

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

**“Análisis y Propuesta en Índices de Operación
en Líneas de Transmisión de la Zona Laguna”**

POR

Ing. Pablo Jesús Pech Chalé

TESIS

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL
GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA ELÉCTRICA**

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Victor Manuel Cabrera Morelos

ISSN: 0188-9060

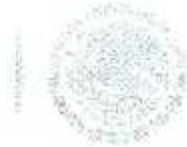


RIITEC: (09)-TMCIE-2014

Torreón, Coahuila, México
Agosto, 2014

SEP

SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA



DIRECCIÓN GENERAL DE EDUCACIÓN SUPERIOR TECNOLÓGICA
Instituto Tecnológico de la Laguna



2014, Año de Ochoavo Paz

Torreón, Coah., **01/Julio/2014**
Dependencia: DEPI/CPCIE
Oficio: DEPIJ/CPCIE/054/2014
Asunto: Autorización de
impresión de tesis.

C. PABLO JESÚS PECH CHALÉ
CANDIDATO AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA ELÉCTRICA.
PRESENTE

Después de haber sometido a revisión su trabajo de tesis titulado:

**"ANÁLISIS Y PROPUESTAS EN ÍNDICES DE OPERACIÓN
EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN DE LA ZONA LAGUNA"**

Habiendo cumplido con todas las indicaciones que el jurado revisor de tesis hizo, se le comunica que se le concede la autorización con número de registro **RIITEC: (09)-TMCIE-2014**, para que proceda a la impresión del mismo.

ATENTAMENTE

EDUCACIÓN TECNOLÓGICA FUENTE DE INNOVACIÓN


DR. JOSÉ LUIS MEZA MEDINA
Jefe de la División de Estudios de Posgrado e Investigación
del Instituto Tecnológico de la Laguna







DR. JOSE LUIS MEZA MEDINA
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

Por medio de la presente, hacemos de su conocimiento que después de haber sometido a revisión el trabajo de tesis titulado:

**"ANÁLISIS Y PROPUESTAS EN ÍNDICES DE OPERACIÓN
EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN DE LA ZONA LAGUNA"**

Desarrollado por el **C. Pablo Jesús Pech Chalé**, con número de control **M1213022** y habiendo cumplido con todas las correcciones que se le indicaron, estamos de acuerdo que se le conceda la autorización de la fecha de examen de grado para que proceda a la impresión de la misma.

ATENTAMENTE

EDUCACIÓN TECNOLÓGICA FUENTE DE INNOVACIÓN

Dr. Víctor M. Cabrera Morelos
Asesor/Director de Tesis

Dr. Francisco S. Sellschopp Sánchez
Comité Tutorial

Dr. Marco A. Arjona López
Comité Tutorial

M.C. Carlos A. Morales Bazán
Comité Tutorial



Dedicado a

A mis papás

Berta & José

A mis hermanos

José Ramón & Reyna

A mi sobrino

Tadeo

Agradecimientos

Agradecimiento al Dr. Víctor Cabrera Morelos por su apoyo en la elaboración de este proyecto.

A los maestros del Tecnológico de la Laguna: Dr. Francisco Sergio Sellschopp Sánchez, MC. Carlos Alberto Morales Bazán, MC. Teodoro Corona Pérez y MC. Carlos Tirado Ruiz.

A los compañeros del Tecnológico: Guillermo Ávila, Sergio Salazar, Heriberto Valadez, Ramón Lara, Enrique Guerrero y David Pérez.

Al MC. Elías Montes Cáceres por todo el apoyo brindado.

A los Ingenieros de la Zona de Transmisión Laguna: Ing. Humberto Jasso Peña, Ing. Juan Estrella, Ing. Rolando Vega y Sr. Guillermo Ibarra.

A CONACYT

Resumen

Se presenta el análisis del comportamiento de cada uno de los elementos que conforman las líneas de transmisión cuando una falla provocada por una descarga atmosférica ha incidido en ella. El modelado de cada uno de estos elementos fue realizado con el programa Alternative Transients Programa ATP con los datos correspondientes a los cuales opera la línea, para realizar este análisis se diseñaron los modelos para dos líneas de transmisión de diferentes longitudes y con estructuras de un circuito y de doble circuito. El análisis consiste en ir inyectando una corriente que simula una descarga atmosférica que incide en el hilo de guarda, esta magnitud de rayo se va incrementando gradualmente y se observa a partir de que magnitud se presentan flameos inversos en la torre donde incide y como afecta a las estructuras aledañas a ella. El segundo análisis consiste en modificar la resistencia de puesta a tierra para conocer cual valor es más adecuado de esta para evitar el flameo. El tercer análisis consiste en aplicar apartarrayos para conocer hasta que magnitud de corriente de descarga el apartarrayo evita que se presenten los flameos inversos.

Abstract

It is presented an analysis of every component which form part of a transmission line as conductor wires, ground wires, insulators, grounding and the transmission tower when a sudden failure induced by a lightning has struck the line. The modeling of each element was done with ATP software with the corresponding data which the line operates, to analyze the problem was designed two models with similar characteristics although different lengths and structures with a circuit and structures with two circuits. The principal objective is to inject a current which simulates a lightning flash hitting the ground wire in the structure where incide and how it affects the adjoining structures. The second analysis consist to decrease the grounding resistance value to know what is the best condition to avoid backflashover. The third analysis consist to install arresters to know what is the maximum value that an arrester can avoid a backflashover.

Índice general

| | |
|--|----------|
| Agradecimientos | II |
| Resumen | III |
| Abstract | III |
| Índice general | VII |
| Índice de figuras | X |
| Índice de tablas | XIII |
| Capítulo 1 | 1 |
| 1. Introducción | 1 |
| 1.1. Objetivo | 2 |
| 1.2. Justificación | 3 |
| 1.3. Contenido de la Tesis | 3 |
| Capítulo 2 | 5 |
| 2. Principios y Fundamentos de los Transitorios Electromagnéticos | 5 |
| 2.1. Parámetros de un Circuito | 6 |
| 2.2. Circuitos con Parámetros Distribuidos | 7 |
| 2.3. Análisis Transitorio de Ondas Viajeras | 10 |
| 2.4. Reflexión y Refracción de las Ondas Viajeras | 12 |

| | | |
|-------------------|--|-----------|
| 2.5. | Comportamiento de las Ondas Viajeras en la línea de Transmisión . . . | 14 |
| 2.5.1. | Corto Circuito | 14 |
| 2.5.2. | Circuito Abierto | 16 |
| 2.5.3. | Reflexión de la resistencia $R=Z$ | 17 |
| 2.5.3.1. | Reflexión cuando $Z_3 > Z$ | 18 |
| 2.5.3.2. | Reflexión cuando $Z_3 < Z$ | 18 |
| 2.6. | Diagrama de Lattice | 19 |
| Capítulo 3 | | 23 |
| 3. | Principios y Fundamentos de las Descargas Atmosféricas | 23 |
| 3.1. | Formación de la descarga atmosférica | 26 |
| 3.1.1. | Stepped leader (Líder escalonado) | 26 |
| 3.1.2. | Golpe de retorno (Return stroke) | 26 |
| 3.1.3. | Líder rápido (Dart leader) | 27 |
| 3.2. | Descripción de los tipos de Descargas Atmosféricas | 28 |
| Capítulo 4 | | 31 |
| 4. | Protecciones de una línea de Transmisión ante Descargas Atmosféricas | 31 |
| 4.1. | Índices de descargas | 31 |
| 4.2. | Blindaje de las líneas aéreas | 34 |
| 4.3. | Modelo Electrogeométrico | 36 |
| 4.3.1. | Fallas de blindaje | 37 |
| 4.3.2. | Fallas por flameo inverso | 40 |
| 4.4. | Sobretensión en la Torre | 44 |
| 4.5. | Sistemas de Puesta a Tierra | 44 |
| 4.6. | Aisladores | 45 |
| 4.6.1. | Cálculo de la longitud de la cadena de aisladores | 46 |
| 4.6.1.1. | Cálculo de la Longitud de la cadena de aisladores pa- ra Condiciones ambientales normalizadas | 46 |

| | | |
|-------------------|--|-----------|
| 4.6.1.2. | Corrección de la Longitud del aislamiento por condiciones atmosféricas No Normalizadas | 47 |
| 4.7. | Apartarrayos de Óxido Metálico | 49 |
| 4.7.1. | Cálculo de la curva Tensión-Corriente | 51 |
| 4.8. | Coordinación de aislamiento | 51 |
| 4.8.1. | Clasificación y Características de las sobretensiones | 52 |
| 4.8.2. | Formas de Onda Normalizadas | 53 |
| 4.8.3. | Comportamiento del aislamiento eléctrico | 54 |
| Capítulo 5 | | 57 |
| 5. | Levantamiento de Información y Modelado de la Línea | 57 |
| 5.1. | Líneas de estudio | 57 |
| 5.1.1. | Línea 93030 | 58 |
| 5.1.2. | Línea 93090 | 59 |
| 5.2. | Modelado | 67 |
| 5.2.1. | Modelado de los conductores de fases | 67 |
| 5.2.2. | Modelado de los Hilos de guarda | 69 |
| 5.2.3. | Características geométricas de los conductores | 71 |
| 5.2.4. | Modelado de las Estructuras | 75 |
| 5.2.5. | Modelado de la Red de tierras | 77 |
| 5.2.6. | Modelado de la Cadena de Aisladores | 77 |
| 5.2.7. | Modelado del Apartarrayo | 79 |
| 5.2.8. | Modelado de la fuente de Alimentación | 80 |
| 5.2.9. | Modelado de la Descarga Atmosférica | 80 |
| 5.2.10. | Modelo final de las líneas | 82 |
| Capítulo 6 | | 87 |
| 6. | Análisis de Resultados | 87 |
| 6.1. | Simulación línea 93030 | 88 |
| 6.1.1. | Caso con resistencia de puesta a tierra de 10Ω | 88 |

| | | |
|--|---|------------|
| 6.1.2. | Caso modificando la resistencia de puesta a tierra | 93 |
| 6.1.3. | Caso de instalación de apartarrayos | 94 |
| 6.2. | Simulación línea 93090 | 95 |
| 6.2.1. | Caso con resistencia de puesta a tierra de 10Ω | 95 |
| 6.2.2. | Caso modificando la resistencia de puesta a tierra | 98 |
| 6.2.3. | Caso de instalación de apartarrayos | 99 |
| 6.3. | Simulación de la línea de doble circuito | 100 |
| 6.3.1. | Caso con resistencia de puesta a tierra de 10Ω | 100 |
| 6.3.2. | Caso modificando la resistencia de puesta a tierra | 102 |
| 6.3.3. | Caso de instalación de apartarrayos | 103 |
| Capítulo 7 | | 105 |
| 7. Conclusiones y Recomendaciones | | 105 |
| Anexos | | 108 |
| Referencias | | 116 |

Índice de figuras

| | |
|--|----|
| 2.1. Línea de Transmisión de dos hilos (adaptado de referencia [1]) | 7 |
| 2.2. "Lumpy", Representación de una línea de dos hilos [1] | 8 |
| 2.3. Pequeño elemento de una línea de Transmisión (adaptado de referencia [1]) | 10 |
| 2.4. Representación del Corto Circuito | 15 |
| 2.5. Variación de la tensión y corriente en un circuito abierto (adaptado de referencia [18]) | 16 |
| 2.6. Representación de la reflexión de la Resistencia | 17 |
| 2.7. Diagrama de Lattice para una sola línea de transmisión terminada en una impedancia Z (adaptado de referencia [1]) | 20 |
| 2.8. Corriente y Tensión en un punto de distancia desde el extremo emisor de una línea en cortocircuito después de la aplicación de la tensión V [1] | 22 |
| 3.1. Tipos de descarga [7] | 24 |
| 3.2. Distribución de Carga en la nube [6] | 25 |
| 3.3. Formación de una Descarga Atmosférica (adaptado de referencia [1]) | 28 |
| 3.4. Tipos de descarga basados en la dirección del Líder y del golpe Retorno [8] | 30 |
| 4.1. Mapa Isocerámico Mundial [9] | 32 |
| 4.2. Sombra Eléctrica creado en la superficie de la tierra por una línea de transmisión [9] | 33 |
| 4.3. Forma de onda idealizada de corriente (adaptado de referencia [1]) | 34 |
| 4.4. Distribución de Probabilidad acumulativa de la magnitud de la corriente de la descarga atmosférica (adaptado de referencia [1]) | 34 |
| 4.5. Distancias críticas del Hilo de Guarda, Conductor de fase y tierra [10] | 36 |

| | |
|--|----|
| 4.6. Modelo Electrogeométrico: Definición de ángulos y distancias [10] | 37 |
| 4.7. Ángulos para el cálculo del modelo electrogeométrico [10] | 40 |
| 4.8. Aproximación para las impedancias de sobretensiones (ohms) para distintas clases de torres [9] | 44 |
| 4.9. Nivel de protección en apartarrayos de óxido de zinc | 50 |
| 4.10. Clasificación de las Sobretensiones (adaptado de referencia [10]) | 53 |
| 4.11. Curvas de tensión-tiempo (adaptado de referencia [1]) | 56 |
| 5.1. Estructura Autosoportada de 1 circuito E92B11+4 localizada en la Línea 93030 | 60 |
| 5.2. Características geométricas de la Estructura Autosoportada E92B11+4 de 1 Circuito empleada en la Línea 93030 y 93090 | 61 |
| 5.3. Estructura Autosoportada de 2 circuitos E92B21+4 localizada en el tramo de 9km | 63 |
| 5.4. Características geométricas de la Estructura Autosoportada E92B21+4 de 2 Circuitos empleada en el tramo de 9km | 64 |
| 5.5. Aislador de suspensión de vidrio templado | 66 |
| 5.6. Bloque 'Transposed Line' del ATP para el modelado de la línea 93030 | 69 |
| 5.7. Bloque 'Transposed Lines' del ATP para el modelado del Hilo de Guarda de la línea 93030 | 70 |
| 5.8. Pestaña 'Model' del bloque LCC del ATP para la Línea 93030 | 74 |
| 5.9. Pestaña 'Data' del bloque LCC del ATP para la Línea 93030 | 74 |
| 5.10. Modelo en ATP para la Estructura Autosoportada de 1 circuito E92B11+4 (adaptado de referencia [19]) | 75 |
| 5.11. Modelo en ATP para la Estructura Autosoportada de 2 circuitos E92B21+4 (adaptado de referencia [19]) | 76 |
| 5.12. Bloque 'Switch Voltage-controlled' del ATP para modelar la cadena de aisla- dores | 78 |
| 5.13. Bloque Heidler del ATP para modelar la Descarga Atmosférica | 81 |
| 5.14. Modelo de una línea de un circuito conformado por Estructuras E92B11+4 | 83 |
| 5.15. Modelo de una línea de dos circuitos conformado por Estructuras E92B21+4 | 84 |

| | |
|---|----|
| 5.16. Modelo de la estructura autosoportada de 1 circuito E92B11+4 | 85 |
| 5.17. Modelo de la estructura autosoportada de 2 circuitos E92B21+4 con aparta- r rayos | 86 |
| 6.1. Simulación de la Corriente de rayo según el Modelo de Heidler de 30kA | 87 |
| 6.2. Tensión en las fases de la línea 93030 aplicando 30kA en la Estructura central(A:Rojo- B:Verde-C:Azul) | 88 |
| 6.3. Tensión en la cadena de aisladores de la línea 93030 aplicando 30kA en la Estructura central(A:Rojo-B:Verde-C:Azul) | 89 |
| 6.4. Tensión en las fases de la línea 93030 aplicando 30kA a mitad del claro(A:Rojo- B:Verde-C:Azul) | 89 |
| 6.5. Tensión en las fases de la línea 93030 aplicando 90kA en la Estructura central(A:Rojo- B:Verde-C:Azul) | 90 |
| 6.6. Tensión en la cadena de aisladores de la línea 93030 aplicando 90kA en la Estructura central(A:Rojo-B:Verde-C:Azul) | 90 |
| 6.7. Corriente en la cadena de aisladores de la línea 93030 aplicando 90kA en la Estructura central(A:Rojo-B:Verde-C:Azul) | 91 |
| 6.8. Tensión en las fases de la línea 93030 aplicando 110kA en la Estructura central(A:Rojo-B:Verde-C:Azul) | 94 |
| 6.9. Tensión en la cadena de aisladores de la línea 93090 aplicando 100kA en la Estructura central(A:Rojo-B:Verde-C:Azul) | 96 |

Índice de tablas

| | |
|--|----|
| 5.1. Características de la Línea 93030 | 58 |
| 5.2. Características de la Línea 93090 | 59 |
| 5.3. Medida de cada sección que conforman la Estructura Autosoportada E92B11+4 de 1 circuito | 62 |
| 5.4. Medida de cada sección que conforman la Estructura Autosoportada E92B21+4 de 2 circuitos | 65 |
| 5.5. Característica de los aisladores de suspensión de vidrio templado | 66 |
| 5.6. Impedancias de secuencias de las líneas | 67 |
| 5.7. Variables para calcular la Inductancia y la Capacitancia | 68 |
| 5.8. Valores a ingresar en el bloque 'Transposed Line' del ATP | 68 |
| 5.9. Valores a ingresar en el bloque 'Transposed Lines' del ATP para Hilos de Guarda | 70 |
| 5.10. Valores ingresados en la sección 'System Type' de la pestaña Model del Bloque LCC del ATP | 71 |
| 5.11. Valores ingresados en la sección 'Standard Data' de la pestaña Model del Bloque LCC del ATP | 72 |
| 5.12. Valores ingresados en la sección 'Model' del Bloque LCC del ATP | 72 |
| 5.13. Valores ingresados en la sección 'Data' de la pestaña Model del Bloque LCC del ATP | 73 |
| 5.14. Impedancia transitoria de las secciones de la torre autosoportada de un circuito | 76 |
| 5.15. Impedancia transitoria de las secciones de la torre autosoportada de dos circuitos | 77 |
| 5.16. Valores ingresados en el bloque 'Switch Voltage-controlled' del ATP | 78 |
| 5.17. Valores ingresados a la Pestaña 'Attributes' del bloque ZNO del ATP | 79 |

| | |
|---|-----|
| 5.18. Valores de la curva Tensión-Corriente del Bloque 'ZNO' del ATP | 79 |
| 5.19. Valores ingresados al bloque de la fuente 'Heidler' del ATP | 81 |
| 6.1. Resumen de pruebas del caso con resistencia de puesta a tierra de 10Ω cuando la descarga incide en la estructura central | 92 |
| 6.2. Resumen de pruebas del caso con resistencia de puesta a tierra de 10Ω cuando la descarga incide a mitad del claro | 92 |
| 6.3. Resumen de pruebas del caso modificando de la resistencia de puesta a tierra cuando la descarga incide en la estructura central | 93 |
| 6.4. Resumen de pruebas del caso modificando de la resistencia de puesta a tierra cuando la descarga incide a mitad del claro | 93 |
| 6.5. Resumen de pruebas del caso de instalación de apartarrayos cuando una descarga incide en la Estructura central | 95 |
| 6.6. Resumen de pruebas del caso de instalación de apartarrayos cuando una descarga incide a mitad del claro | 95 |
| 6.7. Resumen de pruebas del caso con resistencia de puesta a tierra de 10Ω cuando una descarga incide en la Estructura central | 97 |
| 6.8. Resumen de pruebas del caso con resistencia de puesta a tierra de 10Ω cuando la descarga incide a mitad del claro | 97 |
| 6.9. Resumen de pruebas del caso modificando de la resistencia de puesta a tierra cuando la descarga incide en la estructura central | 98 |
| 6.10. Resumen de pruebas del caso modificando de la resistencia de puesta a tierra cuando la descarga incide a mitad del claro | 98 |
| 6.11. Resumen de pruebas del caso de instalación de apartarrayos cuando una descarga incide en la estructura central | 99 |
| 6.12. Resumen de pruebas del caso de instalación de apartarrayos cuando una descarga incide a mitad del claro | 100 |
| 6.13. Resumen de pruebas del caso con resistencia de puesta a tierra de 10Ω cuando la descarga incide en la estructura central | 101 |

| | |
|--|-----|
| 6.14. Resumen de pruebas del caso con resistencia de puesta a tierra de 10Ω cuando la descarga incide a mitad del claro | 101 |
| 6.15. Resumen de pruebas del caso modificando la resistencia de puesta a tierra cuando una descarga incide en la estructura | 102 |
| 6.16. Resumen de pruebas del caso modificando la resistencia de puesta a tierra cuando una descarga incide a mitad del claro | 102 |
| 6.17. Resumen de pruebas del caso de instalación de apartarrayos cuando una descarga incide en la estructura central | 103 |
| 6.18. Resumen de pruebas del caso de instalación de apartarrayos cuando la descarga incide a mitad del claro | 104 |
| | |
| A.1. Resumen de cálculos del índice de fallas por blindaje | 108 |
| A.2. Resumen de cálculos del índice de fallas por flameo inverso | 109 |
| A.3. Resumen de cálculos del índice de fallas por blindaje y Flameo inverso | 110 |
| A.4. Resumen de cálculos del índice de fallas por blindaje y Flameo inverso | 111 |
| A.5. Niveles básicos de aislamiento por impulso tipo rayo | 112 |
| A.6. Valores de los factores K_n , K_m y K_r , para diferentes configuraciones de entrehierros [3] | 113 |
| A.7. Determinación del número de aisladores por cadena en función del tensión de aguante (BIL) [3] | 114 |
| A.8. Relación de las distancias de fuga mínima de acuerdo al tipo de zona de contaminación [3] | 114 |
| A.9. Factores de corrección por presión atmosférica a distintas altitudes [3] | 115 |
| A.10. Humedad absoluta del aire en función de las lecturas de un termómetro de bulbo seco y húmedo [3] | 116 |
| A.11. Factores de corrección en función de la humedad absoluta [3] | 116 |

Capítulo 1

Introducción

La empresa paraestatal Comisión Federal de Electricidad (*CFE*) es la encargada de controlar, generar, transmitir y comercializar la energía eléctrica en todo el territorio mexicano y de cada uno de los elementos que conforman el Sistema de Potencia. Las líneas de transmisión cuya función es transmitir la energía eléctrica de un punto a otro; específicamente, desde una fuente hasta a una carga, como por ejemplo la conexión de una central a una subestación de potencia con una longitud de varios kilómetros. En las líneas de transmisión se pueden presentar sobretensiones que pueden afectar su comportamiento y provocar una falla, una sobretensión es una variable en el tiempo cuyo valor máximo es superior al valor pico de tensión nominal del sistema en el que se origina, existen tres tipos de sobretensiones; las sobretensiones temporales, sobretensiones por maniobras y las sobretensiones producidas por descargas atmosféricas, esta última es la más severa y es la que nos concierne. El conductor de fase es la parte más expuesta en una línea de transmisión, lo que las hace propensa a que una descarga atmosférica incida sobre ella. En la parte más alta de la torre, se instalan conductores desnudos, llamados hilos de guarda, que sirven para blindar la línea e interceptar los rayos antes que alcancen los conductores de fase. Los hilos de guarda no conducen corriente, por lo que normalmente se hacen de acero y se conectan a tierra por medio de las torres debido a que éstas están aterrizadas. Cuando un rayo cae sobre la torre o el hilo de guarda, la corriente del rayo puede descargarse rápidamente a tierra sin llegar a producir flameo inverso en la cadena de

aisladores. Si la estructura no cuenta con una adecuada instalación de red de tierras aún cuando la descarga atmosférica incida en el hilo de guarda, la sobretensión ocasionaría daños en la línea debido a que la corriente del rayo no se drenaría a tierra. Algunas de las estructuras están situadas en lugares donde el terreno tiene una resistividad muy alta, como es el caso de las que están situadas en los cerros, por lo que es muy difícil lograr que la resistencia de puesta a tierra sea la más adecuada, una de las medidas adoptadas es la instalación de apartarrayos de Óxido de Zinc (ZnO) en las fases más expuestas. Estas medidas son aplicadas para blindar adecuadamente la línea de las descargas atmosféricas y evitar fallas que provoquen la salida de algunas de sus fases.

1.1. Objetivo

El objetivo del presente proyecto de investigación es el de diseñar un modelo para conocer el comportamiento de una línea de transmisión cuando una descarga atmosférica incide sobre el hilo de guarda, ya sea en la estructura o en el claro formado entre 2 estructuras. El objetivo consiste en observar el comportamiento de cada uno de los elementos que conforman la línea y con los resultados obtenidos dar una solución para disminuir el riesgo de falla. Para lograr el objetivo es necesario la recolección de datos en campo; cuantas estructuras conforman la línea, el número de discos que conforman la cadena de aisladores, el calibre del conductor de fases, las características del hilo de guarda que emplean, la resistencia del sistema de puesta a tierra, el lugar donde se encuentran las estructuras, si se cuenta con apartarrayos y las características geométricas de la línea. Una vez recolectado toda la información se procede a simular la línea en el Software ATP, el primer modelo consiste en construir 5 estructuras, en la estructura localizada en el centro se le aplica la corriente de rayo en el Hilo de Guarda y se observa como sus componentes se van comportando cuando se presenta la sobretensión en ellos, de igual manera se observa como se comportan las estructuras aledañas. El segundo modelo consiste en construir 4 estructuras, en el claro formado por dos torres se aplica una corriente de rayo a mi-

tad del claro y se observa como se comportan las estructuras y sus componentes. La magnitud de la corriente de rayo que se aplica se va incrementando gradualmente hasta observar a partir de que valor se produce el flameo inverso. Teniendo los resultados de las simulaciones se procede a modificar la resistencia de puesta a tierra o de instalar apartarrayos en los modelos para incrementar la protección de la línea ante la presencia de una descarga atmosférica. Con el resultado de ambas simulaciones se analiza cual es la opción más viable para evitar la presencia de flameos inversos en la cadena de aisladores.

1.2. Justificación

Actualmente se han presentado problemas en dos líneas que tiene a su cargo *CFE*, en cada una de ellas se han presentado salidas por descargas atmosféricas. Cada línea se localiza en distintas zonas geográficas, una de ellas se localiza en una zona desértica y la otra se localiza en un área donde la presencia de cerros es extensa. Debido a los problemas que han surgido en ambas líneas se ha planteado llevar a cabo el presente proyecto de investigación. Se ha propuesto modelar la línea y simular su comportamiento cuando se presenta una descarga atmosférica. Cuando se tengan los resultados se pretende presentar una propuesta para disminuir los daños ocasionados por las descargas atmosféricas.

1.3. Contenido de la Tesis

Esta tesis se encuentra dividida en 7 capítulos, los cuales son descritos a continuación:

Capítulo 1: Introducción. En este capítulo se presentan los objetivos y las diferentes problemáticas de la tesis.

Capítulo 2: Principios y Fundamentos de los Transitorios electromagnéticos. En

este capítulo se describe la teoría y el comportamiento de las ondas viajeras en una línea de transmisión.

Capítulo 3: Principios y Fundamentos de las Descargas Atmosféricas. En este capítulo se describe el desarrollo de una descarga atmosférica desde su formación hasta cuando incide en algún punto de la superficie terrestre y los tipos de descargas que existen.

Capítulo 4: Protecciones de una línea de Transmisión ante Descargas Atmosféricas. En este capítulo se describe los diferentes tipos de dispositivos de protección con las que cuenta una línea de transmisión.

Capítulo 5: Levantamiento de Información y Modelado de la Línea. En este capítulo se describe como se modela cada uno de los elementos que conforman las líneas en el software ATP.

Capítulo 6: Análisis de los Resultados de la Simulación. En este capítulo se describe el análisis de los resultados observados en cada una de las diferentes simulaciones realizadas.

Capítulo 7: Conclusiones y Recomendaciones. En este capítulo se presentan las posibles soluciones a los problemas que presentan la línea.

Anexos.

Capítulo 2

Principios y Fundamentos de los Transitorios Electromagnéticos

El propósito de un sistema de potencia es transportar y distribuir la energía eléctrica generada en las Centrales Eléctricas a los usuarios en una forma segura y confiable. Cuando el sistema está operando en condiciones normales se considera que se encuentra operando en estado estacionario, el análisis de flujos cuando la frecuencia del sistema opera a 50 o 60Hz, se pueden aplicar el uso de cálculos complejos y de fasores para representar las tensiones y corrientes del sistema. Sin embargo cuando se presentan los transitorios electromagnéticos, las magnitudes de las frecuencias son mucho más grandes que van desde los kHz o MHz por lo que los métodos empleados para resolver problemas en estado estacionario no pueden ser empleados [2]. Un transitorio electromagnético se define como una manifestación externa de un repentino cambio en las condiciones de un circuito, este repentino cambio se produce cuando se presenta una falla en el sistema. El periodo de un transitorio es usualmente muy corto, la fracción del tiempo que dura un circuito en condiciones de un transitorio es insignificante comparándola en condiciones en estado estacionario. Aún estos periodos de tiempo sean insignificantes, son de gran importancia debido a que los componentes que conforman los circuitos son sometidos a grandes magnitudes de tensión y corriente en estos pequeños intervalos de tiempo [1].

2.1. Parámetros de un Circuito

Los circuitos eléctricos están compuestos de tres parámetros:

R Resistencia

L Inductancia

C Capacitancia

Todos los componentes de un sistema poseen cada uno de estos elementos y uno se presenta en mayor grado que otro. Bajo condiciones en estado estacionario uno frecuentemente predominará, mientras que en estado transitorio esto puede ser muy diferente. La resistencia, la inductancia y la capacitancia de un circuito están distribuidas cuantitativamente, pero se encuentra frecuentemente que pueden ser tratados como constantes agrupadas concentradas en ramificaciones particulares, sin afectar seriamente el deterioro en la exactitud de los cálculos, en circunstancias donde esta técnica no es adecuada, se emplea un enfoque diferente. Los parámetros L y C se caracterizan por su habilidad de almacenar energía, L en campo magnético y C en campo eléctrico del circuito. Este almacenamiento de energía está en función de la tensión (V) y corriente instantánea (I) y son respectivamente:

$$\frac{1}{2}LI^2 \text{ y } \frac{1}{2}CV^2$$

en contraste con el parámetro R que es un disipador de energía, la razón de disipación viene siendo $R I^2$ en cualquier instante. Bajo condiciones de estado estacionario, la energía almacenada en las inductancias y capacitancias de CD es constante, mientras que en CA la energía es trasferida cíclicamente entre las L y C del circuito. Cuando un repentino cambio ocurre en un circuito, existe generalmente una redistribución de energía para encontrarse con las nuevas condiciones, esto es lo que se analiza en la naturaleza de los transitorios. Es importante que se tenga en cuenta que la redistribución de la energía no toma lugar instantáneamente por dos razones:

1. El cambio de energía magnética requiere un cambio de corriente, pero el cambio de corriente de un inductor se le opone una FEM de magnitud $L di/dt$. Un instantáneo

cambio de corriente en el inductor puede requerir tensión infinita. En la práctica la corriente en los circuitos inductivos no cambia abruptamente y consecuentemente no puede cambiar repentinamente la energía magnética almacenada.

2. Para cambiar la energía eléctrica se requiere un cambio de tensión. La tensión en el capacitor está dado por la Ecuación $V = Q/C$. Para un cambio instantáneo de tensión debe fluir una corriente infinita, que en la práctica no se puede realizar, consecuentemente la tensión en el capacitor no puede cambiar abruptamente ni la energía almacenada asociada al campo eléctrico [1].

2.2. Circuitos con Parámetros Distribuidos

Una característica de los circuitos de parámetros distribuidos es su capacidad de soportar ondas viajeras de tensión y corriente. Considerando un circuito de dos conductores que se muestran en la Figura 2.1, en donde S es un interruptor que se cierra, la línea de transmisión está conectada a una fuente de tensión V y se asume una impedancia cero.

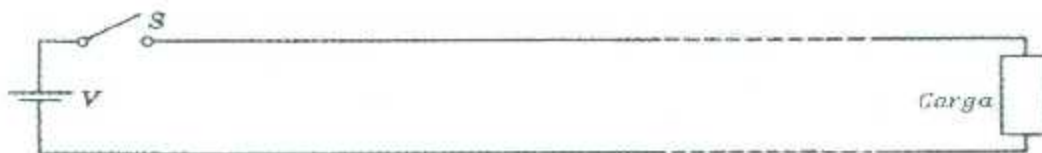


Figura 2.1: Línea de Transmisión de dos hilos (adaptado de referencia [1])

En la Figura 2.2 se muestra una representación de una línea de transmisión, la línea está dividida en un número de secciones, cada sección está asociada con cierta inductancia L y capacitancia C [1]. Cuando el interruptor S_1 se cierra, una corriente empieza de cero y fluye hacia la inductancia para cargar la primera capacitancia, tan pronto el primer capacitor se carga de nuevo fluye corriente hacia la segunda inductancia para cargar la segunda capacitancia y el proceso se repite en las demás inductancias y capacitancias. El disturbio es creado por el cierre de S_1 en el viaje de la onda sobre la línea con una velocidad finita, esta solo toca a puntos remotos

después de un intervalo finito determinado por los pasos de propagación de ondas electromagnéticas en los medios circundantes de la línea [3].

