



**ESTUDIO DEL ESQUEMA DE PROTECCION CONTRA  
DESCARGAS ATMOSFERICAS EN LINEAS DE DISTRIBUCION  
DE MEDIA TENSION DE LA ANDE, CASO ALIMENTADORES  
COV08 Y CYO04.**

**Elaborado por**

**MIGUEL MARTINEZ AQUINO**

Tutor

**Ing. Moisés Britez**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAAGUAZU  
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGIAS  
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRICIDAD**

Coronel Oviedo - Paraguay

Año 2021

## Página de aprobación

Trabajo de fin de grado para la obtención del Título de Ingeniero Electricista aprobado en representación de la Facultad Ciencias y Tecnología de la Universidad Nacional de Caaguazú, por el Tribunal Examinador constituido por los siguientes profesores.

Prof. Ing.

Prof. Ing.

Prof. Ing.

## **Dedicado a:**

Dios, por guiarme siempre por el buen camino y por todo lo que me ha brindado en la vida por las oportunidades y logros conseguidos.

Mi madre Aurelia, por su paciencia, confianza y apoyo incondicional para culminar mis estudios.

A mi padre Rosalino, por demostrar siempre su deseo de que pueda llegar al objetivo.

A mis dos hermanas, Carolina y Gladys por estar siempre a mi lado y comprensión en todo momento.

# Agradecimientos

Al Ing. Moises Britez, por su orientación, ayuda y disponibilidad de siempre.

# Resumen

El presente proyecto de fin de grado consiste en analizar esquema de protección contra descargas atmosféricas en líneas de distribución de media tensión de la ANDE de los alimentadores COV08 y CYO04 de la Estación COV y CYO respectivamente, con el objetivo de buscar la mejor protección de los alimentadores de las líneas de distribución de media tensión ante los efectos de sobretensiones transitorias producidas por el fenómeno aludido.

Para lograr el objetivo trazado se desarrolló el cálculo de sobretensiones por descargas directas se hizo de dos maneras: analíticamente, a través de ecuaciones utilizadas en los modelos de líneas y de acoplamiento de líneas que incluyen una metodología recomendada por el IEEE Working Group on Lightning Performance of Distribución Lines y por medio de la simulación, utilizando el software ATP (Alternative Transients Program). Las sobretensiones debidas a descargas indirectas se calculan a través del método de Rusck.

El análisis realizado arrojó como resultado, para el caso del alimentador COV08, una mejor efectividad del hilo de guarda con la utilización de la resistencia de puesta a tierra en cada poste, como lo prescribe la IEEE, y, para el caso del alimentador CYO04, se logra una mejor efectividad de los descargadores utilizándolos con una separación de 1km. El esquema más efectivo de protección encontrada es cuando se implementa la protección del hilo de guarda y los descargadores en forma conjunta al mismo tiempo, con el hilo de guarda puesto a tierra en cada poste y los descargadores cada 4 km.

**Palabras claves:** Descargas atmosféricas, Línea de distribución de media tensión, EMTP - ATP, Sobretensión transitoria.

# Abstract

This final degree project consists of analyzing the protection scheme against atmospheric discharges in medium voltage distribution lines of the ANDE of the COV08 and CYO04 feeders of the COV and CYO Station respectively, to seek the best protection of the feeders of medium voltage distribution lines to the effects of transient overvoltages produced by the aforementioned phenomenon.

To achieve the objective outlined, the calculation of overvoltages due to direct discharges was developed in two ways: analytically, through equations used in the line and line coupling models that include a methodology recommended by the IEEE Working Group on Lightning Performance. of Distribution Lines and through simulation, using ATP (Alternative Transients Program) software. Surge voltages due to indirect discharges are calculated using the Rusck method.

The analysis carried out showed, in the case of the COV08 feeder, better effectiveness of the guard wire with the use of the grounding resistance in each pole, as prescribed by the IEEE, and, in the case of the CYO04 feeder, better effectiveness of the arresters is achieved by using them with a separation of 1km. The most effective protection scheme found is when the protection of the guard wire and the arresters is implemented together at the same time, with the guard wire grounded on each pole and the arresters every 4 km.

**Keywords:** Atmospheric discharges, Medium voltage distribution line, EMTP - ATP, Transient overvoltage.



# Índice general

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>I Revisión Bibliográfica</b>	<b>3</b>
<b>2. Sistema de distribución</b>	<b>5</b>
2.1. Redes de distribución eléctrica . . . . .	6
2.2. Clasificación de los sistemas de distribución de acuerdo a su construcción.	6
2.2.1. Redes de distribución aéreas. . . . .	6
2.2.2. Redes de distribución subterráneas. . . . .	7
2.3. Descargas atmosféricas. . . . .	8
2.3.1. Tipos de descargas atmosféricas . . . . .	10
2.4. Proceso de formación del rayo nube - tierra . . . . .	11
2.5. Parámetros del rayo . . . . .	11
2.5.1. Parámetros de incidencia . . . . .	12
2.5.2. Amplitud máxima de la corriente de retorno del rayo . . . . .	15
2.5.3. Parámetro de la forma del impulso de la corriente de rayo . . . . .	16
2.5.4. Ángulo de incidencia . . . . .	17
2.5.5. Velocidad de retorno del rayo . . . . .	17

2.5.6.	DMH . . . . .	18
2.5.7.	Sobretensiones de las descargas atmosféricas. . . . .	18
2.5.8.	Sobretensiones. . . . .	19
2.6.	Efectos producidos por las descargas atmosféricas sobre las líneas de distribución. . . . .	21
2.6.1.	Descargas directas . . . . .	21
2.6.2.	Descargas indirectas . . . . .	26
2.7.	Estadística asociada a las descargas atmosféricas en líneas de distribución .	27
2.7.1.	Funciones de probabilidad para la corriente máxima de un rayo . .	27
2.7.2.	Función de distribución de la corriente acumulada ( $P(I \geq i_0)$ ) . . . .	29
2.8.	Modelo Electrogeométrico . . . . .	32
2.8.1.	Aplicación del modelo . . . . .	32
2.8.2.	Apantallamiento efectivo . . . . .	33
2.8.3.	Distancia a partir de la cual se producen sobretensiones ( $X_d$ ) . . . .	34
2.8.4.	Sobretensiones originadas por rayos directos . . . . .	35
2.8.5.	Sobretensiones originadas por rayos indirectos . . . . .	39
2.8.6.	Tensiones inducidas en líneas de distribución . . . . .	39
2.8.7.	Protecciones contra la descarga atmosférica. . . . .	41
2.8.8.	Sistema de protección contra las descargas atmosféricas. . . . .	42
2.8.9.	Aisladores . . . . .	48
2.8.10.	Fuera de servicio. . . . .	48
2.9.	Simulación utilizando el programa ATP . . . . .	49
2.9.1.	Introducción . . . . .	49
2.9.2.	Programa de simulación ATP . . . . .	49

2.9.3. Estructura de funcionamiento del ATP . . . . .	50
2.9.4. Aplicaciones del ATP . . . . .	52
2.10. DEFINICION DE TERMINOS BASICOS . . . . .	53

## **II Resumen Ejecutivo 55**

### **3. Resumen Ejecutivo 57**

3.1. Descripción del trabajo . . . . .	57
3.1.1. Métodos y técnicas utilizadas . . . . .	57
3.2. Justificación . . . . .	58
3.3. Finalidad del proyecto . . . . .	58
3.4. Metas . . . . .	59
3.5. Objetivos . . . . .	59
3.5.1. Objetivos generales . . . . .	59
3.5.2. Objetivos específicos . . . . .	59
3.6. Beneficiarios . . . . .	59
3.7. Producto . . . . .	60
3.8. Localización física y cobertura espacial . . . . .	60
3.9. Especificaciones de actividades y tareas realizadas . . . . .	61
3.10. Recursos necesarios . . . . .	62
3.10.1. Recursos humanos . . . . .	62
3.10.2. Recursos materiales . . . . .	62
3.11. Factibilidad técnica . . . . .	62

<b>III Ingeniería de Diseño</b>	<b>65</b>
<b>4. Modelado</b>	<b>67</b>
4.1. Sistema de distribución aérea de MT actual de la ciudad de Coronel Oviedo.	67
4.2. Características de los equipos de protección contra las descargas atmosféricas de MT utilizadas por la ANDE . . . . .	68
4.2.1. Hilos de guarda . . . . .	68
4.2.2. Características del descargador de sobretensión utilizado en ANDE	68
4.2.3. Características eléctricas de la red: . . . . .	69
4.3. Cálculo de las sobretensiones inducidas . . . . .	70
4.3.1. Parámetros sistema de distribución de la ANDE utilizados para los cálculos . . . . .	70
4.3.2. Cálculos de las sobre tensiones inducidas por método analítico . . .	72
4.3.3. Cálculo de probabilidad para el tiempo de frente de la onda de corriente del rayo ( $p(t_f)$ ) . . . . .	96
4.3.4. Cálculo de sobretensiones producidas en las líneas de distribución mediante la simulación en ATPDRAW . . . . .	97
4.3.5. Simulaciones del desempeño de los esquemas de protección con descargadores e hilos de guarda. . . . .	117
4.3.6. Comparación gráfica entre el método teórico y la simulación en el software ATPDRAW . . . . .	126
<b>5. Resultados y Discusión</b>	<b>129</b>
<b>6. Conclusiones</b>	<b>133</b>
<b>7. Recomendaciones</b>	<b>135</b>

**IV Anexo 137**

- .1. Estructuras en Sistemas de Distribución Para Líneas Aéreas Desnudas . . . 139
  - .1.1. Parámetros Geométricos de los Postes . . . . . 139
  - .1.2. Poste de Hormigón Armado Para Sosten de Líneas Aéreas . . . . . 139
- .2. Parámetros Eléctricos Para Líneas Aéreas Desnuda . . . . . 140
  - .2.1. Parámetros de la Cruceta . . . . . 140
  - .2.2. Conductores de Lineas Aéreas Desnudas . . . . . 140
- .3. Relevamiento de Datos del Alimentador C0V8 . . . . . 143
- .4. Relevamiento de Datos del Alimentador CYO04 . . . . . 145

