto es su magnitud como en sus tiempos de frente, no se puede olvidar al punto de incidencia de la descarga que es otro factor que se puede considerar aleatorio. El número de días de tormenta al año no es un valor constante sino más bien puede cambiar de un año a otro, etc. (*8)

La técnica empleada para determinar el punto de incidencia de una descarga está basada en el modelo electrogeométrico tridimensional (*8), sin embargo los resultados finales siempre requieren ser correlacionados con datos de campo que entre otras cosas permitan demostrar la validez del método empleado. Desafortunadamente en este medio no se cuenta con suficiente información que se pueda proporcionar una calibración adecuada del mecanismo empleado, (*9) pero se podría buscar alguna correlación con “salidas” o desconexiones de las L/T durante las tormentas, que es un dato que si se dispone.

3.2.2 FORMULACIÓN DEL MODELO

La formulación del modelo está basada en el criterio utilizado para las subestaciones, por esto solo se va a mencionar de manera breve y concisa de que se trata la formulación: el modelo se basa en la determinación del punto de incidencia de una descarga tomando en cuenta los factores explicados en el numeral 3.1.2.1. “En el desarrollo del procedimiento se debe tomar en cuenta la influencia que pueden representar los elementos de protección (hilo de guarda),

de tal manera que los resultados garanticen el éxito o fracaso de un esquema de apantallamiento". (*9)

Hay que tomar en cuenta algunas suposiciones antes de considerar los parámetros de entrada del modelo para cada una de las descargas simuladas: (*9)

- La distancia crítica de arqueo es la que delimita la distancia a la que el líder (rayo) empieza a tener influencia del elemento protector (hilo de guarda).
- Por el momento las descargas serán consideradas como que están cayendo en forma vertical.
- Uno de los datos que se va a considerar como conocido será el número de rayos, que dependerá de la densidad de descargas a tierra (nivel cerámico), con cierta magnitud de corriente, los cuales se van a regir a la probabilidad de ocurrencia durante el tiempo que será período de análisis. Para esto se utilizaran las curvas antes mencionadas.

Las demás consideraciones ya fueron mencionadas a lo largo de este trabajo, por lo que no tiene caso alguno volverlos a mencionar como puntos incidentes en los cálculos del modelo, pues a estas alturas se tiene muy claro de qué manera afectan la aplicación del modelo.

Ahora bien, por otro lado se debe tener claro que el radio de influencia es muy importante para el desarrollo de la simulación por lo que se considerará un área siempre mayor o igual que el área de la L/T, en este caso el radio de influencia depende directamente de la longitud de la L/T. Por otro lado el área marginal de riesgo está considerada como un avance de la simulación de rayos no verticales y se dejará un espacio para que el usuario tome la decisión si quiere o no considerar un área marginal. Es importante mencionar que en el caso de líneas de transmisión no siempre una perforación de apantallamiento causará una salida del

sistema, aun cuando la descarga haya terminado su trayectoria en una de las fases, la desconexión de la L/T, depende de otros factores que no son objeto de estudio en este trabajo.

El procedimiento que debe seguirse, en forma general, para el análisis planteado se desarrolla de la siguiente manera (*9):

- i. Elegir el punto $M(Xg, Yg, 0)$, ver figura 3.1, en forma aleatoria, como posible punto de impacto de la descarga.
- ii. Determinar la magnitud de corriente media que tendrán cada uno de los intervalos mostrados en las curvas dadas anteriormente.
- iii. Para este valor de corriente evaluar el número de rayos que se producirán durante el período de tiempo en análisis, de acuerdo a su probabilidad de ocurrencia.
- iv. Para cada uno de los rayos obtenidos en el numeral (ii), y en forma independiente, calcular la distancia crítica de arqueo.
- v. Y para finalizar, geoméricamente se determina sobre que elemento del sistema incidirá la descarga.

El procedimiento descrito debe repetirse para cada uno de los rayos que tengan cierta magnitud de corriente, y de igual forma se determinará para los siguientes valores de corriente que deben ser analizados.

3.2.3 FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDADES PARA LA MAGNITUD DE CORRIENTES DE LAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS (*9).

Las curvas que se describen a continuación han sido obtenidas de aquellas que se presentaron en el capítulo anterior, a través de un proceso matemático que conlleva a obtener la derivada de cada una de ellas para representarla en forma discreta. Los intervalos escogidos para la derivación han sido obtenidos de tal manera que la probabilidad de ocurrencia en dicho intervalo no cambie bruscamente, tratando así de expresar en la forma más real posible.

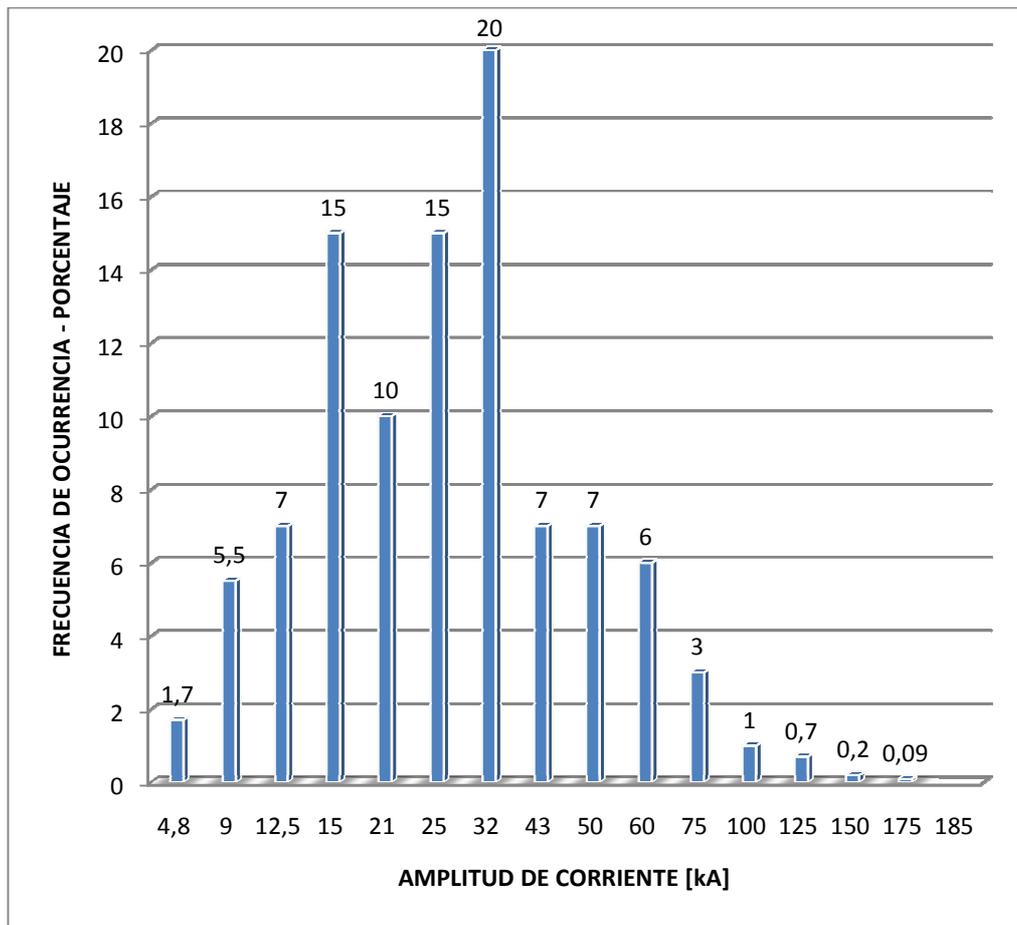
Para la aplicación del modelo descrito en la sección anterior se plantea la alternativa de escoger el valor medio de corriente para cada uno de los intervalos que se presentan en las curvas, y de acuerdo a la probabilidad de ocurrencia de este grupo de rayos se evalúa el número de descargas que estarán presentes durante la simulación, tomando en cuenta que el 100% de los rayos equivale al número total de descargas que se deben simular y que serán obtenidos por medio de la densidad de descargas a tierra propia de la región en análisis, el área de influencia que se desee considerar y el tiempo que se tomará para realizar la simulación.

Por otro lado resulta muy importante tener en cuenta los porcentajes de probabilidad que tendrán ciertos grupos de rayos con determinada magnitud de corriente, para que de esta manera durante la simulación se pueda escoger con un juicio crítico cuál de las alternativas se desea emplear, o en su defecto aplicar los diseños bajo la influencia de cada una de ellas.

Es fundamental dejar claro la importancia que va a representar la densidad de descargas a tierra para la aplicación de cualquiera de las curvas que se escoja como alternativa de solución.