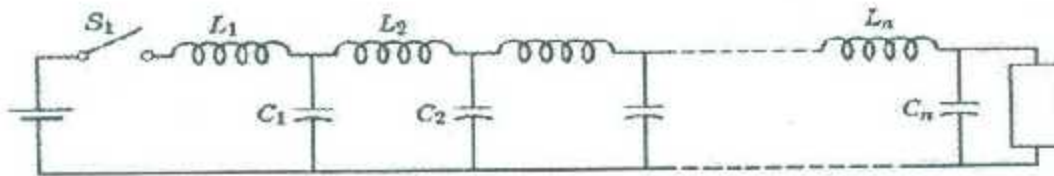


Figura 2.2: "Lumpy", Representación de una línea de dos hilos [1]

En una línea de transmisión cuando una corriente eléctrica comienza a fluir, la capacitancia de la línea comienza a cargarse. Si consideramos que después de un tiempo Δt una longitud Δx de la línea ha sido cargada, si la capacitancia de la línea es C faradios por metro, una carga pudiera haber sido impartida en la línea.

$$Q = CV\Delta x \quad (2.1)$$

Un campo eléctrico es creado entre los conductores de los primeros Δx metros de la línea y un campo magnético es similarmente creado alrededor de los conductores debido a la corriente que fluye en ellos. La corriente está determinada por $I = dQ/dt$ por lo que la Ecuación (2.1)

$$I = VC \frac{\Delta x}{\Delta t} = CV \frac{dx}{dt} \text{ en el límite} \quad (2.2)$$

Ahora dx/dt es la razón en la que el disturbio es propagado a lo largo de la línea, esta variable la consideramos ν . Por lo que

$$I = CV\nu \quad (2.3)$$

el progresivo establecimiento de enlace de flujo magnético en las líneas significa que una FEM igual a la razón de cambio del acoplamiento inductivo está siendo inducida en el lazo formado por los conductores y el frente de onda. El enlace de flujo puede determinarse en términos de la inductancia de línea. Suponiendo que la línea tiene

una inductancia de L henrios por metro, cuando la corriente ha penetrado Δ metros, el enlace de flujo ϕ está dada por

$$\phi = L\Delta x I - L\Delta x C V v \quad (2.4)$$

La FEM inducida es

$$\begin{aligned} \frac{d\phi}{dt} &= L C V v \frac{\Delta x}{\Delta t} \\ &= L C V v^2 \text{ en el límite} \end{aligned} \quad (2.5)$$

Por lo que

$$\begin{aligned} V &= L C V v^2 \quad \text{o} \\ v &= \frac{1}{\sqrt{L C}} \end{aligned} \quad (2.6)$$

La velocidad de propagación de estas ondas de corriente y tensión a lo largo de la línea parecen depender de la geometría de la línea y las propiedades electromagnéticas que rodean el medio, estos son los factores que prescriben L y C . Si el espaciado d entre las líneas es grande en comparación con el radio de conductores r , el flujo dentro de los conductores se puede despreciar. Una buena aproximación para la inductancia es

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{d}{r} \frac{H}{m} \quad (2.7)$$

Con la misma suposición, la capacitancia puede escribirse como

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{d}{r}} \frac{F}{m} \quad (2.8)$$

Sustituyendo estos valores en (2.6)

$$L C = \mu_0 \epsilon_0 \quad \text{o} \quad v = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \quad (2.9)$$

La cual es la velocidad de la onda electromagnética en el espacio libre, que es la velocidad de la luz, usualmente denominado c . La Ecuación (2.3) puede alternativamente ser descrita como

$$I = CVv = \frac{CV}{\sqrt{LC}} \text{ o } \frac{V}{I} = \left(\frac{L}{C}\right)^{1/2} \quad (2.10)$$

La Ecuación (2.10) expresa la razón de la amplitud de las ondas de tensión y corriente. Por lo tanto, tiene las dimensiones de impedancia y se designa la impedancia característica de la línea. Debido a que es idéntica a la impedancia característica de un circuito LC , se utiliza para ello el mismo símbolo, Z_0 [1].

$$Z_0 = \left(\frac{L}{C}\right)^{1/2} \quad (2.11)$$

2.3. Análisis Transitorio de Ondas Viajeras

Los transitorios en los sistemas de transmisión se originan debido a cualquier cambio repentino en las condiciones de operación o configuraciones de los sistemas. Los transitorios producidos por descargas atmosféricas son siempre un potencial de peligro para los equipos de los sistemas de potencia, así como lo son los de maniobras [4]. La Figura 2.3 nos muestra los elementos de líneas de transmisión

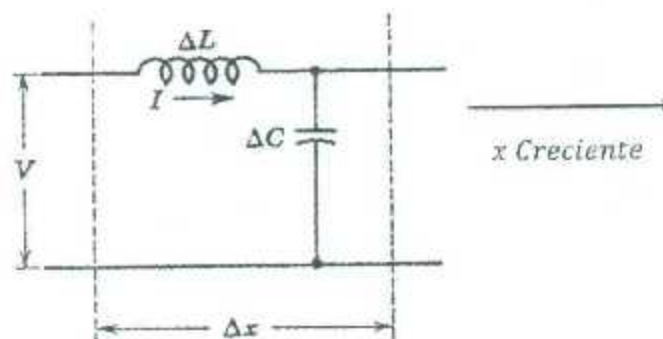


Figura 2.3: Pequeño elemento de una línea de Transmisión (adaptado de referencia [1])

Si una línea tiene una inductancia L y una capacitancia C , una elemental longitud Δx

tendrá una inductancia $L\Delta x$ y una capacitancia $C\Delta x$ como se muestra. La tensión a lo largo del elemento será

$$-\Delta V = L\Delta x \frac{\delta I}{\delta t}$$

en la que en el límite cuando el elemento se reduce en longitud a la dx infinitesimal se puede escribir

$$\frac{\delta V}{\delta x} = -L \frac{\delta I}{\delta t} \quad (2.12)$$

Usamos las derivadas parciales debido a que V e I están en función de posición y tiempo. La corriente para cargar la capacitancia primaria ΔC está dada por

$$-\Delta I = C\Delta x \frac{\delta V}{\delta t}$$

En la que el límite se convierte

$$\frac{\delta I}{\delta x} = -C \frac{\delta V}{\delta t} \quad (2.13)$$

I puede ser eliminada del par de ecuaciones simultáneas por la diferenciación de (2.12) con respecto a x y (2.13) con respecto a t :

$$\frac{\delta^2 V}{\delta x^2} = -L \frac{\delta^2 I}{\delta x \delta t}, \quad \frac{\delta^2 I}{\delta x \delta t} = -C \frac{\delta^2 V}{\delta t^2}$$

Eliminando $\frac{\delta^2 I}{\delta x \delta t}$ y reordenando los términos,

$$\frac{\delta^2 V}{\delta x^2} = LC \frac{\delta^2 V}{\delta t^2} \quad (2.14)$$

Resolviendo las ecuaciones (2.12) y (2.13) por I en vez de V nos conduce a la ecuación

$$\frac{\delta^2 I}{\delta x^2} = LC \frac{\delta^2 I}{\delta t^2} \quad (2.15)$$

Las ecuaciones (2.14) y (2.15) constituyen las ecuaciones de onda en las líneas de transmisión. La solución general de la ecuación de corriente

$$I = f \left[x \pm \frac{t}{(LC)^{1/2}} \right] \quad (2.16)$$

La ecuación (2.16) puede ser escrita

$$I(x, t) = f_1(x - \nu t) + f_2(x + \nu t) \quad (2.17)$$

La solución de tensión puede ser obtenida de (2.12)

$$\frac{\delta V}{\delta x} = L\nu [f'_1(x - \nu t) - f'_2(x + \nu t)] \quad (2.18)$$

Integrando ambos lados de la (2.18) con respecto x ,

$$V(x, t) = LVf_1(x - \nu t) - f_2(x + \nu t)$$

$$V(x, t) = Z_1 f_1(x - \nu t) - Z_2 f_2(x + \nu t) \quad (2.19)$$

Notamos que en (2.17) y (2.19) hay una directa proporcionalidad entre la corriente y tensión, el factor de proporcionalidad es una característica de Z_0

Una solución válida para la ecuación de onda es:

$$I(x, y) = f_1 \left(\frac{x}{\nu - t} \right) + f_2 \left(\frac{x}{\nu - t} \right) \quad (2.20)$$

Y la de tensión es

$$V(x, y) = Z_0 \left(\frac{x}{\nu - t} \right) - Z_0 \left(\frac{x}{\nu - t} \right) \quad (2.21)$$

Las ecuaciones (2.20) y (2.21) nos permiten concentrarnos en una localización particular en la línea y observar que está pasando como una función de tiempo [1].

2.4. Reflexión y Refracción de las Ondas Viajeras

En muchas situaciones, varios componentes están conectados en serie y una onda viajera se puede propagar en diferentes componentes con valores distintos, esto se

debe a que cuando existe la unión entre dos conductores varía la Z_0 . Esta discontinuidad de las impedancias da lugar a las ondas reflejadas y refractadas. Cuando una onda llega a una línea discontinua, en donde la impedancia característica de la línea cambia, se deben de realizar varios ajustes para que la proporcionalidad en la línea no sea alterada [17]. En la discontinuidad, parte de la energía atraviesa el cambio de impedancia y parte de la energía va de regreso, en este cambio de impedancia las ondas de tensión y corriente permanecen continuas [2]. Este ajuste produce la formación de dos pares de ondas, la onda reflejada de tensión y corriente que viaja por la línea superpuesta en sentido opuesto o de regreso a la onda incidente. La onda refractada es aquella que penetra más allá de la discontinuidad. Las amplitudes de las ondas reflejadas y refractadas son tales que la proporcionalidad de la tensión y corriente se conservan para cada una, según lo exigido por las impedancias características de las líneas en las que están viajando, las ondas de corriente y tensión en la discontinuidad de línea son en sí continuas y la energía se conserva. Consideremos la unión de dos líneas con impedancia Z_A y Z_B y supongamos que $Z_A > Z_B$ y que la sobretensión es una función escalón con una amplitud V_1 . La corriente tiene la misma forma y amplitud que la tensión

$$I_1 = \frac{V_1}{Z_A} \quad (2.22)$$

Sean las ondas de tensión reflejadas y refractadas V_2 y V_3 respectivamente, por lo que las corrientes serán:

$$I_2 = -\frac{V_2}{Z_A} \quad (2.23)$$

$$I_3 = \frac{V_3}{Z_B} \quad (2.24)$$

Por definición, la dirección positiva de x es la dirección de la onda incidente. Si la tensión y la corriente son continuas entonces

$$V_1 + V_2 = V_3 \quad (2.25)$$

$$I_1 + I_2 = I_3 \quad (2.26)$$

La ecuación (2.26) puede reescribirse de la siguiente manera:

$$\frac{V_1}{Z_A} - \frac{V_2}{Z_A} = \frac{V_3}{Z_3} \quad (2.27)$$

De las ecuaciones (2.25) y (2.26) es posible escribir expresiones para las ondas reflejadas y refractadas en términos de la onda incidente:

$$V_2 \left(\frac{Z_B + Z_A}{Z_B Z_A} \right) = V_1 \left(\frac{Z_A - Z_B}{Z_A Z_B} \right)$$

$$V_2 \left(\frac{Z_B - Z_A}{Z_B + Z_A} \right) \quad (2.28)$$

La cantidad $(Z_B - Z_A)/(Z_B + Z_A)$ se le conoce como coeficiente de reflexión y se le designa como a y este valor puede ser positivo o negativo dependiendo de los valores de Z_A y Z_B . Las ondas refractadas se obtienen eliminando V_2 entre (2.25) y (2.26)

$$V_3 \left(\frac{Z_B + Z_A}{Z_A Z_B} \right) = \frac{2V_1}{Z_A}$$

$$V_3 \left(\frac{Z_B}{Z_B + Z_A} \right) V_1 \quad (2.29)$$

$2Z_B/(Z_B + Z_A)$ se define como el coeficiente de refracción el cual varía entre cero y dos dependiendo de los valores relativos de Z_A y Z_B [1].

2.5. Comportamiento de las Ondas Viajeras en la línea de Transmisión

2.5.1. Corto Circuito

La principal característica es que es imposible desarrollar una tensión a través del circuito. Por lo que una onda viajera de tensión en un corto circuito (incidente) es

cancelada por la reflejada por lo que no se presenta la onda refractada. Caso contrario con la corriente en donde esta duplica su valor. Se tiene que:

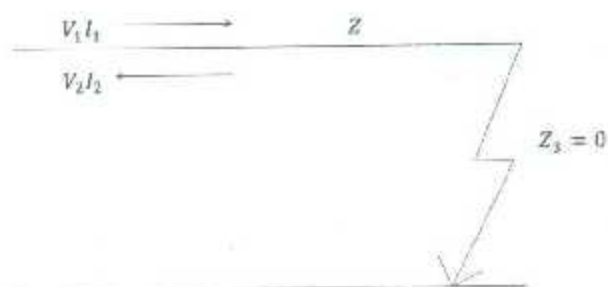


Figura 2.4: Representación del Corto Circuito

$$\frac{V_3}{V_1} = \frac{2Z_3}{Z_3 + Z} \text{ como } Z_3 = 0$$

$$V_1 = Z_3 + Z$$

$$Z_3 = 2(0)V_1$$

$$V_3 = 0$$

Entonces

$$V_2 = V_3 - V_1$$

$$V_2 = -V_1 \tag{2.31}$$

Para la corriente

$$I_2 = I_3 - I_1 \text{ como } I_3 = \frac{2V_1}{Z} = 2I_1$$

$$I_2 = 2I_1 - I_1$$

$$I_2 = I_1 \quad (2.32)$$

La onda reflejada V_2 tiene la misma magnitud pero con signo opuesto por lo que la onda refractada se cancela. A diferencia de la corriente en donde la I_2 y la I_1 tiene la misma magnitud y el mismo signo por lo que estas dos ondas al encontrarse producen una onda refractada con un valor doble.

2.5.2. Circuito Abierto

Un circuito abierto al final de la línea de transmisión demanda que la corriente en ese punto debe de tener un valor de cero. Tan pronto como la onda incidente alcanza el extremo abierto, la corriente se vuelve cero, esto significa que una línea de extremo abierto, una onda de corriente se refleja con signo negativo cancelando la onda refractada. En la tensión la onda incidente y la reflejada son de la misma magnitud, por lo que la refractada duplica su valor al encontrarse las onda incidente y reflejada.

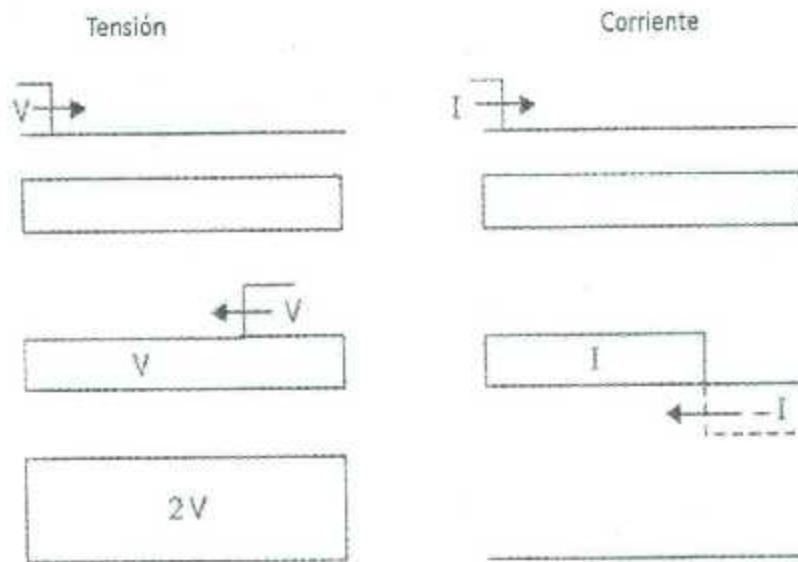


Figura 2.5: Variación de la tensión y corriente en un circuito abierto (adaptado de referencia [18])

Se tiene

$$I_3 = 0 \text{ y } V_3 = 2V_1 V_2 = V_1$$

$$V_2 = V_3 - V_1 \text{ se tiene que } V_2 = V_1 \quad (2.33)$$

$$I_2 = I_3 - I_1 \text{ se tiene que } I_2 = -I_1 \quad (2.34)$$

2.5.3. Reflexión de la resistencia $R=Z$

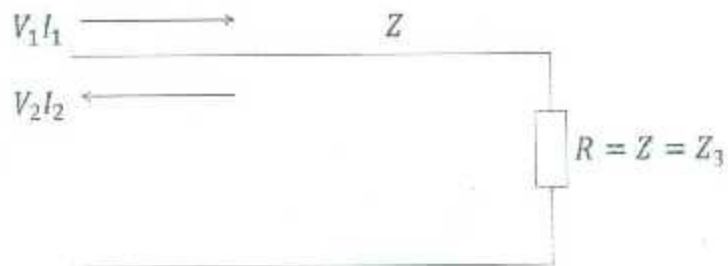


Figura 2.6: Representación de la reflexión de la Resistencia

$$I_3 = \frac{2V_1}{Z + Z_3} = \frac{V_1}{Z} = I_1 \quad I_3 = I_1 \quad (2.35)$$

$$V_3 = 2V_1 \frac{Z_3}{Z_3 + Z} = V_1 \quad V_3 = V_1 \quad (2.36)$$

$$V_2 = V_1 \frac{Z_3 - Z}{Z_3 + Z} = 0 \quad V_2 = 0 \quad (2.37)$$

$$I_2 = -\frac{V_2}{Z} = 0 \quad I_2 = 0 \quad (2.38)$$

2.5.3.1. Reflexión cuando $Z_3 > Z$

$$\text{Coeficiente de reflexión Tensión } \beta_v = \frac{Z_3 - Z}{Z_3 + Z} > 0 \text{ y cuando } Z_3 < 0 \quad (2.39)$$

$$0 < \beta_v < -1$$

$$\text{Coeficiente de refracción de Tensión } \alpha_v = \frac{2Z_3}{Z_3 + Z} > 1 \quad (2.40)$$

$$0 < \alpha_v < 2$$

$$\text{Coeficiente de reflexión de Corriente } \beta_i = -\beta_v \quad -1 < \beta_i < 0 \quad (2.41)$$

$$\text{Coeficiente de refracción de Corriente } \alpha_i = \frac{2Z}{Z_3 + Z} < 1 \quad (2.42)$$

$$0 < \alpha_i < 1$$

2.5.3.2. Reflexión cuando $Z_3 < Z$

$$\text{Coeficiente de reflexión Tensión } \beta_v = \frac{Z_3 - Z}{Z_3 + Z} < 0 \text{ y cuando } Z_3 > 0 \quad (2.43)$$

$$-1 < \beta_v < 0$$

$$\text{Coeficiente de refracción Tensión } \alpha_v = \frac{2Z_3}{Z_3 + Z} < 1 \quad (2.44)$$

$$0 < \alpha_v < 1$$

$$\text{Coeficiente de reflexión Corriente } \beta_i = -\beta_v, \quad 0 < \beta_i < 1 \quad (2.45)$$

$$\text{Coeficiente de refracción Corriente } \alpha_i = \frac{2Z}{Z_3 + Z} < 2 \quad (2.46)$$

$$1 < \alpha_i < 2$$

2.6. Diagrama de Lattice

En una extensiva red con muchas líneas interconectadas y una variedad de terminaciones es claro que el número de ondas viajeras iniciadas por una sola onda incidente incrementará a una considerable razón la división de ondas así como la reflexión de estas mismas. Es cierto que no podemos tener más energía que la que posee el impulso inicial y que esta será compartida por muchas ondas. Sin embargo, es posible que la tensión se acumule en ciertos puntos mediante el refuerzo de la acción de varias ondas. Para estudiar estos efectos se deben utilizar algunos métodos sistemáticos. Se propuso un esquema de los diagramas espacio temporales, llamados diagramas de celosía (Lattice), que ha recibido una amplia aceptación. Para introducir los diagramas de celosía vamos a considerar una sola línea que termina en el extremo remoto en una impedancia Z y que tiene en sí un aumento de impedancia Z_1 . Supongamos que en el extremo cercano, la línea se puede conectar a un bus cuya impedancia es tan baja como para ser considerado un cortocircuito. La conexión se realiza a través de un interruptor de circuito. Se analizará la secuencia de acontecimientos tras el cierre del interruptor cuando la tensión de bus instantánea es V . Empezamos por el despido de una escala de tiempo vertical que puede ser en cuestión de segundos o en unidades iguales al tiempo de transmisión de la onda de extremo a extremo de la línea, es decir $(LC)^{1/2}$ en donde L es la inductancia y C la capacitancia total de la línea en la Figura 2.7 [1].

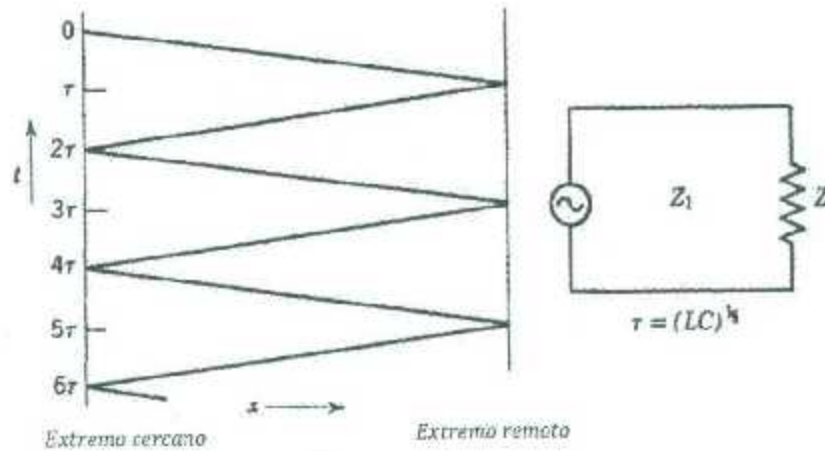


Figura 2.7: Diagrama de Lattice para una sola línea de transmisión terminada en una impedancia Z (adaptado de referencia [1])

$V_1 = V =$ Onda incidente

$V'_1 = a_1 V_1 =$ Reflexión de V_1 en el extremo remoto

$a_1 =$ Coeficiente de Reflexión en el extremo remoto

$V_2 = a_2 V'_1 = a_1 a_2 V =$ La Reflexión de V'_1 cerca del extremo inicial

$a_2 =$ Coeficiente de reflexión cerca del extremo inicial

$V'_2 = a_1 V_2 = a_1^2 a_2 V =$ Reflexión de V_2 en el extremo remoto

Este proceso de la sumatoria de ondas es continuo, debido a que los fenómenos de onda se encuentran en el rango de μs , la tensión que ocasiona la formación de las ondas se puede suponer que se mantiene constante durante el proceso de reflexión y refracción [2]. La tensión en un punto de la línea puede ser obtenida en cualquier instante agregando todas las ondas que han pasado el punto en ambas direcciones, hasta el instante bajo revisión. Se trata de una suma algebraica, tan especial que se debe prestar atención a los signos de varias ondas. Si nos referimos a la tensión en una terminación de línea, el mismo procedimiento puede ser seguido, o alternativamente, el número de ondas se podría reducir mediante el uso de coeficiente de refracción en el extremo remoto es $b_1 = 2Z/(Z + Z_1)$, en el extremo cercano, $b_2 = 0$. Así, en la terminación remota las siguientes fluctuaciones de tensión se producen:

$$t < \tau < 3\tau \quad \text{tensin} = 0$$

$$\tau < t < 3\tau = b_1 V_1 = b_1 V$$

$$3\tau < 5\tau = b_1 (V_1 + V_2) = b_1 (1 + a_1 a_2) V$$

$$5\tau < t < 7\tau = b_1 (V_1 + V_2 + V_3) = b_1 (1 + a_1 a_2 + a_1^2 + a_2^2) V$$

Los diagramas de Lattice se pueden extraer igualmente para las ondas de corriente. Las ondas actuales se derivan fácilmente de la onda de tensión correspondiente a través de la relación

$$I = V' / \pm Z_0$$

La elección de los signos para Z_0 dependerá de la dirección de la onda, como se explicó anteriormente en el análisis. Con un corto circuito en el extremo $a_1 = -1$ por lo que $V_1' = -V_1 = -V$. Esta onda se asocia con una corriente de signo opuesto, ya que se está desplazando en la dirección negativa. Siguiendo la misma convención para la corriente como de tensión, tenemos

$$I_1' = \frac{V_1'}{Z_1} = \frac{V}{Z_1}$$

Esta onda es sumada a la onda incidente de modo que la corriente se duplica en la primera reflexión. Sin embargo, no hasta que la onda reflejada llega de vuelta en el extremo cercano la fuente no tendrá algún indicio de las condiciones de cargas. Durante un tiempo 2τ , la línea parece una resistencia de valor Z_1 independientemente de la terminación. En el extremo más cercano, donde la línea es más eficaz en cortocircuito, los acontecimientos se repiten de manera similar, y la corriente se lleva a otro salto de V/Z_1 . De hecho, el proceso no deja de repetir en cada reflexión. Un gráfico de la corriente en un punto x distancia a lo largo de la línea como una función del tiempo se muestra en la Figura 2.8 [1].

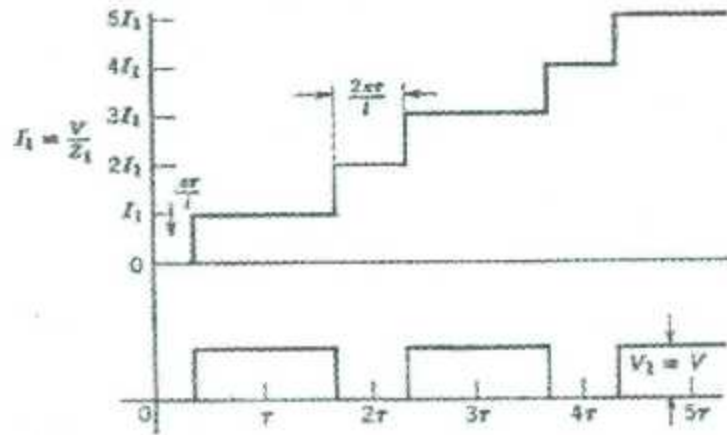


Figura 2.8: Corriente y Tensión en un punto de distancia desde el extremo emisor de una línea en cortocircuito después de la aplicación de la tensión V [1]

Capítulo 3

Principios y Fundamentos de las Descargas Atmosféricas

Un rayo o descarga atmosférica puede ser definido como un transitorio de una magnitud muy alta corriente cuya longitud se mide en kilómetros. Los rayos ocurren cuando en alguna región de la atmósfera se alcanza una carga eléctrica suficientemente grande para que el campo eléctrico asociado con la carga cause una ruptura eléctrica en el aire. Los rayos se presentan en las nubes de tormenta de arena, nubes de tormentas de nieve, erupciones volcánicas y en las nubes que producen las lluvias, estas últimas son las que tienen mayor presencia y es la que nos concierne. Las descargas se pueden dividir en dos clases, las descargas a tierra y las descargas entre las nubes, por lo que los rayos se presentan ya sea entre nube-nube, nube-tierra o tierra-nube [1]. Las descargas que inciden en la tierra se dividen en cuatro categorías basados en la polaridad de la carga que trae a la tierra y su punto de iniciación, existen las descargas descendentes a tierra negativas y las descendentes positivas, de igual manera existen las ascendentes con carga positiva y con carga negativa. En la Figura (3.1) se observan los tipos de descargas que existen. En (a) son los tipos de descargas en las nubes, (i) descarga dentro de la nube, (ii) descarga en el aire y (iii) descarga entre nube a nube. En (b) son los tipos de descarga que se presentan a tierra, en (i) descarga descendente a tierra con carga negativa, (ii) descarga descendente con carga positiva, (iii) descarga ascendente con carga positiva y (iv) descarga

ascendente con carga negativa [5].

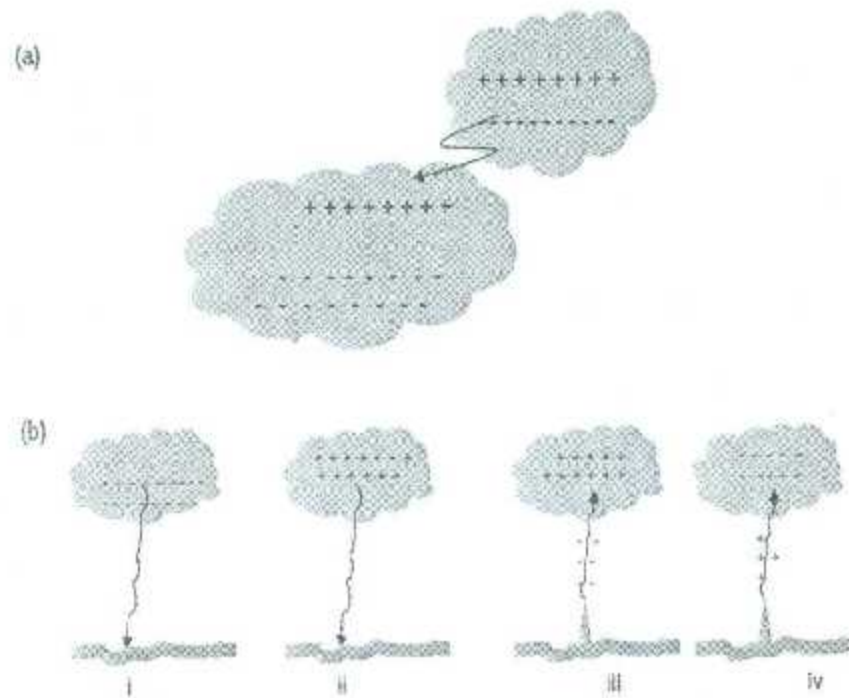


Figura 3.1: Tipos de descarga [7]

Para tener un conocimiento más amplio de cómo se forman los rayos, se debe de comprender como están constituidas las nubes de tormenta. Las nubes se forman en la atmósfera; la atmósfera está conformada por aire frío y denso en los niveles más altos y en los niveles más bajos el aire es tibio y húmedo. El aire tibio en los niveles más bajos asciende en ráfagas fuertes de aire para formar las nubes mientras que el aire frío en la parte superior desciende. Por lo que una nube de tormenta está constituida por viento, agua e hielo. Esta aceptado que las corrientes de aire ascendentes son las responsables de las separaciones de carga dentro de las nubes, las cuales son las responsables de la creación de los campos eléctricos dentro y alrededor de la nube y que al final producirá la ruptura, conocida como rayo o descarga atmosférica. Existen diferentes tipos de teorías las cuales nos explican la separación de las cargas dentro de la nube, se ha postulado que las gotas de lluvia que caen en el campo eléctrico que existe en la atmósfera comienzan a polarizarse, las corrientes de aire

ascendentes conducen hasta la cima de la nube la carga positiva, mientras que las gotas más pesadas que contiene carga negativa se asienta en la parte inferior de la nube. Así, la estructura de carga principal de la nube de tormenta es la de un dipolo eléctrico. Las regiones cargadas del dipolo son del orden de kilómetros de diámetro, en adición a esto existe una pequeña porción de carga positiva en la base de la nube de tormenta. La descarga que es de nuestro interés es aquel que se produce entre nube-tierra, este tipo de descarga se genera de una o más descargas parciales intermitentes.

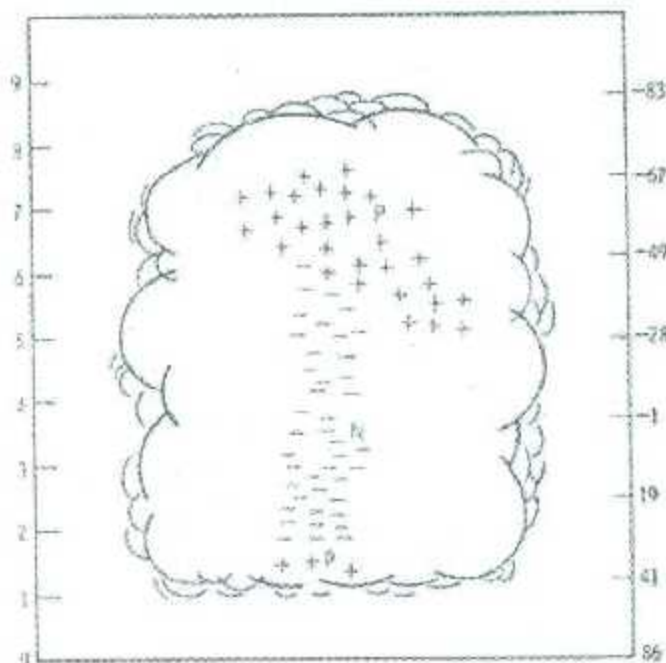


Figura 3.2: Distribución de Carga en la nube [6]

En la Figura 3.2 se muestra la distribución de las cargas de una nube, en la parte más alta de la nube se localiza la carga positiva denotada como P , en la base de la nube está la carga negativa denotada como N , en la base de la nube se presenta una pequeña área de carga positiva denotada como p [6].

3.1. Formación de la descarga atmosférica

Para comprender como se forma una descarga atmosférica es necesario comprender cada uno de los siguientes puntos.