**Bibliografías 147**

## Lista de abreviaturas

MT: Media Tensión

ANDE: Administración Nacional de Electricidad

XLPE: Polietilino reticulado

HDPE: Polietilino de alta densidad

ACSR: Aluminum Conductor Steel Reinforced: conductor de aluminio con centro reticulado

KV: Kilo Volts

kA: Kilo Amperios

km: Kilómetros

m: Metros

DMH: Dirección de Meteorología e Hidrología

SPAT: Sistema de Puesta a Tierra

# Índice de tablas

1.	Poste de Hormigón con Ducto Embutido para Puesta a Tierra . . . . .	139
2.	Poste de Hormigon Armado Para Sosten de Líneas Aéreas . . . . .	140
3.	Dimensiones de los Conductores de Aluminio . . . . .	141
4.	Características Eléctricas . . . . .	141
5.	Diámetro Interno y Externo de los Conductores . . . . .	141
6.	Promedio de la puesta a tierra del alimentador C0V08 . . . . .	144
7.	Distancia de los Descargadores del Alimentador CYO04 . . . . .	145



# Índice de figuras

2.1. Ilustración del fenómeno del rayo. . . . .	9
2.2. Proceso completo de un rayo. . . . .	9
2.3. Trueno . . . . .	10
2.4. Gráfico de la amplitud máxima de la corriente del rayo. . . . .	16
2.5. Onda de sobretensión normalizada. . . . .	16
2.6. (a) Cargas de línea inducidas debido a golpes de rayos indirectos y (b) la ocurrencia de un rayo entre las nubes . . . . .	19
2.7. Descarga directa sobre un conductor de fase . . . . .	22
2.8. Descarga directa sobre el conductor de guarda . . . . .	23
2.9. Concepto de inducción por acople . . . . .	24
2.10. Distribución de la descarga entre el cable de guarda y los postes . . . . .	25
2.11. Fenómeno de flameo inverso en líneas de distribución (a. Rutas posibles, b. Circuito de flameo) . . . . .	25
2.12. Descarga indirecta . . . . .	26
2.13. Geometría de la inducción en líneas por descargas indirectas . . . . .	26
2.14. Parámetros recomendado por CIGREE para una descarga atmosférica. . . . .	28
2.15. Forma de onda de una descarga atmosférica. . . . .	29
2.16. Valor máximo de la corriente de cresta . . . . .	30

2.17. Variación de la pendiente máxima de la corriente en el tiempo . . . . .	30
2.18. Modelo Electrogeométrico (Cálculo de zona no apantallada). . . . .	32
2.19. Método Electrogeométrico, apantallamiento efectivo . . . . .	34
2.20. Distancia a partir de la cual se producen sobretensiones inducidas . . . . .	35
2.21. Impacto en un conductor de fase. . . . .	36
2.22. a) En medio de un vano. . . . .	37
2.23. b) En un poste. . . . .	38
2.24. Modelo simplificado. . . . .	38
2.25. Curva del DPS . . . . .	44
2.26. Descargador de sobretension . . . . .	45
2.27. Hilo de guarda . . . . .	46
2.28. Valores de referencia para el sistema de puesta a tierra . . . . .	46
2.29. Modelo de una varilla al circular una alta corriente . . . . .	47
2.30. Diagrama de funcionamiento del ATP. . . . .	52
3.1. Mapa del de Departamento Caaguazú . . . . .	60
3.2. Ciudad de Coronel Oviedo del de Departamento Caaguazú . . . . .	61
4.1. Hilo de guarda del alimentador COV08 . . . . .	68
4.2. Distribución acumulada de la corriente de la descarga atmosférica . . . . .	73
4.3. Función de densidad de probabilidad de la corriente pico de retorno del rayo	74
4.4. Función de distribución acumulada de la corriente pico de retorno del rayo	74
4.5. Sobretensión producida por descargas directas al conductor de fase . . . . .	75
4.6. Tensión inducida en la línea más cercana al conductor de fase impactado por un rayo ( $I=0-200$ kA). . . . .	76

4.7. Tensión inducida en la línea más cercana al conductor de fase impactado por un rayo (I=0-31,5 kA). . . . .	77
4.8. Sobretensión inducida en el conductor de fase por descargas directas al hilo de guarda (I=0-200 kA) . . . . .	78
4.9. Sobretensión inducida en el conductor de fase por descargas directas al hilo de guarda (I=0-31,5 kA) . . . . .	79
4.10. Zona de atracción del conductor de fase . . . . .	80
4.11. Zona de atracción del hilo de guarda . . . . .	81
4.12. Zona sin proteger (1-200 kA) . . . . .	82
4.13. Zona sin proteger (1-5 kA) . . . . .	82
4.14. Sobretensión inducida en el conductor de fase cuando la descarga atmosférica incide sobre el poste . . . . .	84
4.15. Sobretensión inducida en el conductor de fase cuando la descarga atmosférica incide sobre el poste para una corriente de 31,5 kA . . . . .	84
4.16. Comparación de la tensión inducida entre sistemas con Hilo de Guarda y sin Hilo de Guarda . . . . .	85
4.17. Influencia de la distancia perpendicular (y) en la sobretensión inducida . . . . .	86
4.18. Influencia de la velocidad de retorno (v) en la Sobretensión Inducida . . . . .	87
4.19. Influencia de I en la sobretensión inducida (con y=50 m) . . . . .	87
4.20. Influencia de I en la sobretensión inducida (con y=100 m, I=1-90 kA) . . . . .	88
4.21. Influencia de I en la sobretensión inducida (con y=100 m, I=1-31,5 kA) . . . . .	88
4.22. Influencia de I en la sobretensión inducida (con y=150 m, I=1-192 kA) . . . . .	89
4.23. Influencia de I en la sobretensión inducida (con y=150 m, I=1-31,5 kA) . . . . .	89
4.24. Influencia de I en la sobretensión inducida (y=50m; y=100; y=150m I=1-31,5 kA) . . . . .	90
4.25. Influencia de la distancia perpendicular (y) en la sobretensión inducida . . . . .	91

4.26. Influencia de la velocidad de retorno ( $v$ ) en la Sobretensión Inducida . . . . .	92
4.27. Influencia de $I$ en la sobretensión inducida (con $y=50$ m) . . . . .	92
4.28. Influencia de $I$ en la sobretensión inducida (con $y=100$ m, $I=1-84$ kA) . . . . .	93
4.29. Influencia de $I$ en la sobretensión inducida (con $y=100$ m, $I=1-31,5$ kA) . . . . .	93
4.30. Influencia de $I$ en la sobretensión inducida (con $y=150$ m, $I=1-187$ kA) . . . . .	93
4.31. Influencia de $I$ en la sobretensión inducida (con $y=150$ m, $I=1-31,5$ kA) . . . . .	94
4.32. Influencia de $I$ en la sobretensión inducida ( $y=50$ m; $y=100$ ; $y=150$ m $I=1-31,5$ kA) de una línea con hilo de guarda . . . . .	94
4.33. Influencia de la distancia perpendicular ( $y$ ) en la sobretensión inducida . . . . .	95
4.34. Influencia de la velocidad de retorno ( $v$ ) en la Sobretensión Inducida . . . . .	96
4.35. Influencia de $I$ en la sobretensión inducida con $y=150$ m . . . . .	96
4.36. Función de densidad de probabilidad para el tiempo de frente . . . . .	97
4.37. Modelo Clarke para la simulación de los postes . . . . .	98
4.38. Modelo del poste en ATPDRAW . . . . .	98
4.39. Modelo de la línea para el conductor de fase . . . . .	99
4.40. Características de la fase . . . . .	99
4.41. Características y posición de las fases . . . . .	100
4.42. Modelo de aislador en ATPDRAW . . . . .	100
4.43. Posición de los conductores . . . . .	101
4.44. Característica del aislador en ATPDRAW . . . . .	101
4.45. Modelo de la resistencia de la puesta a tierra en ATPDRAW . . . . .	102
4.46. Modelo de la resistencia de la puesta a tierra en ATPDRAW . . . . .	102
4.47. Modelo de la corriente del rayo en ATPDRAW . . . . .	103
4.48. Características del rayo en ATPDRAW . . . . .	103

4.49. Modelo de la línea en ATPDRAW . . . . .	104
4.50. Sobretensión inducida en la fase impactada . . . . .	104
4.51. Sobretensión inducida en la fase más cercana a la fase impactada por el rayo	104
4.52. Sobretensión pico inducida en la fase más cercana a la fase impactada por el rayo . . . . .	105
4.53. Modelo de la línea para el conductor de fase con el hilo de guarda . . . . .	106
4.54. Características de la fase con hilo de guarda . . . . .	106
4.55. Características y posición de las fases con hilo de guarda . . . . .	107
4.56. Posición de los conductores de fase con hilo de guarda . . . . .	107
4.57. Modelo de la Líneas con Hilo de Guarda del Alimentador COV08 . . . . .	108
4.58. Sobretensión inducida al hilo de guarda y a las 3 fases . . . . .	108
4.59. Sobretensión inducida en las 3 fases cuando el rayo impacta al hilo de guarda	109
4.60. Sobretensión inducida en la fase más cercana al hilo de guarda . . . . .	109
4.61. Medición de voltaje a los postes adyacentes en donde se produjo el impacto del rayo . . . . .	109
4.62. Modelo de la línea con hilo de guarda en ATDRAW . . . . .	110
4.63. Sobretensión inducida en el hilo de guarda y las fases . . . . .	110
4.64. Sobretensión inducida en las 3 fases cuando el rayo impacta al hilo de guarda	110
4.65. Sobretensión inducida en la fase con mayor sobre tensión . . . . .	111
4.66. Medición de voltaje a los postes adyacente en donde se produjo el impacto del rayo . . . . .	111
4.67. Medición de voltaje a lado de los postes adyacente en donde se produjo el impacto del rayo . . . . .	111
4.68. Sobretensión inducida en la fase con puesta a tierra cada dos vano. . . . .	112
4.69. Sobretensión inducida en las 3 fases cuando el rayo impacta al hilo de guarda	112