FIGURA 3.5

HISTOGRAMA DE LA FRECUENCIA DE DISTRIBUCIÓN DE LA CORRIENTE DE RAYOS: DATOS DE UMAN

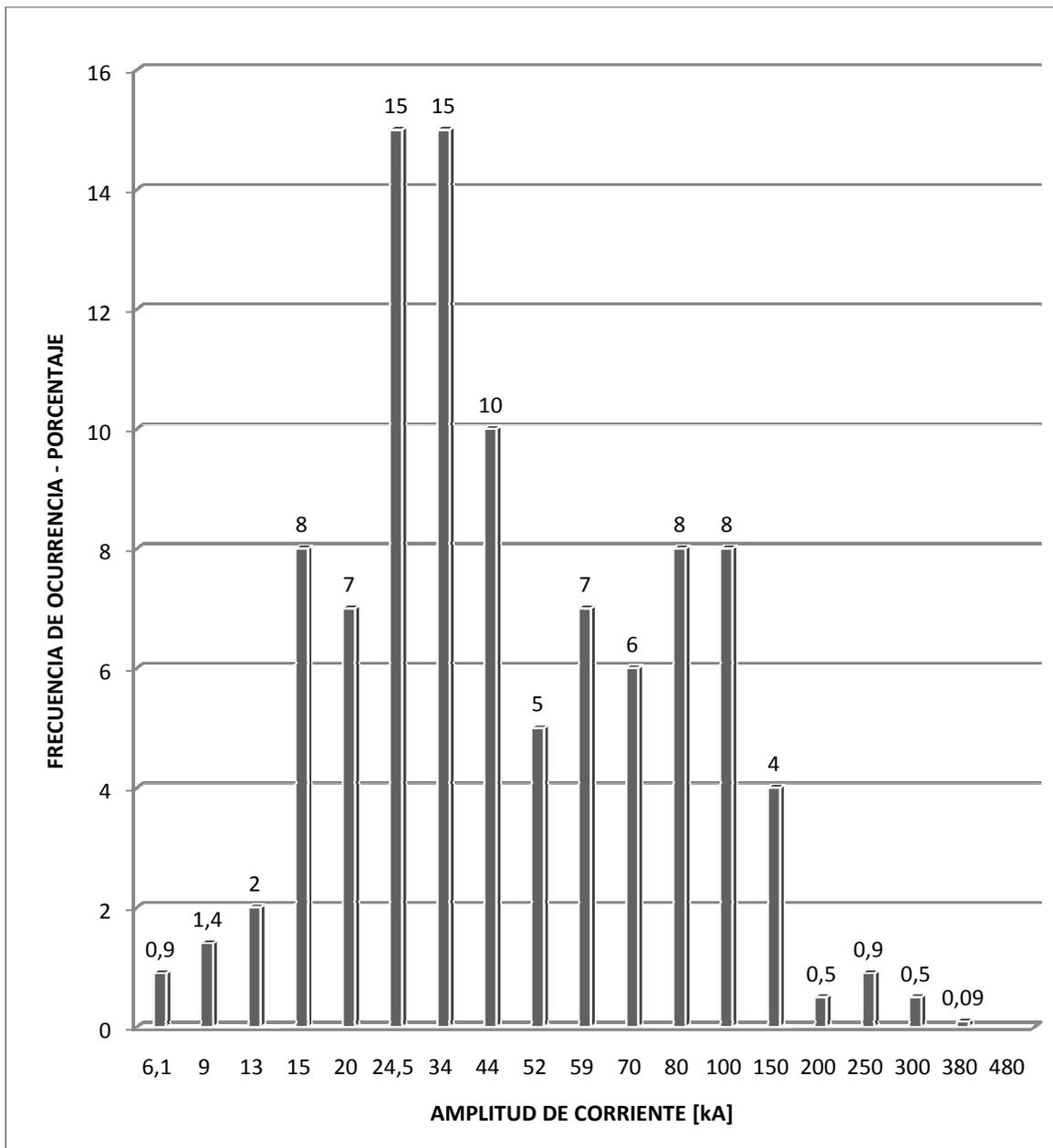


Fuente: Referencia (*16)

Elaborado por: Nataly Correa

FIGURA 3.6

**HISTOGRAMA DE LA FRECUENCIA DE DISTRIBUCIÓN
DE LA CORRIENTE DE RAYOS: DATOS DE HERODOTOU Y OTRO**

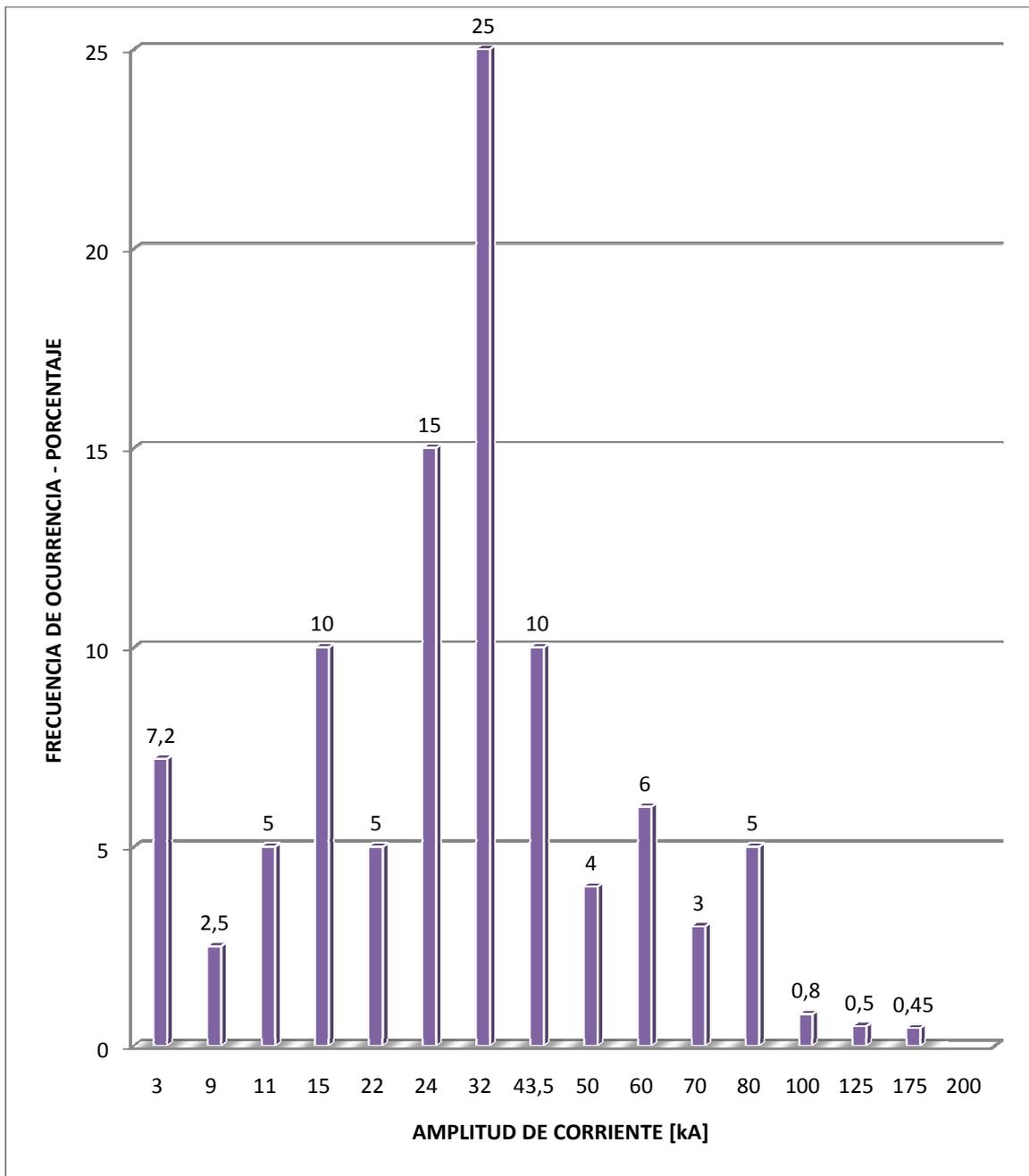


Fuente: Referencia (*16)

Elaborado por: Nataly Correa

FIGURA 3.7

**HISTOGRAMA DE LA FRECUENCIA DE DISTRIBUCIÓN
DE LA CORRIENTE DE RAYOS: DATOS DE LA CIGRÈ**



Fuente: Referencia (*16)

Elaborado por: Nataly Correa

3.2.4 ALGORITMOS DE SOLUCIÓN.

Cada uno de los procesos que realiza el programa tiene su algoritmo. Debido a su "similitud" con el programa D.A.S. no se profundizará en el desarrollo de esta sección, sin embargo se hará una breve explicación de los parámetros más importantes.

3.2.4.1 Ingreso de datos.

Para poder dar paso al diseño del apantallamiento el usuario deberá conocer muy bien la geometría de la línea a la que se va a proteger, y tener muy claro las dimensiones expresadas en coordenadas cartesianas ya que el programa requiere esos datos para arrojar sus resultados.

Como primera instancia el usuario debe saber el número de años que desee será el periodo de estudio, el programa también pide el ingreso de una distancia de seguridad (alrededor del plano expuesto de la L/T), donde serán consideradas como perforaciones a las descargas que caigan dentro de esta distancia, esta tiene una similitud con el área marginal de riesgo de la S/E, sin embargo no maneja el mismo concepto, ya que el líneas de transmisión es considerada como área marginal al radio alrededor de la torre, lo que se busca con el ingreso de esta distancia es ofrecer un margen de seguridad al usuario para que de esta manera el apantallamiento sea realmente efectivo en presencia de las descargas atmosféricas.

Los datos que también se deben tener bien claro son la dimensión del plano expuesto total de la línea, es decir al ancho (en cuanto a fases expuestas) y largo de la línea que se desea proteger, el número de circuitos y el número de tramos en los que se va a dividir a la línea, procurando que los tramos sean tomados en cuenta de acuerdo al nivel cerámico al que se encuentra expuesto, ya que así es como evalúa el programa los datos.

Otros datos que también tienen importancia son la ubicación, en el plano cartesiano, del o los hilos de guarda y los conductores de fase, estos datos son requeridos para la simulación del hilo de guarda y para saber si las descargas que perforaron el apantallamiento caerán en alguna fase o seguirán directo a tierra.

3.2.4.2 Cálculo área protegida (*9).

Una vez ingresados los datos se prosigue con el cálculo del área protegida, y para esto se utiliza la siguiente fórmula:

$$A_P = \left[\int_{I_{min}}^I 2 \cdot L \cdot S_e \cdot h(I) \cdot dI + \int_I^{I_{max}} 2 \cdot L \cdot \sqrt{S_s^2 - (S_e - H)^2} \cdot h(I) \cdot dI \right] \quad [m]^2$$

Los parámetros involucrados en esta ecuación ya fueron definidos en este capítulo.

Para efectos de facilitar el algoritmo de solución, y su codificación, se ha dividido en dos secciones a la ecuación en mención.

$$A_P = (A_{P1} + A_{P2})[m^2] \quad (3.20)$$

Donde:

$$A_{P1} = \left[\int_{I_{min}}^I 2 \cdot L \cdot S_e \cdot h(I) \cdot dI \right] \quad (3.21a)$$

$$A_{P2} = \left[\int_I^{I_{max}} 2 \cdot L \cdot \sqrt{S_s^2 - (S_e - H)^2} \cdot h(I) \cdot dI \right] \quad (3.21b)$$

3.2.4.3 Número de perforaciones en el apantallamiento (fallas).

Para la evaluación del número de las posibles salidas provocadas por la perforación del apantallamiento se utiliza la siguiente expresión, en base al número de descargas incidentes sobre el área analizada y de acuerdo al elemento de protección empleado, en este caso hilo de guarda.

$$Ns = No(A - AP) \times 10^{-6} \quad (3.22)$$

Donde: $A = \text{Área que se desea proteger } (2L \cdot X_p) \text{ [m}^2\text{]}$

$A_p = \text{Área protegida [m}^2\text{]}$

$X_p = \text{Distancia protegida por el hilo de guarda [m]}$

$No = \text{Densidad de descargas a tierra } \left[\frac{\text{descargas}}{\text{km}^2 \cdot \text{año}} \right]$

$(A - A_p) < 0 = \text{Para considerar que se produjeron}$

$\text{Perforaciones del blindaje en [m}^2\text{]}$

3.2.4.4 Punto de Incidencia (*9).

Para evaluar aleatoriamente el punto de incidencia de una descarga, mediante la aplicación del modelo electrogeométrico tridimensional, está basado en el siguiente procedimiento:

3.2.4.4.1 Lectura y asignación de datos generales.

El usuario deberá ingresar un conjunto de datos que serán necesarios conocer para iniciar la simulación. Como primer punto se deberá escoger las ecuaciones que definan a la distancia crítica de arqueo, o en su defecto determinar las que considere sean las apropiadas, luego de esto será necesario que se defina o edite la curva de distribución de probabilidad para la corriente de los rayos a tierra, y por último se requiere proporcionar información sobre las características de la subestación y otros parámetros fundamentales como los siguiente:

- Geometría de la L/T.
- El número de años para la simulación.
- La densidad de descargas a tierra, o en su defecto el nivel cerámico.