3.1.1. Stepped leader (Líder escalonado)

Cada golpe de rayo (Lightning Stroke) comienza con una débil predescarga luminosa, el líder en proceso, el cual se propaga de nube a tierra es seguido inmediatamente por un golpe de retorno (Return stroke) muy luminoso. El golpe de retorno se propaga de tierra a nube. La predescarga de nube a tierra que precede al primer golpe de retorno se le conoce como líder escalonado. El líder escalonado empieza con una ruptura eléctrica local entre las regiones N y p dentro de las nubes de tormenta mostrado en la Figura 3.2. Estas rupturas pudieran servir para empezar a movilizar las cargas eléctricas las cuales previamente son adheridas con hielo y partículas de agua. La resultante fuerte concentración de carga negativa dentro de la base de la nube pueden producir campos eléctricos los cuales podrían causar la carga de columna negativa para que se forme la descarga hacia la superficie terrestre. Esta columna se le conoce como líder escalonado debido a que mientras desciende se va comportando de manera escalonada en pasos luminosos típicamente de 50m de longitud con un tiempo de pausa de cada escalonado de $50\mu s$. Durante los tiempos de pausa el líder escalonado no es lo suficientemente luminoso [6].

3.1.2. Golpe de retorno (Return stroke)

Cuando el líder escalonado ha descendido como una columna de alto potencial negativo cerca del suelo, la alta intensidad de campo eléctrico resultante es suficiente para provocar una descarga de movimiento ascendente que va del suelo hasta la punta del líder escalonado. Cuando una de estas descargas hace contacto con el líder, la base del líder esta efectivamente conectado al potencial a tierra mientras que el resto del líder está a un potencial negativo por lo que está cargado negativamente [6]. La cantidad de carga (usualmente negativa) que desciende a la tierra de la nube

es igual a la carga (usualmente positiva) que fluye hacia arriba desde la tierra [7]. El canal del líder actúa como una línea de transmisión soportando un golpe de retorno muy luminoso. El frente de onda de un golpe de retorno, que es un frente de onda de ionización de alta intensidad de campo eléctrico, lleva el potencial de tierra hasta el camino forjado previamente por el líder escalonado. El frente de onda del golpe de retorno se propaga a una velocidad típicamente de un tercio o una décima parte de la velocidad de la luz, por lo que el viaje entre el suelo y la base de la nube tiene un tiempo aproximado de $70\mu s$. Este canal formado entre la nube y la tierra se desplazarán grandes magnitudes de corriente [6].

3.1.3. Líder rápido (Dart leader)

Después que el golpe de retorno alcanza la base de la nube y se expande lateralmente, este alcanza el límite de la región de descarga de la nube, aumentando el campo eléctrico y produciendo así un nuevo ciclo de carga mediante streamers que penetran alrededor de 300m en la nube, todavía cargada. Este periodo está caracterizado por una intensa descarga corona de las gotas de agua debido a la propagación de la onda ionizante al interior de la nube. Esta corona drena la carga un área más grande a una más pequeña dejada por el líder escalonado y su descarga de retorno emergiendo de la base de la nube como un canal luminoso llamado líder rápido. Los líderes rápidos se propagan de forma continua, sin escalonamiento, desde la nube hasta la tierra, siguiendo el canal preionizado. Sin embargo, cuando el intervalo de tiempo desde la descarga de retorno es excepcionalmente largo, el líder rápido presenta tortuosidades a medida que se aproxima a tierra [6]. En la parte izquierda de la Figura 3.3 se aprecian la duración de cada uno de los pasos que conforman el proceso de formación del rayo vistas desde el lente de una cámara especial. En la parte derecha es como se ve un rayo con una cámara normal.

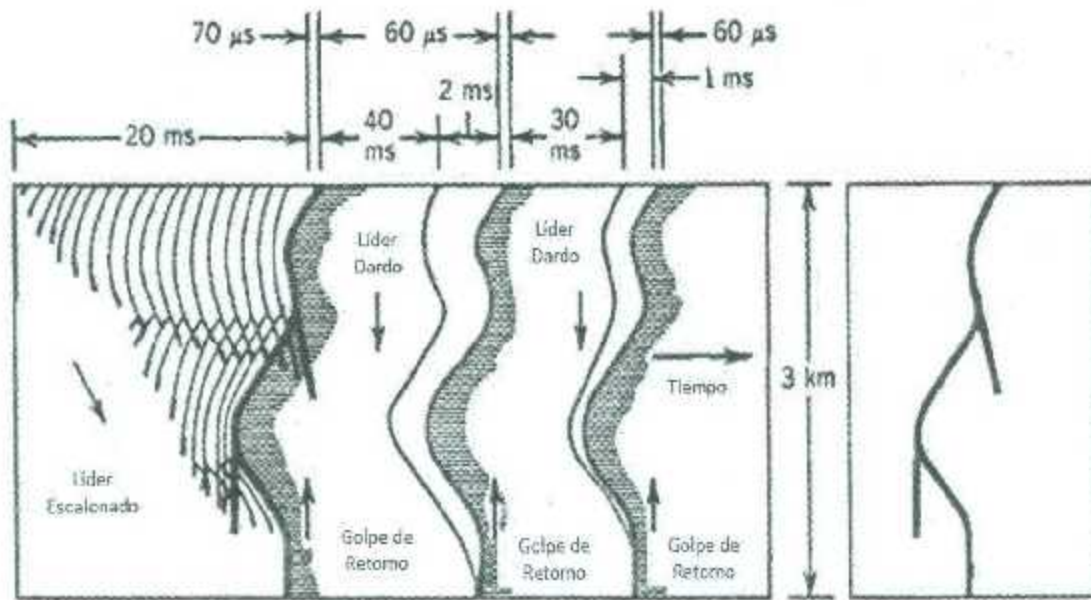


Figura 3.3: Formación de una Descarga Atmosférica (adaptado de referencia [1])

3.2. Descripción de los tipos de Descargas Atmosféricas

Como se ha mencionado con anterioridad una descarga atmosférica se desarrolla en diferentes pasos y que existen 4 diferentes tipos. En la Figura 3.4 se observan los diferentes tipos de descargas que inciden a tierra. Esta ilustración esquemática solamente nos muestra la polaridad de la carga de la nube la cual participa directamente en el rayo, sin referencia a la distribución de otras cargas en la nube. Un líder puede ser seguido o no por un golpe de retorno, el caso predominante de un líder descendente de una nube negativa seguido por un golpe de retorno es ampliamente aceptado, por lo que una imagen de un rayo sin golpe de retorno es el resultado de observaciones en estructuras altas. Para tener un mejor entendimiento de los diferentes tipos de descargas se requiere una subdivisión de los 4 tipos de líderes que existen mostrados en la Figura 3.4, los que cuentan con un subíndice *a* son los que no cuentan con golpe de retorno y los que tiene el subíndice *b* tienen golpe de retorno.

Tipo 1a. La descarga comienza con un líder descendente de una nube negativa, esto es predominante cuando se presenta en campo abierto sin objetos altos en los alrededores. El líder está cargado negativamente así como su corriente. Si el líder no alcanza la tierra (descarga en aire) no sobreviene ningún golpe de retorno, esto constituye una nube de descarga.

Tipo 1b. Cuando un líder descendente negativo alcanza la tierra, un golpe de retorno ascendente se desarrolla y este descarga al líder y parte de la carga de la nube a tierra. Esta secuencia se puede producir solo una vez, produciendo un solo golpe o puede ser repetido produciendo varios rayos.

Tipo 2a. La descarga es iniciada por un líder ascendente proveniente de un objeto alto situado en la tierra, ya sea una torre o cima de montaña, que se dirige hacia una nube negativa. El líder es cargado positivamente, la cima del punto de donde proviene constituye un ánodo; por lo que es un líder positivo. La carga fluye a tierra y la corriente en la torre o montaña es negativa.

Tipo 2b. La etapa inicial es igual a la del *Tipo 2a*, seguido por subsecuentes golpes, teniendo cada uno un líder descendente y un golpe de retorno ascendente como la del *Tipo 1b*.

Tipo 3a. Este corresponde al del *Tipo 1a* pero bajo una nube positiva. Tanto la carga y el líder son positivos, el líder no alcanza la tierra firme.

Tipo 3b. Cuando un líder descendente positivo alcanza la tierra, este da lugar a un golpe de retorno positivo ascendente por el cual el líder y parte de la carga de la nube son descargas. Este tipo es muy raro y generalmente se presentan en regiones montañosas.

Tipo 4a. Un líder ascendente es iniciado bajo una nube positiva y parte de objetos

altos localizados en tierra firme. El líder está cargado negativamente; la cima de la estructura de donde surge constituye el cátodo. El flujo de la carga a tierra es positivo por lo que la corriente la cual siendo de larga duración, se describe como una corriente continua.

Tipo 4b. Este inicia como la del *Tipo 4a* pero el líder ascendente es continuo, después de 4 o 5ms se presenta una severa descarga descendente positiva, la cual debe ser considerada como un golpe de retorno.

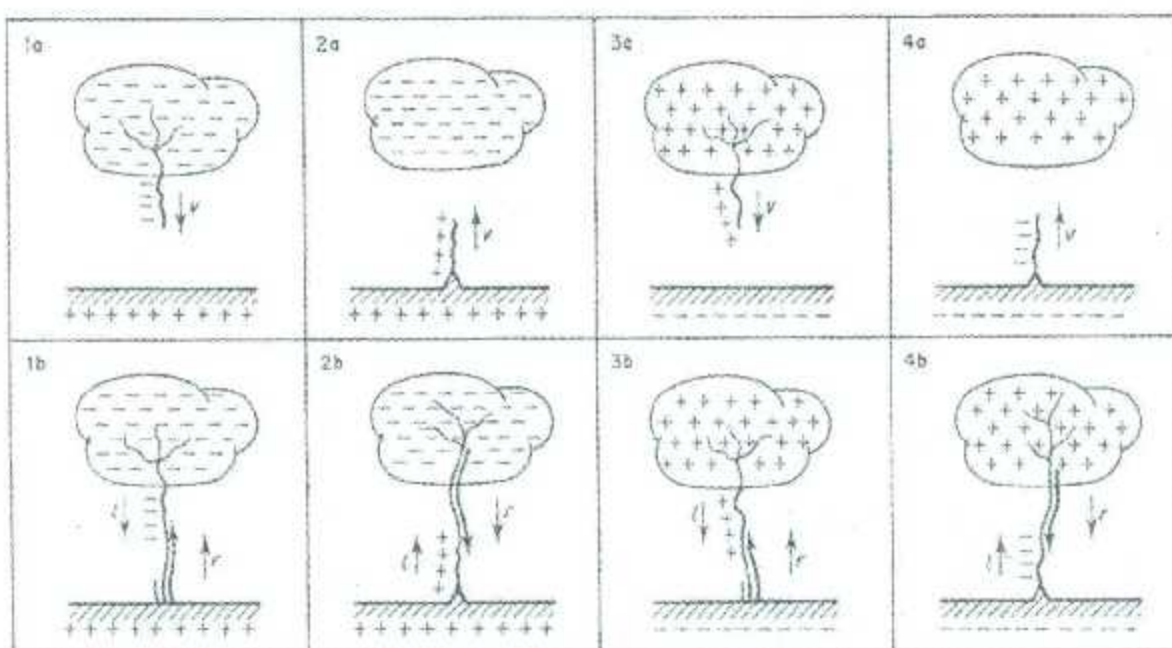


Figura 3.4: Tipos de descarga basados en la dirección del Líder y del golpe Retorno [8]

La Figura 3.4 esta simplificada, cuando un líder descendente se aproxima a la tierra, un streamer ascendente es a menudo iniciado de la tierra continua hacia la punta del líder descendente en forma de un líder ascendente (golpe de retorno).[8]

Capítulo 4

Protecciones de una línea de Transmisión ante Descargas Atmosféricas

Las sobretensiones en un Sistema de Potencia pueden ser muy destructivas por lo que es importante tener una adecuada protección contra estos fenómenos. Las sobretensiones del tipo atmosférico son la más peligrosa debido al daño que ocasionan cuando se presentan. Para la adecuada elección del tipo de protección que será instalada en una línea es necesario conocer sus características generales.

4.1. Índices de descargas

El nivel cerámico para una línea dada se estima a partir de los mapas isocerámicos como el que se muestra en la Figura 4.1. Conociendo el nivel isocerámico, se aproxima el número de rayos a tierra que son interceptados por la línea de transmisión. El método simplificado asume que la línea presenta una especie de sombra eléctrica (electrical shadow) sobre la tierra y que cualquier rayo que normalmente caería dentro de esta sombra, en lugar de esto se pondrá en contacto con la línea. Usando este concepto, la Ecuación (4.1) proporciona una aproximación para el número de rayos en una línea por 100km por año

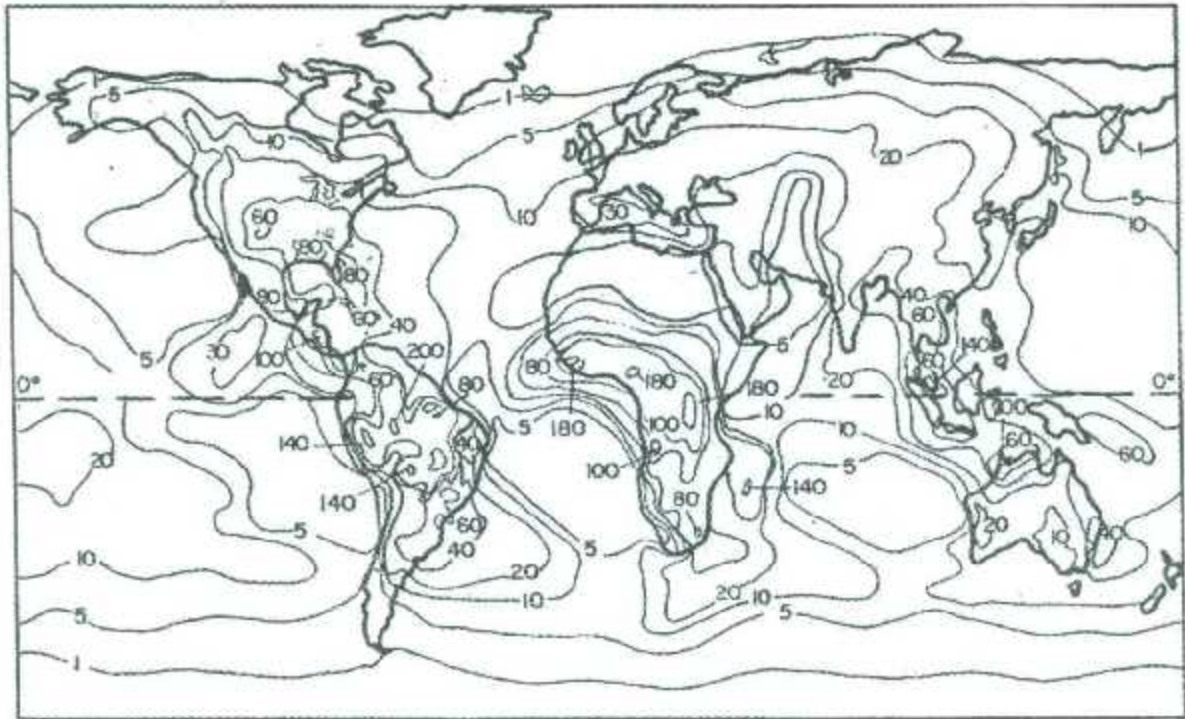


Figura 4.1: Mapa Isoceráunico Mundial [9]

$$N_L = 0.004T^{1.35}(b + 4h^{1.09}) \quad (4.1)$$

en donde

N_L : Número de rayos a línea por 100km por año

T: Nivel ceráunico en las proximidades de la línea [Número de tormentas días/años]

h: Altura promedio de los hilos de guarda [m]

b: Espaciamiento horizontal entre los hilos de guarda [m]

En la Figura 4.2 se muestra las dimensiones de h y b con más detalle. Para la altura promedio de la parte más alta de los conductores, se utiliza la altura a las torres menos dos tercios de la flecha [9].

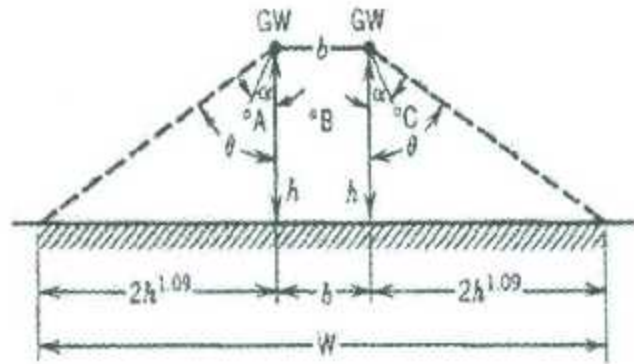


Figura 4.2: Sombra Eléctrica creado en la superficie de la tierra por una línea de transmisión [9]

En donde

θ : Ángulo de la sombra

α : Ángulo de blindaje entre el hilo de guarda y el conductor de fase

W : Longitud de la sombra con la superficie de la tierra

GW : Hilo de guarda

A, B, C : Conductores de fase

El impacto de un golpe a la línea dependerá de la magnitud de la corriente y el incremento de la velocidad y la impedancia con los objetos que colisione. La forma de onda de la corriente ha sido idealizado para el propósito del análisis, como se muestra en la Figura 4.3. Se ha encontrado que los datos de referencia de Anderson y Eriksson que pueden ser adaptados a la expresión

$$P_f = \frac{1}{1 + \left(\frac{I}{31}\right)^{2.6}} \text{ p.u.} \quad (4.2)$$

donde

P_f : Probabilidad de que un golpe de rayo exceda una corriente.

I : Golpe de rayo en Kiloamperes.

Esta ecuación junto con los datos de Anderson/Eriksson son graficados en la Figura

4.4. Se observa que el 50% de los golpes de rayos excede 31kA [1].

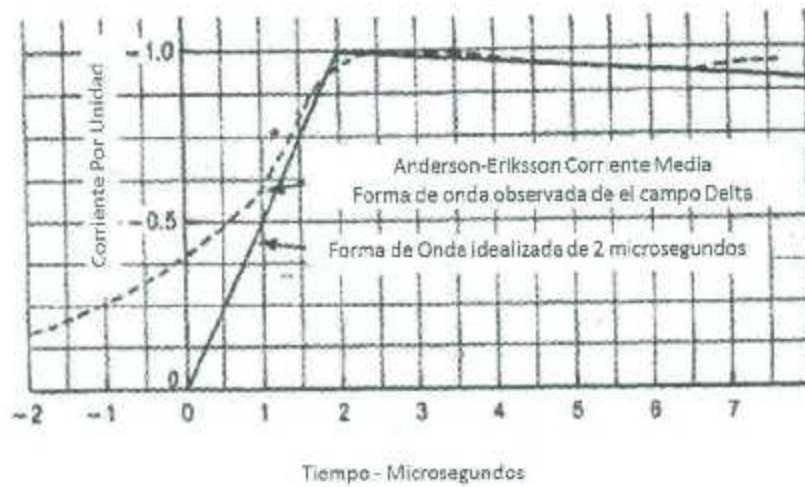


Figura 4.3: Forma de onda idealizada de corriente (adaptado de referencia [1])

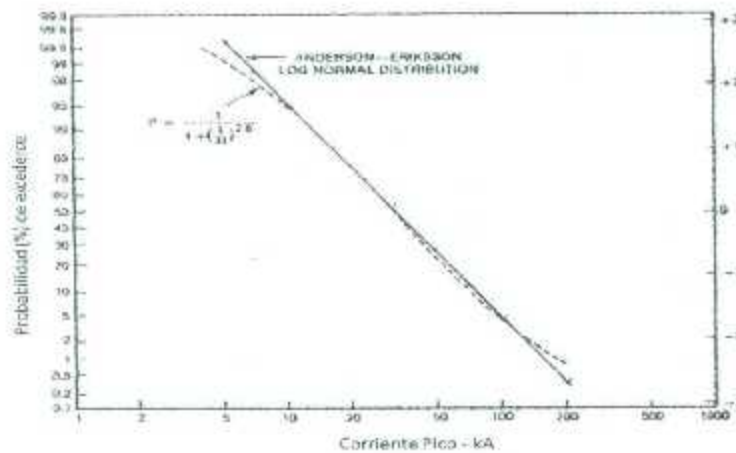


Figura 4.4: Distribución de Probabilidad acumulativa de la magnitud de la corriente de la descarga atmosférica (adaptado de referencia [1])

4.2. Blindaje de las líneas aéreas

El objetivo del blindaje es reducir el número de interrupciones que provocan las descargas atmosféricas, para lograr este objetivo es habitual la instalación de hilos de

guarda (Overhead Ground Wires) en la parte superior de las torres de transmisión. Con esto se pretende que las posibles descargas atmosféricas impacten sobre un hilo de guarda y se deriven a tierra las posibles sobretensiones. La probabilidad de que un rayo impacte sobre un conductor de fase o en hilo de guarda es una variable aleatoria que puede relacionarse con la geometría del sistema (altura y posición del hilo de guarda con respecto a los conductores de fase). En general se considera que existe una distancia crítica alrededor del conductor del fase y del hilo de guarda de forma que los rayos, cuyo último paso se encuentren más cercanos a esta distancia impactarán sobre el conductor correspondiente. El lugar geométrico de los puntos equidistantes del conductor de fase o cable de guarda es un círculo cuyo radio (distancia crítica) esta en función de la intensidad de pico de la descarga de manera que a mayor intensidad de pico le corresponde una distancia crítica mayor. La probabilidad de que un rayo impacte en tierra, en un conductor de fase o en un hilo de guarda depende de la corriente de pico de la descarga, de la altura del conductor de fase y de la localización del hilo de guarda con respecto al de la fase. La Figura 4.5 presenta las distancias críticas (striking distance) del conductor de fase (r_c), del cable de guarda (r_s) y tierra (r_g) [10]. Existen diferentes ecuaciones para determinar las distancias críticas; las ecuaciones a emplear son las de IEEE [7]. Su valor depende de la corriente de pico de descarga I (expresada en kA) y suele expresarse en función de la distancia crítica a tierra (r_g) según la relación

$$\gamma_s = \gamma_c = 1 \quad (4.3a)$$

$$r_s = \gamma_s \cdot r_g \quad (4.3b)$$

$$r_c = \gamma_c \cdot r_g \quad (4.3c)$$

Los valores de los parámetros, de acuerdo con IEEE son [7]:

$$r_g = 8I^{0.65} \quad (4.4)$$

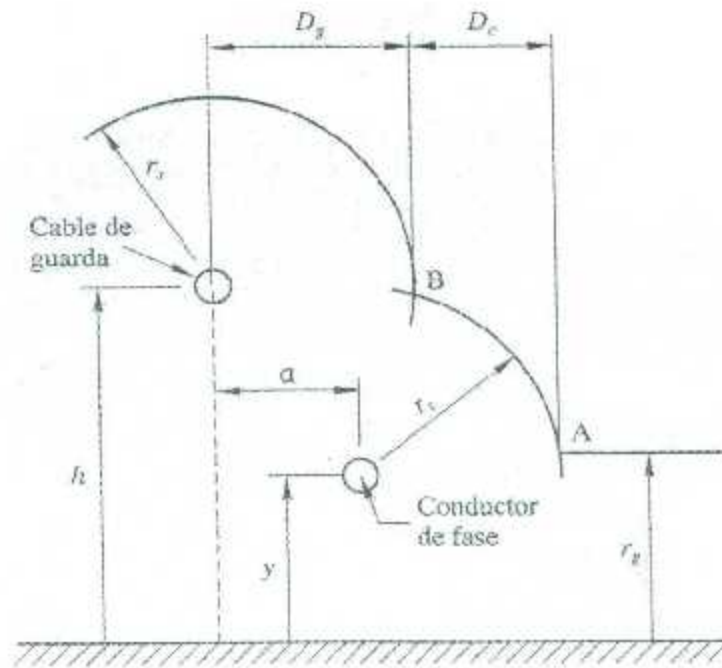


Figura 4.5: Distancias críticas del Hilo de Guarda, Conductor de fase y tierra [10]

4.3. Modelo Electrogeométrico

El Modelo Electrogeométrico se considera el esquema general presentado en la Figura 4.6, los arcos se han trazado con centros en los conductores de fase y en los hilos de guarda, considerando un radio r_c en ambos casos. Este valor depende de la intensidad de descarga del rayo. Además, la línea horizontal trazada a una altura r_g desde el suelo determina la zona de influencia de tierra. De nuevo, esta distancia r_g depende de la intensidad de pico de la descarga del rayo; así a mayor intensidad mayores serán las distancias críticas r_c y r_g . Las intersecciones entre los arcos cuyos centros son los conductores de fase con la línea horizontal paralela a tierra están marcados como puntos A; las intersecciones entre los arcos cuyos centros son los conductores de fase y aquellos cuyos centros son los hilos de guarda están marcados como B y la intersección entre los arcos cuyos centros son los hilos de guarda están marcados como C. Las descargas atmosféricas que alcancen el arco entre A y B impactarán sobre el conductor de fase, las que alcancen el arco entre B y C impactarán sobre el hilo de

guarda y las demás descargas irán a parar a tierra.

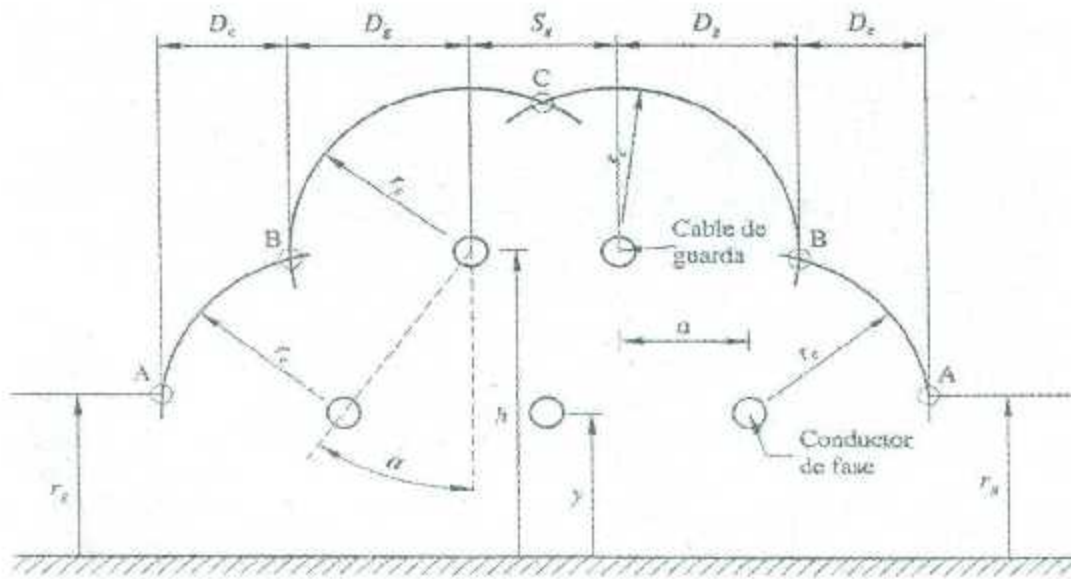


Figura 4.6: Modelo Electrogeométrico: Definición de ángulos y distancias [10]

En la Figura 4.6 se puede observar que cuanto mayor sea la intensidad de pico considerada mayores serán por tanto las distancias críticas r_c y r_g , con la cual el arco AB disminuirá. Se define la intensidad máxima de falla de blindaje como aquella para la cual todas las distancias críticas coinciden en un punto; es decir, el valor de la intensidad para la cual los puntos A y B de la Figura 4.6 coinciden. Las descargas cuya corriente de pico sea superior a la intensidad máxima de falla de blindaje impactarán contra el hilo de guarda o contra tierra pero no contra una parte activa. Para intensidades de descarga menores existe una probabilidad de que impacte contra un conductor de fase. Considerando solamente descargas verticales, para una descarga atmosférica las distancias D_c y D_g de la Figura 4.6 son las distancias de exposición del conductor de fase y el hilo de guarda respectivamente [10].

4.3.1. Fallas de blindaje

Uno de los métodos de protección contra descargas atmosféricas es por medio del blindaje; este método consiste en interceptar las descargas atmosféricas y conducir las

a tierra por medio de un conductor conectado a tierra llamado Hilo de Guarda. El hilo de guarda se instala en la parte más alta de la torre de transmisión con un ángulo respecto a su línea vertical y el conductor de fase más externo conocido como ángulo de blindaje. El procedimiento basado en el modelo electrogeométrico para calcular el índice de fallas de blindaje de una línea de transmisión se explica a continuación.

1. Se debe de calcular la corriente de rayo mínima requerida con la que pueda ocurrir un flameo en el aislamiento, esto se realiza debido a que para ciertos niveles de tensión con corrientes de rayo pequeñas no siempre causa fallas en el aislamiento, para su cálculo se utilizan las siguientes Ecuaciones

$$I_{min} = \frac{2TCF}{Z_c} \quad (4.5a)$$

$$TCF = \left(100 + \frac{710}{t^{0.75}} \right) L_{ca} \quad (4.5b)$$

$$Z_c = 60 \ln \left(\frac{2h}{R_{out}} \right) \quad (4.5c)$$

donde

I_{min} : Corriente mínima para que se presente flameo [kA]

TCF : tensión crítica de flameo [kV]

L_{ca} : Longitud de la cadena de aisladores [m]

Z_c : Impedancia transitoria del conductor [Ω]

2. Teniendo el valor de I_{min} , se procede a determinar el valor de R_{min} se aplica la Ecuación (4.4) sustituyendo con los valores correspondientes

$$R_{min} = 8(I_{min})^{0.667} \text{ [m]} \quad (4.6)$$

3. Para el cálculo de la exposición del conductor D_c en la zona BA de la Figura 4.7 se aplican las Ecuaciones

$$\beta = \sin^{-1} \frac{c}{2 \cdot R_{min}} = \sin^{-1} \frac{\sqrt{a + (h - y)^2}}{2 \cdot R_{min}} = \sin^{-1} \frac{h - y}{2 \cdot R_{min} \cdot \cos \alpha} \quad (4.7)$$

Los ángulos θ y α son

$$\theta = \sin^{-1} \frac{R_{min} - y}{R_{min}} \quad \alpha = \tan^{-1} \frac{a}{h - y} \quad (4.8)$$

Por lo tanto, de la Figura 4.7 resultan la Distancia de exposición de los conductores de fase D_c y de los Hilos de Guarda D_g

$$D_c = R_{min} \cdot [\cos \theta - \cos(\alpha + \beta)] \quad [\text{m}] \quad (4.9a)$$

$$D_g = R_{min} \cdot \cos(\alpha - \beta) \quad [\text{m}] \quad (4.9b)$$

Al ir incrementando el valor de la corriente de rayo, la distancia de atracción r_c va incrementando y D_c disminuyendo, hasta que se llega al valor R_{max} en que D_c vale cero. Esta distancia se obtiene aplicando la Ecuación

$$R_{max} = \frac{h + y}{2(1 - \sin \alpha)} \quad [\text{m}] \quad (4.10)$$

4. Para calcular la I_{max} se aplica la Ecuación

$$I_{max} = \left(\frac{R_{max}}{8} \right)^{0.65} \quad [\text{kA}] \quad (4.11)$$

Con los valores I_{min} e I_{max} conocemos las probabilidades de que ocurran rayos con esta corriente.

$$P(I_{min}) = \frac{1}{1 + \left(\frac{I_{min}}{31} \right)^{2.6}} \quad (4.12a)$$

$$P(I_{max}) = \frac{1}{1 + \left(\frac{I_{max}}{31} \right)^{2.6}} \quad (4.12b)$$

Con estos rangos de corriente en los cuales puede suceder una falla de blindaje y tomando una distancia de exposición $D_c/2$ se calcula el índice de fallas de blindaje mediante la Ecuación (4.13): [3]

$$IFBF = \frac{N_g L D_c}{10 \cdot 2} (P(I_{min}) - P(I_{max})) \text{ flameo/100km/año} \quad (4.13)$$

Los cálculos de esta sección se muestran en la Tabla A.3

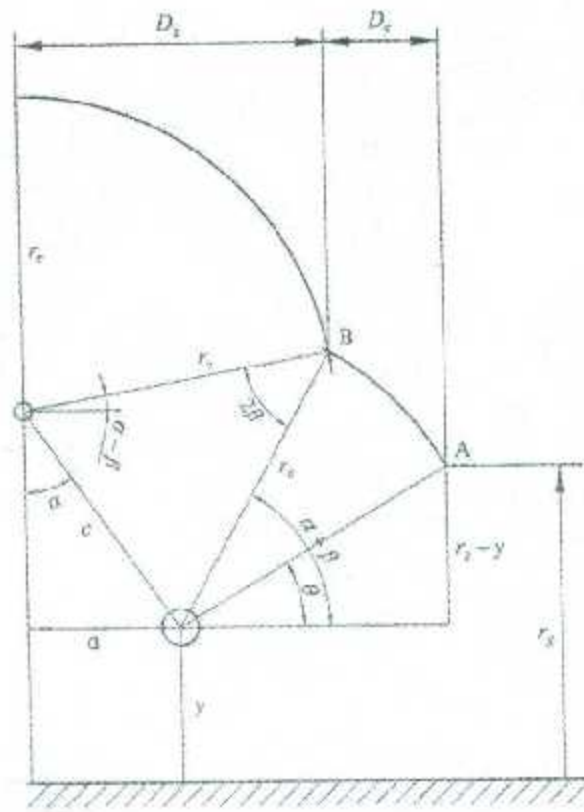


Figura 4.7: *Ángulos para el cálculo del modelo electrogeométrico [10]*

4.3.2. Fallas por flameo inverso

Cuando una descarga impacta en el hilo de guarda, se crean ondas transitorias de corriente y de tensión que viajan hacia ambos lados del conductor. Al llegar la onda a un punto de cambio de impedancia, como lo es una torre, se producen ondas reflejadas y refractadas en la cima de la torre, estas onda crean diferencias de potencial en los aislamientos entre los hilos de guarda y conductores de fase en diferentes puntos de la línea, estos puntos pueden ser a lo largo del claro o en los aisladores sostenidos en las torres. En el caso de que este potencial exceda los potenciales del aislamiento se producirán flameos entre las estructuras y conductores de fase, estos flameos se denominan flameos inversos. Para evaluar el esfuerzo al que se someten los aisladores debido a la corriente de rayo deben conocerse la tensión en la torre al nivel de la fase y la tensión inducida en el conductor debido a la tensión en la cima de la torre.