4.70. Medición de voltaje a lado de los postes adyacente en donde se produjo el impacto del rayo . . . . .	113
4.71. Medición de voltaje donde se produjo el impacto del rayo en el segundo poste con puesta a tierra . . . . .	113
4.72. Sobretensión producida en la de la fase por descargas directas al hilo de guarda con una resistencia de 30 $\Omega$ . . . . .	114
4.73. Sobretensión inducida en el conductor de fase por descargas directas al hilo de guarda con una resistencia de 20 $\Omega$ . . . . .	114
4.74. Sobretensión producida en la de la fase por descargas directas al hilo de guarda con una resistencia de 30 $\Omega$ en vanos de por medio . . . . .	114
4.75. Sobretensión producida en la de la fase por descargas directas al hilo de guarda con una resistencia de 20 $\Omega$ en vanos de por medio . . . . .	115
4.76. Sobretensión inducida en el conductor de fase por descargas directas al hilo de guarda con puesta a tierra en cada poste . . . . .	115
4.77. Sobretensión inducida en el conductor de fase por descargas directas al hilo de guarda con puesta a tierra en postes de por medio . . . . .	115
4.78. Sobretensión inducida en la fase cuando el rayo impacta al poste. . . . .	116
4.79. Sobretensión inducida en la fase cuando el rayo impacta al poste. . . . .	116
4.80. Sobretensión inducida en la fase en los postes adyacentes. . . . .	116
4.81. Sobretensión inducida en la fase impactada directamente . . . . .	117
4.82. Sobretensión inducida en la fase más cercana al hilo de guarda . . . . .	117
4.83. Modelo utilizado en ATDRAW para representar descargadores. . . . .	118
4.84. Características de operación frente a descargas atmosféricas del descargador en ATPDRAW . . . . .	118
4.85. Curva tensión vs corriente del descargador en ATPDRAW . . . . .	119
4.86. Modelado esquema de protección con descargadores en las Líneas de Distribución CYO04 en ATPDRAW . . . . .	120

4.87. Medición de voltaje en el punto de impacto de la descarga para una separación entre descargadores de 1.88 Km. . . . .	120
4.88. Medición de voltaje en el punto donde están instalados los descargadores cada 1.88 km . . . . .	121
4.89. Medición de voltaje en el punto de impacto de la descarga para una separación entre descargadores de 1Km. . . . .	121
4.90. Medición de voltaje en el punto donde están instalados los descargadores cada 1 km . . . . .	122
4.91. Configuración de la conexión del juego de descargadores con hilo de guarda en las Líneas de Distribución en ATPDRAW . . . . .	123
4.92. Medición de voltaje en el punto de impacto de la descarga para una separación entre descargadores de 4 Km. . . . .	124
4.93. Medición de voltaje en el punto de impacto de la descarga para una separación entre descargadores de 2 Km.. . . . .	124
4.94. Protección contra descargas atmosféricas con Hilo de Guarda . . . . .	125
4.95. Protección contra descargas atmosféricas con Hilo de Guarda y Descargador	125
4.96. Sobretensión inducida en las fases donde están instalados los descargadores	125
4.97. Sobretensión producida por descargas directas al conductor de fase . . . . .	126
4.98. Sobretensión inducida en la fase impactada . . . . .	126
4.99. Tensión inducida en la línea más cercana al conductor de fase impactado por un rayo (I=0-31,5 kA) . . . . .	127
4.100 Sobretensión pico inducida en la fase más cercana a la fase impactada por el rayo . . . . .	127
4.101 Sobretensión inducida en el conductor de fase por descargas directas al hilo de guarda (I=0-31,5 kA) . . . . .	127
4.102 Sobretensión inducida en la fase más cercana al hilo de guarda . . . . .	127
4.103 Sobretensión inducida en el conductor de fase cuando la descarga atmosférica incide sobre el poste para una corriente de 31,5 kA . . . . .	128

4.104	Sobretensión inducida en la fase cuando el rayo impacta al poste. . . . .	128
1.	Cruceta de MT Para Líneas Aéreas Desnuda . . . . .	140
2.	Alimentador COV08 . . . . .	143
3.	Alimentador con Hilo de Guarda Suelto COV08 . . . . .	143
4.	Relevamiento de campo del Alimentador CYO04 . . . . .	146
5.	Sección de los Alimentadores . . . . .	146

# Capítulo 1

## Introducción

Uno de los tipos de sobretensiones más comunes y más perjudiciales, que se encuentran en sistemas de distribución son las sobretensiones de origen atmosférico, que son debidas a una descarga atmosférica, tienen una duración muy corta y una amplitud que puede ser varias veces la tensión de pico nominal. La importancia de las sobretensiones atmosféricas crece conforme disminuye la tensión nominal de los componentes afectados por el rayo. El valor de las sobretensiones que se pueden producir en una red de distribución, originadas por un rayo es tan elevado frente al valor de la tensión nominal de la red.

Ahora bien, según Procedimientos para la Elaboración de Proyectos de Líneas de Distribución Alimentadoras de media tensión de la Administración Nacional de Electricidad (ANDE), se utilizan como medida de protección contra los efectos de las descargas atmosféricas los hilos de guarda o descargadores en los alimentadores, de manera indistinta, es decir no de manera conjunta.

El objetivo del trabajo de fin de grado es el estudio y análisis del esquema de protección actualmente utilizado por la ANDE y determinar si el mismo es efectivo como protección ante sobretensiones transitorias provocadas por las descargas atmosféricas. También se buscó diseñar un modelo de protección más efectivo contra las sobretensiones de origen atmosféricas, para ofrecer una mejor confiabilidad del sistemas de distribución y lograr así un mejor servicio a los usuarios finales.

A continuación, se describen los capítulos desarrollados en este proyecto de fin de grado:

En la parte I capítulo 2 del trabajo se realizó una extensa revisión bibliográfica en donde se consideraron los sistemas de distribución, las descargas atmosféricas, sus parámetros, los efectos que producen en las líneas de distribución y conceptos sobre el método analítico

y la del software del programa ATP-DRAW. El capítulo 3 abarca el resumen ejecutivo del proyecto. Seguidamente en el capítulo 4 se realizó la ingeniería de diseño en donde se realizó el análisis de la situación actual del esquema de protección contra sobretensiones transitorias provocadas por rayos en los alimentadores seleccionados, para luego pasar a analizar las alternativas de mejoramiento. En el capítulo 5 se se realizó el análisis y discusión de los resultados, conclusiones del trabajo, y finalmente las recomendaciones.

# Parte I

## Revisión Bibliográfica



# Capítulo 2

## Sistema de distribución

Un sistema eléctrico incluye las etapas de generación, transmisión, distribución y utilización de la energía eléctrica, y su función primordial es la de llevar esta energía desde los centros de generación hasta los centros de consumo y por último entregarla al usuario en forma segura y con los niveles de calidad exigidos. Aproximadamente las 2/3 partes de la inversión total del sistema de potencia, están dedicados a la parte de distribución (Gigante Invisible), lo que implica necesariamente un trabajo cuidadoso en el planeamiento, diseño y construcción y en la operación del sistema de distribución, lo que requiere manejar una información voluminosa y tomar numerosas decisiones, lo cual es una tarea compleja, pero de gran trascendencia. Nótese que es en esta parte donde se producen los porcentajes más grandes de pérdidas de energía en todas sus manifestaciones debido al gran volumen de elementos que lo conforman, y a los bajos niveles de tensión que se manejan. La distribución de energía eléctrica es una actividad cuyas técnicas están en un proceso constante de evolución reflejada en el tipo de equipos y herramientas utilizadas, en los tipos de estructuras, en los materiales con los que se construyen las redes de distribución y en los métodos de trabajo de las cuadrillas de construcción y mantenimiento, reflejada también en la metodología de diseño y operación empleando computadores (programas de gerencia de redes, software gráfico, etc.). Algunos de estos factores de evolución son: expansión de la carga, normalización de materiales, estructuras y montajes, herramientas y equipos adecuados, métodos de trabajo específicos y normalizados, programas de prevención de accidentes y programas de mantenimiento, surgimiento de industrias de fabricación de equipos eléctricos, grandes volúmenes de datos y planos.

## 2.1. Redes de distribución eléctrica

Las redes de distribución de energía eléctrica es la parte de la infraestructura de suministro de energía que toma la electricidad de los circuitos de transmisión de alto voltaje y altamente mallados y la entrega a los clientes. La infraestructura de distribución es extensa; después de todo, la electricidad tiene que ser entregado a clientes concentrados en ciudades, clientes en los alrededores y clientes en regiones muy remotas [10].

## 2.2. Clasificación de los sistemas de distribución de acuerdo a su construcción.

Redes de distribución aéreas.

Redes de distribución subterráneas.

### 2.2.1. Redes de distribución aéreas.

En esta modalidad, el conductor que usualmente está desnudo, va soportado a través de aisladores instalados en crucetas, en postes de madera o de concreto. instalados en crucetas, en postes de madera o de concreto. Al comparársele con el sistema subterráneo tiene las siguientes ventajas:

- Costo inicial más bajo.
- Son las más comunes y materiales de fácil consecución.
- Fácil mantenimiento.
- Fácil localización de fallas.
- Tiempos de construcción más bajos.

**Y tiene las siguientes desventajas:**

- Mal aspecto estético.
- Menor confiabilidad.

- Menor seguridad (ofrece más peligro para los transeúntes).
- Son susceptibles de fallas y cortes de energía ya que están expuestas a: descargas atmosféricas, lluvia, granizo, polvo, temblores, gases contaminantes, brisa salina, vientos, contactos con cuerpos extraños, choques de vehículos y vandalismo.