Es importante conocer las coordenadas de ubicación del hilo de guarda y de los conductores, los cuales determinarán el plano a proteger, y adicionalmente será necesario conocer la altura de las superficies de exposición, ya que estos datos son esenciales en el desarrollo del programa.

3.2.4.4.2 Hilo de guarda como elemento de protección.

Ahora en cuanto a los elementos de protección, hilo de guarda, se deben definir los cuatro vértices de cada una de las áreas que serán protegidas por el hilo de guarda, y realizar la traslación de estas hacia el centro del área de influencia.

Ubicar las coordenadas de cada uno de los elementos de protección de tal manera que se encuentren referidas al plano dado por el área de influencia, y de hecho sobre cada una de las áreas que se deberían proteger.

3.2.4.4.3 Aleatoriedad.

En base a la curva de distribución de probabilidad escogida, se podrá evaluar todos los posibles valores de corriente con los que ocurrirá un determinado número de descargas, de acuerdo al período de tiempo que se desee analizar. Se inician un grupo de contadores que permitan tener en consideración todo el rango de corrientes que involucre la curva que se está estudiando y se empieza a evaluar con el primer grupo que tenga una corriente "1". Para esto se seguirá los siguientes pasos:

- Se inicializan los contadores que se usarán para llevar la cuenta de todos los eventos.
- Se genera dos números aleatorios para considerar el posible punto de impacto de la descarga con sus coordenadas X_g y Y_g
- Se evalúa la distancia crítica de arqueo para cada descarga involucrada en la simulación, dentro del grupo considerado con una cierta corriente “I”.
- Se determina el punto de corte entre la trayectoria de la descarga y las superficies de exposición o interceptoras para todos los posibles elementos del sistema modelado de acuerdo a lo mencionado anteriormente en este capítulo.
- Se determina la mayor altura de corte de todos los componentes analizados, para así evaluar sobre qué tramo del hilo de guarda terminó la trayectoria de la descarga. En base a este resultado se actualizan los contadores que llevarán la cuenta de las descargas a tierra, aquellas que terminen sobre el hilo de guarda
- Si se han analizado todo el grupo de rayos con una cierta corriente “I”, se actualiza el valor de dicha corriente tomando como base el siguiente grupo que corresponda según la curva de distribución utilizada y se repite el proceso de elemento de protección, de lo contrario se repetirá solo el proceso de aleatoriedad, pero para considerar un nuevo rayo del grupo de análisis y que posee cierta corriente “I”.
- El proceso anterior se repite hasta cubrir todo el rango de posibles corrientes establecidas en la curva de distribución empleada, luego de lo cual se procede a determinar, tomando en cuenta el número de salidas que se produjeron, el período de protección del apantallamiento de la L/T así

como la efectividad del esquema del apantallamiento, en base a las siguientes expresiones:

$$\left\{ \begin{array}{l} T = \frac{1}{Ns/\#años} \\ EA = \frac{Ns}{NSD} \times 100 \end{array} \right. \quad (3.23)$$

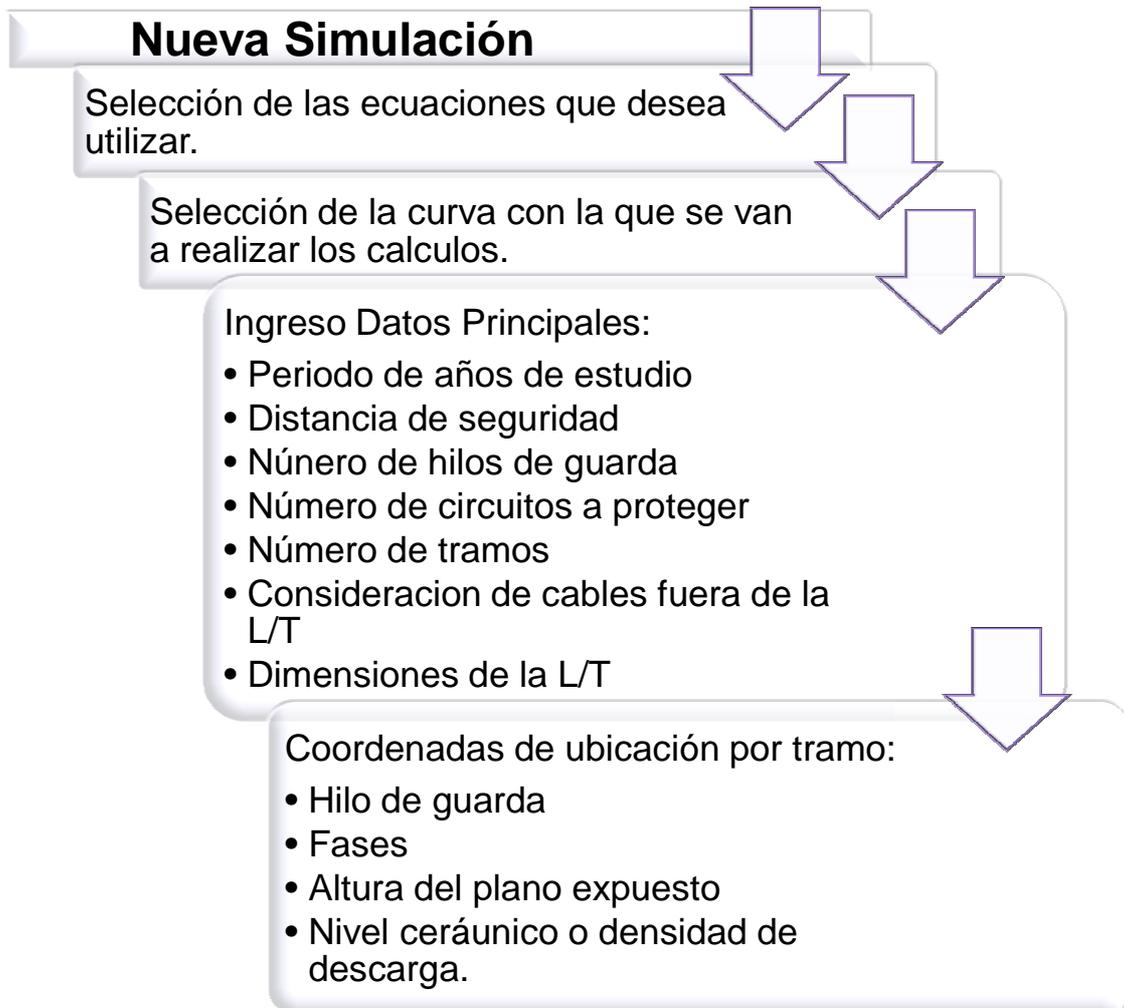
Donde: T = Período de protección del apantallamiento [años]
 Ns = Número de posibles salidas producidas por falla de Apantallamiento.
 #años = Son los años de simulación [años]
 EA = Efectividad del apantallamiento [%]
 NSD = Número de posibles salidas mas el número de descargas interceptadas sobre el área de la L/T.

- Una vez detectadas las corrientes que perforaron el apantallamiento se realizará una simulación con estos valores, para determinar el punto de impacto de estas descargas y así determinar si la descarga caerá en un conductor de fase o pasará directo a tierra.
- Impresión de resultados en forma tabulada sobre las descargas y sus puntos de impacto, así como de las coordenadas de aquellas que posiblemente producirán una salida de la L/T.