La forma de efectuar este cálculo, consiste en calcular las tensiones en la cima de la torre y el pie de la misma y después interpolar entre estas dos tensiones para cada fase. Asumiendo que la tensión cambia en forma lineal a lo largo de la torre. Para el cálculo de la tensión en la cima de la torre y en la base se utilizan las siguientes ecuaciones

$$V_{tt}(t) = V(t) - \alpha_T(1 + \beta_t) \sum_{n=1}^N (-1)^{n+1} V(t - 2nt_T)(\alpha_t\beta_t)^{n-1} \quad (4.14)$$

$$V_{rt}(t) = (1 - \alpha_t) \sum_{n=1}^N V[t - (2n - 1)t_T](\alpha_t\beta_t)^{n-1} \quad (4.15)$$

donde

V_{tt} : Tensión en la cima de la torre

V_{rt} : Tensión al pie de la torre

$V(t)$: Valor de la tensión incidente en la cima de la torre

$i(t)$: Corriente inyectada a la torre

$$\alpha_T = \frac{Z_t - R_t}{Z_t + R_t} \quad (4.16)$$

$$\beta_t = \frac{Z_g - 2Z_t}{Z_g + 2Z_t} \quad (4.17)$$

$$T_t = \frac{h}{v} \quad (4.18)$$

donde

Z_g : Impedancia transitoria del Hilo de Guarda [Ω]

Z_t : Impedancia transitoria de la torre [Ω]

R_t : Resistencia de aterrizamiento [Ω]

α_t : Coeficiente de reflexión al pie de la torre

β_t : Coeficiente de reflexión en la cima de la torre

h : Altura de la torre [m]

v : Velocidad de propagación

T_k : Tiempo de propagación en la torre [s]

La tensión en una fase se calcula

$$V_{fase}(t) = V_{rt}(t) + \frac{h + Y_{fase}}{h} (V_{tt}(t) - V_{rt}(t)) \quad (4.19)$$

Y_{fase} es la distancia de la cima de la torre a la fase en metros.

Las tensiones inducidas en los conductores de fase, se obtienen al multiplicar la tensión en la cima de la torre por el factor de acoplamiento electromagnético C. Este se calcula por la expresión

$$C_n = \frac{Z_{in} + Z_{jn}}{Z_{ii} + Z_{ij}} \quad (4.20)$$

C_n : Coeficiente de acoplamiento del conductor n

Z_{ii} : Impedancia propia de los hilos de guarda

Z_{ij} : Impedancia mutua entre hilos de guarda

Z_{in} : Impedancia mutua entre conductor e hilo de guarda i

Z_{jn} : Impedancia mutua entre conductor e hilo de guarda j

La tensión en el aislamiento de la torre se determina aplicando la siguiente expresión

$$V_{ais} = V_{fase} - CV_{tt}(t) \quad (4.21)$$

donde

V_{ais} : Tensión en el aislamiento [kV]

V_{fase} : Tensión de fase [kV]

El valor de la corriente crítica con la que ocurre flameo en cada fase se calcula mediante la relación

$$I_c = \frac{TCF - V_{FN}}{V_{ais}} \quad (4.22)$$

$$V_{CF} = TCF(t, L_{ca}) \quad (4.23)$$

TCF es la Ecuación (4.5b)

donde

I_c : Corriente crítica de flameo [kA]

V_{CF} : Tensión crítica de flameo [kV]

Z_c : Impedancia del conductor de fase [Ω]

L_{ca} : Longitud de la cadena de aisladores [m]

t : tiempo [s]

Al calcular la corriente crítica de flameo, deben considerarse todas las fases con sus correspondientes factores de acoplamiento y se debe seleccionar la menor de todas las corrientes posibles. Normalmente, esto ocurre para la fase externa en una disposición vertical. El IFB se calcula entonces como la probabilidad de que esta corriente sea excedida multiplicada por el número de rayos que caen en la línea

$$P(I_c) = \frac{1}{1 + \left(\frac{I_c}{31}\right)^{2.6}} \quad (4.24a)$$

$$IFB = N_L P(I_c) \quad (4.24b)$$

donde

IFB : Fallas por flameo inverso [No. de flameos/100km/año]

N_L : Mostrada en la Ecuación (4.1)

$P(I_c)$: Probabilidad de la incidencia de I_c

Tomando en cuenta el efecto del claro entre torres, el IFB se calcula

$$IFB = 0.8 N_L P(I_c) \quad (4.25)$$

El índice de fallas total será la suma de los dos valores calculados, es decir

$$IFT = IFBF * 2 + IFB \text{ No de salidas}/100\text{km/año} \quad (4.26)$$

Los cálculos de esta sección se muestran en la Tabla A.2

4.4. Sobretensión en la Torre

El modelo de una torre de transmisión es una línea de transmisión vertical igual en longitud a la altura de la torre y la velocidad de propagación de las sobretensiones en la torre en este equivalente se asume que es un 85% de la velocidad de la luz, esto se debe a la presencia crucetas, cuerpo de la torre y el material con el que esta diseñada que tiende a disminuir la velocidad de propagación. En la Figura 4.8 observamos algunas relaciones que pueden ser usados para aproximar la impedancia de sobretensión Z_T para distintos tipos de formas de torres [9].

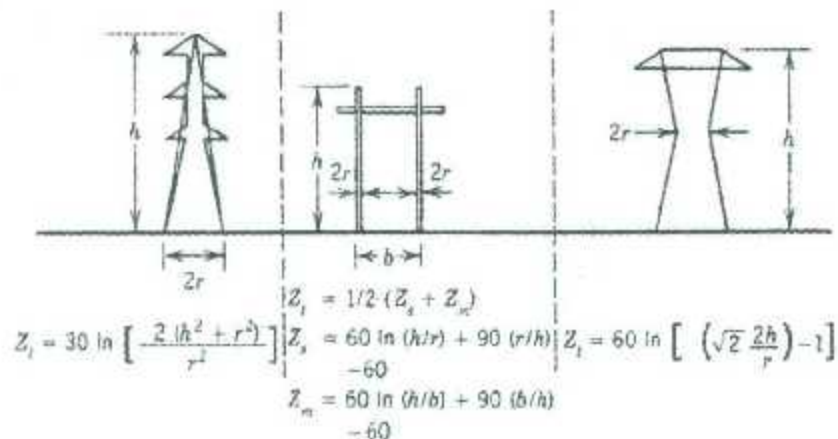


Figura 4.8: Aproximación para las impedancias de sobretensiones (ohms) para distintas clases de torres [9]

4.5. Sistemas de Puesta a Tierra

La sistemas de puesta a tierra de las torres de transmisión cuyo elemento principal es el electrodo tienen la función de dispersar las corrientes producidas por una des-

carga atmosférica a tierra, manteniendo adecuado los niveles de protección contra estos fenómenos y garantizar la seguridad de las personas alrededor de las torres. Cuando se presenta una diferencia de potencial entre la cruceta de la torre y el conductor de fase causado por la inducción de un rayo y esta excede la tensión de flameo del aislador, un flameo inverso sucederá a lo largo de la cadena de aisladores, que podría tener una influencia negativa provocando una falla o una salida en la línea. Con un buen diseño de un sistema de puesta a tierra se puede mejorar la fiabilidad del funcionamiento de una línea de transmisión evitando la diferencia de potencial y consecuentemente la presencia de los flameos. Para una red de alta y muy alta tensión, siempre se requiere una resistencia de puesta a tierra menor o igual 10Ω tomando como base la resistividad del subsuelo [12]. El cálculo aproximado de la resistencia de puesta a tierra de estructuras de líneas aéreas tiene la finalidad de servir de herramienta para poder visualizar rápidamente los valores esperados de una configuración típica. Los elementos básicos en la instalación de un sistema de puesta a tierra en estructuras de líneas aéreas son electrodos verticales, Contra-antenas y las patas de la torre. Las torres de transmisión instaladas en México tienen sus cuatro patas aterrizadas a tierra para obtener un valor específico de 10Ω . Si este valor no es alcanzado se requerirá una resistencia adicional en paralelo con la resistencia de las patas, esta resistencia se logra con la instalación de contra-antena y electrodos verticales, estos electrodos adicionales son instalados a una separación de 6m de los electrodos de cada pata de la torre o de otros electrodos adicionales [20].

4.6. Aisladores

Para mantener el conductor de fase aislado se emplea un soporte no conductor de vidrio o porcelana conocido como aislador. El arreglo de un esbozo aislante y herrajes para el acoplamiento no rígido con otras unidades o al herraje de sujeción se le conoce como aislador tipo suspensión. La cadena de aisladores es un conjunto de dos o más aisladores tipo suspensión instalados en serie, que aíslan y soportan no rígidamente los conductores de fase [13].

4.6.1. Cálculo de la longitud de la cadena de aisladores

4.6.1.1. Cálculo de la Longitud de la cadena de aisladores para Condiciones ambientales normalizadas

El NBAI se obtiene de la Tabla A.5. Dependiendo del nivel de operación de la línea escogemos el valor más adecuado. El NBAI está dada por la expresión

$$NBAI = TCF(1 - 1.3\sigma) \quad (4.27)$$

en donde:

NBAI: Nivel Básico de Aislamiento por Impulso de Rayo [kV]

TCF: Tensión Crítica de Flameo [kV]

$\sigma = 3\%$

Para el cálculo de la longitud del aislamiento podemos usar la siguiente expresión

$$TCF = K_r d \quad (4.28)$$

en donde:

K_r : Factor para rayo, Ver Figura A.6

d : distancia mínima requerida de fase a tierra [m]

De la Tabla 5.5 obtenemos el espaciamiento del aislamiento y aplicamos

$$\text{Número de aisladores} = \frac{d}{\text{Espaciamento}} \quad (4.29)$$

El resultado obtenido en la Ecuación 4.29 multiplicándolo por el espaciamiento obtenemos la longitud de la cadena de aisladores. En condiciones normalizadas los valores de temperatura, humedad y altitud son los siguientes [14]:

Temperatura $T_0 = 20^\circ\text{C}$

Presión $b_0 = 1013$

humedad absoluta $h_0 = 11 \text{ gr}/\text{m}^3$

Altitud = 0msnm

Basándose en la norma [14] se tiene la corrección de la presión atmosférica con la altitud

$$\frac{b_0}{b} = e^{\left(\frac{H}{5130}\right)} \quad (4.30)$$

en donde:

b_0 : Presión atmosférica.

b : Presión atmosférica con respecto al nivel del mar.

H : Altura msnm.

Para corrección, se selecciona el NBAI del sistema, por lo que la tensión de aguante requerido para cubrir el factor de corrección por altitud donde está instalada la línea es

$$V_{rc} = NBAI e^{\left(\frac{H}{5130}\right)} \quad (4.31)$$

Con el resultado obtenido en la Ecuación 4.31 se verifica la Tabla A.7 para conocer el número de aisladores.

4.6.1.2. Corrección de la Longitud del aislamiento por condiciones atmosféricas No Normalizadas

El siguiente paso es corregir los valores del NBAI para los distintos niveles de operación, debido a los efectos ambientales en los que operarán las líneas de transmisión. Se consideran dos factores de corrección por condiciones atmosféricas, por densidad de aire y de humedad. El factor de corrección por densidad de aire

$$K_{da} = \left(\frac{b}{b_0}\right)^m \left[\frac{273 + T_0}{273 + T}\right]^n \quad (4.32)$$

en donde:

T : Temperatura.

b : Presión atmosférica.

T_0 : Temperatura ambiente en condiciones estándares.

b_0 : Presión atmosférica en condición estándar.

m, n : Factores dependientes de la polaridad, tipo de tensión de prueba, forma de los electrodos y distancia disruptiva (igual a 1 para impulso por rayo).

Si se conoce la altitud del lugar donde se lleva a cabo el estudio podemos obtener el K_{da} que es el factor de corrección de la Figura ???. El factor de corrección por humedad se obtiene por la siguiente ecuación

$$K_h = K^w \quad (4.33)$$

en donde

$$w = 1$$

Debido a la geometría de entrehierros el valor de w su valor es 1. El factor K se obtiene de la Figura ??? y ???. Obtenido el valor K_h se calcula el factor de corrección por condiciones atmosféricas

$$K_{ca} = \frac{K_{da}}{K_h} \quad (4.34)$$

Para obtener la distancia corregida empleamos la siguiente ecuación

$$d_{co} = \frac{TCF}{(1 - 1.3\sigma)K_{ca}K_r} \quad (4.35)$$

Calculamos el Número de aislamiento empleando la Ecuación 4.29. Para el cálculo de la cadena de aisladores tratando de cubrir el nivel de contaminación de la zona aplicamos la Tabla 5.5. Para determinar la longitud y el número de aislamientos de una cadena de aisladores dependiendo de la zona de contaminación, aplicamos la siguiente ecuación

$$D_{ft} = D_{fmin}V_{max}K \quad (4.36)$$

en donde: D_{ft} : Distancia de fuga total.

D_{fmin} : Distancia de fuga mínima nominal.

V_{max} : Tensión máxima.

K : Factor de corrección.

Para conocer el número de aisladores

$$NA = \frac{\text{Distancia de fuga total}}{\text{Distancia de fuga mínima del Aislador}} \quad (4.37)$$

4.7. Apartarrays de Óxido Metálico

Tienen su base en las investigaciones que se han venido efectuando sobre las propiedades semiconductoras de los óxidos metálicos. Este tipo de apartarrays está basado en que la curva de tensión-corriente de las resistencias es menos lineal que la de los apartarrays de Carburo de Silicio; estos conducen cuando la tensión es superior a la tensión máxima de referencia y cierra la conducción prácticamente a un valor de corriente cero, cuando la tensión regresa a su valor normal. Los apartarrays están constituidos por varias piezas de resistencia no lineal, de óxido de zinc, apiladas dentro de una columna hueca de porcelana, sin entrehierros. En la parte superior de la porcelana tienen una placa relevadora de presión que, en caso de una sobrepresión interna, se rompe y permite escapar los gases hacia arriba sin producir daños laterales. Las resistencias no lineales son también unos pequeños cilindros formados por partículas de óxido de zinc de menor tamaño que en el caso de los convencionales. Las partículas están formadas por cristales de óxido de zinc de unos 10 micrones, rodeados por un material aglutinador de mayor resistencia eléctrica que el cristal, el cual produce una separación entre los cristales del orden de 0.1 de micrón y permite cierto contacto entre los cristales de óxido, ocasionando una resistencia no lineal. La resistencia de los cristales es mucho menor que la del material aglutinador, de tal manera que cuando aparece una sobretensión entre los elementos no lineales, casi toda la tensión aparece en la capa aglutinadora; así se produce un fenómeno multiplicador de corriente, típico de la electrónica de estado sólido y se obtiene una característica extremadamente no lineal entre la tensión aplicada y la corriente resultante, que se aproxima al apartarrayo ideal. La protección con apartarrays de

Óxidos Metálicos en líneas de transmisión se realiza en algunos países como una alternativa para reducir los índices de fallas producidas por descargas atmosféricas, particularmente en áreas que combinan niveles elevados de densidad de rayos a tierra y de resistividad del terreno. Es típico encontrar estas aplicaciones en líneas con trayectorias sobre terrenos montañosos y zonas con alto índice de descarga [15]. En la Figura 4.9 se muestran las tensiones que pueden presentarse en los apartarrayos en relación con la corriente que se drenarían a través de ellos.

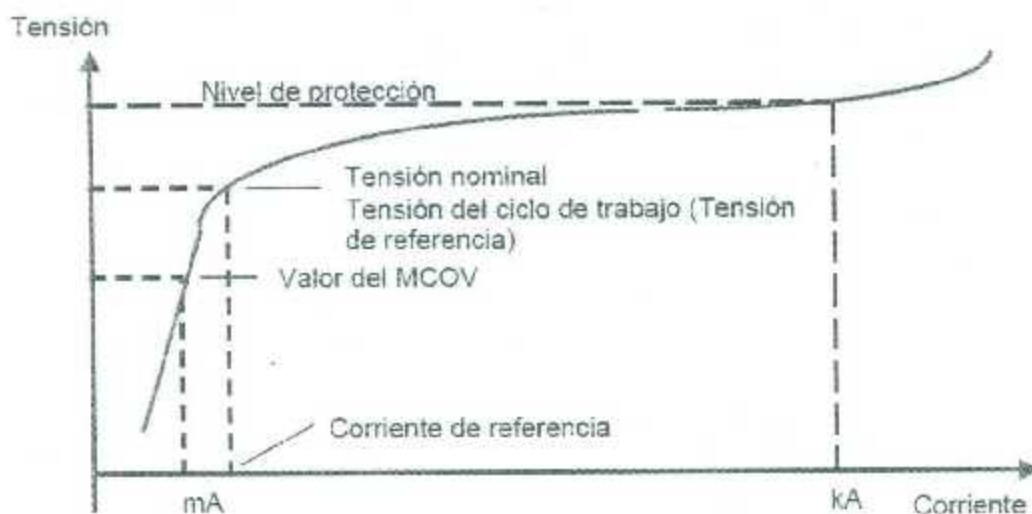


Figura 4.9: Nivel de protección en apartarrayos de óxido de zinc

Existen básicamente 2 tipos de apartarrayos a considerar, los que se conectan directamente a través de las cadenas de aisladores y los que se instalan con un entrehierro externo en serie. Los primeros se encuentran permanentemente conectados a la tensión de la línea a tierra y en condiciones normales de operación se encuentran sometidos a la circulación de la corriente de fuga. Estos apartarrayos, para su aplicación en líneas de transmisión, deben poseer algunas características particulares como ser ligeros en peso, con un diseño que los haga mecánicamente adecuados a las condiciones de intensos vientos a los que podrán estar sometidos en áreas abiertas y que no sean susceptibles a daño por impacto de proyectiles lanzados en acciones de vandalismo. Esto prácticamente excluye la utilización de apartarrayos con envoltente de porcelana, actualmente se usan envoltente de polímero [15].

4.7.1. Cálculo de la curva Tensión-Corriente

Para calcular la curva tensión-corriente aplicamos la Ecuación (4.38).

$$V = V_{ref} \left(\frac{I}{2500} \right)^{1/26} \quad (4.38)$$

$$V_{ref} = 1.39\sqrt{2}V_n$$

en donde

V_{ref} : Tensión de referencia [V]

V_n : Tensión nominal del apartarrayo

V : Tensión a obtener [V]

I : Corriente [A]

4.8. Coordinación de aislamiento

Los equipos e instalaciones eléctricas están sometidos a sobretensiones que pueden afectar su aislamiento y provocar una falla o una avería. Una sobretensión es una variable en el tiempo cuyo valor máximo es superior al valor pico de tensión nominal del sistema en el que se origina. Las sobretensiones en una red eléctrica se originan como consecuencia de una falla producida por una maniobra o una descarga atmosférica. El objetivo de coordinación de aislamiento es la selección de la rigidez dieléctrica de los materiales y equipos que conforman un sistema de potencia en función de las tensiones que pueden aparecer en la red a la cual esta será destinada y teniendo en cuenta las condiciones ambientales y las características de los dispositivos de protección disponibles [10]. Para lograr estos objetivos es necesario tener claro los siguientes conceptos:

1. Esfuerzo Dieléctrico – La probable magnitud de la descarga atmosférica, sobretensiones por maniobras, sobretensiones temporales etc., en la que un sistema de potencia será sometido.

2. Fortaleza – La capacidad de soporte dieléctrico de los sistemas de aislamiento (sólido, líquido o gas) cuyo trabajo es preservar la integridad del sistema eléctrico.

3. Protección – Son los dispositivos o arreglos que eliminarán las sobretensiones o reducir su efecto.

4. Economía – el costo de las diferentes aproximaciones o estrategias para que los conocimientos ganados en los puntos 1, 2 y 3 se pueden coordinar para prever una solución efectiva y económica [1].

4.8.1. Clasificación y Características de las sobretensiones

La clasificación de las sobretensiones se basa en el origen, debido a que la causa puede ser interna o externa a la red. Las sobretensiones de origen externo son aquellas que se producen por causas ajenas al sistema y generalmente son ocasionadas por una descarga atmosférica, las sobretensiones de origen interno son causadas por el propio sistema y se dividen en sobretensiones temporales y sobretensiones de maniobra. Una clasificación más completa de las sobretensiones mostradas en la Figura 4.10 se basa en las principales características con las que se presenta el proceso transitorio, por lo que se pueden distinguir las siguientes categorías:

(a) Sobretensiones temporales: Son aquellas que tiene una larga duración, varían de varios milisegundos hasta varios segundos, la frecuencia de estas sobretensiones es igual o próxima a la frecuencia de operación.

(b) Sobretensiones de frente lento: Son generalmente originadas por maniobras, tienen una duración corta que varía de pocos milisegundos, la frecuencia de este tipo de sobretensiones se presenta entre 2 a 20kHz.

(c) Sobretensiones de frente rápido: Son causados por descargas atmosféricas y tiene

una duración muy corta y una amplitud muy superior a la tensión de pico.

(d) Sobretensiones de frente muy rápido – Se presentan en fallas y maniobras en subestaciones de SF_6 , tienen una duración de pocos microsegundos, y su frecuencia es superior a 1MHz [10].

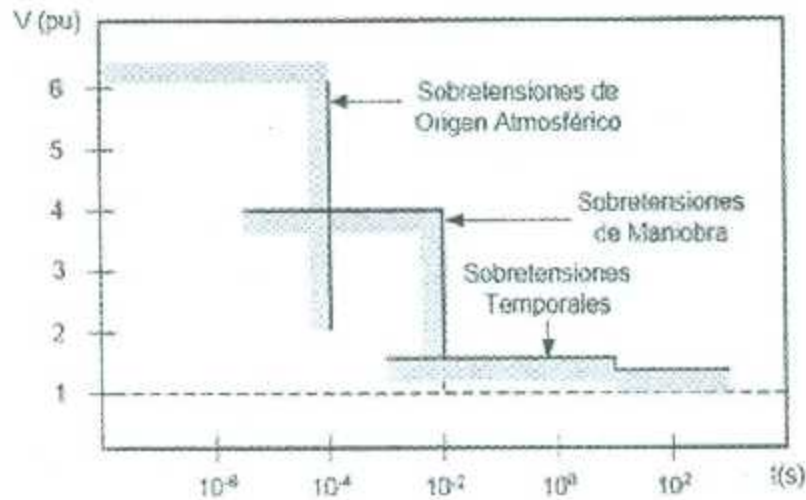


Figura 4.10: Clasificación de las Sobretensiones (adaptado de referencia [10])

4.8.2. Formas de Onda Normalizadas

Clasificación

(a) Tensión normalizada de corta duración a frecuencia industrial: Es una tensión sinusoidal, de frecuencia comprendida entre 48 y 62Hz, y una duración igual a 60 segundos.

(b) Impulsivo de tensión tipo maniobra normalizado: Es un impulso de tensión con un tiempo de subida hasta el valor pico de $250\mu s$ y un tiempo de cola de $2500\mu s$.

(c) Impulso de tensión tipo rayo normalizado: Es un impulso de tensión con un tiempo de subida hasta el valor de $1.2\mu s$ y un tiempo de cola $50\mu s$.

(d) Impulso de tensión tipo normalizado: Es un impulso de tensión combinado que tiene dos componentes del mismo valor pico y polaridad opuesta, la componente positiva es un impulso de maniobras normalizado, mientras que la componente negativa es un impulso de maniobra cuyos tiempos de subida y de cola no deberían ser inferiores a los del impulso positivo. Ambos deberían alcanzar el valor pico en el mismo instante [10]. Ver Figura A.4.

4.8.3. Comportamiento del aislamiento eléctrico

El aislamiento en los equipos se clasifican en dos grupos, los auto regenerables y los No autoregenerables, un aislamiento autoregenerable recupera sus propiedades cuando desaparece el flameo (Flashover) y las causas que lo han provocado (Gases y Líquidos), caso contrario de un aislamiento no autoregenerable puede quedar total o parcialmente averiado después de una descarga disruptiva (Sólidos). La rigidez dieléctrica de un aislamiento depende de la forma de onda de tensión aplicada, de la polaridad y de las condiciones ambientales. Como se ha mencionado la descarga disruptiva de un aislamiento es un fenómeno de naturaleza estadístico. Esto significa que un mismo aislamiento puede aguantar unas cuantas veces y fallar otras veces cuando es sometido de forma repetitiva a la misma onda de tensión, manteniendo constantes la polaridad y las condiciones ambientales. La descarga disruptiva en un aislamiento gaseoso empieza con un proceso de ionización causado por los electrones libres que son acelerados por el campo eléctrico aplicado. Con estos electrones libres se puede originar una avalancha que ioniza los átomos neutros y las moléculas y libera nuevos electrones. La descarga disruptiva del aislamiento tiene lugar cuando la avalancha consigue atravesar el espacio comprendido entre los electrodos. El tiempo de ruptura hasta que se consigue la descarga disruptiva total se descompone en tres periodos:

1. Se debe originar el efecto corona que arranque o acelere los electrones libres que terminarán provocando la avalancha.

2. El tiempo de propagación de los caminos precursores del arco, que disminuye conforme aumenta el valor del campo eléctrico aplicado.

3. El tiempo de propagación del canal conductor.

En general, el tiempo de aparición del efecto corona es despreciable frente a los otros dos y depende de la intensidad del campo eléctrico aplicado. La dependencia de la rigidez dieléctrica de un aislamiento gaseoso respecto a la forma de onda de tensión aplicada se cuantifica mediante las curvas de tensión-tiempo. Un aislamiento soporta una onda de tensión normalizada si el valor pico no es suficientemente elevado, en la Figura 4.11 se observa que si no rebasa el valor 2, no se produce un flameo. A medida que se va incrementando el valor pico de la onda y rebasa o llega al valor 1 de la Figura 4.11, se puede llegar a producir una descarga disruptiva que inicialmente se producirá en algún instante de la cola de la tensión, es decir después de haber alcanzado el valor pico de la onda. Como se ha mencionado con anterioridad los flameos en el aislamiento son de carácter estadístico, por lo que una vez superado este valor existe una probabilidad del 50 % que se produzca flameo y un 50 % de probabilidad que no, por tal motivo se le conoce como Tensión Crítica de Flameo (CFO). Finalmente si aumenta más el valor de pico, la descarga puede aparecer en algún instante durante el valor pico de la onda o en el frente de la onda antes de haberse alcanzado el valor máximo. La curva tensión-tiempo relaciona, por tanto, la tensión aplicada con el tiempo que tarda el aislamiento en contornear. Este tipo de curva depende de la polaridad y de la forma de onda de tensión aplicada. De igual manera el sistema de potencia se debe de diseñar mediante el Nivel Básico de Aislamiento al impulso. El NBAI es un valor de sobretensión mediante el cual el aislamiento de un equipo eléctrico debe de soportar en varias ocasiones una sobretensión sin que se presente una descarga disruptiva, ya que estas producen pérdidas permanentes de la rigidez dieléctrica del sistema y esto puede producir que se produzca una falla. Se espera que la probabilidad de flameo que se presenta sea de un 10 % y un 90 % que

no ocurra.

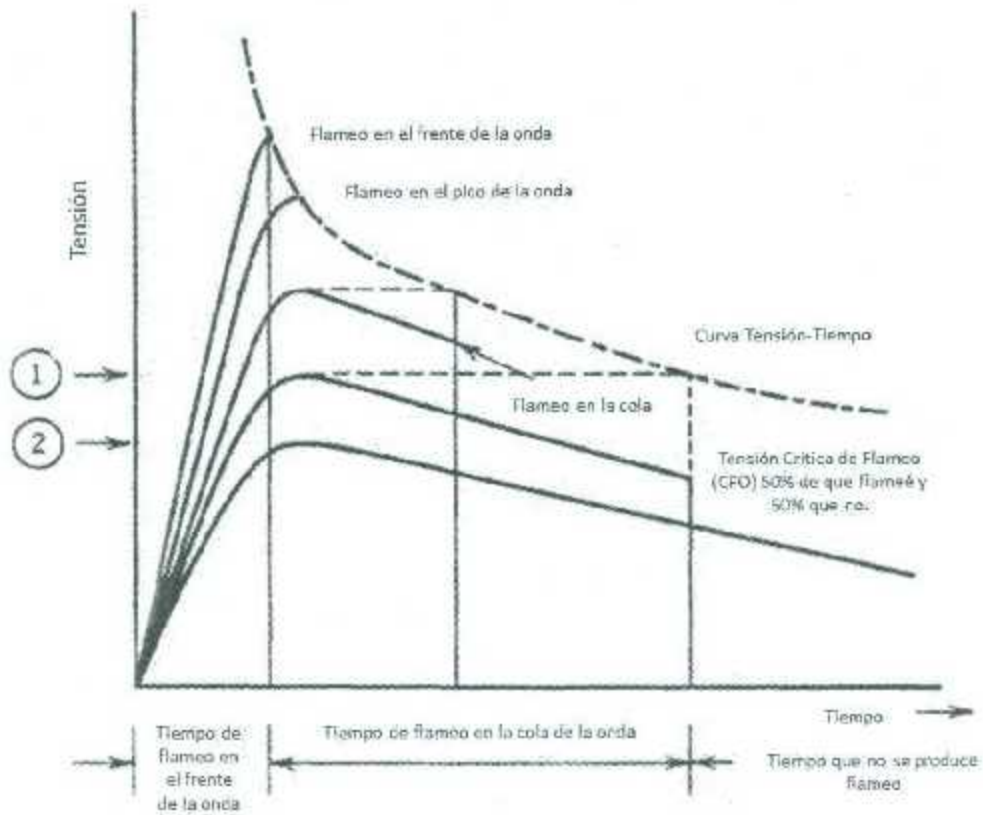


Figura 4.11: Curvas de tensión-tiempo (adaptado de referencia [1])

Capítulo 5

Levantamiento de Información y Modelado de la Línea

La zona de Transmisión Laguna y la Zona de Transmisión Durango tienen la función de abastecer la demanda de energía eléctrica de sus respectivas regiones. Cada región cuenta con líneas de uno o dos circuitos cuyas longitudes varían, algunas líneas cuentan con trayectorias que atraviesan regiones planas y otras que atraviesan regiones rodeadas de cerros. Es muy importante conocer las características del terreno donde se encuentran las líneas así como las condiciones climáticas, con el fin de conocer la probabilidad de que se presenten descargas atmosféricas en las líneas.

5.1. Líneas de estudio

De las líneas con las que cuenta la zona de transmisión Laguna y Durango actualmente existen dos que han presentado problemas, la línea 93030 localizada dentro de la subárea de la Laguna que ha presentado salidas debido contaminación, por la acción de animales y por descargas atmosféricas. La línea 93090 que es compartida por la subárea de Durango y La Laguna, la característica principal de esta línea es que ha presentado salidas debido a que han incidido una gran cantidad de descargas atmosféricas en las estructuras localizadas en los cerros, estas estructuras son más propensas a presentar este fenómeno.

La línea 93030 va de la S.E Gómez Palacio hacia la S.E Guadalupe Victoria y la 93090 va de la S.E Durango hacia la S.E Guadalupe Victoria, ambas líneas cuentan en la mayor parte con estructuras de un circuito, 9km antes de llegar a la S.E Guadalupe Victoria ambas líneas se enlazan en estructuras de dos circuitos.

5.1.1. Línea 93030

Esta línea al ser de una longitud corta no cuenta con transposición.

Tabla 5.1: Características de la Línea 93030

| Datos de la línea | |
|--------------------------------------|--|
| Nombre de la Línea | 93030 S.E Gómez Palacio – SE Guadalupe Victoria |
| Distancia total | 30km |
| Longitud [L] y Número de estructuras | 21km de línea con 50 estructuras de 1 circuito 9km de línea con 21 estructuras de 2 circuitos |
| Tipo de estructuras | Metálicas autosoportadas de 1 circuito y de 2 Circuitos |
| Conductor | 900 ACSR “Canary” R_{in} : 0.491cm R_{out} : 1.4757cm Resis: 0.0736 Ω /Km en DC [17] |
| Hilos de Guarda | 3/8, Acero S/M 2(1 X Cono) R_{out} : 0.457cm Resis: 1.463 Ω /Km en DC [18] |
| Altura sobre el nivel del mar | Varían de su ubicación geográfica (1130 - 1247) msnm |
| Tipo de Zona de Contaminación | Alta |
| Tensión de operación de la línea | 230kV |
| Número de aisladores de la línea | 16 aisladores del tipo 32SVC111CM |

5.1.2. Línea 93090

La línea tiene transposición.