### **2.2.2. Redes de distribución subterráneas.**

Son empleadas en zonas donde por razones de urbanismo, estética, congestión o condiciones de seguridad no es aconsejable el sistema aéreo. Actualmente el sistema subterráneo es competitivo frente al sistema aéreo en zonas urbanas céntricas. Tiene las siguientes ventajas:

- Mucho más confiable ya que la mayoría de las contingencias mencionadas en las redes aéreas no afectan a las redes subterráneas.
- Son más estéticas, pues no están a la vista.
- Son mucho más seguras.
- No están expuestas a vandalismo.

#### **Tienen las siguientes desventajas**

- Su alto costo de inversión inicial.
- Se dificulta la localización de fallas.
- El mantenimiento es más complicado y reparaciones más demoradas.
- Están expuestas a la humedad y a la acción de los roedores. Los conductores utilizados son aislados de acuerdo al voltaje de operación y conformados por varias capas aislantes y cubiertas protectoras. Estos cables están directamente enterrados o instalados en bancos de ductos (dentro de las excavaciones), con cajas de inspección en intervalos regulares.[10]

Actualmente la ANDE cuenta con los dos tipos de líneas mencionadas, siendo las líneas de distribución aérea la más usada, en tanto la línea subterránea es utilizada generalmente en la salida de las subestaciones como también en los circuitos de distribución de aquellas ciudades que cuentan con una gran cantidad de edificaciones y habitantes.

## 2.3. Descargas atmosféricas.

Por definición, la descarga atmosférica es una descarga eléctrica. Es la descarga de alta corriente de una electrostática acumulación de electricidad entre la nube y la tierra o entre las nubes. El mecanismo por el cuál una nube se carga eléctricamente todavía no se entiende completamente. Sin embargo, se sabe que los cristales de hielo en una nube activa están cargados positivamente, mientras que las gotas de agua generalmente tienen cargas negativas. Por lo tanto, una nube tormentosa tiene un centro positivo en su sección superior y un centro de carga negativa en su sección inferior. En términos eléctricos, esto constituye dipolo. Tenga en cuenta que la separación de carga está relacionada con el sobre enfriamiento y ocasionalmente incluso la congelación de gotitas. La disposición de las concentraciones de carga se debe parcialmente a la circulación vertical en términos de corrientes ascendentes y descendentes. A medida que se acumula una carga negativa en la base de la nube, se induce una carga positiva correspondiente en la tierra, como se muestra en la Figura 2.1(a). El gradiente de voltaje en el aire entre los centros de carga en la nube (o nubes) o entre la nube y la tierra no es uniforme, pero es máxima donde la concentración de carga es mayor. Cuando el gradiente de voltaje dentro de la nube aumenta hasta el orden de 5-10 kV / cm, el aire en la región se descompone y comienza a formarse un camino ionizado llamado trazo líder o líder, que se mueve desde el nublar hasta la tierra, como se muestra en la Figura 2.1(b). La punta del líder tiene una velocidad entre 105 y  $2 \times 10^5$  m/s es decir, menos de 1000 de la velocidad de la luz de  $3 \times 10^8$  m/s y se mueve en saltos. Si es fotografiado por una lente de cámara que se mueve de izquierda a derecha, el trazo del líder aparecerá como se muestra en la Figura 2.2.

Por lo tanto, la formación de una descarga atmosférica es una avería progresiva del camino del arco de la nube a tierra. A medida que el líder golpea la tierra, un transmisor de retorno extremadamente brillante, llamado golpe de retorno, se propaga hacia arriba desde la tierra a la nube siguiendo el mismo camino, como se muestra en las Figura 2.1(c) y Figura 2.1(d).

En cierto sentido, la carrera de retorno establece un cortocircuito eléctrico entre la carga negativa depositado a lo largo del líder y la carga positiva inducida electrostáticamente en el suelo. Por lo tanto, la energía de carga de la nube está relacionada con el suelo, neutralizando la carga centros. La velocidad inicial de la carrera de retorno es de 108 m/s. La corriente involucrada en el golpe de retorno tiene un valor máximo de 1 a 200 KA, que dura aproximadamente 100  $\mu$ s. Aproximadamente 40  $\mu$ s después, un segundo líder, llamado el líder del dardo, puede sufrir un accidente cerebrovascular generalmente siguiendo el mismo camino tomado por el primer líder.

El primer centelleo es mucho más rápido y no tiene ramificaciones y puede producirse por descarga entre dos centros de carga en la nube, como se muestra en la Figura 2.1(e). Tenga en cuenta la distribución de la carga negativa a lo largo del recorrido de la carrera. El proceso del líder del dardo y la carrera de retorno Figura 2.1(f) puede repetirse varias veces. El proceso completo de golpes sucesivos se llama relámpago. Por lo tanto, una descarga atmosférica puede tener una sola o una secuencia de varios golpes discretos (hasta 40) separados por aproximadamente 40ms, como se muestra en la Figura 2.1.

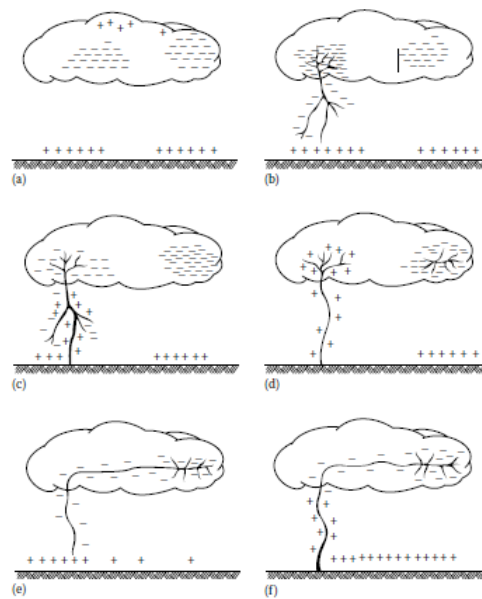


Figura 2.1: Ilustración del fenómeno del rayo.

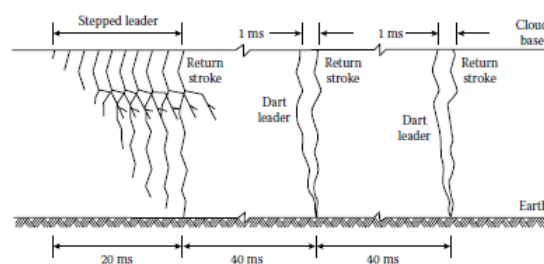


Figura 2.2: Proceso completo de un rayo.

El trueno es la señal acústica generada por un canal de aire caliente que se expande rápidamente, de él, se puede extraer información sobre la localización, tamaño y orientación del rayo. Una teoría aceptada del trueno y sus principales rasgos, solo existe desde hace unos 25 años.

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

El estudio del trueno ha perfeccionado los conocimientos que ya se tenían sobre el rayo y constituye un elemento fundamental para el estudio de las descargas entre las nubes y del canal de la descarga en el interior de una nube donde los medios visuales no pueden suministrar información. La siguiente figura muestra la evolución de la descarga eléctrica, la cual tiene una duración promedio de 0,32 segundos.



Figura 2.3: Trueno

### 2.3.1. Tipos de descargas atmosféricas

- Descargas dentro de la nube.
- Descargas entre nubes.
- Descargas Nube - Ionósfera.
- Descarga Nube - Tierra.

De todas entre ellas la mas perjudicial es la Descarga Nube - Tierra. Ya que puede producir daños a las personas, a los animales, a los árboles y a las estructuras expuestas a ellas.

## 2.4. Proceso de formación del rayo nube - tierra

La mayoría de los rayos nube-tierra se inician por el fuerte campo eléctrico que existe en la carga positiva  $p$  situada debajo de la nube y la carga negativa  $N$  de la base de la nube. Una vez que la nube de tormenta se ha cargado hasta el punto en que el campo eléctrico excede la rigidez dieléctrica local de la atmósfera -es decir, la capacidad de la atmósfera de mantener una separación de cargas eléctricas-, el resultado es la iniciación de una descarga eléctrica atmosférica o rayo.

En ese instante, el campo eléctrico es del orden de un millón de voltios por metro; en menos de un segundo, el rayo transportará la carga correspondiente a 1020 electrones y proporcionará una potencia eléctrica equivalente a 100 millones de bombillas de alumbrado residencial. Durante esa fracción de segundo, la energía electrostática de la carga acumulada pasa a energía electromagnética, energía acústica y, finalmente, calor. No se conoce exactamente el proceso físico mediante el cual la carga almacenada en la nube de tormenta se transfiere a la tierra en forma de rayo.

Existen varias teorías que tratan de explicar con algún detalle las diferentes etapas de una descarga, pero hasta ahora no existe una teoría única y comprobada con la que estén de acuerdo todos los investigadores.[23].

## 2.5. Parámetros del rayo

Más de 15 parámetros mensurable han sido establecidos por diversos investigadores que han estudiado la física del rayo.

El conocimiento de estos parámetros, en sus diferentes escala, tiene importancia tanto científica como tecnológica. El conocimiento científico nos facilita entender su comportamiento en el tiempo y en el espacio, y sus relaciones con otros fenómenos naturales. En lo tecnológico, permite el diseño óptimo y la protección adecuada de seres vivo y de equipo eléctrico y electrónico, así como el oportuno mantenimiento para garantizar una operación confiable, económica y segura.

Las magnitudes de los parámetros de la descarga eléctrica atmosférica utilizados en aplicaciones en ingeniería (nivel ceráuneo, densidad de rayos a tierra, polaridad, corriente de retorno de rayo) varían espacial y temporalmente. La perspectiva temporal significa que los parámetros del rayo se caracterizan por variar en diferentes escalas de tiempo: diaria,

mensual, anual y multianual. Una perspectiva espacial significa que la magnitud de los parámetros del rayo varían global y localmente.

La descarga eléctrica atmosférica y sus parámetros asociados son un fenómeno meteorológico que, como tal, se manifiesta de una manera aleatoria. En sus aplicaciones en la protección, diseño, operación y mantenimiento de equipos y sistemas eléctricos o electrónicos, es necesario considerar, entonces, la dimensión estadística y la probabilidad de sus valores, es decir, explicar la condición aleatoria del fenómeno.