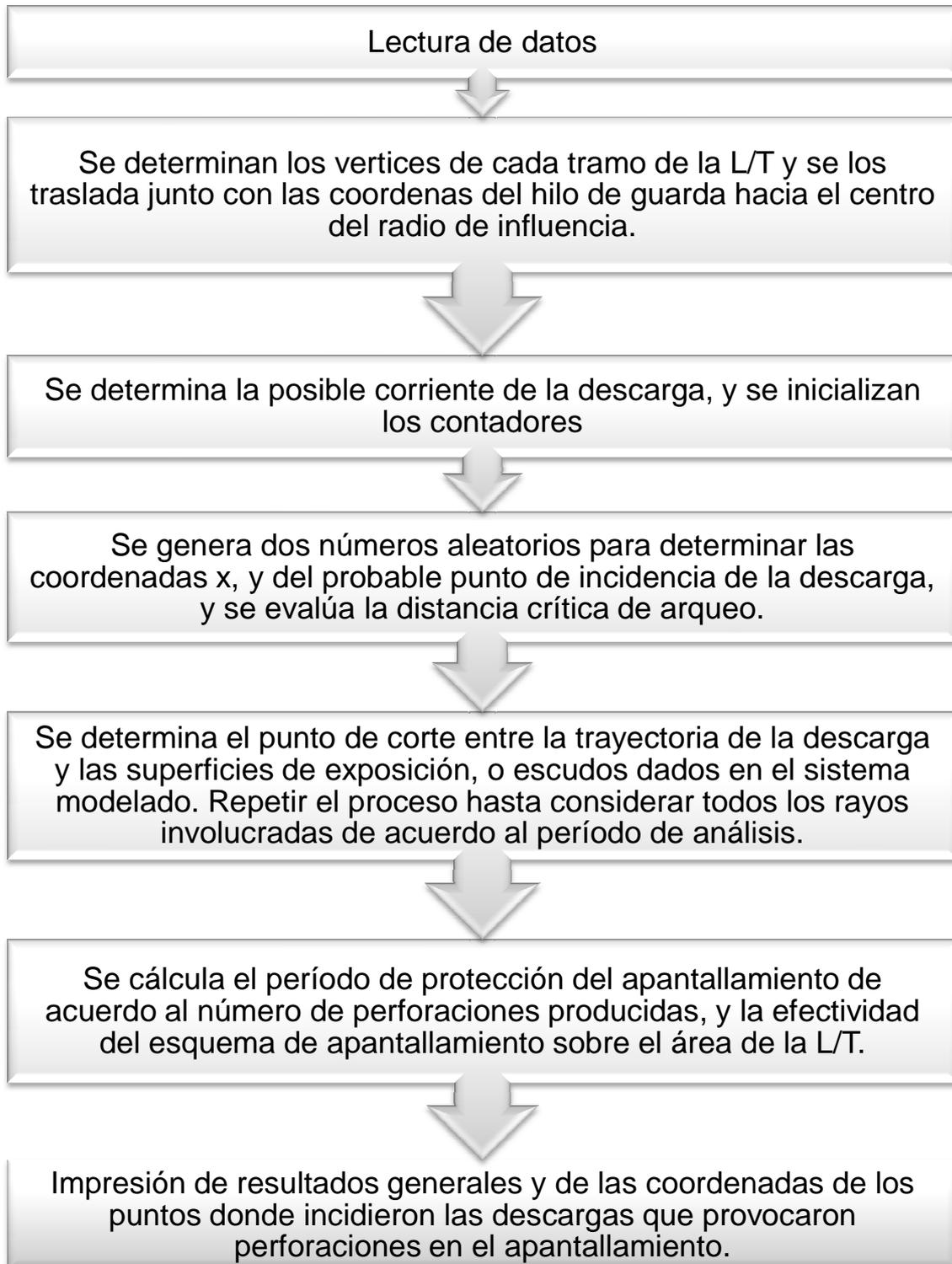
3.2.5

3.2.6 DIAGRAMA DE BLOQUES.

3.2.6.1 Consideraciones generales del programa.



3.2.6.2 Punto de incidencia. (*9)



3.2.7 RESTRICCIONES.

Una restricción es un límite o prohibición al cual está sujeto determinada aplicación, en el caso de este programa la restricción está orientada a ciertos valores de datos que podrían dar alguna falla en los resultados o simplemente no permitan que la simulación se lleve a cabo por encontrarse fuera de rangos de operación del programa.

La finalidad del programa es que este sea lo más amigable posible con el usuario, por esto se ha procurado que las restricciones que posea sean mínimas, sin embargo existen unas pequeñas restricciones que el usuario deberá tomar en cuenta antes del ingreso de datos, para que luego no se encuentre con sorpresas o que le toque ingresar datos nuevamente.

En cuanto a la selección de las ecuaciones que el usuario desee utilizar no existe restricción alguna, ya que el usuario no solo tiene las ecuaciones planteadas por este trabajo, sino que tiene la opción de crear sus propias ecuaciones para que el programa trabaje con ellas, para la selección de la curva de probabilidad se tiene la misma opción, el usuario podrá ingresar su propia curva, así que por el lado de selección de datos se considera que el programa no tiene restricción alguna.

Para el ingreso de datos generales existen unas pequeñas restricciones que hay que tomar en cuenta, el periodo de años de protección de lo posible debe estar en el orden de los miles, ya que si ponemos un periodo de protección menor a 200 años la simulación del programa arroja resultados inútiles debido a que por ser un programa de estudio, basado en probabilidades y aleatoriedades los periodos deben ser grandes, dando lugar a que puedan existir variaciones en el comportamiento. Una restricción que es lógica pero no está demás mencionarla es que el radio de influencia debe ser mayor igual a la longitud de la L/T puesto que este valor delimita el área donde se va a analizar las posibles descargas y por

obvias razones se emplea un radio menor este va a disminuir respuestas ya que no considerara todo la L/T que se desee estudiar sino recortará la misma hasta que se encuentre dentro de su área de estudio.

En cuanto al ingreso de coordenadas no existe restricción alguna, sin embargo el programa no aceptará coordenadas que no tengan congruencia, el ingreso de coordenadas está validado de tal forma que si las coordenadas no son adecuadas la simulación no se llevará a cabo.

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS DE SENSITIVIDAD

4.1 GENERALIDADES

Este capítulo está orientado al análisis de resultados, por tanto para poder desarrollarlo es necesario plantear unos ejemplos en los cuales se puedan hacer las observaciones pertinentes y se pueda sacar las debidas conclusiones.

El análisis de sensibilidad se puede considerar de muchas maneras, es decir, la influencia de ciertos factores, fórmulas, al momento de aplicar el modelo, o la variación en cuanto a geometrías y planteamiento de soluciones de apantallamiento; esta vez se realizará un análisis en cuanto a criterios de apantallamiento, además que se desea dar una pauta al usuario para que tenga una idea más clara de todos los datos que se necesita para el modelo implementado y también del criterio que debe manejar y tener claro en el momento de ingresar los datos.

El criterio que se maneja en el programa está orientado al sobredimensionamiento de apantallamiento, es decir, se maneja el criterio, “es mejor que sobre y no que falte”, es por esto que se tiene una serie de factores que van a permitir que el usuario pueda probar todas y cada una de las posibilidades que se le ocurran, sin embargo hay que tener muy claro que las soluciones planteadas tienen que ser económicamente sustentables, esto quiere decir que el Ingeniero diseñador debe plantear soluciones que estén dentro del presupuesto del proyecto, sin embargo al trabajar con torres no existen mayores dificultades ya que estas son fabricadas bajo pedido, pero es importante tener en cuenta que hay modelos y rangos con los que se pueden jugar y otros que están ya determinados y no casi no tienen variaciones posibles, como es el caso de la separación de fases en la L/T. Esta se va a dividir en tramos, lo cual tiene similitud con los criterios para el

apantallamiento de las S/E, pues los tramos vienen a ser las sub-áreas en las que se dividirá a la L/T

Cabe mencionar que aun siendo importante presentar el efecto resultante del empleo de las diferentes ecuaciones y curvas, mencionadas en este proyecto, no serán analizados, ya que en la referencia *9 existe un análisis detallado de estos efectos, por tanto no tiene sentido redundar con este tema.

4.2 INFLUENCIA DE LA DISPOSICIÓN DE LAS FASES.

Una L/T no necesariamente es simétrica, tampoco tiene la obligación de poseer las mismas estructuras (geometría), ni mucho menos de tener sólo un hilo de guarda en toda su trayectoria, es por eso que es importante tomar en cuenta la disposición de las fases al momento de plantear un apantallamiento, hay que tomar en cuenta que no necesariamente la o las fases más expuestas serán la que delimiten el plano de exposición y altura del mismo, estos son criterios que deben manejarse de la manera más apropiada para que el apantallamiento sea lo más efectivo posible, sin embargo eso queda a criterio del Ingeniero diseñador.

4.2.1 EJEMPLO 1.

Ahora bien, se tiene una línea de 138kV que en toda su trayectoria tiene una estructura tipo, como se muestra en la figura 4.1, además que se van a considerar los siguientes datos para realizar la simulación, los datos planteados se han escogido de tal manera que nos permita analizar la influencia de la disposición de las fases.

Datos:

Período de análisis: 200 [años]

Longitud de la L/T: 20 [km]

Radio de influencia: 20,1 [km]

Distancia de seguridad: 5[m]

Número de circuitos: 1

Número de hilos de guarda: 1

Número de tramos: 3

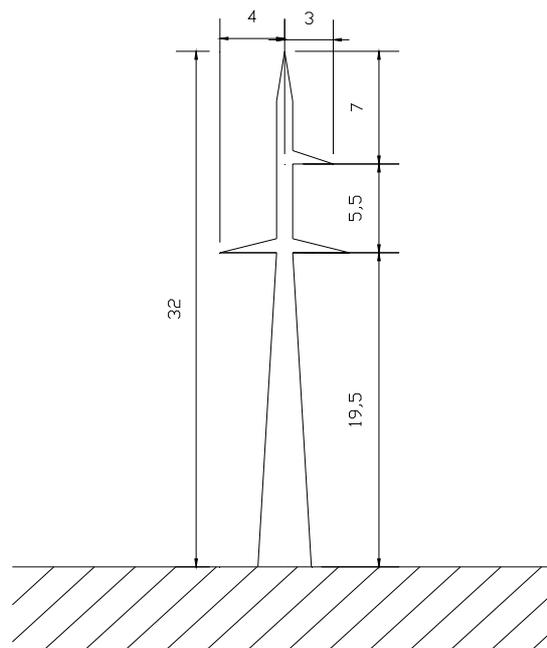
1º. Tramo: Longitud: 5 [km]
N_C: 25 y C: 0,1

2º. Tramo: Longitud: 7 [km]
N_C: 40 y C: 0,1

3º. Tramo: Longitud: 8 [km]
N_C: 30 y C: 0,1

FIGURA 4.1

ESTRUCTURA TIPO, EJEMPLO PLANTEADO



Fuente: Referencia (*15)

Elaborado por: Nataly Correa

Para el desarrollo de este ejemplo en el programa hay que conocer el sistema de coordenadas que se está empleando, pues de lo contrario los datos serán mal ingresados.

FIGURA 4.2

ANÁLISIS DE LA GEOMETRÍA DE LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN A MODELARSE



SIMBOLOGÍA:

-  **ÁREA DE SEGURIDAD**
-  **HILO DE GUARDA**
-  **FASES**
-  **DIVISIÓN TRAMOS**
-  **LÍNEAS DE CORTE**

Fuente: Referencia (*9)

Elaborado por: Nataly Correa

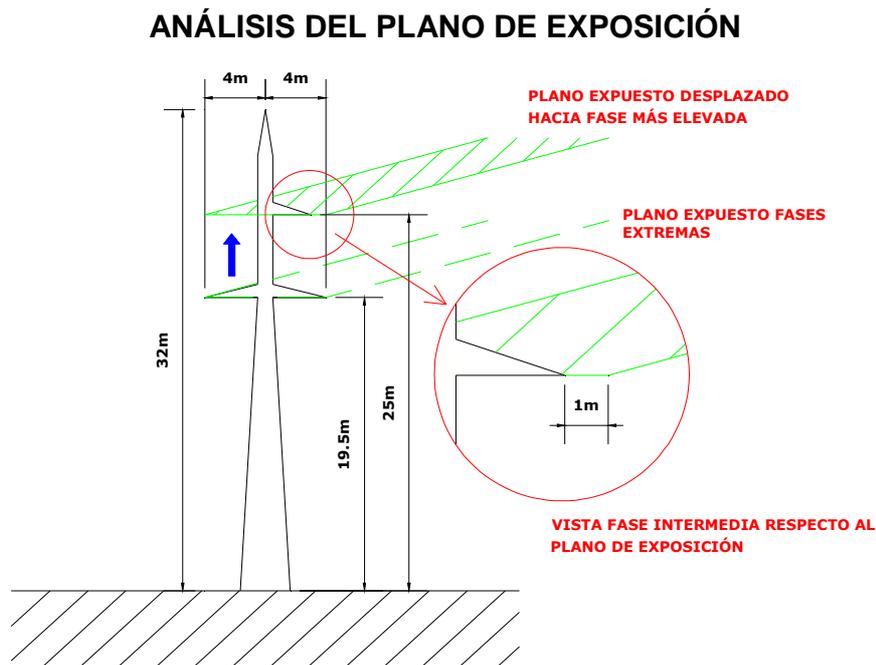
La figura 4.1 tiene todos los datos necesarios para elaborar un esquema de apantallamiento según la geometría de la línea, es por esto que se puede elaborar el diagrama que se muestra en la figura 4.2, pero hay que hacer cierta aclaración para tener claro como se están manejando los ejes de coordenadas en el programa, las coordenadas están orientadas de la siguiente manera, se tiene que, el largo de la línea o en su defecto del tramo, está en el eje de las “x”, el ancho de la línea o del plano expuesto (formado entre las fases más expuestas más el área de seguridad) está en el eje de las “y”, y lo referente a alturas de conductores o plano de exposición está en el eje de las “z”.