Tabla 5.2: Características de la Línea 93090

| Datos de la línea | |
|--------------------------------------|--|
| Nombre de la Línea | 93090 S.E Durango – S.E Guadalupe Victoria |
| Distancia total | 202km |
| Longitud [L] y Número de estructuras | 193km de línea con 450 estructuras de 1 circuito 9km de línea con 21 estructuras de 2 circuitos |
| Tipo de estructuras | Metálicas autosoportadas de 1 Circuito y de 2 Circuitos |
| Conductor | 900 ACSR “Canary” R_{in} : 0.491cm R_{out} : 1.4757cm Resis: 0.0736 Ω /Km en DC [17] |
| Hilos de Guarda | 3/8, Acero S/M 2(1 X Cono) R_{out} : 0.457cm Resis: 1.463 Ω /Km en DC [18] |
| Altura sobre el nivel del mar | Varían de su ubicación geográfica (1100 - 1500) msnm |
| Tipo de Zona de Contaminación | Alta |
| Tensión de operación de la línea | 230kV |
| Número de aisladores de la línea | 16 aisladores del tipo 32SVC111CM |

En las Figura 5.1 se muestra la fotografía de una Estructura Autosoportada E92B11+4 empleada en la Línea 93030, esta estructura es empleada igual en la Línea 93090. En la Figura 5.2 se detallan las características geométricas de la estructura y en la Tabla 5.3 se detallan las medidas de cada sección que conforman la Estructura.

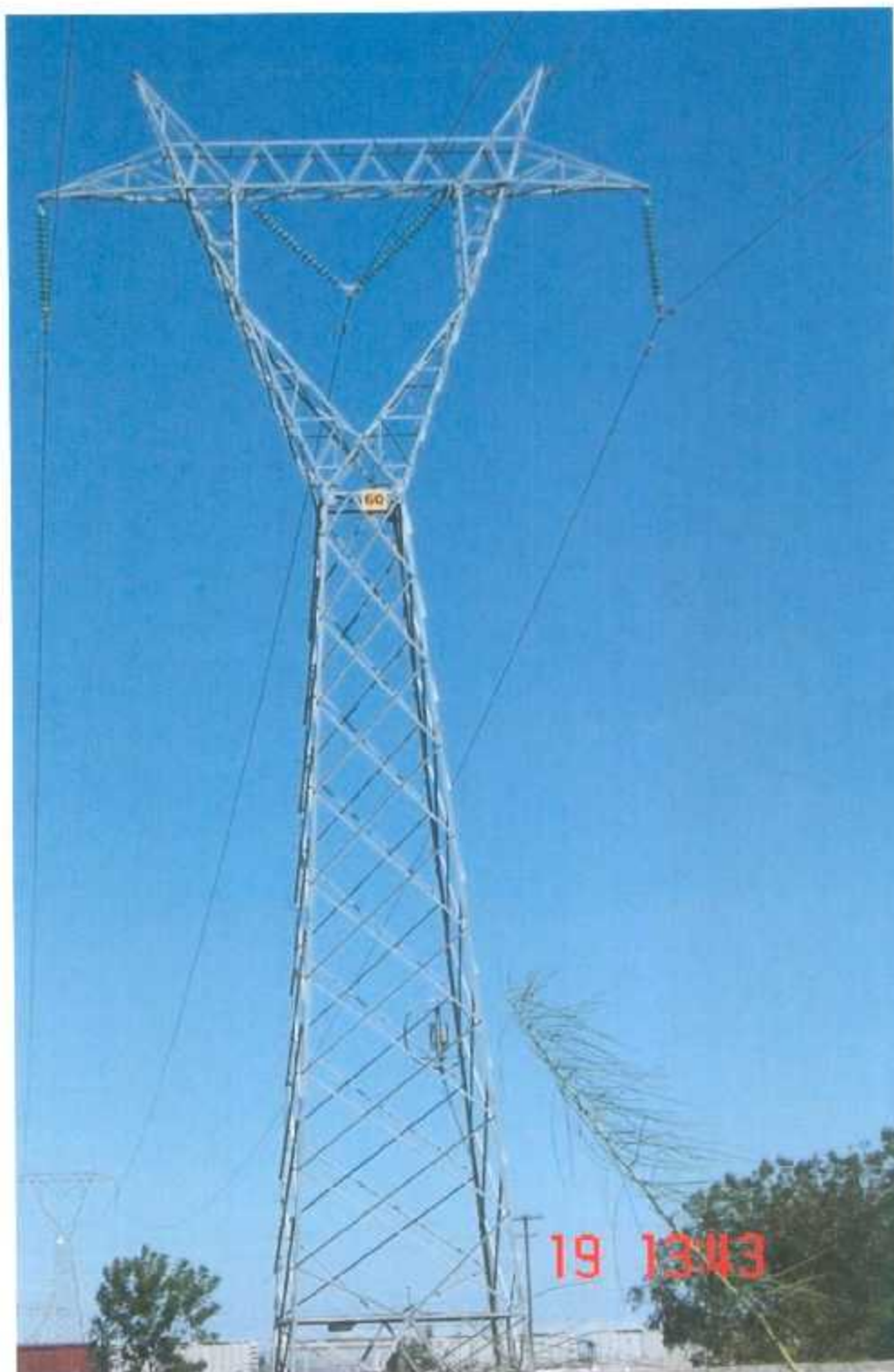


Figura 5.1: Estructura Autosoportada de 1 circuito E92B11+4 localizada en la Línea 93030

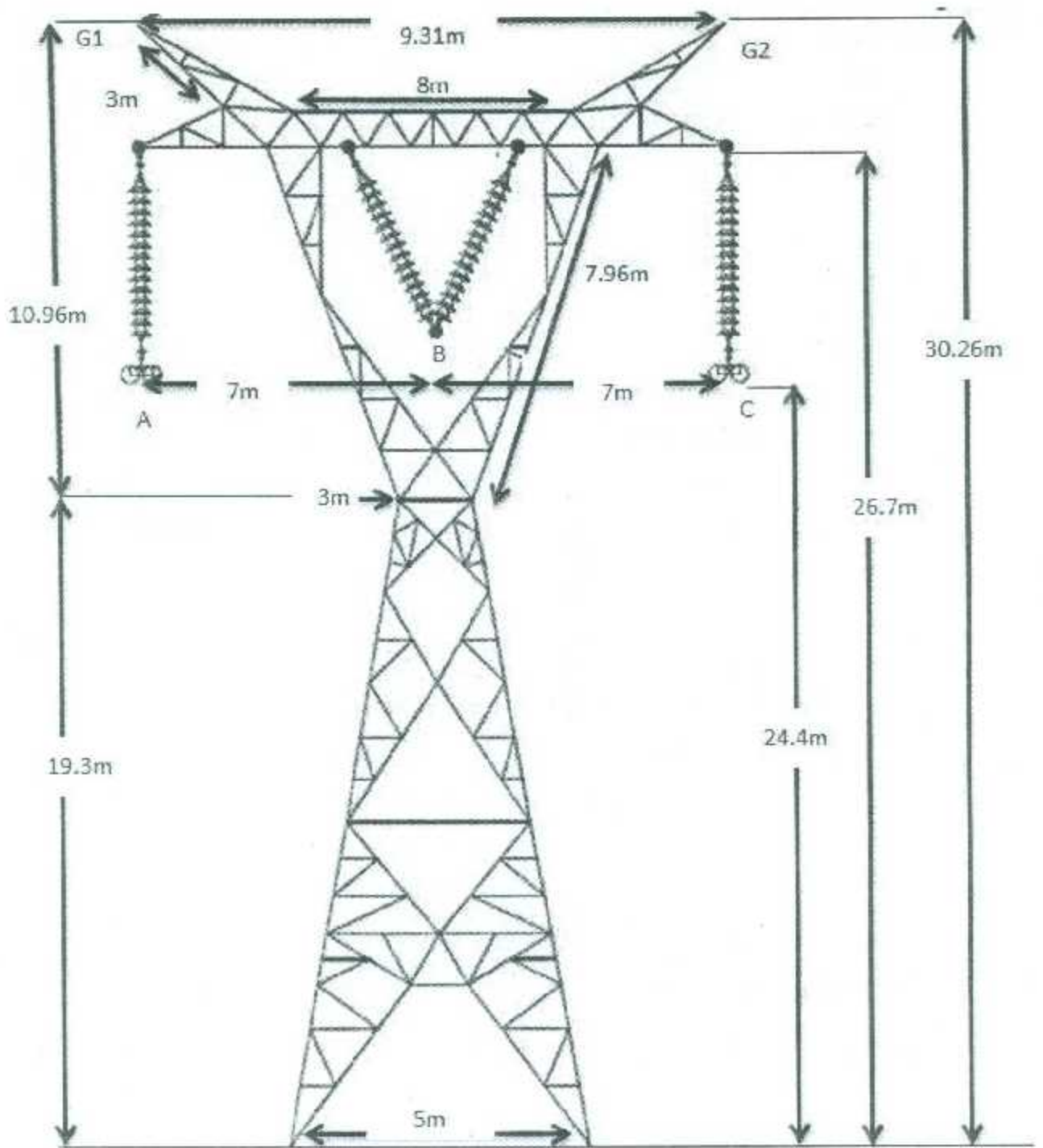


Figura 5.2: Características geométricas de la Estructura Autosoportada E92B11+4 de 1 Circuito empleada en la Línea 93030 y 93090

Tabla 5.3: Medida de cada sección que conforman la Estructura Autosoportada E92B11+4 de 1 circuito

| Sección de la Estructura autosoportada de un circuito | Longitud |
|---|----------|
| Altura de los Hilos de Guarda G1-G2 [h] | 30.26m |
| Altura del conductor de fase A [y] | 24.4m |
| Altura del conductor de fase B [y] | 24.4m |
| Altura del conductor de fase C [y] | 24.4m |
| Separación entre los hilos de Guarda | 9.31m |
| Separación entre los conductores de Fase A-B | 7m |
| Separación entre los conductores de Fase B-C | 7m |
| Separación entre los conductores de Fase A-C | 14m |
| Libramiento de los Hilos de Guarda | 26.8m |
| Libramiento de los conductores de Fase | 12.4m |
| Longitud de la Cintura de la torre | 3m |
| Longitud del Puente o trabe | 8m |
| Longitud de la Cadena de Aisladores [L_{ca}] | 2.3m |
| Longitud de la Base de la torre | 5m |
| Altura del Cuerpo piramidal | 19.3m |
| Longitud de la Ventana de la torre | 7.96m |
| Longitud de la Cruceta de Hilos de guarda | 3m |
| Longitud de Cruceta de Fases A y C | 3m |

En la Figura 5.3 se muestra una fotografía de la Estructura Autosoportada de 2 Circuitos E92B21+4 localizada en el tramo de 9km donde se enlazan las líneas 93030 y 93090 donde solo se cuenta unicamente con estructuras de este tipo. En la Figura 5.4 se muestran las características geométricas y en la Tabla 5.4 se detallan las medidas de las secciones que conforman la estructura.



Figura 5.3: Estructura Autosoportada de 2 circuitos E92B21+4 localizada en el tramo de 9km

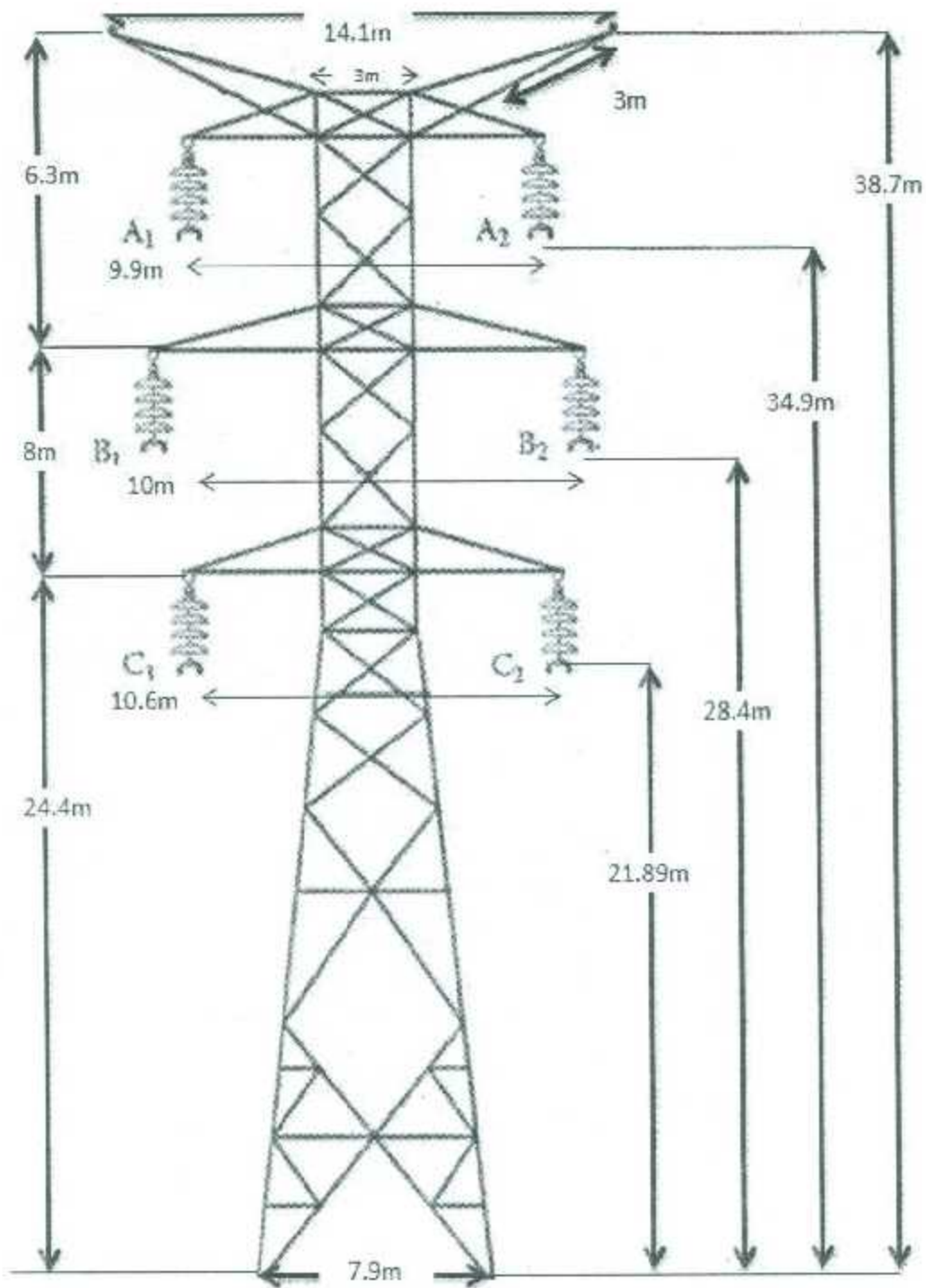


Figura 5.4: Características geométricas de la Estructura Autosoportada E92B21+4 de 2 Circuitos empleada en el tramo de 9km

Tabla 5.4: Medida de cada sección que conforman la Estructura Autosoportada E92B21+4 de 2 circuitos

| Sección de la Estructura autosoportada de un circuito | Longitud |
|--|----------|
| Altura de los Hilos de Guarda [h] | 38.7m |
| Altura de los conductores de fase A_1 y A_2 | 34.9m |
| Altura de los conductores de fase B_1 y B_2 | 28.4m |
| Altura de los conductores de fase C_1 y C_2 | 21.89m |
| Separación entre los hilos de Guarda | 14.10m |
| Separación entre los conductores Fase A_1 y A_2 | 9.9m |
| Separación entre los conductores Fase B_1 y B_2 | 10m |
| Separación entre los conductores Fase C_1 y C_2 | 10.6m |
| Libramiento Hilos de guarda | 35.25m |
| Libramiento de los conductores de Fase A_1 y A_2 | 22.91m |
| Libramiento de los conductores de Fase B_1 y B_2 | 16.41m |
| Libramiento de los conductores de Fase C_1 y C_2 | 9.91m |
| Longitud de la Cadena de Aisladores [L_{ca}] | 2.3m |
| Longitud de la Base de la torre | 7.9m |
| Altura del Cuerpo piramidal | 24.2m |
| Longitud de la Base del cuerpo recto | 3m |
| Longitud del Cuerpo Recto entre Fases B y C | 8m |
| Longitud del Cuerpo Recto entre Fases B e Hilo de Guarda | 6.3m |
| Longitud de Crucetas de hilo de guarda | 3m |
| Longitud de Crucetas de conductores de fase | 3m |

La línea 93030 cuenta con estructuras de Suspensión y de Tensión. La línea 93090 cuenta con estructuras de Suspensión, Tensión y de Transposición. El tipo de aislador que se emplea en las líneas 93030, 93090 y la línea de doble circuito es mostrado en la Figura 5.5

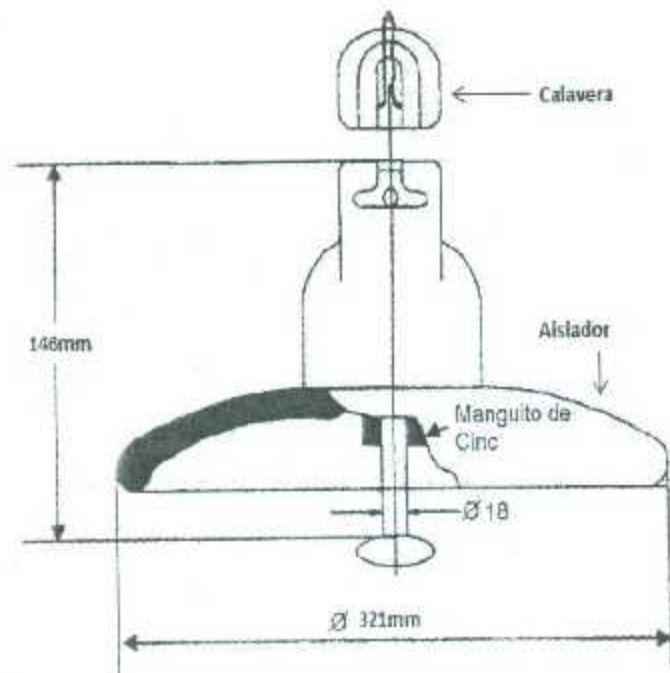


Figura 5.5: Aislador de suspensión de vidrio templado

Tabla 5.5: Característica de los aisladores de suspensión de vidrio templado

| | |
|---|---------------------|
| Descripción corta | 32SVC111CM |
| Diametro | 321mm |
| Espaciamiento | 146mm |
| Distancia mínima de fuga | 612mm |
| Tipo | Suspensión [S] |
| Material | Vidrio templado [V] |
| Herraje de acoplamiento | Calavera [C] |
| Resistencia electromecánica | 111kN |
| Soporta y aísla conductores aéreos en zonas | Corrosivas [C] |
| Tipo de contaminación | Muy contaminada [M] |

5.2. Modelado

Realizar el modelo de una línea de transmisión es necesario contar con todas sus características geométricas y de operación, cada uno de estos datos serán de importancia para ingresarlos en cada uno de los bloques que nos servirán para construir en el software ATP los diferentes elementos que conforman la línea. En las siguientes secciones se explicará que bloques y que datos se deben de ingresar para diseñar cada elemento de la línea.

5.2.1. Modelado de los conductores de fases

Para el modelado de los conductores de fases en ATP se emplea el bloque 'Transposed Lines (Clarke) 3 phases'. El bloque nos pide ingresar las variables de la resistencia por unidad de longitud de secuencia así como las impedancias de secuencia. Estos valores son calculados por el Método de Carson, para facilitar la solución de este método se realizó un programa en el lenguaje libre de programación 'Python'. En la Tabla 5.6 se muestran las impedancias de secuencia obtenidas en este programa.

Tabla 5.6: Impedancias de secuencias de las líneas

| | |
|--|---|
| Impedancias de secuencia de la línea 93030 | $Z_0=8.94404596+j26.01045504 \Omega$ $Z_+=1.57202551+j10.50485724 \Omega$ $Z_- =1.57202551+j10.50485724 \Omega$ |
| Impedancias de secuencia de la línea 93090 | $Z_0=81.09791131+j235.84332924 \Omega$ $Z_- -14.25395019 +j95.25017925 \Omega$ $Z_- -14.25395019 +j95.25017925 \Omega$ |
| Impedancias de secuencia de la línea de doble circuito | $Z_0= 3.23591704+j12.37138419 \Omega$ $Z_+ =6.65964746e-01 +j4.37876748 \Omega$ $Z_- =6.65964746e-01 +j4.37876748 \Omega$ |

El siguiente dato a ingresar al bloque es la velocidad de propagación de la onda en el conductor, para obtener estos valores se aplica las Ecuaciones (2.7) y la Ecuación (2.8), las variables de estas Ecuaciones se muestran en la Tabla 5.7

Tabla 5.7: Variables para calcular la Inductancia y la Capacitancia

| | |
|--|--------------------------------|
| Radio exterior $[d]$ | 0.014757m |
| Radio interior $[r]$ | 0.00491m |
| Permeabilidad magnética absoluta $[\mu_0]$ | 1.25664×10^{-6} Vs/Am |
| Permitividad eléctrica $[\epsilon]$ | 1.328×10^{-11} |

Ingresando los valores de la Tabla 5.7 a las ecuaciones (2.7) y (2.8) obtenemos

$$L = 2.2008 \times 10^{-7} \text{ H/m}$$

$$C = 1.328 \times 10^{-11} \text{ F/m}$$

Ingresando L y C a la Ecuación (2.6) obtenemos la velocidad de propagación

$$v = 244779589 \text{ m/s}$$

En la Tabla 5.8 se muestran los valores ingresados al bloque 'Transposed Lines (Clarke) 3 phases' de cada línea analizada.

Tabla 5.8: Valores a ingresar en el bloque 'Transposed Line' del ATP

| Elemento | Línea 93030 | Línea 93090 | Doble Circuito |
|---|--------------------|--------------------|--------------------|
| R/l_+ Resistencia secuencia positiva $[\Omega/m]$ | 4×10^{-4} | 7×10^{-5} | 7×10^{-5} |
| R/l_0 Resistencia secuencia cero $[\Omega/m]$ | 7×10^{-5} | 4×10^{-3} | 3×10^{-4} |
| Z_+ Impedancia secuencia positiva $[\Omega]$ | 10.6218 | 96.3108 | 4.4291 |
| Z_0 Impedancia secuencia cero $[\Omega]$ | 27.5052 | 249.3971 | 12.7875 |
| v_+ Velocidad de propagación $[m/s]$ | 244779517 | 244779517 | 244779517 |
| v_0 Velocidad de propagación $[m/s]$ | 244779517 | 244779517 | 244779517 |

En la Figura 5.6 se muestra el Bloque 'Transposed Lines (Clarke) 3 phases' de la Línea 93030 con las variables ya ingresadas. Para la Línea 93090 y la de Doble circuito se ingresan los valores mostrados en la Tabla 5.8.

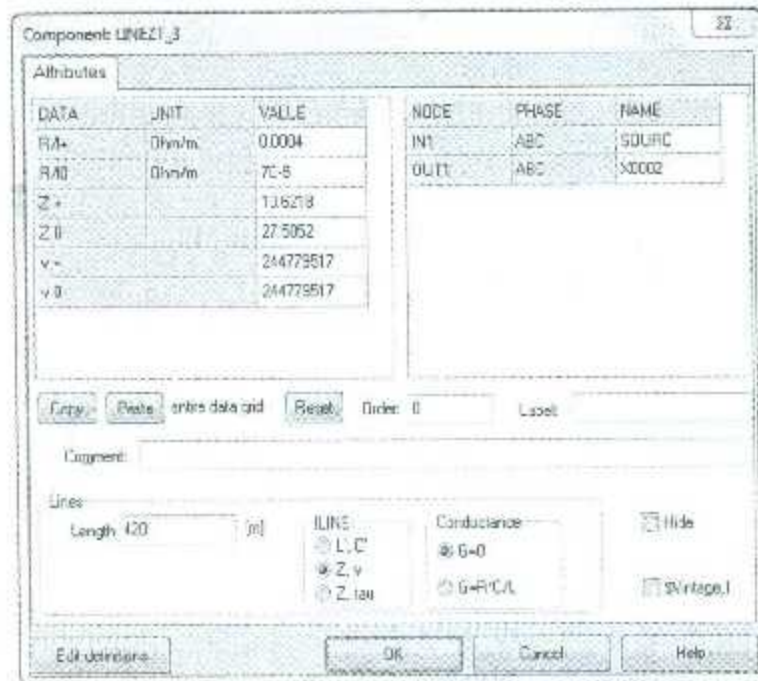


Figura 5.6: Bloque 'Transposed Line' del ATP para el modelado de la línea 93030

5.2.2. Modelado de los Hilos de guarda

Para modelar el hilo de guarda en ATP se emplea el bloque 'Transposed Lines (Clarke) 1 phase'. Los valores a ingresar a este bloque son la impedancia transitoria (propia) mostrada en la Tabla A.2 para la línea de 1 circuito y la línea de 2 circuitos. La velocidad de propagación es la misma que se obtuvo de los conductores de fase y la Resistencia se obtiene de catálogos constructivos del hilo de guarda. En la Tabla 5.9 se muestran los datos que son ingresados al bloque.

Tabla 5.9: Valores a ingresar en el bloque 'Transposed Lines' del ATP para Hilos de Guarda

| Elemento | Línea 93030 | Línea 93090 | Doble Circuito |
|--|-------------|-------------|----------------|
| R/l Resistencia por unidad de longitud [Ω/m] | 0.0015 | 0.0015 | 0.0015 |
| Z Impedancia transitoria del hilo de Guarda [Ω] | 569 | 569 | 584 |
| v Velocidad de propagación [m/s] | 244779517 | 244779517 | 244779517 |

En la Figura 5.7 se muestra el bloque aplicado para el hilo de guarda de la línea 93030. Para la línea 93090 y la de doble circuito los valores a ingresar son los que se muestran en la Tabla 5.9.

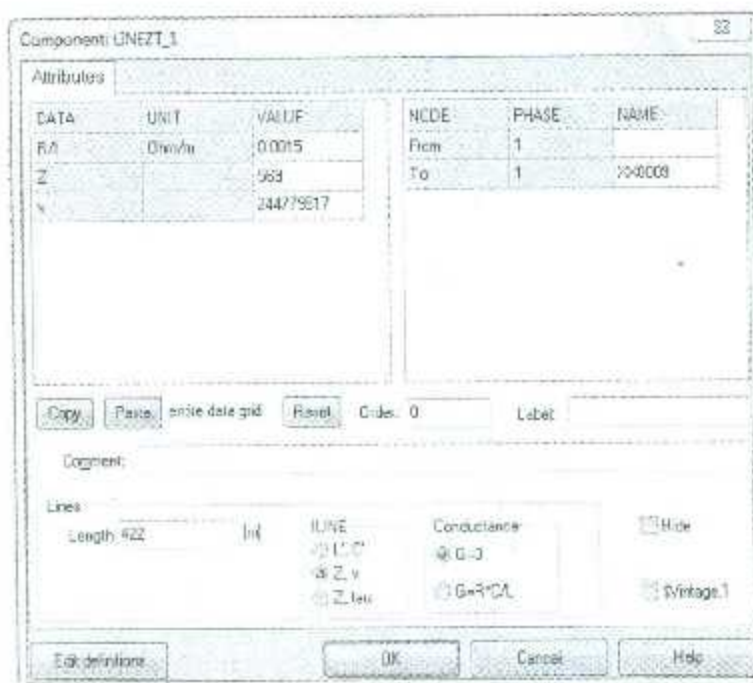


Figura 5.7: Bloque 'Transposed Lines' del ATP para el modelado del Hilo de Guarda de la línea 93030

5.2.3. Características geométricas de los conductores

El bloque empleado en ATP para modelar las características de los conductores es 'Line/Cable Model data' o LCC, el bloque LCC está formado por dos pestañas, la primera; que se llama 'Model' nos permite ingresar las constantes de la línea así como el modelo empleado para calcular el comportamiento transitorio. La pestaña Model se divide en 3 secciones, la primera 'System Type' que en la Tabla 5.10 se muestra un resumen de los valores seleccionados para esta pestaña de cada línea analizada.

Tabla 5.10: Valores ingresados en la sección 'System Type' de la pestaña Model del Bloque LCC del ATP

| Elemento | Aplicación | Línea 93030 | Línea 93090 | Doble Circuito |
|---------------------|--|-------------|-------------|-----------------------|
| Transposed | Indica si la línea cuenta con transposición | No activado | Activado | No activado |
| Auto bunding | Permite la instalación automática de las constantes de línea | Activado | Activado | Activado |
| Skin effect | Indica si se toma en cuenta el efecto piel | Activado | Activado | Activado |
| Segmented ground | Indica si los hilos de Guarda no son continuos | No activado | No activado | No activado |
| Real transf. Matrix | Indica que se asume que la matriz de transformación es real. Recomendado para simulaciones de transitorios | Activado | Activado | Activado |
| #Ph | Indica número de fases más hilos de guarda | 5, 3F-2HG | 5, 3F-2HG | 8, 3F(Cada línea)-2HG |

La segunda sección de la pestaña Model es 'Standard data', en la Tabla 5.11 se muestran los parámetros seleccionados en cada una de las líneas analizadas.

Tabla 5.11: Valores ingresados en la sección 'Standard Data' de la pestaña Model del Bloque LCC del ATP

| Elemento | Aplicación | Línea 93030 | Línea 93090 | Doble Circuito |
|--------------------------|---|-------------|-------------|----------------|
| Rho [Ωm] | Resistividad del terreno | 100 | 100 | 100 |
| Freq. init [Hz] | Frecuencia en la que se calculan los parámetros de la línea o el punto de frecuencia más baja | 0.001 | 0.001 | 0.001 |
| Length [km] | Longitud de claros entre torres | 420 | 428 | 428 |

La tercera sección llamada 'Model' homónima a la pestaña; nos permite seleccionar el modelo para simular el comportamiento transitorio de la línea, el modelo seleccionado para el presente análisis es el 'JMarti'. Al seleccionar este modelo se abrirá un nuevo recuadro, en la Tabla 5.13 se presenta un resumen de los valores seleccionados.

Tabla 5.12: Valores ingresados en la sección 'Model' del Bloque LCC del ATP

| Elemento | Aplicación | Valor |
|---------------|---|-------|
| Decades | Número de décadas de la escala logarítmica | 8 |
| Points/Dec | Número de puntos de frecuencia por década | 10 |
| Freq. Matrix | Frecuencia a la cual se calcula la matriz de transformación | 5000 |
| Freq. SS [Hz] | Frecuencia en estado estable | 60 |

La segunda pestaña del bloque LCC se llama 'Data' la cual nos permite ingresar las características geométricas de las estructuras de las líneas y las características constructivas de los conductores de fase e Hilos de guarda. En la Tabla 5.13 se muestra un resumen de los datos seleccionados de la pestaña 'Data' para cada una de las líneas analizadas.

Tabla 5.13: Valores ingresados en la sección 'Data' de la pestaña Model del Bloque LCC del AIP

| Elemento | Aplicación |
|--------------------------|--|
| Ph.no | Número de conductores de fase e hilos de guarda. En esta sección se ingresa el número total de conductores tomando en cuenta los de fase e hilos de guarda |
| Rin [cm] | Radio interno del conductor |
| Rout [cm] | Radio externo del conductor |
| Resis [Ω /km DC] | Resistencia en DC. Al seleccionar 'Skin effect' en la sección System Type de la pestaña Model se selecciona la Resistencia en DC |
| Horiz [m] | Separación horizontal entre los centros de los conductores o conjunto de conductores tomando como referencia el centro de la torre |
| Vtower [m] | Altura vertical del centro del conductor o del conjunto de conductores medido desde la torre hasta el superficie del terreno |
| Vmid [m] | Libramiento de los conductores de fase e Hilos de Guarda |
| Separ [cm] | Distancia de separación entre los centros de dos conductores adyacentes de un conjunto de conductores |
| Alpha [deg] | Posición angular del centro a uno de los conductores o del conjunto de conductores |
| NB | Número de conductores que forman parte del conjunto de cables |

Los valores de los elementos 'Alpha' y 'Separ' en el presente análisis son 0 debido a que las líneas 93030, 93090 y la línea de Doble Circuito están formadas por un solo conductor por fase. En la Figura 5.8 se muestra la pestaña 'Model' del bloque LCC con los parámetros seleccionados de la Línea 93030 y en la Figura 5.9 se presenta la pestaña 'Data' del bloque LCC con las características de los conductores y las características geométricas de la estructura de un circuito de la línea 93030.