Para realizar el modelado de su desarrollo y así caracterizar su parámetros a tener en cuenta para su aplicación en los diseños de los sistemas de protección.

**Estos parámetros fundamentales son:**

- Parámetros de Incidencia
- Parámetro de amplitud de la corriente de retorno del rayo
- Parámetros de la forma del impulso de la corriente de rayo
- El ángulo de incidencia del rayo respecto a la vertical.
- La velocidad de retorno del rayo.

### **2.5.1. Parámetros de incidencia**

Los parámetros de la incidencia de los rayos esta dividida en: el nivel cerámico, la densidad de rayos a tierra, la polaridad de la descarga y las características de las descargas múltiples.

#### **2.5.1.1. Nivel cerámico (Td)**

Es el número de días al año en que ocurren tormentas eléctricas. Este parámetro es utilizado cuando no hay disponibilidad de mediciones directas de densidad de descargas a tierra que caracteriza a la zona particular que está siendo estudiada..

Así pueden presentarse regiones con 1 o menos días de tormenta al año (baja actividad cerámica) hasta 200-300 días de tormenta al año, en zonas críticas, especialmente en el trópico (Centro-Sur de América y África).

Su principal deficiencia es que no discrimina entre las descargas entre nube y tierra o entre nube y nube, además de que el uso de ecuaciones empíricas lo convierten en un método de relativa exactitud. Fue el primer indicador y es ampliamente utilizado aún, es un indicador indirecto que acostumbra a darse para un país según el Mapa de Niveles Isoceráunicos (curvas de igual nivel ceráunico). Para obtener el número de días tormentas al año se utilizan las observaciones que se realizan desde las estaciones meteorológicas.[23]

#### 2.5.1.2. Densidad de rayos a tierra (Ng)

Es el número de rayos a tierra por kilómetro cuadrado - año (Km<sup>2</sup> en un año.). Para estudios y diseños eléctricos, se utiliza la cantidad de rayos a tierra (Ng).

Existen tres formas para determinar este indicador: con el uso de contadores; por medio de los datos obtenidos a través de los registros realizados por satélite; y por medio de ecuaciones empíricas que lo relaciona con el nivel ceráunico (Td). El nivel ceráunico representa la cantidad de días tormentas al año, que caracteriza a la zona particular que está siendo estudiada. Este último método es el menos exacto, pero es utilizado mundialmente en zonas donde no existen otras alternativas. En tanto este último método se va utilizar en este trabajo ya que en nuestro país no existe un contador de descargas de rayos a tierra.

Se han obtenido en función de medidas y estadísticas, ciertas formulaciones que permiten establecer una relación entre el nivel ceráunico y la densidad de rayos a tierra (rayos/Km<sup>2</sup>-año). De todas ellas la más aceptada en el ámbito de normativas y trabajos internacionales es la propuesta por Anderson y Eriksson (Ec. 2.1), en 1980, ya que los resultados obtenidos están avalados por un período de observación de seis años. Ésta misma es adoptada por la CEI (Comisión Electrotécnica Internacional) en su norma 601024.

La expresión matemática utilizada para el cálculo de la densidad de descargas a nivel de tierra, es:

$$Ng = 0,04.T_d^{1,25} \quad (2.1)$$

Donde:

Ng: Número total de rayos a tierra (descargas/km<sup>2</sup>-año)

T<sub>d</sub>: nivel ceráunico (días de tormenta al año).

### 2.5.1.3. Polaridad del rayo

Durante un corto período de tiempo la energía electrostática acumulada es liberada en forma de energía electromagnética (relámpago visible más ondas de radio), energía acústica (trueno) y energía calorífica. El efecto global de las corrientes puestas en juego es el del transporte de cargas negativas hacia el suelo y positiva a niveles altos de la atmósfera. La acumulación local de cargas produce dos tipos de descargas: las NN (dentro de la nube o entre Nube y Nube) y las NT (entre la Nube y Tierra). Normalmente existe una proporción de 5 (o más) a 1 a favor de las NN frente a las NT, ya que los procesos de carga son producidos dentro de la nube y la disminución de la presión con la altura favorece la aparición de los NN.

Lo que sí podemos afirmar es que la mayoría se suelen generar en la región principal de cargas negativas y son del tipo NT(-) con cargas negativas[20].

### 2.5.1.4. Características de las descargas múltiples

Los rayos consisten usualmente de descargas múltiples, con intervalos entre descargas de decenas a centenas de milisegundos. La primera descarga es la que tiene mayor amplitud, mientras que las subsecuentes tienen tiempos de ataque más rápidos, aunque la velocidad de las descargas se ha encontrado que depende del lugar geográfico. La primera descarga está entre 6 y 15 x 10E7 m/s y la segunda entre 11 y 13 x 10E7 m/s.

Las descargas atmosféricas pueden causar grandes diferencias de potencial en sistemas eléctricos distribuidos fuera de edificios o de estructuras protegidas. A consecuencia de ello, pueden circular grandes corrientes en las canalizaciones metálicas, y entre conductores que conectan dos zonas aisladas. Pero, aún sin la descarga, una nube cargada electrostáticamente crea diferencias de potencial en la tierra directamente debajo de ella.

El campo eléctrico debajo de una nube de tormenta es generalmente considerado entre 10 y 30 kV/m. Es importante, comparar estos valores con el de 1.5 kV/m con el que las puntas empiezan a emitir iones.

Una nube de tormenta promedio podría contener unos 140 MWh de energía con voltajes hasta de 100 MV, con una carga en movimiento intranube de unos 40 Coulombs. Esta energía es la que se disipa mediante los rayos, con corrientes pico que van de unos cuantos kiloamperes a unos 200 kA con un percentil (50) de 20 kA, de acuerdo con los datos del Sr. R. B. [18], maneja una magnitud promedio de una descarga negativa de 31 kA, con una pendiente promedio máxima de 24.3 kV/us. Y para las descargas que siguen a la primera,

una magnitud menor aunque más rápidas, con un promedio de 39.9 kV/us, y hasta 70 kV/us ha sido registrado. Los rayos de una nube positiva hacia tierra contienen más carga que sus contrapartes negativos, por lo que son muy estudiados. En general no exhiben el mismo comportamiento de pasos de los negativos, y suceden más frecuentemente en tormentas invernales con nieve y en latitudes altas.

Algunas particularidades aumentan la probabilidad de la caída de rayos en un lugar. Por ejemplo, la frecuencia de descargas en un lugar es proporcional al cuadrado de la altura sobre el terreno circundante. Esto hace que las estructuras aisladas sean particularmente vulnerables. Además, las puntas agudas incrementan también la probabilidad de una descarga[9].

### 2.5.2. Amplitud máxima de la corriente de retorno del rayo

Uno de los parámetros más representativos y de mayor importancia del rayo, es la magnitud de corriente pico de la descarga. Anderson (1987) define que la magnitud media de una descarga es de 31 kA. Su comportamiento es totalmente aleatorio y por lo tanto su caracterización debe realizarse desde el punto de vista probabilístico y que la probabilidad de que cierta magnitud de corriente sea excedida en una descarga, está definida por la siguiente ecuación.

$$P_{IR} = \frac{1}{1 + \left(\frac{I_R}{31}\right)^{2,6}} \quad (2.2)$$

Donde:

$I_R$  : Magnitud de corriente pico de una descarga atmosférica (31KA, media).

$P_{IR}$ : Probabilidad de que la corriente pico de una descarga atmosférica sea excedida.

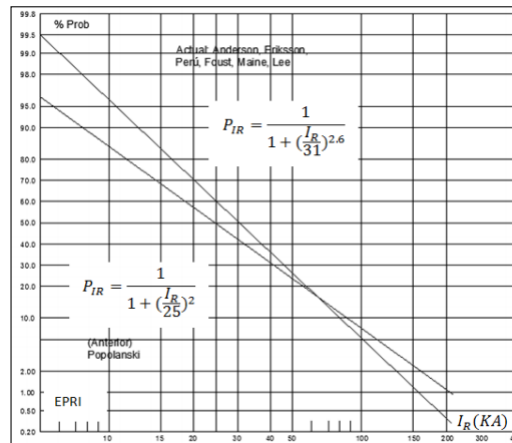


Figura 2.4: Gráfico de la amplitud máxima de la corriente del rayo.

### 2.5.3. Parámetro de la forma del impulso de la corriente de rayo

La descarga del rayo produce fenómenos de inducción de campo electrostático y electromagnético en forma de Sobretensión Impulsional STI de alta frecuencia, que pueden ocasionar la disrupción de los aislamientos.

El impacto directo del rayo en las partes energizadas (activas) o desenergizadas (pasivas) de una instalación eléctrica, crea STI propias unipolares, mientras el impacto lateral (por fuera) crea STI inducidas bipolares.

Las ondas STI cumplen con las leyes de propagación, su velocidad en los conductores eléctricos es próxima a la velocidad de la luz, mientras que en las estructuras de celosía de líneas eléctricas es menor ( $240 \text{ m}/\mu\text{s}$ ). La onda normalizada IEC ( $1.2/50 \mu\text{s}$ ) es unidireccional y unipolar, se compone de un frente ( $t_f = 1.2\mu\text{s}$ ) lineal (rápido o lento), una cresta (KVC) y una cola ( $t_c = 50\mu\text{s}$ ) de suave descenso; con tolerancias de 20 %, 3 % y 30 % que abarcan también a la Onda ANSI ( $1.5/40 \mu\text{s}$ )[14].

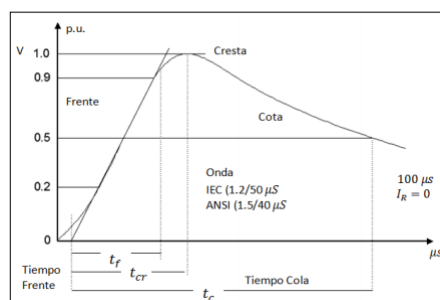


Figura 2.5: Onda de sobretensión normalizada.