Ya teniendo claro la explicación sobre los ejes de coordenadas, se procede a hacer el análisis del plano de exposición y su altura correspondiente (según mi criterio), al observar la figura 4.1 se distingue que la disposición de las fases es asimétrica teniendo que las fases más expuestas (extremos) son A y C (según el programa), pero la fase más elevada es la fase B, aun siendo muy poca la diferencia entre las distancias de separación de las fases expuestas y la fase “intermedia” con respecto a la torre, siempre hay que tener muy presente lo que se desea proteger, en este caso las fases, y por tanto mi criterio es que el ancho del área expuesta las delimitarán las fases A, C, y la altura del plano será determinado por la fase más elevada, protegiendo de esta manera las 3 fases de la mejor manera, aun cuando existe una distancia de seguridad, es preferible determinar bien el área de exposición. (Ver figura 4.3)

Es importante mencionar que el Ingeniero diseñador es el que tiene la última palabra en cuanto la interpretación de la geometría de la línea para el ingreso de datos, sin embargo, el análisis que se está presentando, como se mencionó en el inicio de este capítulo, tiene tendencia al sobredimensionamiento del apantallamiento para evitar de una manera más eficaz las descargas atmosféricas directas a las fases.

El programa pide los datos de las coordenadas de cada fase, pero esto no quiere decir que este escoja arbitrariamente el plano expuesto, es el usuario el que determinará altura del plano expuesto y las coordenadas que delimitaran el mismo.

FIGURA 4.3



Para que todo quede claro se va a presentar una tabla de coordenadas en cuanto a ubicación de los conductores (ver tabla 4.1), la ubicación de los mismos será por tramo de L/T, para ratificar la disposición de los ejes de coordenadas antes expuestos, para esto se debe tomar en cuenta las dos figuras antes mostradas, ya que la unión de las dos determina todas las coordenadas.

Es recomendable que se realicen los gráficos antes expuestos para tener claras las coordenadas y poder ingresar los datos, en este ejemplo se dividió en tramos a

la línea tomando en cuenta el nivel cerámico al que se encontraba expuesta la L/T.

DATOS EJEMPLO:

Período de análisis: 200 [años]

Radio de influencia: 20,1 [km]

Distancia de seguridad: 5[m]

Número de circuitos: 1

Número de hilos de guarda: 1

Número de tramos: 3

1. Tramo: Longitud: 5 [km]

NC: 25 y C: 0,1

2. Tramo: Longitud: 7 [km]

NC: 40 y C: 0,1

3. Tramo: Longitud: 8 [km]

NC: 30 y C: 0,1

TABLA 4.1

**TABLA DE COORDENADAS DE
UBICACIÓN DE LOS CONDUCTORES**

		<u>PUNTO INICIAL</u>			<u>PUNTO FINAL</u>		
		X [m]	Y [m]	Z [m]	X [m]	Y [m]	Z [m]
TRAMO 1	HILO DE GUARDA	0	4	32	5000	4	32
	FASE A	0	0	19.5	5000	0	19.5
	FASE B	0	1	25	5000	1	25
	FASE C	0	8	19.5	5000	8	19.5
TRAMO 2	HILO DE GUARDA	5000	4	32	12000	4	32

	FASE A	5000	0	19.5	12000	0	19.5
	FASE B	5000	1	25	12000	1	25
	FASE C	5000	8	19.5	12000	8	19.5
TRAMO 3	HILO DE GUARDA	12000	4	32	20000	4	32
	FASE A	12000	0	19.5	20000	0	19.5
	FASE B	12000	1	25	20000	1	25
	FASE C	12000	8	19.5	20000	8	19.5

Fuente: Figuras 4.2 y 4.3

Elaborado por: Nataly Correa

Ya con los datos de ingreso totalmente claros se procede al ingreso, para luego pasar a la simulación y pasar a los resultados.

4.2.2 EJEMPLO 2.

En el ejemplo que se va a presentar a continuación se tiene una L/T de 69kV, la cual se va subdividir en 2 tramos, esta subdivisión se hará por geometría de la línea, mas no por nivel cerámico, en la figura 4.4 se puede ver las estructuras que se van a utilizar en la L/T.

Datos:

- Período de análisis: 1000 [años]
- Longitud de la L/T: 10 [km]
- Radio de influencia: 12 [km]
- Distancia de seguridad: 5 [m]
- Número de circuitos: 1
- Número de hilos de guarda: 1
- Densidad de descarga: 3,5

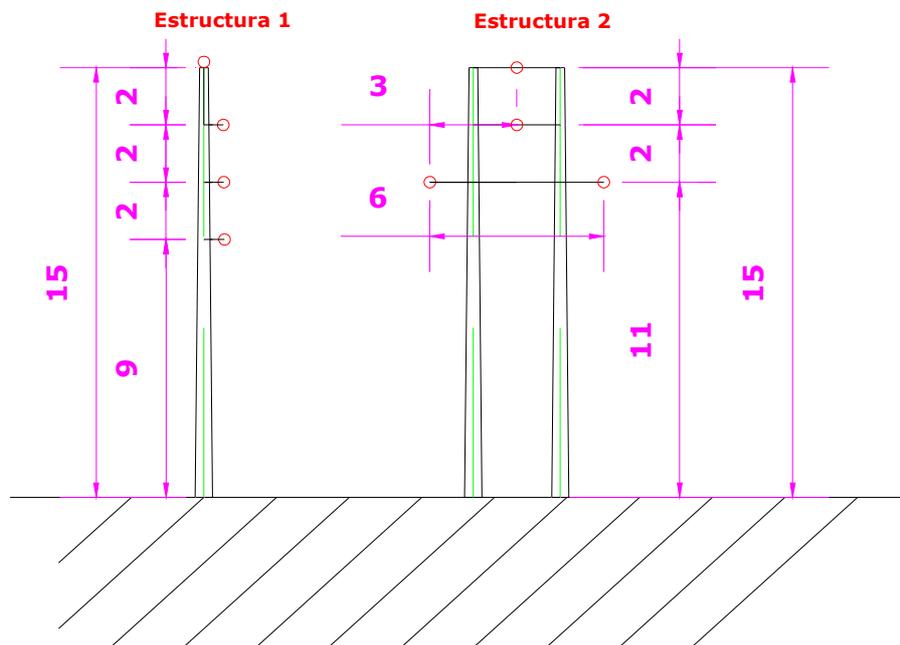
Número de tramos: 2

1º. Tramo: Longitud: 3km
Estructura 1

2º. Tramo Longitud: 7km
Estructura 2

FIGURA 4.4

ESTRUCTURAS TIPO PARA EJEMPLO



Fuente: Referencia (*15)

Elaborado por: Nataly Correa

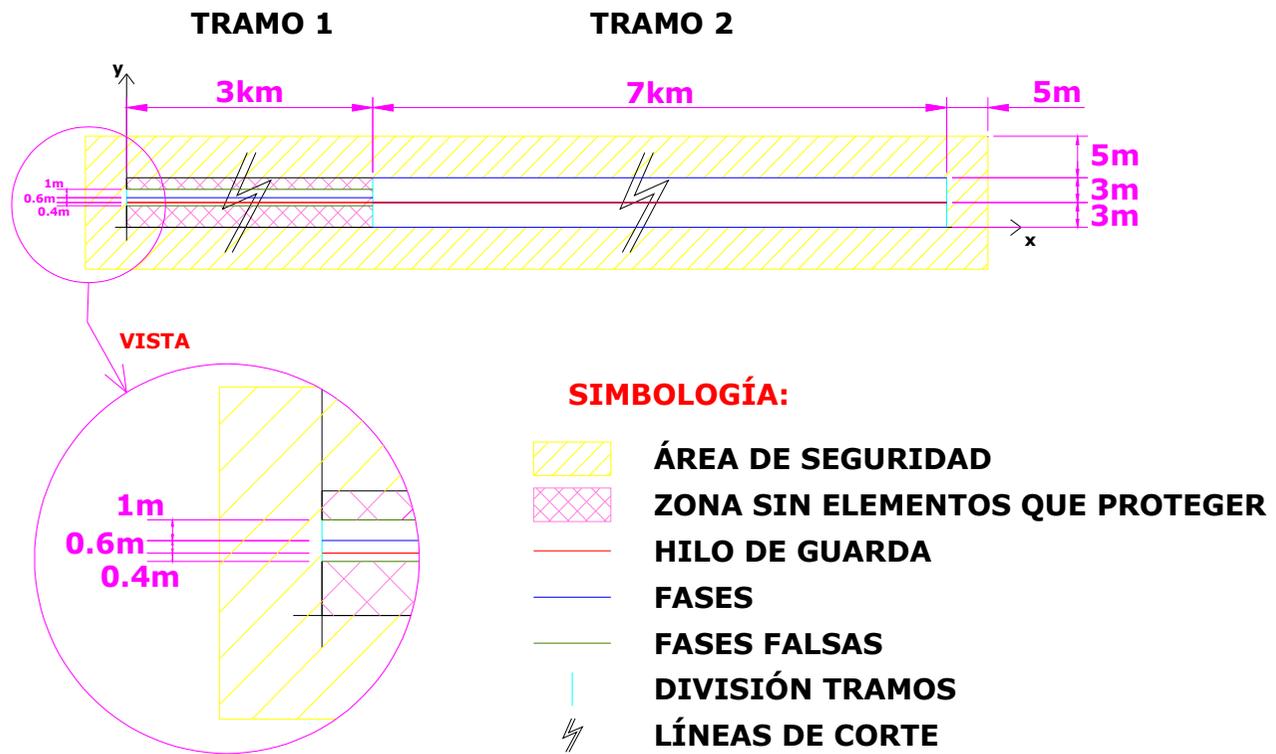
En este ejemplo se puede ver claramente que en la estructura 1 de la figura 4.3 no se tiene un plano expuesto como tal, pues las fases se encuentran ubicados en disposición vertical una sobre otra, por tanto se puede dar al plano un ancho de 1[m] a cada lado del hilo de guarda, tomando en cuenta el diámetro de las fases se podría poner un ancho relacionado, pero este sería demasiado pequeño en comparación al plano expuesto que se presentará en la estructura 2, entonces un metro es una medida estándar y con la que se puede trabajar sin ningún problema en este caso, como en el ejemplo anterior se va a proceder a hacer el respectivo

análisis considerando la geometría de las estructuras, las cuales están dando la geometría a la red, así se tiene que en la figura 4.5 se podrá ver cómo afecta la geometría de la línea para el planteo del apantallamiento, este ejemplo fue considerado puesto que existen líneas que tienen torres con diferentes geometrías, ubicadas de acuerdo al lugar o espacio disponible para la torre, tomando en cuenta que antes se hizo un análisis correspondiente de la ruta y que las distancias entre fases por lo general no cambian, hay que mencionar y recalcar que para la utilización del programa que se presenta en este trabajo es muy importante hacer primero este análisis de geometría de la L/T, ya que este dará la pauta para el ingreso de coordenadas y al ser considerado mal un tramo o ingresada mal una coordenada la simulación no correrá o en su defecto arrojará resultados con error y deberá ingresar nuevamente todos los datos.