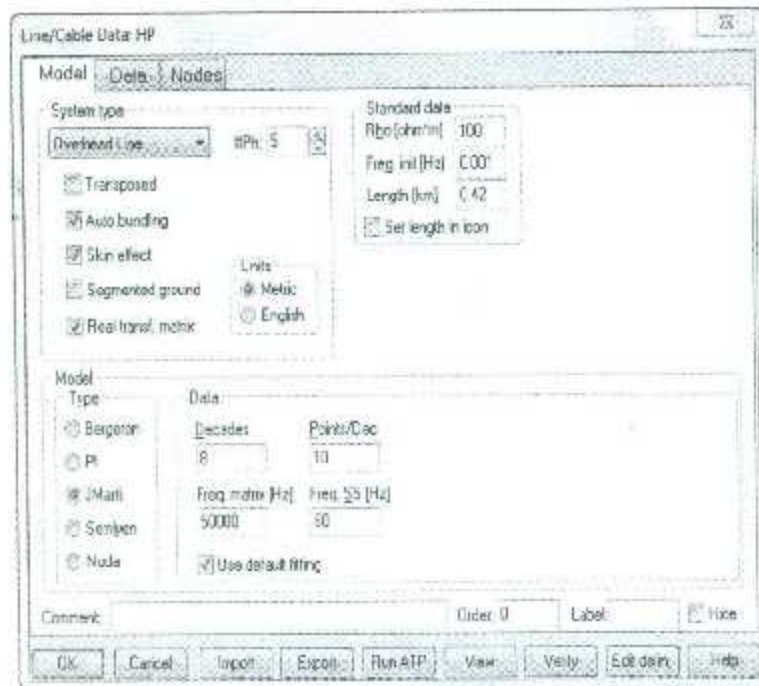


Figura 5.8: Pestaña 'Model' del bloque LCC del ATP para la Línea 93030

Line/Cable Data: HP

| Line/Cable Data: HP | | | | | | | | | | |
|---------------------|-------|-------|--------|-------------|--------|--------|------|-------|-------|----|
| Model | Data | Nodes | | | | | | | | |
| # | Ph.no | Rin | Rout | Rsis | Horiz | Vtower | Vmid | Separ | Alpha | NB |
| | | [cm] | [cm] | [ohm/km DC] | [m] | [m] | [m] | [cm] | [deg] | |
| 1 | 1 | 0.491 | 1.4757 | 0.0736 | -7 | 24.4 | 12.4 | 0 | 0 | 1 |
| 2 | 2 | 0.491 | 1.4757 | 0.0736 | 0 | 24.4 | 12.4 | 0 | 0 | 1 |
| 3 | 3 | 0.491 | 1.4757 | 0.0736 | 7 | 24.4 | 12.4 | 0 | 0 | 1 |
| 4 | 4 | 0 | 0.457 | 1.463 | -4.655 | 30.26 | 26.8 | 0 | 0 | 1 |
| 5 | 0 | 0 | 0.457 | 1.463 | 4.655 | 30.26 | 26.8 | 0 | 0 | 1 |

Figura 5.9: Pestaña 'Data' del bloque LCC del ATP para la Línea 93030

5.2.4. Modelado de las Estructuras

Las torres de transmisión pueden ser representadas por una combinación de varias líneas de transmisión con sus respectivas impedancias características y tiempo de propagación, en serie con su resistencia de puesta a tierra [19]. La torre en el ATP se modela empleando el bloque 'Transposed Lines (Clarke) 1 phase', mismo bloque que se emplea para modelar el Hilo de guarda, la diferencia es que para las estructuras se ingresa la impedancia transitoria de la torre, este valor se calcula a partir de las fórmulas dadas en la Figura 4.8. Para calcular adecuadamente la impedancia transitoria, la estructura se divide en secciones. La Figura 5.10 nos muestra como se diseñó la torre autoportada de un circuito y la Figura 5.11 nos muestra como se diseñó la torre autoportada de dos circuitos en el ATP.

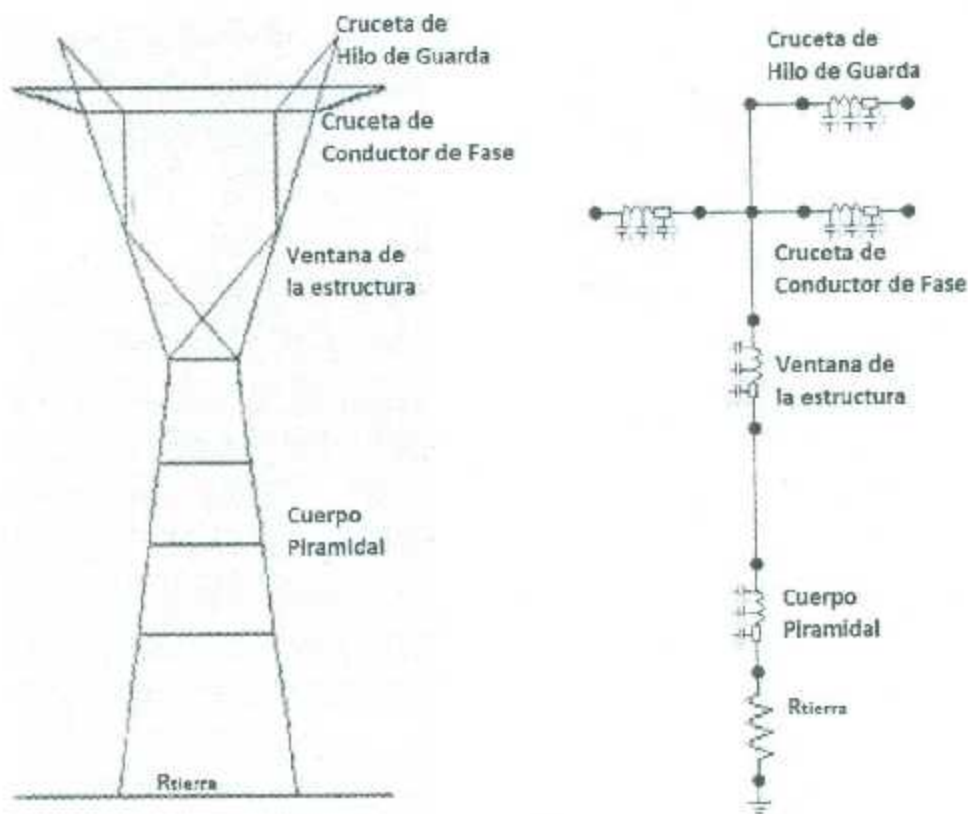


Figura 5.10: Modelo en ATP para la Estructura Autoportada de 1 circuito E92B11+4 (adaptado de referencia [19])

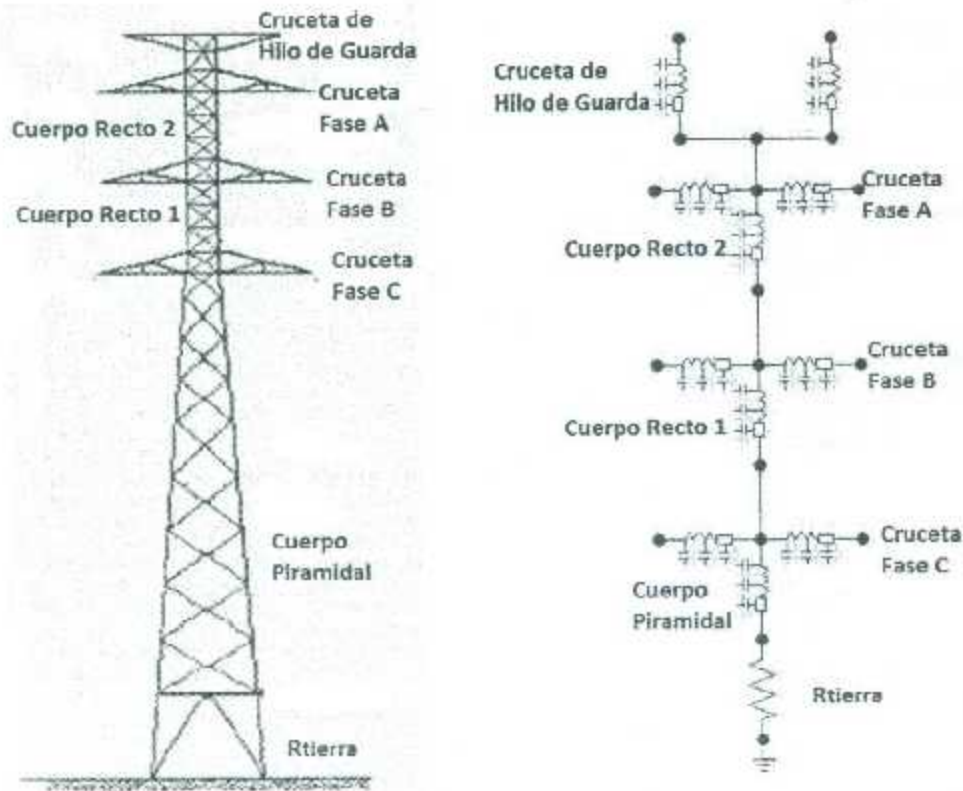


Figura 5.11: Modelo en ATP para la Estructura Autosoportada de 2 circuitos E92B21+4 (adaptado de referencia [19])

En la Tabla 5.14 se muestran las impedancias transitorias de cada sección en la que fue dividida la torre autosoportada de un circuito aplicando las Ecuaciones de la Figura 4.8.

Tabla 5.14: Impedancia transitoria de las secciones de la torre autosoportada de un circuito

| Sección | Altura [h] | Radio [r] | Impedancia [Z_t] |
|---------------------------|------------|-----------|----------------------|
| Cuerpo Piramidal | 19.3m | 2.5m | 185 Ω |
| Ventana de la Estructura | 7.96m | 4m | 145 Ω |
| Cruceta Conductor de Fase | 3m | 1.1m | 84 Ω |
| Cruceta Hilo de Guarda | 3m | 1.1m | 84 Ω |

En la Tabla 5.15 se muestran las impedancias transitorias de cada sección en la que

fue dividida la torre autoportada de dos circuitos aplicando las Ecuaciones de la Figura 4.8.

Tabla 5.15: Impedancia transitoria de las secciones de la torre autoportada de dos circuitos

| Sección | Altura [h] | Radio [r] | Impedancia [Z_t] |
|------------------------------------|------------|-----------|----------------------|
| Cuerpo Piramidal | 24.4m | 3.95m | 130 Ω |
| Cruceta de los Conductores de Fase | 3m | 1.1m | 84 Ω |
| Cruceta Hilo de Guarda | 3m | 1.1m | 84 Ω |
| Cruceta Recto 1 | 8m | 1.5m | 122 Ω |
| Cruceta Recto 2 | 6.3m | 1.5m | 105 Ω |

La velocidad de propagación de la onda en cada sección en que es dividida cada estructura es un 85% de la velocidad de propagación [9]. Por lo que la velocidad en cada sección es

$$v=208062589\text{m/s}$$

5.2.5. Modelado de la Red de tierras

En la Figura 5.10 y la Figura 5.11 se observa que en la parte inferior del modelado de las torres se tiene un bloque que representa una resistencia que esta aterrizada. Esta resistencia nos sirve para modelar la red de puesta a tierra de una manera sencilla. Por norma CFE establece que el valor de la resistencia no debe rebasar un valor de R_t 10 Ω [20].

5.2.6. Modelado de la Cadena de Aisladores

Generalmente se acepta representar la cadena de aisladores por un conjunto de interruptores controlados por una tensión para fenómenos de descargas atmosféricas. El bloque que se emplea para modelar en ATP la cadena de aisladores es 'Switch

Voltage-controlled'. El dato que se debe de ingresar al bloque es una tensión máxima en la que el interruptor debe de soportar, en este caso la tensión aplicada es el Nivel Básico de Aislamiento por Impulso de Rayo (BIL), el nivel de tensión que trabajan las líneas 93030, 93090 y la de doble circuito es de 230kV, por lo que el BIL es de 1050kV. En la Tabla 5.16 se muestran los valores ingresados en el bloque.

Tabla 5.16: Valores ingresados en el bloque 'Switch Voltage-controlled' del ATP

| Elemento | Aplicación | Valor |
|----------|--|---------|
| T-cl | Tiempo de cierre del interruptor [s] | 0 |
| T-de | Tiempo mínimo en [s] en que el interruptor debe permanecer cerrado | 0.001 |
| Imar | El margen de corriente en [A] | 0 |
| V-fl | Tensión de Ruptura [V] | 1050000 |

El interruptor cerrado permanece en estas condiciones si el nivel de tensión no supera el BIL, si se produce una sobretensión que sobrepasa de este valor, el interruptor cierra y empieza a conducir corriente que es cuando se presentaría el flameo inverso en la cadena de aisladores. En la Figura 5.12 observamos el bloque 'Switch Voltage-controlled' para modelar la cadena de aisladores con los datos mostrados en la Tabla 5.16.

| Atributes | | | | | |
|-----------|------|---------|------|-------|------|
| DATA | UNIT | VALUE | NODE | PHASE | NAME |
| T-cl | | 0 | SWF | A | 1 |
| T-de | | 0.001 | SWT | 1 | CFI1 |
| Imar | | 0 | | | |
| V-fl | | 1050000 | | | |

Figura 5.12: Bloque 'Switch Voltage-controlled' del ATP para modelar la cadena de aisladores

5.2.7. Modelado del Apartarrayo

El bloque empleado para modelar un apartarrayo en ATP es el 'ZNO - exponential current-dependent resistor, TYPE 92', este bloque esta constituido de 2 pestañas, 'Attributes' y 'Characteristics', esta última nos permite ingresar los valores obtenidos en la Ecuación (4.38) para crear la curva Tensión-Corriente. En la Tabla 5.17 y la Tabla 5.18 se muestran los datos ingresados a cada pestaña.

Tabla 5.17: Valores ingresados a la Pestaña 'Attributes' del bloque ZNO del ATP

| Elemento | Aplicación | Valor |
|----------|---|-------------|
| Vref | Voltaje de referencia [V] | 353836.2333 |
| Vflash | Voltaje de descarga en por unidad [V] | -1 |
| Vzero | Voltaje inicial en voltios [V] | 0 |
| #COL | Número de columnas del apartarrayos | 1 |
| #SER | Número de bloques en serie de cada rama | 1 |
| ERRLIM | Tolerancia adecuada | 0.05 |

Tabla 5.18: Valores de la curva Tensión-Corriente del Bloque 'ZNO' del ATP

| I [A] | V [V] |
|-------|-------------|
| 1 | 261886.0123 |
| 10 | 286136.8826 |
| 100 | 312633.4043 |
| 500 | 332597.3935 |
| 1000 | 341583.5268 |
| 2000 | 350812.4478 |
| 3000 | 356326.183 |
| 4000 | 360290.7163 |
| 5000 | 363396.1986 |
| 10000 | 373214.4555 |

5.2.8. Modelado de la fuente de Alimentación

Para modelar la tensión de operación de la línea en ATP se emplea la fuente de tensión trifásica 'AC 3PH-Steady-state (cosinus) function'. A este bloque solo se le ingresa el valor de la tensión de operación de la Línea y la frecuencia del sistema.

5.2.9. Modelado de la Descarga Atmosférica

La función de doble exponencial solía ser la función que más se usaba para modelar la descarga atmosférica debido a su simplicidad, facilidad de integración y diferenciación. Los principales inconvenientes de esta función es que es una representación burda de las corrientes de descargas atmosféricas medidas, esta función tiene la discontinuidad de la primera derivada en el tiempo de comienzo $t = 0$ y por lo tanto no es conveniente para los cálculos. Otro inconveniente de esta función es la necesidad de determinar los coeficientes necesarios para que la fuente cumpla con los valores de amplitud de pico, tiempo de pico y tiempo de semi amplitud, lo que manualmente es complicado [21]. Se han propuesto diferentes funciones para simular una descarga atmosférica con una mayor exactitud y precisión que la función de doble exponencial. Una de ellas es la Función Heidler. La función de Heidler permite representar con mejor aproximación la onda normalizada, particularmente en que la pendiente en el tramo inicial es nula y de crecimiento gradual. La Ecuación de la función Heidler es

$$i(t) = \frac{I_p}{\eta} \frac{k^n}{1 + k^n} e^{-t/\tau_2} \quad (5.1)$$

I_p : Amplitud máxima o pico de la corriente

η : Factor de corrección

n : El factor de inclinación actual, $k = t/\tau_1$

τ_1, τ_2 : Constantes de incremento de [1] y tiempo de decaimiento respectivamente

La fuente empleada para simular la descarga atmosférica en ATP en el presente trabajo es 'HEIDLER - Surge function'. Un inconveniente de los parámetros que solicita

el ATP es que, si bien se suministra el valor de pico y el tiempo para el valor de pico, la constante de tiempo τ no es una indicación directa del tiempo de semi amplitud. Esto hace que, para obtener una función con parámetros determinados, deba calcularse esta constante de tiempo, lo que no es sencillo de efectuar manualmente. En este bloque ingresamos los datos para obtener una sobretensión que cumpla con las características del rayo, con un tiempo de frente y un tiempo de cola de $8/20\mu s$ [16]. En la Tabla 5.19 se muestran los datos ingresados al bloque de la fuente Heidler. En la Figura 5.13 se presentan el bloque de la fuente Heidler en el ATP.

Tabla 5.19: Valores ingresados al bloque de la fuente 'Heidler' del ATP

| Elemento | Aplicación | Valor |
|-----------|--|-------------------------|
| Amplitude | Amplitud de la descarga Atmosférica [A] | Variable |
| T_f | Tiempo que la onda llega a su valor pico desde que inicia [s] | 8×10^{-6} |
| tau | Tiempo desde cero hasta el punto donde la cola tiene el 37 % del valor pico[s] | 1.4897×10^{-5} |
| n | Factor influyente en la pendiente de crecimiento de la onda | 5 |
| Tstart | Tiempo en que empieza el disturbio [s] | -1 |
| Tstop | Tiempo en que se detiene la simulación de la fuente [s] | 1 |

| Attributes | | |
|------------|--------|-----------|
| DATA | UNIT | VALUE |
| Amplitude | Ampere | 240000 |
| T_f | s | 8E-6 |
| tau | s | 1.4897E-5 |
| n | | 5 |
| Tstart | s | -1 |
| Tstop | s | 1 |

Figura 5.13: Bloque Heidler del ATP para modelar la Descarga Atmosférica

5.2.10. Modelo final de las líneas

Se diseñaron en total 6 modelos; 2 para cada una de las líneas analizadas que son la 93030, 93090 y la línea de Doble Circuito. El primero de los dos modelos para cada línea consiste en simular una descarga que incide en el Hilo de Guarda que esta conectado directamente a la Estructura, este primer modelo está conformado por 5 estructuras, en la estructura central denominada 'Estructura 3' es donde se simula que la descarga atmosférica hace contacto con el Hilo de Guarda. El segundo modelo consiste en simular que una descarga atmosférica incide a mitad del claro de la línea que es formado por 2 estructuras, este modelo a diferencia del primero esta constituido por 4 Estructuras, entre las dos estructuras centrales denominadas 'Estructura 2' y 'Estructura 4' se simula que la descarga atmosférica incide en el claro formada por ambas torres.

En la Figura 5.14 se muestra el modelo para una línea de un circuito donde la descarga atmosférica incide en el Hilo de Guarda que está conectado directo a la Estructura. Se puede observar que se simula que la descarga incide en la Estructura central denominada 'Estructura 3'. Este modelo es empleado para la línea 93030 y 93090. El modelo de la línea de doble circuito para este caso es similar la única diferencia es que se aplican modelos para estructuras de dos circuitos.

En la Figura 5.15 se muestra el modelo para una línea de doble circuito donde la descarga atmosférica incide a la mitad del claro del Hilo de Guarda localizado entre dos estructuras. En la Figura se observa que la descarga incide en el claro formado por la 'Estructura 2' y 'Estructura 4'. Para el caso de una línea de un circuito el modelo es similar, la diferencia es que se emplean estructuras de 1 circuito en vez de estructuras de 2 circuitos.

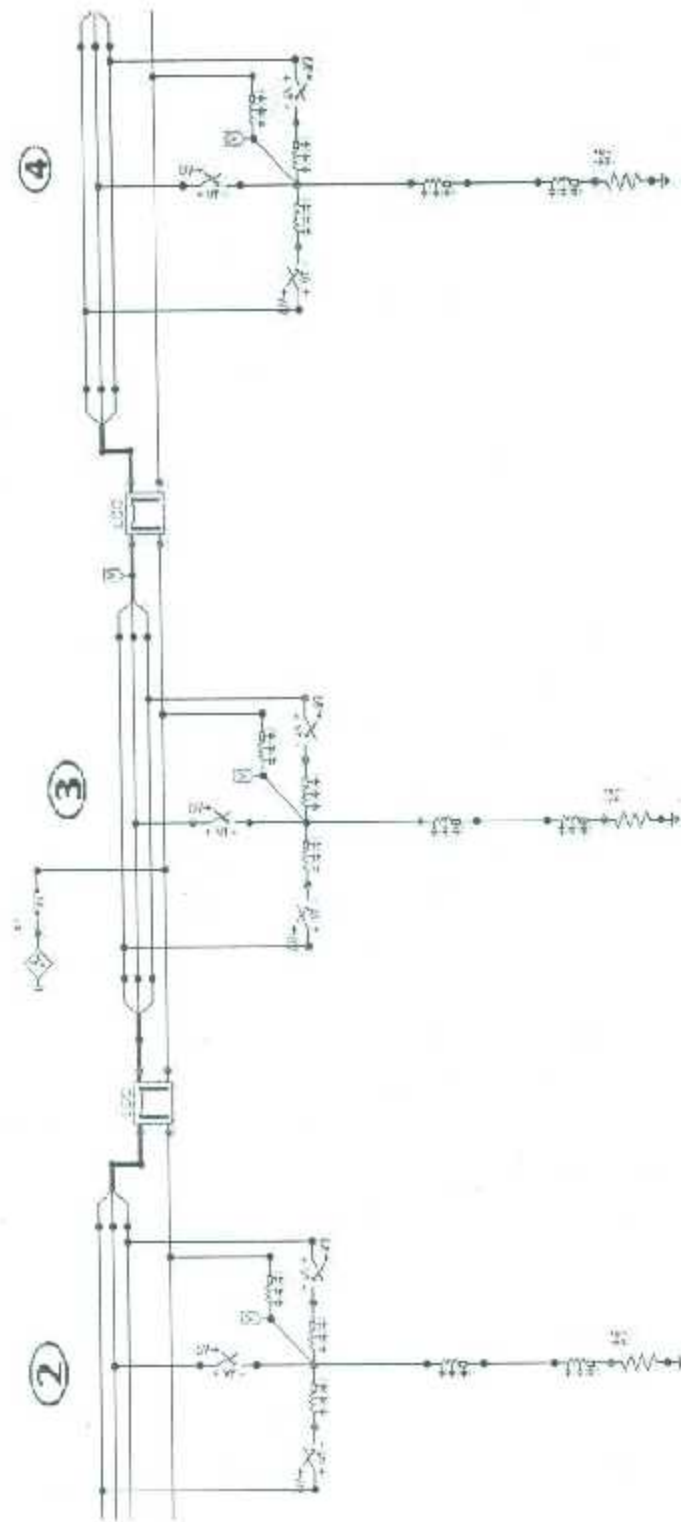


Figura 5.14: Modelo de una línea de un circuito conformado por Estructuras E92B11+4

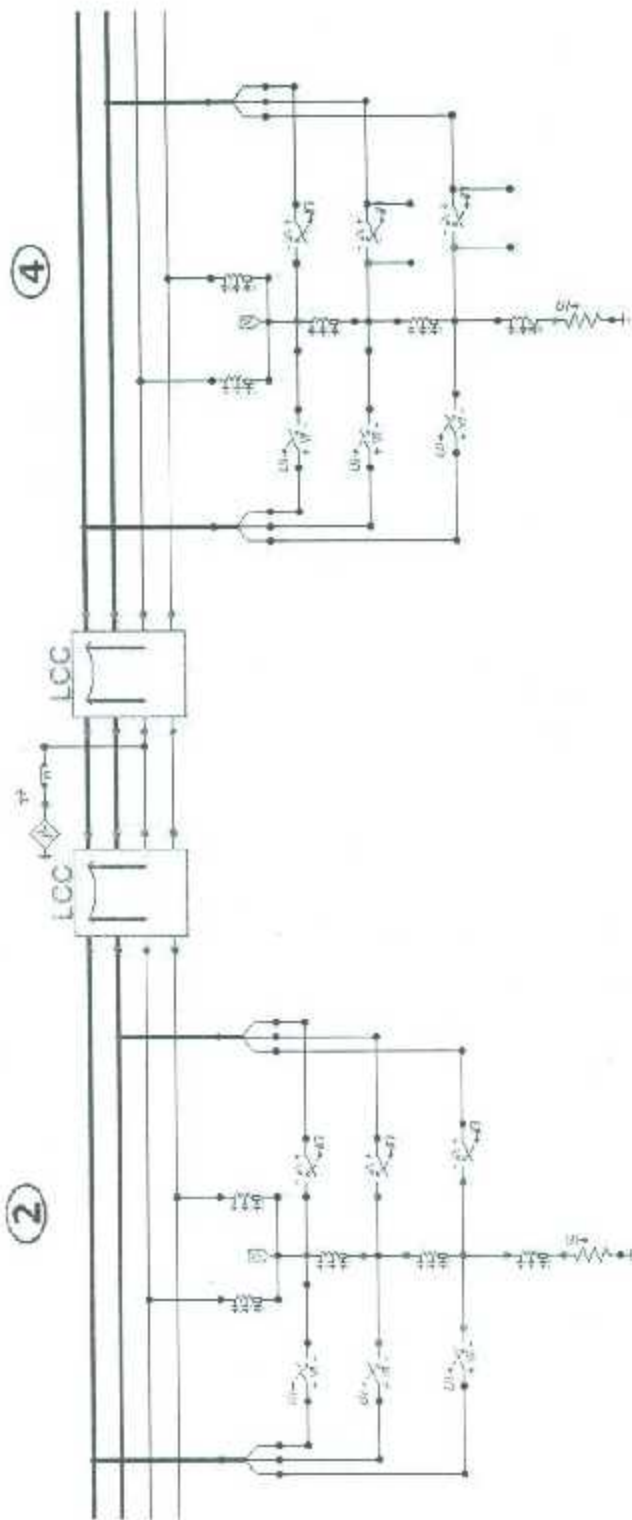


Figura 5.15: Modelo de una línea de dos circuitos conformado por Estructuras E92B21+4

La Figura 5.16 es el modelo de una estructura autosoportada de 1 circuito E92B11+4

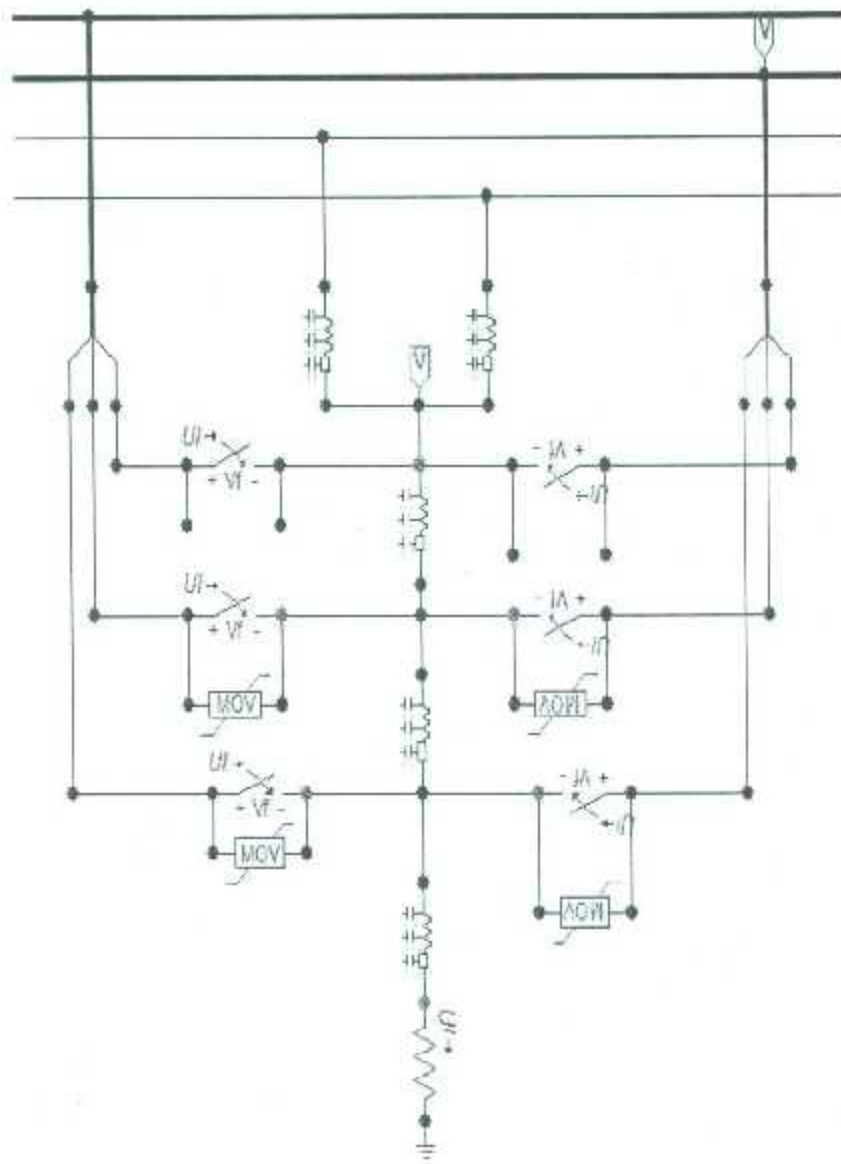


Figura 5.17: Modelo de la estructura autosoportada de 2 circuitos E92B21+4 con apartarrayos

Capítulo 6

Análisis de Resultados

En esta sección se mostrarán las diferentes pruebas que se aplicaron a los modelos realizados. El objetivo es analizar como la corriente de rayo según el modelo de Heidler afecta a cada elemento que conforman la línea; ver Sección 5.2.9. En la Figura 6.1 se muestra la forma de onda de corriente empleada con un tiempo de frente (t_f) de $8\mu s$ y un tiempo de cola (t_c) de $20\mu s$ para $30kA$.

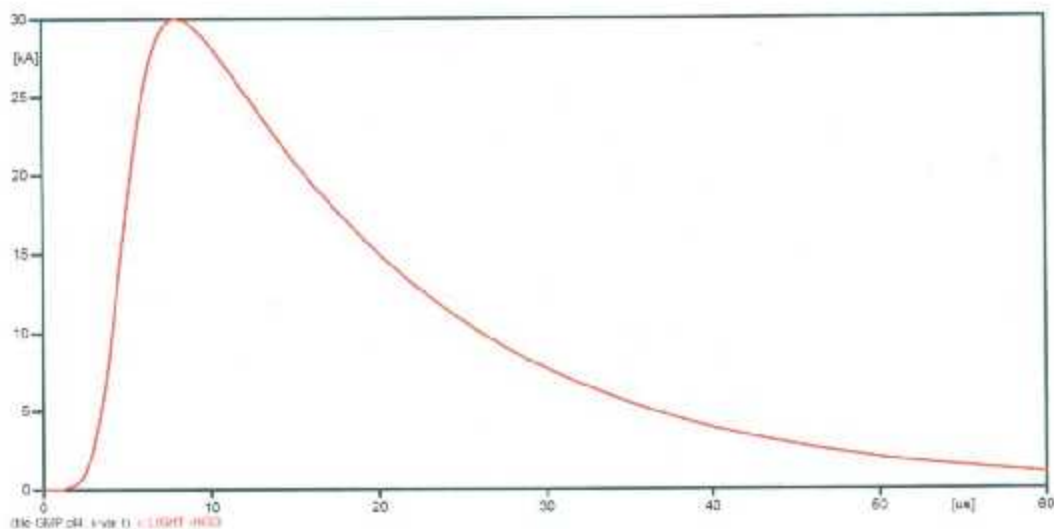


Figura 6.1: Simulación de la Corriente de rayo según el Modelo de Heidler de $30kA$

Como se mencionó en el Capítulo anterior se realizaron dos modelos para cada línea, el primero cuando una descarga incide en el hilo de guarda conectado en la

Estructura y el segundo cuando la descarga incide a mitad de un claro del hilo de guarda.

6.1. Simulación línea 93030

6.1.1. Caso con resistencia de puesta a tierra de 10Ω

En este primer caso se observa como es el comportamiento de la línea en condiciones que actualmente se encuentra, con una resistencia de puesta a tierra de 10Ω . La amplitud inicial de la descarga atmosférica es de 30kA , en la Figura 6.2 se muestra el comportamiento de la tensión que se presenta en las fases cuando una descarga atmosférica ha incidido en la conexión del Hilo de guarda en la estructura central.