#### 2.5.4. Ángulo de incidencia

Es el ángulo con el cual incide la descarga con cualquier punto terminal, respecto a la línea vertical.

Considerar que todos los rayos inciden verticalmente, introduce errores principalmente debido a que se debe tener en cuenta que no sólo el área superior de la estructura es la que está expuesta, sino su superficie lateral también. La probabilidad  $P(\theta)$  de ocurrencia de un ángulo de inclinación se puede expresar como:

$$P(\theta) = \frac{4}{\pi} \int_{\theta}^{\frac{\pi}{2}} \cos^2 \theta . d\theta \quad (2.3)$$

#### 2.5.5. Velocidad de retorno del rayo

Las tensiones inducidas por rayos que caen a tierra en las cercanías de la línea pueden ser un grave problema en líneas con bajos niveles de aislamiento, encontrándose la magnitud de estas sobretensiones en función de la velocidad de retorno del rayo. Por tanto, la velocidad es otro parámetro significativo a ser incluido en el estudio. Sin embargo, los datos experimentales para la velocidad de retorno son escasos. Además, este parámetro puede tener una dependencia geográfica, y las características de los rayos disparados artificialmente pueden ser diferentes de los rayos naturales. Varios autores han propuesto una relación entre la intensidad máxima y la velocidad de retorno de un rayo, como la que muestra la siguiente expresión:

$$v = \frac{c}{\sqrt{1 + \frac{W}{I}}} \quad (2.4)$$

donde  $v$  es la velocidad de retorno del rayo en m/s,  $c$  es la velocidad de la luz en el vacío en m/s,  $W$  es una constante, e  $I$  es la intensidad de pico de la descarga en kA. Esta relación es uno de los principios en los que se basa el Modelo Electrogeométrico que será estudiado más adelante, y por tanto debe ser tomada en cuenta en el cálculo de aquellas tensiones en las que  $v$  intervenga como parámetro. No existe consenso entre autores sobre los valores del parámetro  $W$ , por lo que se han propuesto valores muy diferentes. Por esta razón, en los estudios en los que la velocidad y la intensidad máxima de una descarga vengán relacionados mediante la expresión anterior, se emplearán valores del parámetro  $W$  entre 50 y 500.

### 2.5.6. DMH

El Departamento de Servicios Meteorológicos para el Público tiene como función, dar atención a los requerimientos de provisión, servicios o productos de información meteorológica e hidrológica a usuarios externos ocasionales o frecuentes, efectuando el control, supervisión y despacho de las solicitudes, previa comprobación del pago de los aranceles correspondientes.

Los parámetros pueden ser adquiridos con frecuencia diaria, mensual, anual, o por décadas, en forma literal o presentada en gráficos o mapas. El costo de la provisión de los datos está establecido en Capítulo III del Decreto N° 8.701/2012 "Por el cual se fijan y actualizan tasas y tarifas por la prestación de servicios aeronáuticos aeroportuarios, meteorológicos y otros medios de recursos a cargo de la Dirección Nacional de Aeronáutica Civil", en sus Artículos 80 al 84, y que básicamente establece el costo de 7,70 dólares (IVA incluido) por la provisión del registro diario de cada parámetro en forma mensual

### 2.5.7. Sobretensiones de las descargas atmosféricas.

Los voltajes producidos por una descarga atmosférica en líneas aéreas de distribución pueden deberse a descargas indirectas o descargas directas.

En la carrera indirecta, las cargas inducidas pueden tener lugar en las líneas como resultado de una descarga cercana, golpes al suelo. A pesar de que las cargas de la nube y la tierra se neutralizan a través de lo establecido ruta de corriente nube a tierra, una carga quedará atrapada en la línea, como se muestra en la Figura 2.6(a). La magnitud de esta carga atrapada es una función del gradiente de voltaje de nube a tierra inicial y la cercanía del trazo a la línea. Tal voltaje también puede ser inducido como resultado de un rayo entre las nubes, como se muestra en la Figura 2.6.

En cualquier caso, el voltaje inducido en la línea se propaga a lo largo de la línea como una onda progresiva hasta que se disipe por atenuación, fuga, falla de aislamiento u operación de descargadores. Una descarga atmosférica directa puede golpear cualquier punto de una línea. Puede golpear un poste o en algún lugar en el lapso entre polos. Si la descarga atmosférica golpea una parte superior del poste, parte de la corriente puede fluir a través de los hilos de guarda si hay cualquiera, y la corriente restante fluye a través del polo a la tierra. El flashover se verá como una bola de fuego que envuelve la parte superior del poste. La corriente se dividirá en la conexión neutral, y una pequeña parte de ella viajará por la línea en ambas direcciones hacia los polos a cada lado del poste golpeado.

Cuando las dos ondas de corriente de la descarga atmosférica que viajan alcanzan los dos polos conectados a tierra adyacentes, la corriente viajará a estos polos, y una pequeña parte continuará en la línea siguiente, polo de tierra. En general, se puede suponer que toda la corriente fluye hacia el suelo en el polo que es golpeado y los primeros dos polos conectados a tierra adyacentes. Si la resistencia de la tierra es alta, los polos a tierra pueden estar involucrados en cualquier lado del poste golpeado. Sin embargo, si la descarga atmosférica impacta en medio de una línea de distribución, la corriente del rayo se dividirá, y la mitad viajará a lo largo de la línea en cada dirección casi a la velocidad de la luz. Si la corriente de la descarga atmosférica fluye a través de la impedancia de sobretensión de la línea produce un voltaje mayor que el aislamiento de la línea puede resistir, el flashover tendrá lugar en los dos polos adyacentes al punto de golpe. En adición, los golpes que terminan cerca de la línea, pero que en realidad no lo golpean, pueden inducir voltajes lo suficientemente altos como para causa flashovers.

Para las ondas de voltaje y corriente, el callejón sin salida parecerá ser un circuito abierto. La corriente de la onda se reflejará hacia atrás en la línea con una polaridad invertida. La onda de voltaje se duplicará y reflejará por la línea con la misma polaridad.

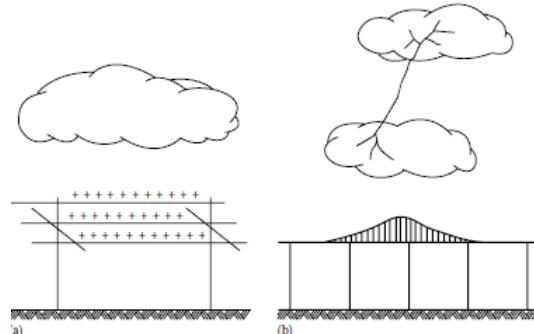


Figura 2.6: (a) Cargas de línea inducidas debido a golpes de rayos indirectos y (b) la ocurrencia de un rayo entre las nubes

### 2.5.8. Sobretensiones.

La sobretensión se puede dar de dos formas:

- Sobretensión trasitoria
- Sobretensión permanente

### 2.5.8.1. Sobretensiones transitorias

Una sobretensión es una tensión elevada que permanece en la instalación y que puede superar la tensión máxima admisible tanto en cables como en receptores. La descarga atmosférica cae sobre cualquier cable conductor provoca sobretensiones transitorias en el conductor que se caracterizan por su corta duración, crecimiento rápido (la descarga atmosférica normalizado tipo es de  $1,2/50 \mu s$ , es decir, onda con tiempo de subida hasta el valor de cresta de  $1,2 \mu s$  y tiempo de baja hasta el 50% del valor de cresta de  $50 \mu s$ ) y valores de cresta muy elevados (hasta varias centenas de KV). Estas descargas se propagan en un radio de varios kilómetros y su dispersión en la tierra eleva su potencial, induciendo fuertes sobretensiones en los cables subterráneos y aumentando la tensión en las tomas de tierra. La descarga atmosférica no es el único causante de sobretensiones transitorias, también lo son las grandes conmutaciones de las compañías eléctricas, las conmutaciones de máquinas de gran potencia y las descargas electrostáticas. Las sobretensiones producidas por las descargas atmosféricas llegan hasta las instalaciones de tres formas:

**Sobretensión conducida:** La descarga atmosférica cae directamente sobre la línea aérea, propagándose la sobretensión a lo largo de varios kilómetros. Esta acaba llegando a las instalaciones interiores de baja tensión y se deriva a tierra a través de los receptores, provocando averías o su total destrucción.

**Sobretensión inducida:** La radiación emitida por el impacto del rayo sobre un objeto (poste, árbol, descargadores, etc.) próximo a las líneas eléctricas, induce tensiones transitorias en éstas, transmitiéndose a las instalaciones interiores.

**Aumento de potencial a tierra:** Cuando una descarga atmosférica cae a tierra o a una estructura conectada a tierra, la corriente de descarga que circula por el terreno puede elevar el potencial del terreno varios miles de voltios [13].

### 2.5.8.2. Sobretensiones permanente

Una sobretensión permanente se produce cuando el valor eficaz de la tensión es superior al 110% del valor nominal, manteniéndose durante varios periodos o permanentemente. Se produce debido a defectos en los centros de transformación o por corte del neutro, en las redes de baja tensión. Estas sobretensiones permanentes pueden conllevar a la reducción de la vida útil del receptor o su destrucción, así como la disminución de la seguridad de los usuarios [13].

## 2.6. Efectos producidos por las descargas atmosféricas sobre las líneas de distribución.

Las descargas atmosféricas en líneas aéreas de distribución son mucho más críticas, debido a que su nivel de aislamiento es mucho menor. Los principales efectos producidos por descargas atmosféricas en líneas de distribución, afectan equipos como: Transformadores de distribución, cortacircuitos y fusibles, interruptores de aceites, conductores de líneas y aisladores. Adicionalmente, pueden transferir impulsos a la red secundaria debido a la capacitancia entre devanados de los transformadores, afectando equipos domésticos. Los daños causados por la descargas atmosféricas en líneas de distribución son debidos a dos tipos de descargas.