Al mirar la figura 4.5 se puede dar cuenta muy claramente de la importancia que tiene hacer este análisis antes de ingresar los datos, pues bien ahora viene la explicación respectiva, en primera instancia se va a mencionar la expresión “fases falsas” que debe ser la que llama más la atención, como se dijo en párrafo anterior se va a tomar un valor de un metro a cada lado de las fases para poder delimitar el plano expuesto en este tramo, sin embargo el ingeniero diseñador es libre de ingresar las fases tal cual se encuentran ubicadas, pero eso sí, tomando en cuenta que es estrictamente necesario delimitar un plano y para esto es obligatorio que una de las fases sea desplazada un poco de sus coordenadas originales, pero sólo para los análisis pertinentes, en el mismo tramo se puede observar una zona sin elementos que proteger, esta zona ha sido llamada así ya que se encuentra dentro del área de la L/T como tal, pero no está cumpliendo la función de proteger a ningún elemento, las dimensiones de la L/T deben ser consideradas como el largo por el mayor ancho que exista en toda la trayectoria de la misma, y a partir de esta se deberá considerar las coordenadas de ubicación de todos los elementos.

FIGURA 4.5

ANÁLISIS DE LA GEOMETRÍA DE
LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN A MODELARSE



Fuente: Referencia (*15)

Elaborado por: Nataly Correa

Como se puede observar muy claramente en la figura 4.5, en el tramo 1 no se tiene una geometría para nada simétrica y en cambio en el tramo 2 se tiene una geometría simétrica con la que no existe mayor dificultad en la interpretación de datos y mucho menos existiría alguna dificultad para la ubicación de los elementos mediante las coordenadas, en este caso muy particular del tramo 2 no es necesario realizar un análisis tan profundo de la geometría de la línea ya que solo basta con tener presente la disposición de las fases y las coordenadas de ubicación casi saldrán solas.

Para el análisis del plano expuesto no necesariamente se debe recurrir a un gráfico ya que el principio aplicado es el mismo que en el ejemplo anterior, sin embargo en los dos tramos es fácil distinguir la mayor altura de los elementos que se desea proteger, en este caso las fases, para el tramo 1 en base al análisis de la delimitación del plano expuesto (figura 4.5) ya se tiene clara la idea de cómo está dispuesto dicho plano, ahora es necesario determinar la altura de este, pues bien, en este tramo se tiene las fases ubicadas una sobre otra (figura 4.4) por lo tanto la altura del tramo expuesto corresponderá a la altura de la fase más elevada, al estar ubicadas una sobre otra se puede decir que la fase más elevada está protegiendo a las fases inferiores por tanto es esta la que necesita la mayor protección; para el tramo 2 la determinación de la altura del plano expuesto se torna un poco más fácil, ya que se tiene una estructura simétrica y esto ayuda muchísimo, pues tiene todos sus parámetros muy claros, sin dar lugar a muchas confusiones ya que se tiene clarísimo cuales son las fases más expuestas en cuanto a delimitación del plano así como también se conoce la altura del elemento más elevado que se desea proteger y al ser simétrica no existe mayor análisis que hacer, puesto que delimitando el plano y considerando la altura de la fase más elevada se puede decir que nuestras fases estarán protegidas del todo. Ya con los análisis ahora se plantean las coordenadas de ubicación (Tabla 4.2).

Datos Ejemplo

Período de análisis: 1000 [años]

Longitud de la L/T: 10 [km]

Radio de influencia: 12 [km]

Distancia de seguridad: 5 [m]

Número de circuitos: 1

Número de hilos de guarda: 1

Densidad de descarga: 3,5

Número de tramos: 2

1º. Tramo: Longitud: 3km
Estructura 1

2º. Tramo Longitud: 7km
Estructura 2

TABLA 4.2

**TABLA DE COORDENADAS DE
UBICACIÓN DE LOS CONDUCTORES**

		<u>PUNTO INICIAL</u>			<u>PUNTO FINAL</u>		
		X [m]	Y [m]	Z [m]	X [m]	Y [m]	Z [m]
TRAMO 1	HILO DE GUARDA	0	3	15	3000	3	15
	FASE A	0	2.6	9	3000	2.6	9
	FASE B	0	3.6	11	3000	3.6	11
	FASE C	0	4.6	13	3000	4.6	13
TRAMO 2	HILO DE GUARDA	3000	3	15	10000	3	15
	FASE A	3000	0	11	10000	0	11
	FASE B	3000	3	13	10000	3	13
	FASE C	3000	6	11	10000	6	11

Fuente: Figuras 4.4 y 4.5

Elaborado por: Nataly Correa

El ejemplo analizado está basado en el hecho de que Ecuador es un país que tiene tanta diversidad de alturas (s.n.m), climas, fauna, flora, aunque no lo parezca, todos esos factores y más influyen en el momento de hacer el trazado de una L/T y más al momento de empezar con la construcción se van presentando una serie de vicisitudes (ya consideradas en el diseño) que hacen que la línea se vea obligada a tener diferentes tipos de estructuras y por tanto de geometrías a lo largo de toda su trayectoria.

4.2.3 EJEMPLO 3.

El ejemplo que se plantea a continuación está orientado para poder realizar una pequeña comparación de resultados entre el programa D.A.S. y el programa D.A.L.T., programa resultante de este trabajo, es por esto que el planteamiento no está dado como los ejemplos anteriores, sino está orientado más hacia los datos que necesita el D.A.S. y los demás datos que necesita el programa D.A.L.T. serán ingresados de acuerdo al criterio que se desee, en este caso solo una ubicación de fases dentro del plano de exposición.

Datos: Período de análisis: 2000 [años]
 Longitud de la L/T: 4,5 [km]
 Radio de influencia: 5000 [km]
 Distancia de seguridad: 10 [m]
 Número de circuitos: 2 Número de hilos de guarda: 1
 Número de tramos: 5 (En D.A.S. 5 hilos de guarda)
 N_c: 80 y C: 0.2 Dimensión de la L/T= 4500 x 22[m]

1º. Coordenadas Tramo:

Hilo de guarda:	x [m]	y [m]	z [m]
Pto. Inicial:	0	11	33
Pto. Final:	1000	11	33

Plano expuesto: **X [m] Y [m]**

P1 0 1

P2 0 21

P3 1000 21

P4 1000 1

Altura plano expuesto: 30 [m]

2º. Coordenadas Tramo:

Hilo de guarda: **x [m] y [m] z [m]**

Pto. Inicial: 1000 11 33

Pto. Final: 2000 11 33

Plano expuesto: **X [m] Y [m]**

P1 1000 1

P2 1000 21

P3 2000 21

P4 2000 1

Altura plano expuesto: 31[m]

3º. Coordenadas Tramo:

Hilo de guarda: **x [m] y [m] z [m]**

Pto. Inicial: 2000 11 33

Pto. Final: 3000 11 33

Plano expuesto: **X [m] Y [m]**

P1 2000 0

P2 2000 22

P3 3000 22

P4 3000 0

Altura plano expuesto: 32 [m]

4°. Coordenadas Tramo:

Hilo de guarda:	x [m]	y [m]	z [m]
-----------------	--------------	--------------	--------------

Pto. Inicial:	3000	11	33
----------------------	------	----	----

Pto. Final:	4000	11	33
--------------------	------	----	----

Plano expuesto:	X [m]	Y [m]
-----------------	--------------	--------------

P1	3000	1
-----------	------	---

P2	3000	21
-----------	------	----

P3	4000	21
-----------	------	----

P4	4000	1
-----------	------	---

Altura plano expuesto:	31 [m]
------------------------	--------

5°. Coordenadas Tramo:

Hilo de guarda:	x [m]	y [m]	z [m]
-----------------	--------------	--------------	--------------