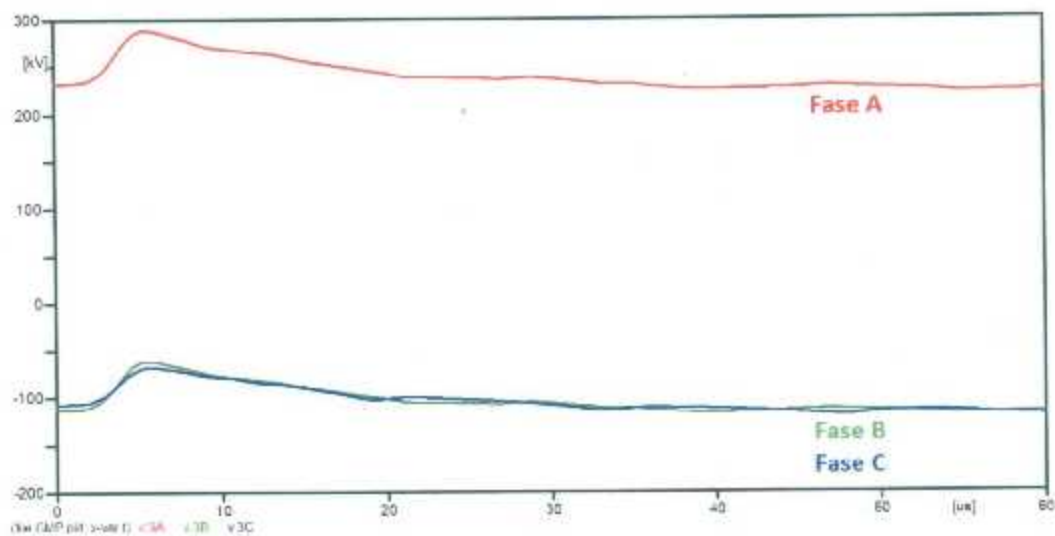


Figura 6.2: Tensión en las fases de la línea 93030 aplicando 30kA en la Estructura central (A:Rojo-B:Verde-C:Azul)

Se puede observar que en la Fase A (rojo) la sobretensión que se presenta es mayor comparada con las Fases B y C (verde y azul). La sobretensión que se presenta en la Fase A es de casi 280kV . Esta sobretensión no es de gran magnitud y no tiene mucha repercusión en la línea. En la Figura 6.3 se muestra como se comporta la cadena de aisladores, se observa que en la cadena de aisladores de la Fase A se presenta la

mayor sobretensión (rojo).

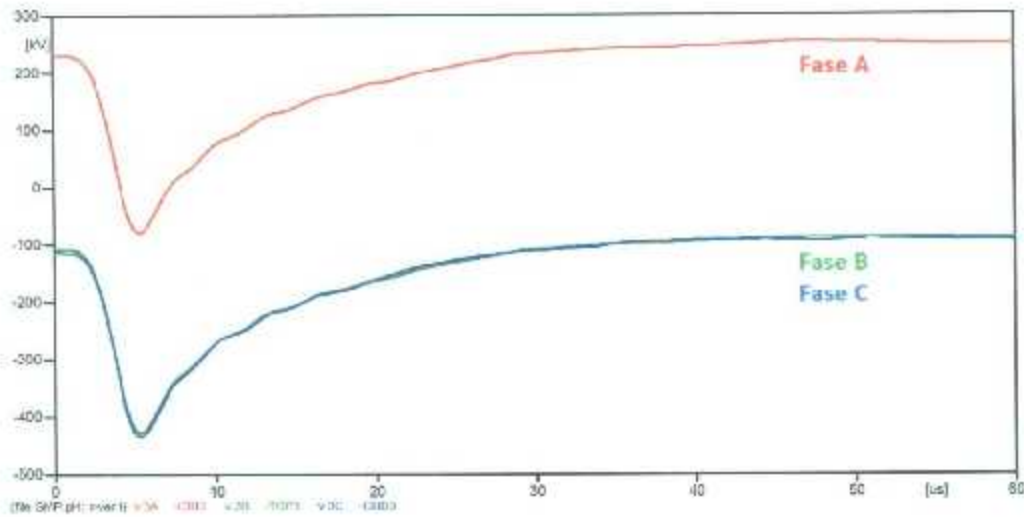


Figura 6.3: Tensión en la cadena de aisladores de la línea 93030 aplicando 30kA en la Estructura central(A:Rojo-B:Verde-C:Azul)

En la Figura 6.4 se muestra la tensión que se presenta en las fases cuando una descarga de 30kA incide a mitad del claro del hilo de guarda entre dos estructuras.

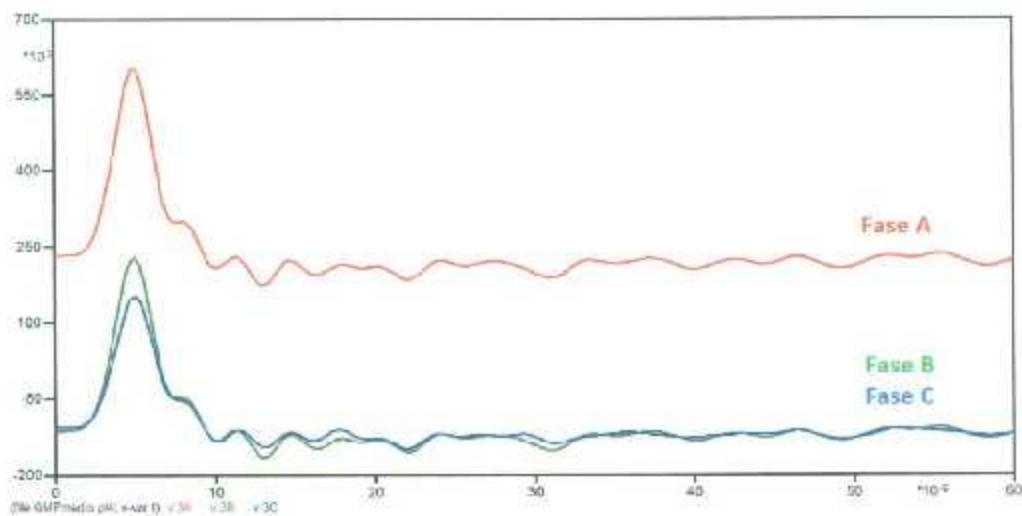


Figura 6.4: Tensión en las fases de la línea 93030 aplicando 30kA a mitad del claro(A:Rojo-B:Verde-C:Azul)

Se observa que la tensión en las fases es mucho mayor cuando una descarga incide a mitad del claro que cuando incide en la estructura. En las siguientes pruebas se fue incrementando la magnitud de la descarga atmosférica hasta observar a partir de qué valor se comienza a producir Flameo en las Cadenas de Aisladores.

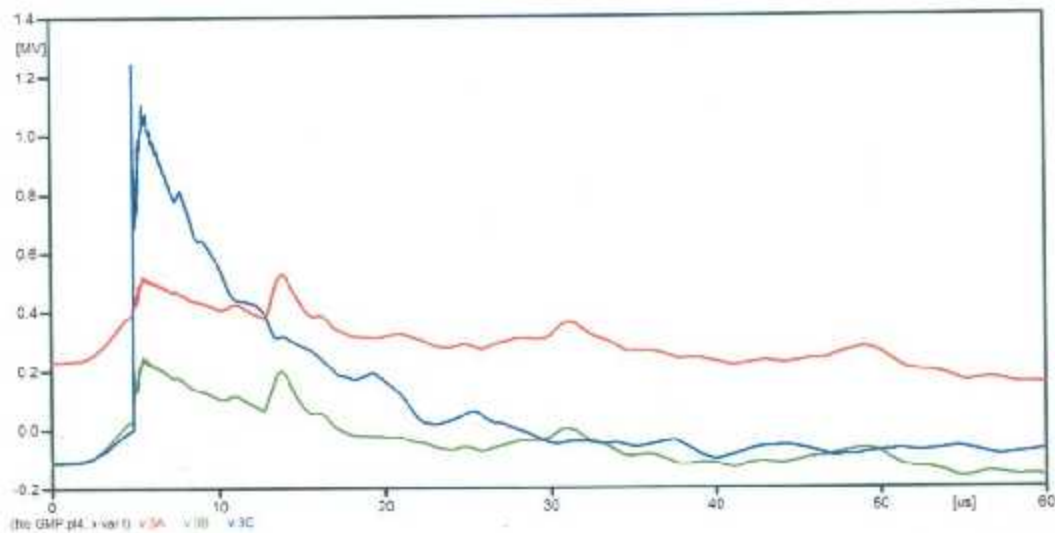


Figura 6.5: Tensión en las fases de la línea 93030 aplicando 90kA en la Estructura central(A:Rojo-B:Verde-C:Azul)

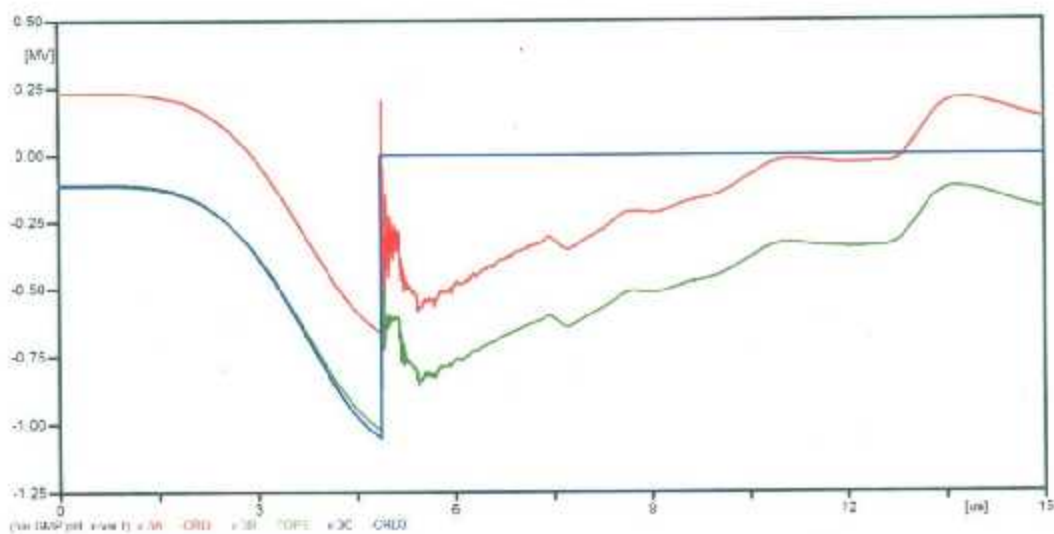


Figura 6.6: Tensión en la cadena de aisladores de la línea 93030 aplicando 90kA en la Estructura central(A:Rojo-B:Verde-C:Azul)

Los resultados que se obtuvieron cuando la descarga incidía en la estructura central permanecieron igual hasta llegar a la magnitud de 90kA, en esta magnitud se empieza a producir problemas en las líneas. En la Figura 6.5 se muestra la tensión en las fases de la línea y en la Figura 6.6 se muestra la tensión en las cadenas de aisladores. En la Figura 6.5 se muestra que en la Fase C (azul) se presenta la mayor sobretensión superando los 1050kV del NBAI a diferencia de la Fase A y B donde no se presenta una sobretensión de magnitud tan grande. En la cadena de aisladores de la Fase C (azul) se presenta el Flameo inverso mostrado en la Figura 6.6. En la Figura 6.7 se muestra el comportamiento de la cadena de aisladores de la Fase C (azul) donde se produce el flameo inverso, en esta fase se observa que comienza a fluir corriente, en las fases A y B (rojo y verde) se observa que en ningún momento se produce conducción.

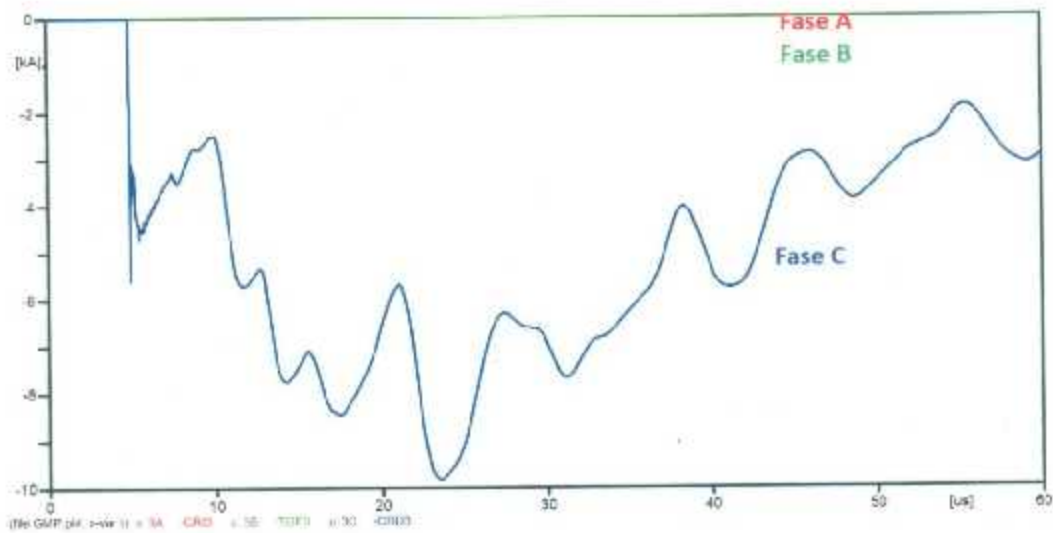


Figura 6.7: Corriente en la cadena de aisladores de la línea 93030 aplicando 90kA en la Estructura central(A:Rojo-B:Verde-C:Azul)

En la Tabla 6.1 se presenta un resumen de las distintas pruebas aplicadas así como las anomalías que se presentaban cuando una descarga incide en la estructura central. En las pruebas se obtuvo que a partir de 150kA empieza a presentarse el flameo inverso en las cadenas de aisladores de las Fases A y B.

Tabla 6.1: Resumen de pruebas del caso con resistencia de puesta a tierra de 10Ω cuando la descarga incide en la estructura central

| Magnitud de la Descarga | Flameo Inverso |
|-------------------------|---------------------------------|
| 30kA | No se presentó flameo inverso |
| 40kA | No se presentó flameo inverso |
| 50kA | No se presentó flameo inverso |
| 60kA | No se presentó flameo inverso |
| 70kA | No se presentó flameo inverso |
| 80kA | No se presentó flameo inverso |
| 90kA | Flameo inverso en la fase C |
| 150kA | Flameo inverso en la fase A y C |

En la Tabla 6.2 se muestra un resumen de las distintas pruebas realizadas cuando una descarga incide a mitad del claro entre dos estructuras.

Tabla 6.2: Resumen de pruebas del caso con resistencia de puesta a tierra de 10Ω cuando la descarga incide a mitad del claro

| Magnitud de la Descarga | Flameo Inverso |
|-------------------------|--|
| 30kA | No se presentó flameo inverso |
| 40kA | No se presentó flameo inverso |
| 50kA | No se presentó flameo inverso |
| 60kA | No se presentó flameo inverso |
| 70kA | No se presentó flameo inverso |
| 80kA | No se presentó flameo inverso |
| 90kA | No se presentó flameo inverso |
| 100kA | No se presentó flameo inverso |
| 110kA | No se presentó flameo inverso |
| 120kA | No se presentó flameo inverso |
| 130kA | Flameo inverso en la Fase C en la estructura 2 y 4 |

6.1.2. Caso modificando la resistencia de puesta a tierra

En este caso se fue disminuyendo la resistencia de puesta a tierra para conocer cuál es la mínima magnitud que se puede aplicar a la red para que tenga una mayor capacidad de tolerancia ante la presencia de las descargas atmosféricas. En la Tabla 6.3 y Tabla 6.4 se resumen la pruebas realizadas.

Tabla 6.3: Resumen de pruebas del caso modificando de la resistencia de puesta a tierra cuando la descarga incide en la estructura central

| Magnitud de la Descarga | Valor de la Resistencia | Flameo Inverso |
|-------------------------|-------------------------|-------------------------------|
| 90kA | 8 Ω | No se presentó Flameo Inverso |
| 100kA | 8 Ω | Flameo Inverso en la Fase C |
| 100kA | 6 Ω | No se presentó Flameo Inverso |
| 110kA | 6 Ω | Flameo Inverso en la Fase C |
| 110kA | 4 Ω | No se presentó Flameo Inverso |
| 120kA | 4 Ω | Flameo Inverso en la Fase C |

Tabla 6.4: Resumen de pruebas del caso modificando de la resistencia de puesta a tierra cuando la descarga incide a mitad del claro

| Magnitud de la Descarga | Valor de la Resistencia | Flameo Inverso |
|-------------------------|-------------------------|---|
| 130kA | 8 Ω | No se presentó Flameo Inverso |
| 140kA | 8 Ω | Flameo Inverso en la Fase C en estructura 2 y 4 |
| 140kA | 6 Ω | No se presentó Flameo Inverso |
| 150kA | 6 Ω | No se presentó Flameo Inverso |
| 160kA | 6 Ω | Flameo Inverso en la Fase C en estructura 2 y 4 |
| 160kA | 4 Ω | No se presentó Flameo Inverso |

Con los resultados obtenidos de la Tabla 6.3 se puede concluir que el valor mínimo de la resistencia para que no se produzca flameo en la cadena de aisladores con una magnitud de 110kA es de 4 Ω . En la Tabla 6.4 el valor mínimo de resistencia es de 4 Ω para que no se produzca flameo con una magnitud de 160kA. Existe una menor tolerancia a las descargas atmosféricas cuando estas inciden en la estructura

directamente que en el claro.

6.1.3. Caso de instalación de apartarrayos

En este caso se instalaron apartarrayos en las fases externas A y C que son las fases más expuestas para obtener hasta que magnitud es capaz de soportar la línea con un apartarrayo instalado. En la Figura 6.8 se muestra el comportamiento de la cadena de aisladores con apartarrayos cuando se simula una descarga de 90kA que incide en la Estructura central.

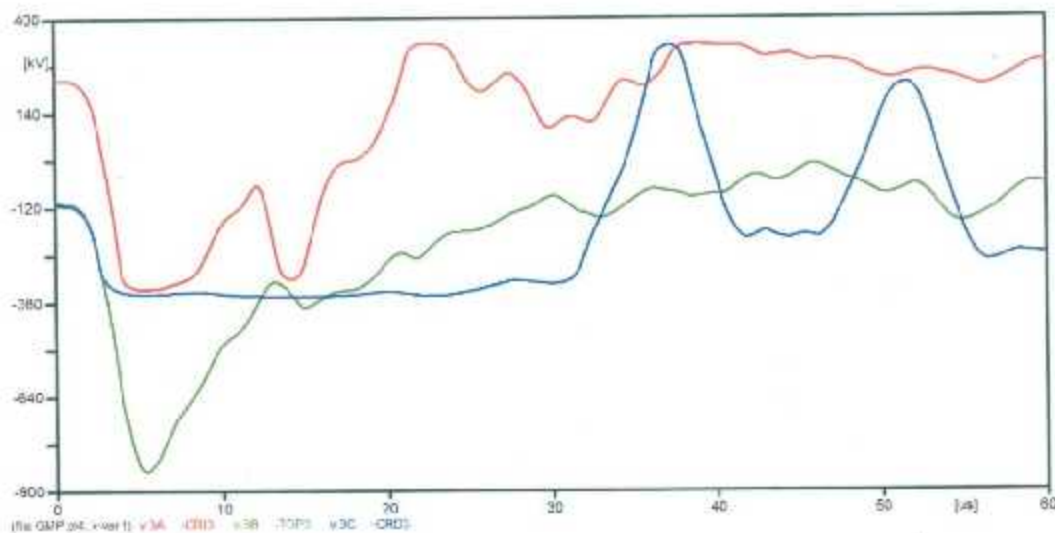


Figura 6.8: Tensión en las fases de la línea 93030 aplicando 110kA en la Estructura central(A:Rojo-B:Verde-C:Azul)

En la Tabla 6.5 se tiene el resumen de las pruebas realizadas con las distintas magnitudes de rayo que inciden en la Estructura central, en esta prueba la mayor magnitud que fue aplicada fueron 150kA, se puede observar que a partir de esta magnitud aún no se produce flameo en las fases que componen la línea. En la Tabla 6.6 se muestran el resumen de las pruebas realizadas cuando la descarga atmosférica incide en a mitad del claro entre dos estructuras, la mayor magnitud aplicada fue de 180kA, aún con esta magnitud no se produce flameo inverso en la cadena de aisladores de alguna fase. En ambos casos los apartarrayos protegen adecuadamente a las líneas.

Tabla 6.5: Resumen de pruebas del caso de instalación de apartarrayos cuando una descarga incide en la Estructura central

| Magnitud de la Descarga | Flameo Inverso |
|-------------------------|-------------------------------|
| 90kA | No se presentó Flameo inverso |
| 100kA | No se presentó Flameo inverso |
| 110kA | No se presentó Flameo inverso |
| 120kA | No se presentó Flameo inverso |
| 130kA | No se presentó Flameo inverso |
| 140kA | No se presentó Flameo inverso |
| 150kA | No se presentó Flameo inverso |
| 160kA | No se presentó Flameo inverso |
| 170kA | No se presentó Flameo inverso |

Tabla 6.6: Resumen de pruebas del caso de instalación de apartarrayos cuando una descarga incide a mitad del claro

| Magnitud de la Descarga | Flameo Inverso |
|-------------------------|-------------------------------|
| 120kA | No se presentó Flameo inverso |
| 130kA | No se presentó Flameo inverso |
| 140kA | No se presentó Flameo inverso |
| 150kA | No se presentó Flameo inverso |
| 160kA | No se presentó Flameo inverso |

6.2. Simulación línea 93090

6.2.1. Caso con resistencia de puesta a tierra de 10Ω

Como en la línea anterior, la prueba se inició con una magnitud de descarga atmosférica de 30kA y se fue incrementando el valor hasta obtener a partir de que magnitud se comienza a producir el flameo en la cadena de aisladores. En la prueba cuando la descarga incide en la estructura central con una magnitud de 30kA no produce

alguna anomalía en la línea, los problemas comienzan a partir de 100kA donde se observa que la sobretensión que se presenta en las Fase C sobrepasa el valor de la tensión del NBI. En la Figura 6.9 se muestra que en la cadena de aisladores de la Fase C se presenta el flameo inverso. En las Fases A y B (rojo y verde) no se superó la tensión del NBI por lo que no se presenta este fenómeno.

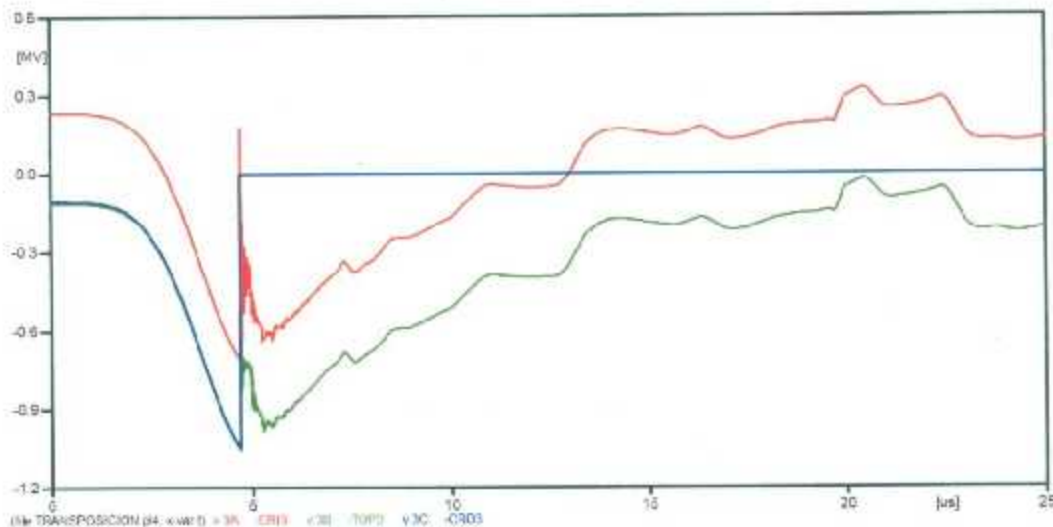


Figura 6.9: Tensión en la cadena de aisladores de la línea 93090 aplicando 100kA en la Estructura central(A:Rojo-B:Verde-C:Azul)

En la Tabla 6.7 se muestra un resumen de las pruebas aplicadas cuando una descarga incide en la Estructura central, esta estructura es capaz de soportar hasta 90kA sin que se presente el flameo inverso, el problema empieza a partir de 100kA, cuando deja de operar adecuadamente el aislamiento y se produce el flameo inverso. La segunda prueba consiste en observar cómo se comporta la línea cuando una descarga atmosférica incide a mitad del claro entre dos estructuras, en la Tabla 6.8 se muestra un resumen de las pruebas realizadas. En la prueba se observa que a partir de 130kA se presenta el flameo inverso en la Fase A y en el Fase C de las estructuras 2 y 4 que se localizan entre el claro afectado. Se puede concluir que cuando la descarga incide directamente en la estructura existe mayor probabilidad de que una fase flamee a que incida a mitad del claro.

Tabla 6.7: Resumen de pruebas del caso con resistencia de puesta a tierra de 10Ω cuando una descarga incide en la Estructura central

| Magnitud de la Descarga | Flameo inverso |
|-------------------------|---------------------------------|
| 30kA | No se presentó flameo inverso |
| 40kA | No se presentó flameo inverso |
| 50kA | No se presentó flameo inverso |
| 60kA | No se presentó flameo inverso |
| 70kA | No se presentó flameo inverso |
| 80kA | No se presentó flameo inverso |
| 90kA | No se presentó flameo inverso |
| 100kA | Flameo Inverso en la Fase C |
| 160kA | Flameo Inverso en la Fase A y C |

Tabla 6.8: Resumen de pruebas del caso con resistencia de puesta a tierra de 10Ω cuando la descarga incide a mitad del claro

| Magnitud de la Descarga | Flameo inverso |
|-------------------------|--|
| 30kA | No se presentó flameo inverso |
| 40kA | No se presentó flameo inverso |
| 50kA | No se presentó flameo inverso |
| 60kA | No se presentó flameo inverso |
| 70kA | No se presentó flameo inverso |
| 80kA | No se presentó flameo inverso |
| 90kA | No se presentó flameo inverso |
| 100kA | No se presentó flameo inverso |
| 110kA | No se presentó flameo inverso |
| 120kA | No se presentó flameo inverso |
| 130kA | Flameo Inverso en la Fase A de las estructuras 2 y 4 |

6.2.2. Caso modificando la resistencia de puesta a tierra

En esta prueba se fue reduciendo la magnitud de la resistencia de puesta a tierra para conocer el valor mínimo que puede tener la red para tener una mayor tolerancia ante las descargas atmosféricas. En la Tabla 6.9 se muestra un resumen de las pruebas realizadas cuando la descarga incide en la estructura central.

Tabla 6.9: Resumen de pruebas del caso modificando de la resistencia de puesta a tierra cuando la descarga incide en la estructura central

| Magnitud de la Descarga | Valor de la Resistencia | Flameo Inverso |
|-------------------------|-------------------------|-------------------------------|
| 100kA | 8Ω | No se presentó flameo inverso |
| 110kA | 8Ω | Flameo Inverso en la Fase C |
| 110kA | 6Ω | No se presentó flameo inverso |
| 120kA | 6Ω | Flameo Inverso en la Fase C |
| 120kA | 4Ω | No se presentó flameo inverso |
| 130kA | 4Ω | Flameo Inverso en la Fase C |

En la Tabla 6.9 se observa que con un valor de Resistencia de 4Ω se puede soportar hasta una magnitud de de 120kA, a partir de 130kA comienza a existir el flameo inverso. En la Tabla 6.10 se muestra un resumen de las pruebas realizadas cuando la descarga atmosférica incide a mitad del claro entre dos estructuras.

Tabla 6.10: Resumen de pruebas del caso modificando de la resistencia de puesta a tierra cuando la descarga incide a mitad del claro

| Magnitud de la Descarga | Valor de la Resistencia | Flameo Inverso |
|-------------------------|-------------------------|---|
| 130kA | 8Ω | No se presentó flameo inverso |
| 140kA | 8Ω | Flameo Inverso en la Fase de C de 2 y 4 |
| 140kA | 6Ω | No se presentó flameo inverso |
| 150kA | 6Ω | Flameo Inverso en la Fase C de 2 y 4 |
| 150kA | 4Ω | No se presentó flameo inverso |
| 160kA | 4Ω | No se presentó flameo inverso |
| 170kA | 4Ω | Flameo Inverso en la Fase de C de 2 y 4 |

Los resultados obtenidos en la Tabla 6.10 nos muestra que cuando una descarga incide a mitad del claro, la línea puede soportar hasta una magnitud de 160kA con una resistencia de 4Ω , a partir de 170kA comienza a producirse flameo en las cadenas de aisladores de la Fase C de las estructuras que forman el claro.

6.2.3. Caso de instalación de apartarrayos

Se instalaron 2 apartarrayos en las fases A y C que son las fases más expuestas. En la Tabla 6.11 se muestran las pruebas realizadas cuando la descarga incide en la estructura central.

Tabla 6.11: Resumen de pruebas del caso de instalación de apartarrayos cuando una descarga incide en la estructura central

| Magnitud de la Descarga | Flameo Inverso |
|-------------------------|-------------------------------|
| 100kA | No se presentó flameo inverso |
| 110kA | No se presentó flameo inverso |
| 120kA | No se presentó flameo inverso |
| 130kA | No se presentó flameo inverso |
| 140kA | No se presentó flameo inverso |
| 150kA | No se presentó flameo inverso |
| 160kA | No se presentó flameo inverso |
| 170kA | No se presentó flameo inverso |
| 180kA | No se presentó flameo inverso |
| 190kA | No se presentó flameo inverso |

La máxima magnitud empleada en la prueba fue de 190kA, los resultados de esta prueba nos arrojó que aún aplicando esta magnitud no se produce flameo inverso en las cadenas de aisladores de la Estructura Central. La segunda prueba consiste en observar el comportamiento de la línea cuando una descarga incide a mitad del claro entre dos estructuras. En la Tabla 6.12 se muestra un resumen de las pruebas aplicadas. La máxima magnitud aplicada en esta prueba fue de 190kA, los resultados obtenidos nos arrojó que aún aplicando esta magnitud no se produce flameo inverso

en alguna de las fases de las estructuras que forman el claro.

Tabla 6.12: Resumen de pruebas del caso de instalación de apartarrayos cuando una descarga incide a mitad del claro

| Magnitud de la Descarga | Flameo Inverso |
|-------------------------|-------------------------------|
| 130kA | No se presentó flameo inverso |
| 140kA | No se presentó flameo inverso |
| 150kA | No se presentó flameo inverso |
| 160kA | No se presentó flameo inverso |
| 170kA | No se presentó flameo inverso |
| 180kA | No se presentó flameo inverso |
| 190kA | No se presentó flameo inverso |

6.3. Simulación de la línea de doble circuito

6.3.1. Caso con resistencia de puesta a tierra de 10Ω

En esta sección se analizará cómo se comporta la línea de doble circuito cuando una descarga atmosférica incide en la estructura central y cuando una descarga incide a mitad del claro. La simulación inicia con una descarga de 30kA. En la Tabla 6.13 se muestra el resumen de las pruebas realizadas cuando la descarga incide en la estructura central, con los resultados obtenidos se observa que a partir de 120kA comienza a producirse flameo en la Fase C de la línea 93090 y en las Fase B de la línea 93030. En la Tabla 6.14 se muestran las pruebas realizadas cuando la descarga incide a mitad del claro, los resultados obtenidos en esta prueba nos demuestra que a partir de 100kA comienza a producirse flameo en la fase C de la línea 93090 y en las fases B y C de la línea 93030. A diferencia de las pruebas anteriores las sobretensiones más peligrosas son las que ocurren a mitad del claro que las que inciden en la estructura.

Tabla 6.13: Resumen de pruebas del caso con resistencia de puesta a tierra de 10Ω cuando la descarga incide en la estructura central

| Magnitud de la Descarga | Flameo inverso | |
|-------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| | 93090 | 93030 |
| 30kA | No se presentó flameo inverso | No se presentó flameo inverso |
| 40kA | No se presentó flameo inverso | No se presentó flameo inverso |
| 50kA | No se presentó flameo inverso | No se presentó flameo inverso |
| 60kA | No se presentó flameo inverso | No se presentó flameo inverso |
| 70kA | No se presentó flameo inverso | No se presentó flameo inverso |
| 80kA | No se presentó flameo inverso | No se presentó flameo inverso |
| 90kA | No se presentó flameo inverso | No se presentó flameo inverso |
| 100kA | No se presentó flameo inverso | No se presentó flameo inverso |
| 110kA | No se presentó flameo inverso | No se presentó flameo inverso |
| 120kA | Flameo en Fase C | Flameo en Fases B |

Tabla 6.14: Resumen de pruebas del caso con resistencia de puesta a tierra de 10Ω cuando la descarga incide a mitad del claro

| Magnitud de la Descarga | Flameo inverso | |
|-------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| | 93090 | 93030 |
| 30kA | No se presentó flameo inverso | No se presentó flameo inverso |
| 40kA | No se presentó flameo inverso | No se presentó flameo inverso |
| 50kA | No se presentó flameo inverso | No se presentó flameo inverso |
| 60kA | No se presentó flameo inverso | No se presentó flameo inverso |
| 70kA | No se presentó flameo inverso | No se presentó flameo inverso |
| 80kA | No se presentó flameo inverso | No se presentó flameo inverso |
| 90kA | No se presentó flameo inverso | No se presentó flameo inverso |
| 100kA | Flameo en Fase C de 2 y 4 | Flameo en Fases B y C de 2 y 4 |

6.3.2. Caso modificando la resistencia de puesta a tierra

En la Tabla 6.15 se presenta el resumen de las pruebas realizadas cuando una descarga incide en la estructura central, se obtuvo que con una resistencia de 4Ω se puede soportar una magnitud de hasta 160kA. En la Tabla 6.16 se muestra el resumen de las pruebas realizadas cuando una descarga incide a mitad del claro, se obtuvo que con una resistencia de 4Ω la línea puede soportar una magnitud de hasta 110kA.