### 2.6.1. Descargas directas

#### 2.6.1.1. Descargas directas sobre un conductor de fase

Se da el caso en el que el conductor se encuentra desprotegido, es decir que no se encuentra bajo el apantallamiento del conductor de guarda. En estos casos la descarga puede impactar directamente sobre el conductor y existe casi un 100 % de probabilidad de que ocasione la salida de la línea. Este tipo de descargas se visualiza en la figura 2.7. Las descargas directas sobre los conductores de fase producirán, casi con certeza, un flameo directo de las cadenas aisladoras, ocasionando una falla usualmente monofásica. El flameo inminente se puede visualizar si tenemos en cuenta que la impedancia característica de una línea de distribución, es aproximadamente  $400\Omega$  que un rayo promedio tiene una corriente pico aproximadamente de 30 kA, con lo cual la sobretensión pico promedio inducida en la línea, es:  $V = 30 \text{ kA} \times 400/2 \Omega = 6000 \text{ kV}$ . Si tenemos en cuenta que la tensión crítica de flameo (tensión a la cual el aislamiento produce flameos el 50 % de las veces), de una línea de distribución, es normalmente inferior a 200 kV, se concluye que es muy poco probable que una línea de distribución soporte sin flamear una descarga directa sobre los conductores de fase.

Este tipo de descargas tiene tres características importantes desde el punto de vista de los daños que puede causar: Si la magnitud de la tasa de crecimiento de la corriente de la descarga tiene un valor suficientemente alto, puede romper el aislamiento interno de los aisladores en puntos de la línea ubicados en cercanías del punto de impacto de la descarga (alrededor de 50 m). Para que este daño ocurra se debe cumplir que la descarga

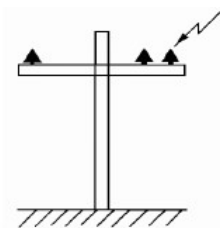


Figura 2.7: Descarga directa sobre un conductor de fase

alcanza la tensión de ruptura de frente escarpado del aislador, en un tiempo inferior a  $0.1 \mu\text{s}$ . Para aislamientos de sistemas de distribución esto corresponde a tasas de crecimiento de la corriente del rayo superiores a  $10 \text{ kA}/\mu\text{s}$ , las cuales tienen una probabilidad muy alta de ocurrir, en el orden de  $70 \%$ . La ruptura del aislamiento interno del aislador no siempre se produce, debido a que el aislamiento del aire normalmente se rompe primero, pero a medida que la tasa de crecimiento de la tensión es mayor, la rigidez del aislamiento del aire mejora ostensiblemente y puede ocurrir que se haga superior a la del aislamiento interno del aislador obligándolo a que se produzca la ruptura eléctrica a través de él. El punto de corte de ambas características es en realidad de muy difícil determinación, dado que depende de factores tales como las condiciones ambientales y la contaminación del aislamiento. Debe tenerse en cuenta que en los postes terminales la tasa de crecimiento de la tensión tiende a duplicarse por el efecto de línea abierta, por lo que sus aisladores tienen mayor probabilidad de sufrir daños. Un fenómeno similar, aunque no tan grave, ocurre en los postes con derivaciones de redes primarias. La presencia de cuernos saltachispas en los aisladores reduce mucho estos daños. Si la magnitud de la corriente de retorno de la descarga tiene suficiente valor, producirá flameo al aire y en consecuencia una falla monofásica que obligará la salida del circuito, con el consiguiente deterioro de la calidad del servicio. Dado el bajo nivel del aislamiento en las líneas de distribución, la magnitud de la corriente necesaria para producir esta falla se puede estimar como de solo  $1 \text{ kA}$ :  $200 \text{ kV} / (400/2 \Omega)$ , valor que supera el  $99.9 \%$  de los rayos. Si la distancia entre pararrayos y transformadores es excesiva, la reflexión de ondas en los bornes de los transformadores incrementa la tensión excesivamente en esos puntos, rompiendo su aislamiento interno. Aunque este efecto se ve amortiguado con la distancia debido a los efectos resistivo e inductivo de la línea, se ha establecido que la distancia entre pararrayos y equipos debe ser tan corta como sea posible y que si su valor es mayor de  $40 \text{ m}$ , la protección brindada por los descargadores al equipo es deficiente. Los daños causados por este efecto en líneas de distribución, alcanzan un radio de aproximadamente  $500 \text{ m}$  del punto de impacto, con lo cual es usual encontrar varios transformadores dañados por una misma descarga.

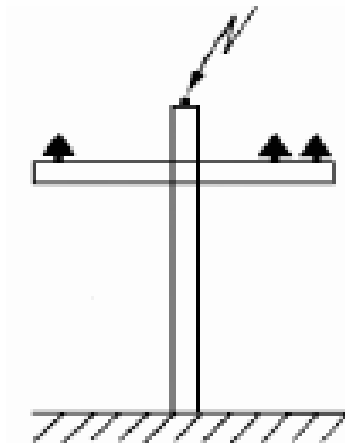


Figura 2.8: Descarga directa sobre el conductor de guarda

#### 2.6.1.2. Sobre cables de guarda o en los postes de distribución

Cuando la descarga directa golpea el hilo de guarda o el poste figura 2.8, se presentan varios fenómenos: La onda electromagnética producida por la descarga viaja a lo largo del conductor de guarda, e induce, debido al acople inductivo y capacitivo con los conductores de fase, una sobretensión en estos últimos que puede causar un flameo fase-tierra. La figura 2.9 ilustra este concepto.

El factor de acople entre cables de guarda y conductores de fase es el porcentaje de tensión inducida en la fase para una sobretensión dada en el cable de guarda

. En líneas de distribución varía entre 0.1 y 0.5, dependiendo de la altura del cable de guarda sobre los conductores de fase. En el mejor de los casos, con ángulos de apantallamiento menores de  $30^\circ$ , el factor de acople es aún suficiente para que una descarga promedio produzca flameo. Esta conclusión se puede visualizar como sigue: La tensión inducida en el cable de guarda, el cual tiene una impedancia característica cercana a  $500 \Omega$ , para una descarga promedio, es aproximadamente 7500 kV:  $(30 \text{ kA} \times 500/2 \Omega)$ , con lo cual la inducción en el conductor de fase será del orden de 750 kV con un factor de acople de 0.1, haciendo inminente el flameo a tierra en el conductor de fase.

Cabe anotar aquí, que en esta estimación no se tuvieron en cuenta las reflexiones negativas producidas en los puntos en que están puestos a tierra los cables de guarda ni el efecto corona, factores que pueden disminuir ostensiblemente la tensión pico alcanzada en el cable de guarda y por ende la inducción. La influencia benéfica de las reflexiones negativas resalta la importancia de poner a tierra los hilos de guarda en el mayor número de puntos posibles, siendo ideal hacerlo en cada poste o estructura. Para descargas atmosféricas de

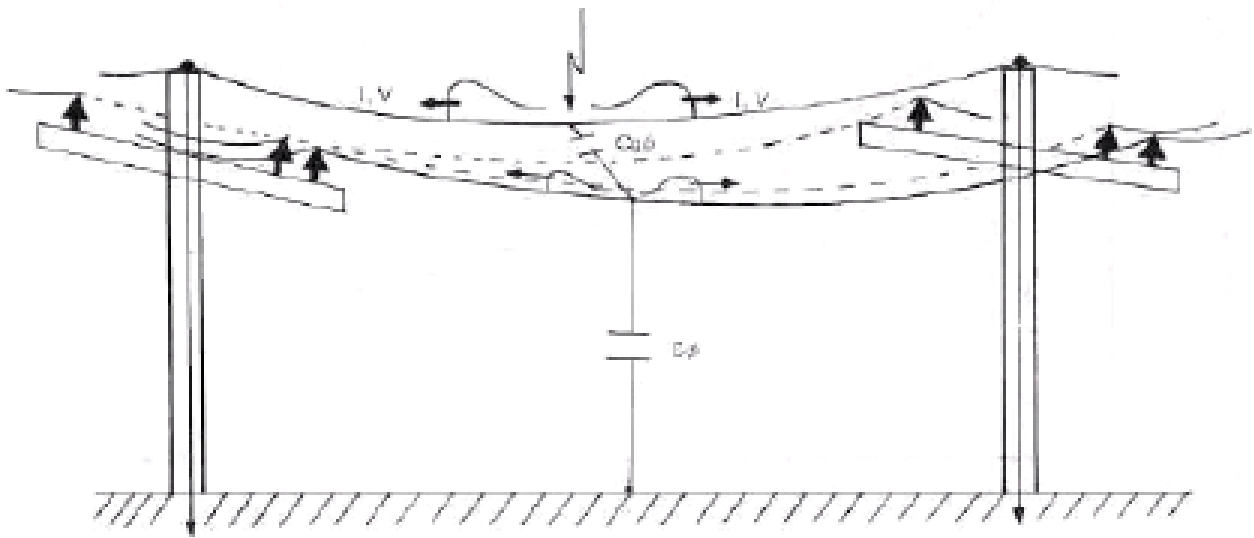


Figura 2.9: Concepto de inducción por acople

alta tasa de crecimiento de la corriente, la puesta a tierra de los extremos del cable de guarda no será suficiente para evitar una gran inducción en el conductor de fase, con lo cual el riesgo de falla en la línea de distribución por descargas atmosféricas en el hilo de guarda es muy elevado. Aunque es muy difícil establecer un porcentaje de fallas, en general podemos estimarlo alrededor del 70 %, que corresponde a la suposición de que las reflexiones amortiguan el 50 % de la onda incidente, de que el factor de acople sea del 10 % y que la tensión de flameo directo del aislamiento sea de 200 kV, y considerando además el aumento de la tensión de tierra correspondiente. Este resultado indica que el hilo de guarda solo podría proteger contra el 30 % de las descargas que lo alcancen. De este breve análisis se concluye que los hilos de guarda en líneas de distribución no ofrecen una protección muy efectiva contra descargas directas.