Pto. Inicial:	4000	11	33
----------------------	------	----	----

Pto. Final:	4500	11	33
--------------------	------	----	----

Plano expuesto:	X [m]	Y [m]
-----------------	--------------	--------------

P1	4000	1
-----------	------	---

P2	4000	21
-----------	------	----

P3	4500	21
-----------	------	----

P4	4500	1
-----------	------	---

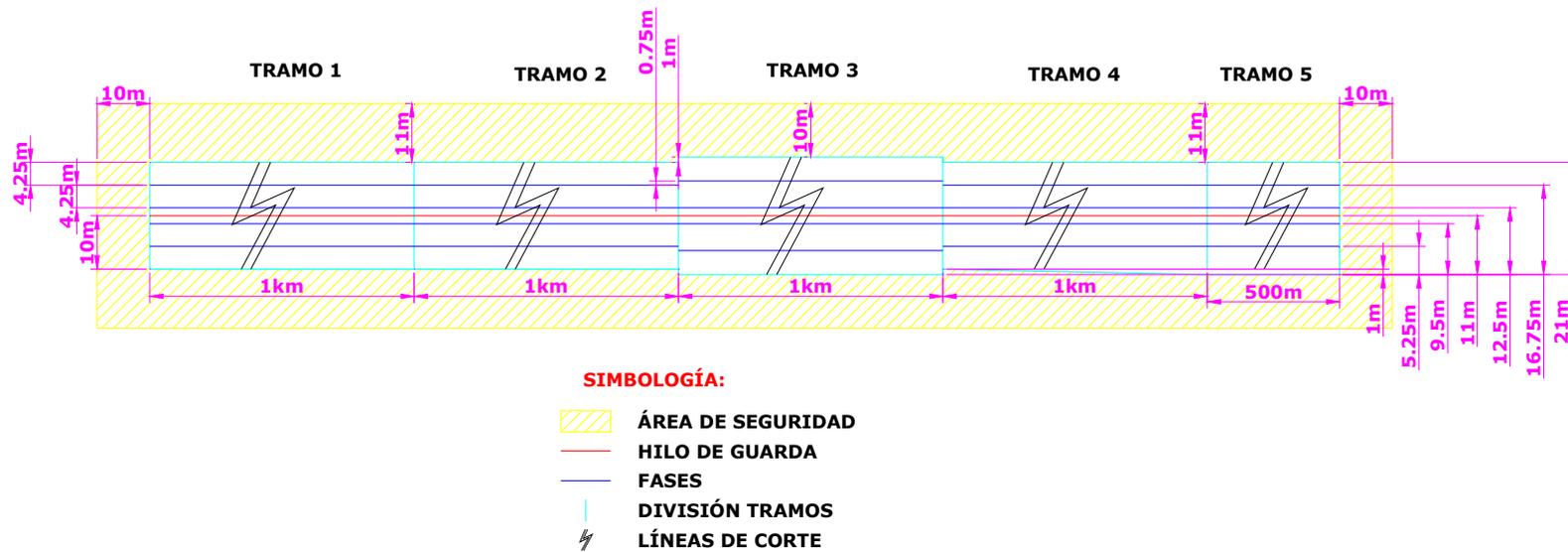
Altura plano expuesto:	31[m]
------------------------	-------

En este ejemplo no hace falta hacer ningún análisis para el ingreso de datos, solamente hacer una interpretación, pero si hay que tomar en cuenta que hay datos que el D.A.L.T. requiere como son las coordenadas de las fases, lo cual no está planteado en el problema, sin embargo esta como dato que se trata de una línea de doble circuito, por tanto se sabe que se deberá tomar valores de

ubicación para 6 fases dentro del plano expuesto, ya que en esos puntos se está delimitando el área que se va a proteger.

FIGURA 4.6

ANÁLISIS DE LA GEOMETRÍA DE LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN A MODELARSE



Fuente: Referencia (*15)

Elaborado por: Nataly Correa

Aparentemente los datos están claros en este ejemplo, y se encuentran listos para ser ingresados y simulados, sin embargo hay que hacer un pequeño análisis para determinar la ubicación de las fases (figura 4.6) como en este ejemplo se presenta un plano expuesto mediante coordenadas hay que ubicar los dos circuitos dentro de ese plano expuesto y eso es lo que se está haciendo en la figura 4.6, se ha planteado una L/T doble circuito simétrica para facilitar el ingreso de datos.

La altura del plano expuesto está planteada en el ejemplo así que se va a tomar como que todas las fases se encuentran a la altura del plano expuesto y se va a proceder a hacer la tabla de ubicación de coordenadas de cada elemento, para ingresar los datos hay que tomar muy en cuenta cuales son las fases que delimitaran el plano expuesto, ya que el plano expuesto probablemente se formará entre una fase del circuito 1 y otra fase del circuito 2.

TABLA 4.3

**TABLA DE COORDENADAS DE
UBICACIÓN DE LOS CONDUCTORES**

		<u>PUNTO INICIAL</u>			<u>PUNTO FINAL</u>		
		X [m]	Y [m]	Z [m]	X [m]	Y [m]	Z [m]
TRAMO 1	HILO DE GUARDA	0	11	33	1000	11	33
	FASE A ₁	0	1	30	1000	1	30
	FASE B ₁	0	5,25	30	1000	5,25	30
	FASE C ₁	0	9,5	30	1000	9,5	30
	FASE A ₂	0	12,5	30	1000	12,5	30
	FASE B ₂	0	16,75	30	1000	16,75	30
	FASE C ₂	0	21	30	1000	21	30

TRAMO 2	HILO DE GUARDA	1000	11	33	2000	11	33
	FASE A ₁	1000	1	31	2000	1	31
	FASE B ₁	1000	5,25	31	2000	5,25	31
	FASE C ₁	1000	9,5	31	2000	9,5	31
	FASE A ₂	1000	12,5	31	2000	12,5	31
	FASE B ₂	1000	16,75	31	2000	16,75	31
	FASE C ₂	1000	21	31	2000	21	31
TRAMO 3	HILO DE GUARDA	2000	11	33	3000	11	33
	FASE A ₁	2000	0	32	3000	0	32
	FASE B ₁	2000	6	32	3000	6	32
	FASE C ₁	2000	9,25	32	3000	9,25	32
	FASE A ₂	2000	12,5	32	3000	12,5	32
	FASE B ₂	2000	17,5	32	3000	17,5	32
	FASE C ₂	2000	22	32	3000	22	32
TRAMO 4	HILO DE GUARDA	3000	11	33	4000	11	33
	FASE A ₁	3000	1	31	4000	1	31
	FASE B ₁	3000	5,25	31	4000	5,25	31
	FASE C ₁	3000	9,5	31	4000	9,5	31
	FASE A ₂	3000	12,5	31	4000	12,5	31
	FASE B ₂	3000	16,75	31	4000	16,75	31
	FASE C ₂	3000	21	31	4000	21	31

TRAMO 5	HILO DE GUARDA	4000	11	33	4500	11	33
	FASE A ₁	4000	1	31	4500	1	31
	FASE B ₁	4000	5,25	31	4500	5,25	31
	FASE C ₁	4000	9,5	31	4500	9,5	31
	FASE A ₂	4000	12,5	31	4500	12,5	31
	FASE B ₂	4000	16,75	31	4500	16,75	31
	FASE C ₂	4000	21	31	4500	21	31

Fuente: Figuras 4.5

Elaborado por: Nataly Correa

Al fijarse en los datos de las coordenadas de ubicación se puede observar claramente que lo único que se hizo es ubicar las fases dentro del plano expuesto que fue dado como dato, es por esto que el mismo ejemplo puede ser simulado en el programa D.A.S., considerando simplemente aéreas que se desea proteger con hilos de guarda, haciendo que la L/T sea una S/E larga.

Cada uno de los ejemplos maneja distintos datos y criterios, es por esto que cada uno de ellos puede ser interpretado de diferente manera de acuerdo con lo que se esté buscando en cada caso.

4.2.4 EJEMPLO 4.

Para fines de comparación se propone el siguiente ejemplo, con el cual se va a tomar en cuenta los siguientes casos:

1. Curva de IEEE con la Curva de CIGRÉ.
2. Curva de IEEE con la Curva de UMAN.

3. Curva de IEEE con la Curva de EXPONENCIAL.
4. Curva de A. MOUSA con la Curva de CIGRÉ.
5. Curva de A. MOUSA con la Curva de UMAN.
6. Curva de A. MOUSA con la Curva de EXPONENCIAL.
7. Curva de BROWN Y WHITEHEAD con la Curva de CIGRÉ.
8. Curva de BROWN Y WHITEHEAD con la Curva de UMAN.
9. Curva de BROWN Y WHITEHEAD con la Curva de EXPONENCIAL.

FIGURA 4.7

**ANÁLISIS DE LA GEOMETRÍA DE
LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN A MODELARSE**



SIMBOLOGÍA:

	ÁREA DE SEGURIDAD
	HILO DE GUARDA
	FASES
	DIVISIÓN TRAMOS
	LÍNEAS DE CORTE

Fuente: Nataly Correa

Elaborado por: Nataly Correa

Datos Ejemplo

Período de análisis: 3000 [años]

Longitud de la L/T: 7 [km]

Radio de influencia: 8 [km]

Distancia de seguridad: 20 [m]

Número de circuitos: 1

Número de hilos de guarda: 1

Densidad de descarga: 4

TABLA 4.4

**TABLA DE COORDENADAS DE
UBICACIÓN DE LOS CONDUCTORES**

		<u>PUNTO INICIAL</u>			<u>PUNTO FINAL</u>		
		X [m]	Y [m]	Z [m]	X [m]	Y [m]	Z [m]
TRAMO 1	HILO DE GUARDA	0	3	15	7000	3	15
	FASE A	0	0	11	7000	0	11
	FASE B	0	3	13	7000	3	13
	FASE C	0	6	11	7000	6	11

Fuente: Figura 4.7

Elaborado por: Nataly Correa

Con este ejemplo se busca determinar de qué manera influye cada curva y cada ecuación que se emplea en el programa, y con esto el usuario tendrá una idea de que curva o ecuación le conviene utilizar según los requerimientos que posea.

4.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS

En esta sección se va a analizar los resultados que arroja el programa con los datos que se plantearon en el análisis anterior, y según esto se variarán ciertos datos hasta conseguir resultados que en cierto modo sean de utilidad, puesto que lo que se desea es conseguir un resultado que nos diga cuál será el período de

protección con el que se cuenta en la L/T, ya que no sólo se desea probar efectividad del diseño del apantallamiento, es decir, aquí lo que se quiere es que haya fallas. (Las tablas de resultados correspondientes se encuentran en los anexos)

4.3.1 EJEMPLO 1.

En este ejemplo se utilizó las ecuaciones planteadas por la IEE y la curva de distribución de probabilidad de CIGRÈ, luego se procedió a ingresar todos los datos mencionados en el análisis y se obtuvo los resultados mostrados en el anexo 1 (Figura A.1), estos arrojaron una eficiencia del 100% lo cual indica que el apantallamiento no fallará, pero como se mencionó anteriormente lo que se desea es tener el periodo de protección de este apantallamiento, por lo que para obtener el resultado deseado se va a aumentar el período de estudio a 20000 años, y la distancia de seguridad a 5m esperando que con estos cambios nos de fallas en el sistema y así determinar el período de protección de esta línea; al mirar el anexo 1 (Figura A.2) se puede ver que se obtuvo el resultado requerido, el período de protección para el apantallamiento es de 2,6 años, lo cual tomando en cuenta que se trata de una L/T de una distancia relativamente grande es un valor aceptable, y la efectividad del sistema es de 19,05%.