Tabla 6.15: Resumen de pruebas del caso modificando la resistencia de puesta a tierra cuando una descarga incide en la estructura

| Nivel de Contaminación | Valor de la Resistencia | Flameo Inverso | |
|------------------------|-------------------------|-----------------------|-----------------------|
| | | 93090 | 93030 |
| 120kA | 8Ω | No se presentó Flameo | No se presentó Flameo |
| 130kA | 8Ω | Flameo en Fase C | Flameo en Fases B |
| 130kA | 6Ω | No se presentó Flameo | No se presentó Flameo |
| 140kA | 6Ω | No se presentó Flameo | No se presentó Flameo |
| 150kA | 6Ω | Flameo en Fase C | Flameo en Fases B |
| 160kA | 4Ω | No se presentó Flameo | No se presentó Flameo |
| 170kA | 4Ω | Flameo en Fase C | Flameo en Fases B |

Tabla 6.16: Resumen de pruebas del caso modificando la resistencia de puesta a tierra cuando una descarga incide a mitad del claro

| Nivel de Contaminación | Valor de la Resistencia | Flameo Inverso | |
|------------------------|-------------------------|-----------------------|-----------------------|
| | | 93090 | 93030 |
| 100kA | 8Ω | Flameo en Fase C | Flameo en Fases B y C |
| 110kA | 8Ω | No se presentó Flameo | No se presentó Flameo |
| 110kA | 6Ω | Flameo en Fase C | Flameo en Fases B y C |
| 110kA | 4Ω | No se presentó Flameo | No se presentó Flameo |
| 120kA | 4Ω | Flameo en Fase C | Flameo en Fases B y C |

En la Tabla 6.16 nos muestra que el flameo ocurre en las estructuras 2 y 4, que son las que se forman el claro. En esta prueba se obtuvo que cuando una descarga incide en el claro hay mayor riesgo de que ocurra un flameo de que cuando incida directamente en la estructura.

6.3.3. Caso de instalación de apartarrayos

En esta caso se van instalando apartarrayos en las fases del modelo conforme se comienza a producir flameo inverso. En la Tabla 6.17 se presenta un resumen de las pruebas realizadas cuando una descarga atmosférica incide en la estructura central. La simulación inicia a partir de una descarga de una magnitud de 120kA y se instala apartarrayos en las Fases C de cada circuito.

Tabla 6.17: Resumen de pruebas del caso de instalación de apartarrayos cuando una descarga incide en la estructura central

| Descarga Atmosférica | Apartarrayo | | Flameo inverso | |
|----------------------|-------------|------------|----------------|--------|
| | DUR | GOM | DUR | GOM |
| 120kA | Fase C | Fase C | — | — |
| 130kA | Fase C | Fase C | — | — |
| 140kA | Fase C | Fase C | — | — |
| 150kA | Fase C | Fase C | — | — |
| 160kA | Fase C | Fase C | Fase B | Fase B |
| | | | | |
| 160kA | Fase B y C | Fase B y C | — | — |
| 170kA | Fase B y C | Fase B y C | — | — |
| 180kA | Fase B y C | Fase B y C | — | — |
| 190kA | Fase B y C | Fase B y C | — | — |

Los resultados obtenidos en esta prueba nos muestran que con apartarrayos instalados en la Fase C (fase que se localiza más cerca del suelo), con una magnitud de descarga de 160kA se produce flameo en la Fase B, a partir de esta magnitud se ins-

talan apartarrayos y se obtiene que hasta con una magnitud de 190kA no se produce flameo en la Fase A la cual no se tiene instalado apartarrayo. En la Tabla 6.18 se muestra un resumen de las pruebas aplicadas cuando una descarga incide a mitad del claro entre dos estructuras.

Tabla 6.18: Resumen de pruebas del caso de instalación de apartarrayos cuando la descarga incide a mitad del claro

| Descarga Atmosférica | Apartarrayo | | Flameo inverso | |
|----------------------|-------------|------------|----------------|--------|
| | DUR | GOM | DUR | GOM |
| 100kA | Fase C | Fase C | — | — |
| 110kA | Fase C | Fase C | — | — |
| 120kA | Fase C | Fase C | — | — |
| 130kA | Fase C | Fase C | Fase B | Fase B |
| | | | | |
| 130kA | Fase B y C | Fase B y C | — | — |
| 140kA | Fase B y C | Fase B y C | — | — |
| 150kA | Fase B y C | Fase B y C | — | — |
| 160kA | Fase B y C | Fase B y C | — | — |

Las magnitudes que inciden a mitad del claro son de menor magnitud y provocan flameo inverso que las que inciden directamente en la estructura y que son de mayor magnitud.

Capítulo 7

Conclusiones y Recomendaciones

En el Capítulo 6 se obtuvo la información de cómo se comportan cada uno de los elementos que conforman una línea de transmisión cuando una descarga atmosférica incide en el hilo de Guarda, ya sea directamente en la conexión del hilo de guarda con la torre o a mitad del claro. Uno de los objetivos del presente proyecto de investigación es obtener cual es la magnitud crítica del rayo donde el aislamiento comienza a dejar de operar adecuadamente. En cada uno de los casos se identificó esta magnitud y a partir de este valor se hicieron modificaciones en la línea para evitar que se presenten anomalías en ella. Una de las propuestas planteadas con anterioridad a este proyecto era la modificación del ángulo de blindaje, el valor actual que cuentan las estructuras de un circuito es de 18.45° y se pretende modificar el ángulo a 0° , con base al análisis se pudo comprobar que con el ángulo de 0° el hilo de guarda tiene una mayor zona de protección, por lo que el conductor de fase no tiene zona de exposición. Sin embargo aún cuando se tenga esta configuración si no se cuenta con una adecuada red de tierras las sobrecorrientes que se presentan en las torres al presentarse una descarga atmosférica ocasionarían una falla en la línea debido a que no se drenarían adecuadamente a tierra. Al inducir un rayo a la línea se observa como la corriente afecta el comportamiento de esta cuando se inyecta a una distancia determinada, se observó que si la descarga incide directamente en la conexión de la torre con el hilo de guarda hay una mayor probabilidad de que se produzca un flameo en las Fases que cuando una descarga incide a mitad del claro. Esto se debe a

que cuando la descarga incide en la torre aproximadamente un 60 % de la corriente producida por el rayo se drena en la misma torre y mientras que cuando incide a mitad del claro, se drena aproximadamente un 35 % de la corriente en las torres que conforman el claro. Las pruebas realizadas una vez detectada la magnitud crítica del rayo cuando se produce un flameo es la modificación de la resistencia de puesta a tierra y la instalación de apartarrayos. En estos dos casos los resultados mostraron que los apartarrayos permiten disminuir de manera significativa la salida de las líneas que modificando la resistencia de puesta a tierra. A continuación se analizarán los resultados obtenidos cuando la descarga incide directamente en la conexión del Hilo de Guarda con la torre ya que en esta prueba se presentaban fallas con magnitudes menores que cuando el rayo incidía a mitad del claro.

- En la línea 93030 se obtuvo que en condiciones actuales la línea puede soportar una magnitud de hasta 90kA, al modificar la resistencia de puesta a tierra se obtuvo que con 4Ω la línea es capaz de soportar una corriente de 120kA. Instalando apartarrayos la línea puede soportar hasta una magnitud mayor de 170kA, la línea con apartarrayos es capaz de soportar mayores magnitudes.
- En la línea 93090 en condiciones actuales esta es capaz de soportar hasta 100kA, modificando la resistencia de puesta a tierra hasta un valor de 4Ω es capaz de soportar hasta 130kA. En la prueba con apartarrayos se obtuvo que puede soportar una magnitud de hasta más de 190kA, la línea con apartarrayos es capaz de soportar mayores magnitudes..
- La línea de doble circuito en condiciones actuales la línea es capaz de soportar hasta 120kA, modificando la resistencia de puesta a tierra hasta un valor de 4Ω es capaz de soportar hasta 170kA y con apartarrayos en las dos fases inferiores (Fase A y B) la línea es capaz de soportar hasta una corriente de 190kA, sin afectar la Fase A localizada en la parte alta de la torre.

Con estos resultados obtenidos se puede obtener las siguientes conclusiones:

- La línea 93030 se localiza en una zona donde la presencia de descargas atmosféricas aunque es baja ha presentado salidas por acción de estos fenómenos. En las estructuras localizadas en los cerros en donde disminuir la resistencia de puesta a tierra es muy complicado por las características del terreno, es recomendable instalar apartarrayos en las fases más externas de las torres para evitar que se produzca un flameo en la cadena de aisladores. En las estructuras localizadas en las zonas planas es recomendable modificar la resistencia de puesta a tierra.
- En la línea 93090 tiene mayor índice de salidas debido a que esta línea atraviesa zonas rodeadas de cerros y zonas con mayor índice de descargas. En esta línea es recomendable modificar la resistencia de puesta a tierra a las estructuras para tener una mayor capacidad de tolerancia ante la presencia de descargas atmosféricas. En las estructuras localizadas en cerros es recomendable instalar apartarrayos debido a la complejidad de modificar la resistencia de puesta a tierra en estas zonas.
- La línea de Doble Circuito es una línea corta y está localizada en una zona completamente plana, actualmente no se ha presentado anomalía alguna, aunque siempre existe la probabilidad que se presenten descargas atmosféricas. En esta línea se recomienda modificar la resistencia de puesta a tierra para que la línea tenga una mayor capacidad de tolerancia ante la presencia de estos fenómenos.

Se ha obtenido en las simulaciones que un apartarrayo es la solución más viable, pero económicamente el costo de instalar estos dispositivos en todas las estructuras sería muy elevado, es recomendable instalarlo en zonas altas donde hay más probabilidad de que se presenten estos fenómenos que en las zonas planas, donde la opción más viable es la modificación de la resistencia de la Red de puesta a tierra.

Anexos: Anexo A

A.1: Índice de fallas por blindaje

Tabla A.1: Resumen de cálculos del índice de fallas por blindaje

| Ecuación | 93030 | 93090 | Doble |
|---|-------------------------|------------------------|-----------------------|
| $Z_c = 60 \ln \left(\frac{2y}{R_{ca}} \right)$ | 486Ω | 486Ω | 479Ω |
| $TCF = \left(400 + \frac{710}{\rho^{0.75}} \right) L_{ca}$ | 1890.9876kV | 1890.9876kV | 1890.9876kV |
| $I_{min} = \frac{2TCF}{Z_c}$ | 7.7818kA | 7.7818kA | 7.8955kA |
| $R_{min} = 8(I_{min})^{0.65}$ | 30.359m | 30.359m | 30.647m |
| Ángulo α | 18.45° | 18.45° | -5.944° |
| $\theta = \sin^{-1} \frac{R_{min}-y}{R_{min}}$ | 11.32° | 11.32° | 11.76° |
| c | 6.177m | 6.177m | 16.738m |
| $\beta = \sin^{-1} \frac{c}{2R_{min}}$ | 5.8394° | 5.8394° | 16.002° |
| $D_c = R_{min} \cdot [\cos \theta - \cos(\alpha + \beta)]$ | 2.09m | 2.09m | -1.722m |
| $D_g = R_{min} \cdot \cos(\alpha - \beta)$ | 29.62m | 29.62m | 28.42m |
| $R_{max} = \frac{h_a + y}{2(1 - \sin \alpha)}$ | 39.984m | 39.984m | 27.4521m |
| $I_{max} = \left(\frac{R_{max}}{8} \right)^{0.65}$ | 11.88kA | 11.88kA | 6.66kA |
| $P(I_{min}) = \frac{1}{1 + \left(\frac{I_{min}}{31} \right)^{2.0}}$ | 0.9732 | 0.9732 | 0.9722 |
| $P(I_{max}) = \frac{1}{1 + \left(\frac{I_{max}}{31} \right)^{2.0}}$ | 0.9237 | 0.9237 | 0.9819 |
| N_g rayos/ Km^2 /año | 1.8 | 2.8 | 1.8 |
| $IFBF = \frac{N_g L D_c}{10} (P(I_{min}) - P(I_{max})) * 2$ flameo/100km/año | 3.9105×10^{-4} | 3.594×10^{-3} | 2.70×10^{-3} |

Los valores de algunas variables se pueden localizar en las Tablas 5.1, 5.2, 5.3, 5.4 y Figura 4.7

A.2: Índice de fallas por flameo inverso

Tabla A.2: Resumen de cálculos del índice de fallas por flameo inverso

| Ecuación | 93030 | 93090 | Doble |
|---|--|--|--|
| Z_t | 141 Ω | 141 Ω | 117 Ω |
| R_x | 10 Ω | 10 Ω | 10 Ω |
| $\alpha_T = \frac{Z_t - R_t}{Z_t + R_t}$ | 0.867 | 0.867 | 0.8425 |
| Z_{propia} | 569 Ω | 569 Ω | 584 Ω |
| Z_{mutua} | 113 Ω | 113 Ω | 516 Ω |
| Z_g Impedancia equivalente | 341 | 341 | 550 Ω |
| $\beta_t = \frac{Z_g - 2Z_t}{Z_g + 2Z_t}$ | 0.0947 | 0.0947 | 0.4030 |
| V_{tt} | 146.46kV | 146.46kV | 148.19kV |
| V_{rt} | 126.71kV | 126.71kV | 119.83kV |
| $V_{fase}(t) = V_{rt}(t) + \frac{h+Y_{fase}}{k}(V_{tt}(t) - V_{rt}(t))$ se aplica a las fases (para el de doble circuito es igual para cada uno) | A:129.03kV B:129.03kV C:129.03kV | A:129.03kV B:129.03kV C:129.03kV | A:120.93kV B:125.69kV C:130.45kV |
| $V_{ais} = V_{fase} - CV_{tt}(t)$ se aplica a las fases (para el de doble circuito es igual para cada uno) | A: 82.64kV B: 77.71kV C:82.64kV | A: 82.64kV B: 77.71kV C:82.64kV | A:84.89kV B:98.91kV 111.33kV |
| $I_c = \frac{TCF - V_{FN}}{V_{ais}}$ se aplica a las fases $V_{FN}:132.79$ | A:21.27kA B: 22.27kA C:21.27kA | A:21.27kA B: 22.27kA C:21.27kA | A:20.71kA 17.77kA 15.79kA |
| Se selecciona la I_c de menor magnitud para obtener $P(I_c) = \frac{1}{1+(\frac{I_c}{I_{c0}})^{2.6}}$ | 0.7269 | 0.7269 | 0.8524 |
| N_L rayos a la línea/100km/año | 26.90 | 68.59 | 35.48 |
| IFB No. de flameos inversos/100km/año | 11.73 | 29.91 | 18.14 |
| IFT No. de salidas/100km/año | 11.7305 | 29.922 | 18.14 |

A.3: Índice de fallas por blindaje y Flameo inverso con ángulo de 0°

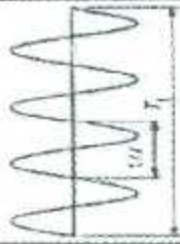
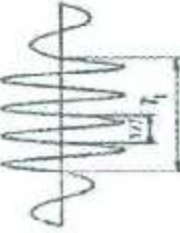


Tabla A.3: Resumen de cálculos del índice de fallas por blindaje y Flameo inverso

| Ecuación | 93030 | 93090 |
|---|-------------------------|-------------------------|
| $R_{min} = 8(I_{min})^{0.65}$ | 30.359m | 30.359m |
| Ángulo α | 0° | 0° |
| $\theta = \sin^{-1} \frac{R_{max}-2}{R_{min}}$ | 11.32° | 11.32° |
| c | 0m | 0m |
| $\beta = \sin^{-1} \frac{c}{2 \cdot R_{min}}$ | 0° | 0° |
| $D_c = R_{min} \cdot \cos \theta - \cos(\alpha + \beta) $ | 0.9698m | 0.9698 |
| $D_g = R_{min} \cdot \cos(\alpha - \beta)$ | 29.62m | 29.62m |
| $R_{max} = \frac{h_g + y}{2(1 - \sin \alpha)}$ | 39.984m | 39.984m |
| $I_{max} = \left(\frac{R_{max}}{8}\right)^{\frac{1}{0.65}}$ | 11.88kA | 11.88kA |
| $P(I_{min}) = \frac{1}{1 + \left(\frac{I_{min}}{31}\right)^{2.5}}$ | 0.9732 | 0.9732 |
| $P(I_{max}) = \frac{1}{1 + \left(\frac{I_{max}}{31}\right)^{2.5}}$ | 0.9237 | 0.9237 |
| N_g rayos/ Km^2 /año | 1.8 | 2.8 |
| $IFBF = \frac{N_g L D_c}{10} (P(I_{min}) - P(I_{max})) * 2$ flameo/100km/año | 9.0729×10^{-5} | 2.5941×10^{-3} |
| IFB No. de flameos inversos/100km/año | 11.73 | 29.91 |
| IFT No. de salidas/100km/año | 11.73009 | 29.9125 |

La modificación del ángulo de blindaje a 0° solo se le esta aplicando a las estructuras de un circuito.

A.4: Formas de ondas normalizadas

Tabla A.4: Resumen de cálculos del índice de fallas por blindaje y Flameo inverso

| Clase | Baja frecuencia | | Transitoria | |
|---|---|--|--|--|
| | Permanente | Temporal | De frente lento | De frente rápido |
| Forma de tensión |  |  |  |  |
| Rango de formas de tensión | $f = 50 \text{ Hz} \text{ ó } 60 \text{ Hz}$ $T_1 \geq 3 \text{ 600 s}$ | $10 \text{ Hz} < f < 500 \text{ Hz}$ $3 \text{ 600 s} \geq T_1 \geq 0,03 \text{ s}$ | $5 \text{ 000 } \mu\text{s} \geq T_2 > 20 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 20 \text{ ms}$ | $100 \text{ ns} \geq T_1 > 3 \text{ ns}$ $0,3 \text{ MHz} < f_1 < 100 \text{ MHz}$ $30 \text{ kHz} < f_2 < 300 \text{ kHz}$ $T_1 \leq 3 \text{ ms}$ |
| Forma actualizada de tensión | $f = 50 \text{ Hz} \text{ ó } 60 \text{ Hz}$ T_1^* | $48 \text{ Hz} \leq f \leq 62 \text{ Hz}$ $T_1 = 60 \text{ s}$ | $T_2 = 250 \mu\text{s}$ $T_1 = 2 \text{ 500 } \mu\text{s}$ | $T_1 = 1,2 \mu\text{s}$ $T_2 = 50 \mu\text{s}$ |
| Ensayo de tensión soportada normalizado | * | Ensayo de corta duración a frecuencia industrial | Ensayo de impulsos tipo manobra | Ensayo de impulsos tipo rayo |

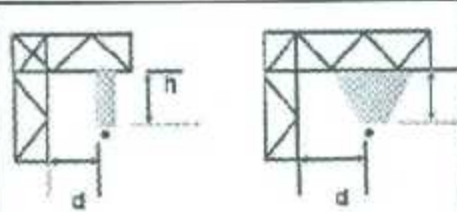
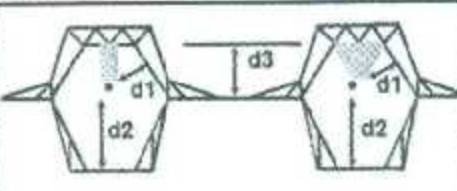
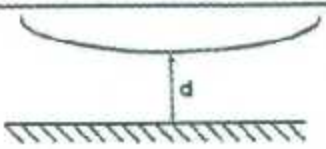
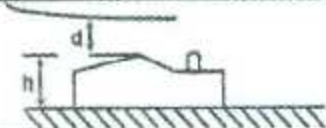
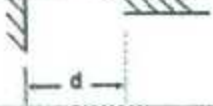
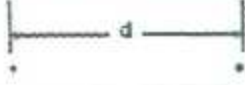
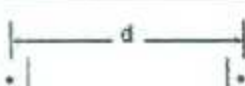
A.5: Niveles básicos de aislamiento por impulso tipo rayo

Tabla A.5: Niveles básicos de aislamiento por impulso tipo rayo

| Tensión Nominal del Sistema V_n kV (Eficaz) | Tensión máxima de diseño del equipo V_d (Eficaz) | Tensión de aguante nominal a 60Hz de fase a Tierra kV (Eficaz) | Tensión de aguante nominal de impulso por rayo (NBAI) de fase a tierra kV (Cresta) |
|---|--|--|--|
| 4.4(1) | 5.5 | 19 | 45 60 75 |
| 6.9(1) | 7.2 | 20 | 40 60 |
| 13.8(2) | 15.5 | 35 | 75 95 110 |
| 23(2) | 27 | 50 60 | 95 125 150 |
| 34.5(2) | 38 | 70 | 125 150 200 |
| 44(1) | 52 | 95 | 250 |
| 69(2) | 72.5 | 140 | 325 350 |
| 85(3), 115(2) | 123 | 185 230 | 450 550 |
| 138(3) | 145 | 230 275 | 550 650 |
| 150(1), 161(3) | 170 | 275 325 | 550 750 |
| 230(2) | 245 | 360 395 460 | 850 900 950 1050 |

A.6: Valores de los factores

Tabla A.6: Valores de los factores K_n , K_m y K_r , para diferentes configuraciones de entrehierros [3]

| CONFIGURACION DE ENTRE-HIERRO | DIAGRAMA | K_n | K_m | K_r |
|--|---|-------|-------|-------|
| FASE - TORRE |  | 1.40 | 1.25 | 550 |
| FASE - VENTANA DE TORRE |  | 1.30 | 1.20 | 550 |
| CONDUCTOR - SUELO |  | 1.30 | 1.10 | 550 |
| CONDUCTOR - OBJETO |  | 1.45 | 1.35 | 550 |
| VARILLA - PLANO |  | 1.20 | 1.00 | 480 |
| CONDUCTOR - CONDUCTOR |  | 1.65 | 1.50 | 550 |
| ENTRE ANILLOS (EQUIPOTENCIALES) DE CONDUCTORES |  | - | 1.50 | 550 |

A.7: Determinación del número de aisladores por cadena

Tabla A.7: Determinación del número de aisladores por cadena en función del tensión de aguante (BIL) [3]

| Número de Aisladores | BIL (kV) | Número de Aisladores | BIL (kV) |
|----------------------|----------|----------------------|----------|
| 1 | 120 | 13 | 1138 |
| 2 | 245 | 14 | 1215 |
| 3 | 331 | 15 | 1292 |
| 4 | 398 | 16 | 1369 |
| 5 | 475 | 17 | 1446 |
| 6 | 562 | 18 | 1523 |
| 7 | 643 | 19 | 1600 |
| 8 | 730 | 20 | 1676 |
| 9 | 812 | 21 | 1753 |
| 10 | 893 | 22 | 1830 |
| 11 | 975 | 23 | 1907 |
| 12 | 1061 | 24 | 1984 |
| | | 25 | 2065 |

A.7: Relación de las distancias de fuga mínima de acuerdo al tipo de zona de contaminación

Tabla A.8: Relación de las distancias de fuga mínima de acuerdo al tipo de zona de contaminación [3]

| Nivel de Contaminación | Distancia específica de Fuga mínima Nominal (mm/kV) | |
|------------------------|---|-------------|
| | Fases - Fase | Fase Tierra |
| I Baja | 16 | 28 |
| II Media | 16 | 28 |
| III Alta | 25 | 43 |
| IV Muy Alta | 31 | 54 |

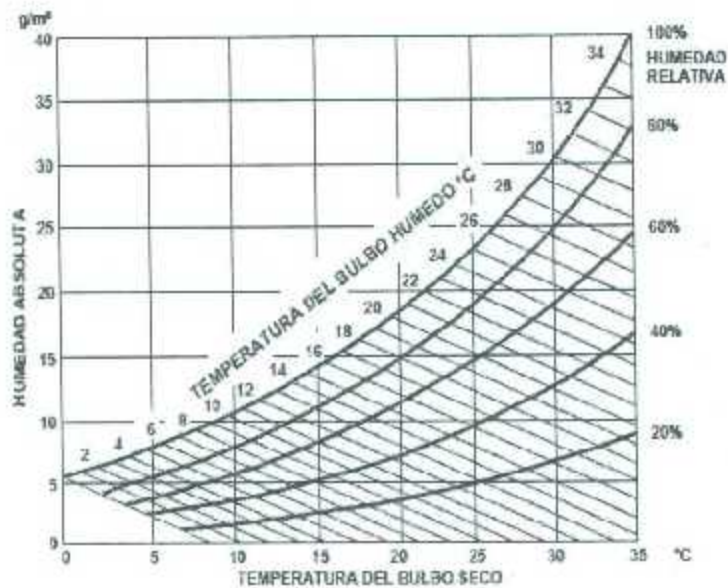
A.9: Factores de corrección por presión atmosférica

Tabla A.9: Factores de corrección por presión atmosférica a distintas altitudes [3]

| ALTITUD EN METROS | PRESION | | FACTOR DE CORRECCION Kda | ALTITUD EN METROS | PRESION | | FACTOR DE CORRECCION Kda |
|-------------------------|---------|-------|--------------------------------|-------------------------|---------|-------|--------------------------------|
| | mbar | mm Hg | | | mbar | mm HG | |
| 0 | 1013 | 760 | 1.00 | 2500 | 747 | 560 | 0.737 |
| 100 | 1001 | 751 | 0.988 | 2600 | 747 | 554 | 0.728 |
| 200 | 989 | 742 | 0.976 | 2700 | 728 | 546 | 0.718 |
| 300 | 977 | 733 | 0.965 | 2800 | 720 | 540 | 0.710 |
| 400 | 968 | 726 | 0.954 | 2900 | 708 | 531 | 0.698 |
| 500 | 955 | 716 | 0.942 | 3000 | 701 | 526 | 0.692 |
| 600 | 943 | 707 | 0.931 | 3100 | 692 | 519 | 0.683 |
| 700 | 932 | 699 | 0.919 | 3200 | 683 | 512 | 0.674 |
| 800 | 921 | 691 | 0.908 | 3300 | 675 | 506 | 0.665 |
| 900 | 909 | 682 | 0.897 | 3400 | 665 | 499 | 0.656 |
| 1000 | 905 | 679 | 0.893 | 3500 | 656 | 492 | 0.647 |
| 1100 | 888 | 666 | 0.876 | 3600 | 648 | 486 | 0.639 |
| 1200 | 877 | 658 | 0.866 | 3700 | 639 | 479 | 0.629 |
| 1300 | 867 | 650 | 0.855 | 3800 | 629 | 472 | 0.621 |
| 1400 | 856 | 642 | 0.845 | 3900 | 621 | 466 | 0.613 |
| 1500 | 845 | 634 | 0.834 | 4000 | 613 | 460 | 0.605 |
| 1600 | 836 | 627 | 0.824 | 4100 | 605 | 454 | 0.597 |
| 1700 | 825 | 619 | 0.814 | 4200 | 597 | 448 | 0.590 |
| 1800 | 815 | 611 | 0.804 | 4300 | 591 | 443 | 0.583 |
| 1900 | 805 | 604 | 0.794 | 4400 | 584 | 438 | 0.576 |
| 2000 | 795 | 596 | 0.784 | 4500 | 577 | 433 | 0.569 |
| 2100 | 785 | 589 | 0.774 | 4600 | 571 | 428 | 0.562 |
| 2200 | 775 | 581 | 0.765 | 4700 | 563 | 422 | 0.555 |
| 2300 | 765 | 574 | 0.756 | 4800 | 556 | 417 | 0.549 |
| 2400 | 756 | 567 | 0.746 | 4900 | 549 | 412 | 0.542 |

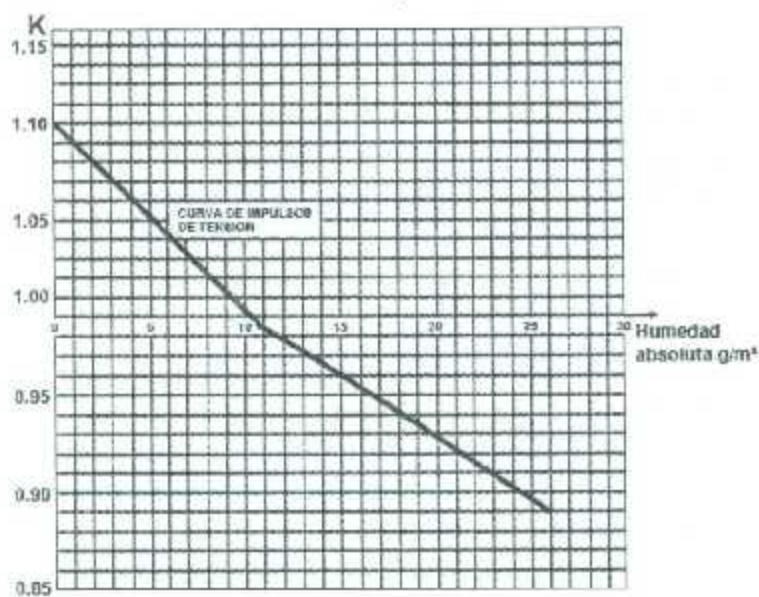
A.10: Humedad absoluta del aire

Tabla A.10: *Humedad absoluta del aire en función de las lecturas de un termómetro de bulbo seco y húmedo [3]*



A.11: Factores de corrección

Tabla A.11: *Factores de corrección en función de la humedad absoluta [3]*



Referencias

- [1] Allan Greenwood, "Electrical Transients In Power Systems", Second Edition, Wiley-Interscience, 1991, ISBN 0-471-62058-0
- [2] Lou Van Der Sluis, "Transients In Power Systems", John Wiley & Sons Ltd, 2001, ISBN 0-471-48639-6
- [3] Tesis para el grado de Maestría presentada por el Ing. Mario Ferreyra Ayala. Instituto Tecnológico de la Laguna. ISSN 0188-9060, Torreón, Coahuila, México, Mayo 2000
- [4] John J. Grainger, William D. Stevenson Jr. "Análisis de Sistemas de Potencia", Mc Graw Hill/Interamericana de México, 1996, ISBN 0-07-061293-5
- [5] Vernon Cooray, "Lightning Protection", Institution of Engineering and Technology, ISBN 978-0-86341-744-3
- [6] Martin A. Uman, "Lightning", Dover Publications, Inc., 1969, ISBN 0-486-64575-4
- [7] IEEE Guide for Direct Lightning Stroke Shielding of Substation, IEEE Power and Energy Society, Revision of IEEE Std 998-1996.
- [8] R. H. Golde, " Lightning Volume 1", Academic Press Inc., 1977, ISBN: 0-12-287801-9
- [9] IEEE Working Group on Lightning Performance of Transmission Lines, "A Simple Method for Estimating Lightning Performance of Transmission Lines", IEEE Vol. PAS-104, 1985

- [10] J. A. Martínez Velasco, "Coordinación de Aislamiento en Redes Eléctricas de Alta Tensión", Mc Graw Hill, 2008, ISBN 978-84-481-6697-7
- [11] IEC 0071-1 "Coordinación de aislamiento Parte 1:Definiciones, principios y reglas, Séptima Edición 1993"
- [12] Jinliang He, Rong Zeng, Bo Zhang, "Methodology and Technology for Power System Grounding", John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd., 2013, ISBN 978-1-118-25495-0
- [13] NRF-018-CFE-2004, "Aisladores tipo suspensión de Porcelana o de Vidrio Templado", 2005
- [14] IEC 0071-2 "Insulation Co-ordination Part 2: Application guide", Third edition 1996-12
- [15] José Raúl Martín, "Diseño de Subestaciones Eléctricas", Mc Graw Hill, 1987, ISBN 968-422-232-9
- [16] IEEE Standard Techniques for High-Voltage Testing, IEEE Std 4-199
- [17] Paul M. Anderson, "Analysis of Faulted Power Systems", Wiley-Interscience, 1995, ISBN 0-7803-1145-0
- [18] Especificación CFE E0000-22, "Cable de Hilo de Guarda", 1987
- [19] A. Villa, G. Carrasco, "Simulación con ATP de pararrayos para líneas a 115 y 400kV de Edelca", C.V.G. Electrificación del Caroní, C.A. División de Ingeniería de Sistemas Eléctricos, Revista Ciencia e Ingeniería. Vol. 22 No. 1. 2001
- [20] Especificación CFE 00JL0-28, "Red de puesta a tierra para Estructuras de Líneas de Transmisión aéreas de 69kV a 400kV en operación", 2008
- [21] F. Heidler, J. M. Cvetić, B. V. Stanić. "Calculation of lightning Current Parameters", IEEE Vol. 14, No. 2, Abril 1999.