4.3.2 EJEMPLO 2.

En este ejemplo se utilizó las ecuaciones planteadas por la Brown y Whitehead y la curva de distribución de probabilidad de CIGRÈ, luego se procedió a ingresar todos los datos mencionados en el análisis y se obtuvo los resultados mostrados en el anexo 2 (Figura A.3), estos arrojaron una eficiencia del 100% lo cual indica que el apantallamiento no fallará, pero al igual que en el ejemplo anterior se va a aumentar el período de estudio a 15000 años, y la distancia de seguridad va a ser 10m, así se podrá determinar el período de protección de esta línea; al mirar el

anexo 2 (Figura A.4) se puede ver que se obtuvo el resultado requerido, el período de protección para el apantallamiento es de 1071 años aproximadamente, lo cual es un valor muy alto, pero considerando que se trata de una línea de distancia media y muy angosta es un valor aceptable, sin embargo se podría variar nuevamente el período de estudio o algún otro parámetro que se desee para obtener un valor más apropiado, para fines de este trabajo, el resultado será aceptado, y la efectividad del sistema es de 99,94%.

4.3.3 EJEMPLO 3.

En este ejemplo se utilizó las ecuaciones planteadas por A. Mousa y la curva de distribución de probabilidad de UMAN, luego se procedió a ingresar todos los datos mencionados en el análisis, tanto en el programa D.A.L.T. así como en el programa D.A.S. y se obtuvo los resultados mostrados en el anexo 3 (Figura A.5 y A.6), en los dos casos el período de protección resultante es demasiado bajo y por tanto la efectividad esto se debe a que la altura del hilo de guarda es muy baja comparada con el área que se desea proteger, sin embargo los resultados entre los dos programas son relativamente congruentes, tomando en cuenta que este es un proceso aleatorio y nunca nos iba a dar un resultado exactamente igual, pero con los dos resultados se puede llegar a la misma conclusión que el apantallamiento no es el conveniente y hay que rediseñar.

4.3.4 EJEMPLO 4.

Como podemos ver en el Anexo 4, al utilizar las diferentes curvas con sus ecuaciones la variación en periodo de protección es mínima, sin embargo se puede apreciar cuales son las corrientes que más están afectando a nuestro sistema, siempre son las corrientes más altas las que afectan nuestro sistema. Con este ejemplo hemos comprobado que todos los métodos y curvas poseen resultados confiables y queda a criterio del usuario la ecuación y curva que desee

utilizar, de acuerdo a las necesidades de la línea o las corrientes más frecuentes en el sistema que se esté manejando.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

Considerando los resultados arrojados por el programa, objeto de estudio "D.A.L.T", se puede decir que el programa cuenta con la confiabilidad necesaria para poder realizar estudios estadísticos y con los resultados el ingeniero diseñador pueda realizar estudios de ciertas zonas donde las salidas de las L/T son habituales para de esta manera tomar en cuenta todas las consideraciones y determinar si el problema radica en el apantallamiento como tal o en la coordinación del aislamiento.

La distancia crítica de arqueo está ligada directamente con la corriente de descarga por lo cual la distancia de arqueo es un valor variante que dependiendo de la corriente que este aproximándose a la L/T, el hilo de guarda puede como no puede interceptar la descarga, esta descarga al no ser interceptada podría ir directamente a tierra o perforar el apantallamiento, una perforación de apantallamiento está considerado como aquellas descargas que caen dentro del plano de protección de la L/T ya sea que caiga o no caiga en una de las fases; la perforación de apantallamiento se da, debido a que existe una corriente determinada que hizo que tanto la distancia crítica de arqueo como la distancia de tierra sean valores relativamente bajos quedando expuestas ciertas zonas del plano de protección y permitiendo la penetración del rayo.

El número de descargas sobre una línea de transmisión de longitud media es mayor que el número de descargas a una subestación de tamaño medio, ya que una L/T está expuesta a diferentes niveles cerámicos y aún más en nuestro país

que los niveles cerámicos varían en radios relativamente cortos, por lo tanto, el período de observación para una línea tendrá que ser considerablemente menor, pero siempre hay que tomar en cuenta que se debe acumular la mayor cantidad de datos lo suficientemente confiables sobre las fallas de apantallamiento. Para explicar lo mencionado citaremos un ejemplo expuesto en el capítulo 2, si cada kilómetro de una línea de transmisión intercepta una descarga cada año, y si la exposición es del 1%, entonces una línea de 100km podría experimentar una falla de apantallamiento cada año.

La geometría de la L/T influye notablemente en el planteamiento del apantallamiento ya que el plano expuesto y su altura están determinados por el análisis en conjunto de la geometría de cada torre que forme la L/T, como se observo en los ejemplos planteados en el capítulo 4.

No necesariamente una falla o perforación en el blindaje implica que el apantallamiento este mal diseñado o que el hilo de guarda se encuentre mal ubicado, esta conclusión deberá sacarse a partir de la evaluación del número de descargas que perforaron el blindaje y el periodo de protección que arroje como resultado la simulación, si el periodo de protección es demasiado bajo (menos 20 años) y la efectividad del apantallamiento es menor a un 70% podría considerarse que el apantallamiento no está cumpliendo con su trabajo y deberá procederse a hacer un ajuste en cuanto a la geometría de la L/T, una solución podría ser, elevar el hilo de guarda un metro (no se recomienda elevarlo más puesto que económicamente no es una solución viable) o en su defecto colocar dos hilos de guarda para que protejan la línea, así como también la redistribución de las fases, en cuanto a ubicación, son soluciones que el Ingeniero diseñador podrá ir probando hasta que encuentre la solución más conveniente.

Al escoger un periodo de protección relativamente bajo (menor a los 500 años) no se está garantizando que el apantallamiento sea 100% efectivo y que nunca va a fallar, más bien es recomendable que se plantee un periodo de estudio alto para

que existan algunas fallas y ahí si poder sacar una conclusión más real de lo que está pasando con el apantallamiento de la línea.

Al tratarse de un procedimiento aleatorio los resultados, emitidos por el programa, difícilmente (casi imposible) podrían salir iguales entre dos simulaciones o más, aun cuando se utilicen las mismas curvas, ecuaciones y mismos datos, es por esto que el programa se puede utilizar para realizar estudios estadísticos.

La ubicación del hilo de guarda no presenta mayor dificultad, ya que las líneas son relativamente angostas, lo cual permite tomar una decisión más acertada en cuanto a la ubicación del o los hilos de guarda, teniendo en cuenta que debido a estudios que han sido realizados, ya existen torres que tienen determinada la ubicación del hilo de guarda dependiendo de su distribución de fases, pero de todas maneras es necesario hacer el respectivo análisis ya que el o los hilos de guarda podrían ser ubicados un poco más arriba de lo estipulado o movido hacia los extremos o el centro de ser el caso, con la finalidad de proteger a la línea.

5.2 RECOMENDACIONES

Como recomendación principal se plantea que para tomar una decisión en cuanto a la división de la L/T en tramos es importante que se consideren principalmente dos aspectos, la geometría de la línea y el nivel cerámico al que la línea se encuentre expuesta, ya que estos son los factores determinantes para que los resultados varíen, puesto que como se observo en el planteamiento de los ejemplos son factores que influyen en cuanto a ubicación de fases, delimitación de plano expuesto y la respectiva altura.

Es recomendable realizar un pequeño estudio en cuanto a geometría de las torres y los rangos en que pueden variar las medidas para que se tenga una idea más clara y de esta manera procurar optimizar costos y considerar el costo de

construcción vs la importancia de la línea y también hay que tener en cuenta si la línea o tramo de línea se encuentra en una zona de alto nivel cerámico.

Si se desea tener un análisis profundo del comportamiento que tiene el apantallamiento frente a las descargas atmosféricas, se recomienda que se utilice las diferentes ecuaciones planteadas con sus diferentes curvas, para de esta manera tener un resultado más efectivo y poder tener un juicio más crítico y con bases para respaldar cualquier estudio.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(*1) Pando R. (2005). Aspectos básicos de las descargas atmosféricas. Universidad Nacional de Tucumán (03/03/10).

<http://www.herrera.unt.edu.ar/revistacet/anteriores/Nro28/PDF/N28Inv02.pdf>

(*2) Martínez J. y Castro F. (2002). Análisis de sobretensiones de origen atmosférico en líneas aéreas de transporte. Universidad Politécnica de Catalunya (08/12/09).

http://www.iitree-unlp.org.ar/caue/PapersRevista/2002-N3-rayos_p2.pdf

(*3) CODENSA (2003). Protección contra sobretensiones causadas por descargas atmosféricas (05/01/10).

http://www.codensa.com.co/documentos/6_20_2007_9_27_14_AM_LAR%20450.pdf

(*4) France F. Fenómeno del rayo (07/08/10).

<http://www.franklin-france.com/spip.php?article283>

(*5) Rojido J. (2009), Métodos de ubicación del cable de guardia para una línea de 500kV. Universidad Nacional de la Plata (12/05/10).

<http://www.scribd.com/doc/26758113/Metodos-de-ubicacion-del-cable-de-guarda-2009>

(*6) Montesdeoca M., Análisis Computacional de Líneas de Transmisión para Identificar las torres con mayor índice de fallas por efecto de Descargas Atmosféricas, E.P.N., 2008.

(*7) SicaNews (2002), Sobretensiones por rayos (15/03/10).

<http://www.paginadigital.com.ar/articulos/2002rest/2002terc/tecnologia/sica85.html>

(*8) Molina M., Apantallamiento de subestaciones. Diseño y evaluación mediante métodos digitales., E.P.N., 1979.

(*9) Paredes F., Análisis de Sensitividad del Apantallamiento contra Rayos en Subestaciones de Potencia., E.P.N., 1998.

(*10) Mousa A., A computer program for designing the lightning shielding systems of substations, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 6, No. 1, January 1991, pp 143-152.

(*11) Linck H., Shielding of modern substations against direct lightning strokes, IEEE Trans., Vol. PAS-94, No 5, Sept. / Oct. 1975, pp. 1674-1679.

(*12) Ayora P. (1996), Sistema de apantallamiento contra descargas atmosféricas, E.P.N., Quito

(*13) Torres-Sánchez H., El rayo: mitos, leyendas, ciencia y tecnología, Universidad Nacional de Colombia, 2002.

(*14) Viatger (2010), Postes de alta y baja tensión. (10/01/11)
<http://electricidad-viatger.blogspot.com/2010/05/postes-de-alta-y-baja-tension-1.html>

(*15) Semblantes M., Diseño de una torre de transmisión eléctrica autoportada para una línea de 69kV, E.P.N., 2010.

(*16) Herodotou N., Chisholom W., Janischewsky W. (1993), Distribution of lightning peak stroke currents in Ontario using an LLP system, IEEE, 92 SM, Transactions on Power Delivery, pp 452 – 463.