La descarga impacta en el vano del hilo de guarda o en la torre, repartiéndose entre los cables de guarda y la puesta a tierra del poste (figura 2.8). Dado que usualmente la puesta a tierra en líneas de distribución es muy pobre (reduciéndose a enterrar una varilla copperweld), la resistencia de puesta a tierra del poste es usualmente alta (mayor de 20  $\Omega$ ), con lo cual una corriente de rayo relativamente baja producirá un apreciable incremento de tensión entre el conductor de puesta a tierra (o el cable de guarda) y los conductores de fase, facilitando la aparición de un flameo inverso. La figura 2.9 muestra este proceso.

Para que ocurra flameo inverso en una línea de distribución, se requiere que la tensión producida por la corriente a tierra sea mayor que la tensión crítica de flameo inverso,

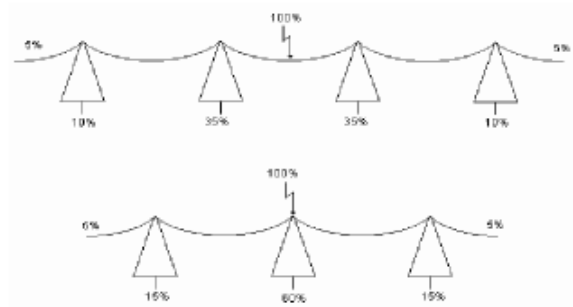


Figura 2.10: Distribución de la descarga entre el cable de guarda y los postes

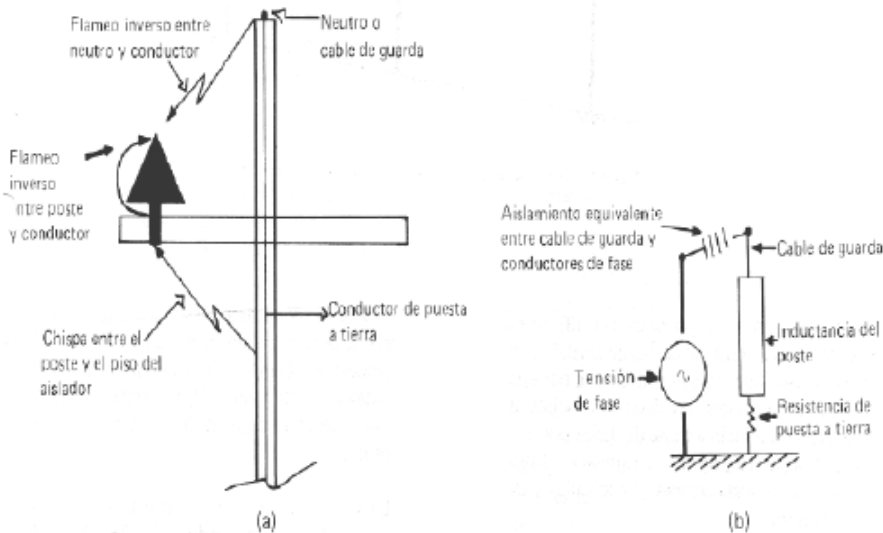


Figura 2.11: Fenómeno de flameo inverso en líneas de distribución (a. Rutas posibles, b. Circuito de flameo)

más tres desviaciones estándar del aislamiento de la línea. Esta tensión, en líneas de distribución, no supera los 300 kV, con lo cual la corriente necesaria para producir flameo es aproximadamente: 15 kA ( $I = 300 \text{ kV}/20 \Omega$ ). Para producir esta corriente se requiere alrededor de 30 kA de corriente de retorno con lo cual se espera que cerca del 50 % de las descargas en la línea de distribución produzcan flameo inverso. Así pues, si la resistencia de puesta a tierra es alta, se producirá flameo directo por inducción o inverso por sobretensión en el cable de guarda, por lo que debe procurarse que este valor sea tan bajo como se pueda.

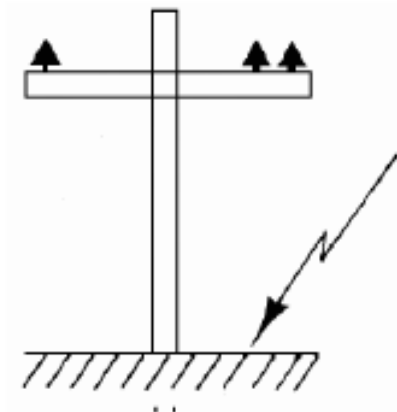


Figura 2.12: Descarga indirecta

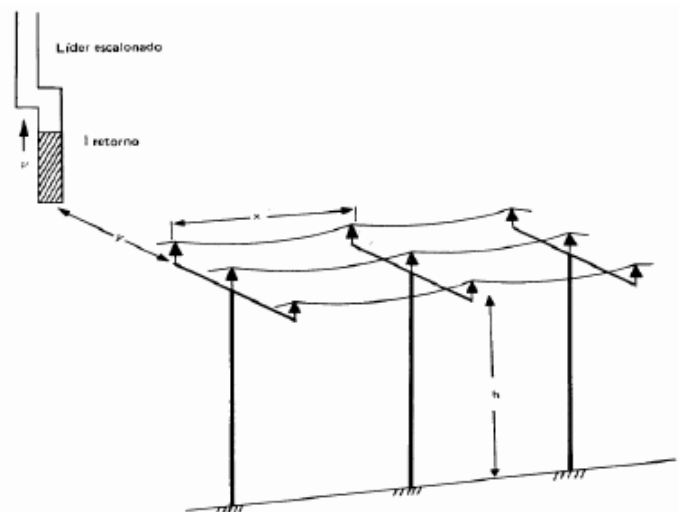


Figura 2.13: Geometría de la inducción en líneas por descargas indirectas

### 2.6.2. Descargas indirectas

Las descargas indirectas son aquellas que no impactan directamente la línea figura 2.12, pero que retornan por un canal ionizado cercano a la línea (dentro de un radio de aproximadamente 200 m). El cambio brusco del campo electromagnético producido por la circulación de la corriente de retorno induce en la línea una sobretensión. La figura 2.13 muestra esta situación.

De acuerdo con investigaciones, se ha encontrado que cerca del 80% de los daños en líneas de distribución, son producidos por este mecanismo. Así pues, las descargas indirectas constituyen la principal causa de daños por descargas atmosféricas, no solo en líneas de distribución sino en instalaciones domiciliarias y de computadores. La protección contra

este tipo de inducciones consiste en la construcción de una jaula de Faraday alrededor de los conductores. Obviamente, una jaula ideal sería de construcción injustificable económicamente en la mayoría de los casos, pero la presencia del cable de guarda ha demostrado comportarse como una jaula de Faraday bastante buena, reduciendo apreciablemente el número de fallas por este concepto. La presencia del cable de guarda en una línea de distribución, se justifica, no sólo como protección contra descargas directas, sino por su efecto de jaula de Faraday contra descargas indirectas.

## 2.7. Estadística asociada a las descargas atmosféricas en líneas de distribución

Las descargas eléctricas atmosféricas son fenómenos aleatorios, por tanto, su comportamiento debe ser estudiado desde el punto de vista probabilístico. En esta sección se estudiarán las funciones de probabilidad que siguen los parámetros más importantes de un rayo.

### 2.7.1. Funciones de probabilidad para la corriente máxima de un rayo

#### 2.7.1.1. Función densidad de probabilidad

La función densidad de probabilidad de las amplitudes de la corriente de pico de un rayo, se calcula a partir del resumen muy completo presentado por (poner como referencia CIGRE Working Group 33.01 [B17]) Se supone la distribución de los parámetros del rayo. La ecuación para la función de densidad de probabilidad para cualquier parámetro particular  $x$  viene dado por la ecuación:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\theta x}} \cdot e^{\left(-\frac{z^2}{2}\right)} \quad (2.5)$$

Donde:

$$z = \frac{\ln(x/M)}{\theta} \quad (2.6)$$

$M$  es el valor medio y  $\theta$  es la desviación estandar del parámetro en estudio, los mismos que se indican en la tabla de la figura 2.14

	Primera Descarga	
	Valor Medio	Desviación logarítmica Estándar
<b>FRENTE DE ONDA</b>		
$t_{10/90}=T_{10/90}/0.8$	5.63	0.576
$t_{30/90}=T_{30/90}/0.6$	3.83	0.553
$t_m=I_f/S_m$	1.28	00.611
<b>PENDIENTE kA/<math>\mu</math>s</b>		
$S_m$ , Máxima	24.3	0.599
$S_{10}$	2.6	0.921
$S_{10/90}$	5	0.645
$S_{30/90}$	7.2	0.622
<b>CORRIENTE DE CRESTA Ka</b>		
$I_i$	27.7	0.461
$I_f$	31.1	0.484
$I$ inicial/final	0.9	0.23
COLA, $T_n$ , $\mu$ s	77.5	0.577
CARGA, $Q_1$ , C	4.65	0.882
$\frac{1}{2} I^2 dt$ , (kA) <sup>2</sup> s	0.057	1.373

Figura 2.14: Parámetros recomendado por CIGREE para una descarga atmosférica.

Para mayor comprensión se usa conjuntamente con la figura y la tabla en donde se puede ver la forma de onda aceptada por CIGREE para una descarga atmosférica.

$I_{10}$ = 10 % del valor pico de la corriente del rayo

$I_{30}$ = 30 % del valor pico de la corriente del rayo

$I_{90}$ = 90 % del valor pico de la corriente del rayo

$T_{10/90}$ = tiempo entre las intercepciones  $I_{10}$  y  $I_{90}$  en el frente de onda

$T_{30/90}$ = tiempo entre las intercepciones  $I_{30}$  y  $I_{90}$  en el frente de onda

$td_{10/90}$ = Duración de frente de onda lineal equivalente derivada de  $T_{10} / 90$

$td_{30/90}$ = Duración de frente de onda lineal equivalente derivada de  $T_{30} / 90$

$S_m$ = Pendiente máxima del frente de onda

$S_{10}$ = Pendiente instantánea a  $I_{10}$

$S_{10/90}$ = Pendiente promedio entre ( $I_{10}$  e  $I_{90}$ )

$S_{30/90}$ = Pendiente promedio entre ( $I_{30}$  e  $I_{90}$ )

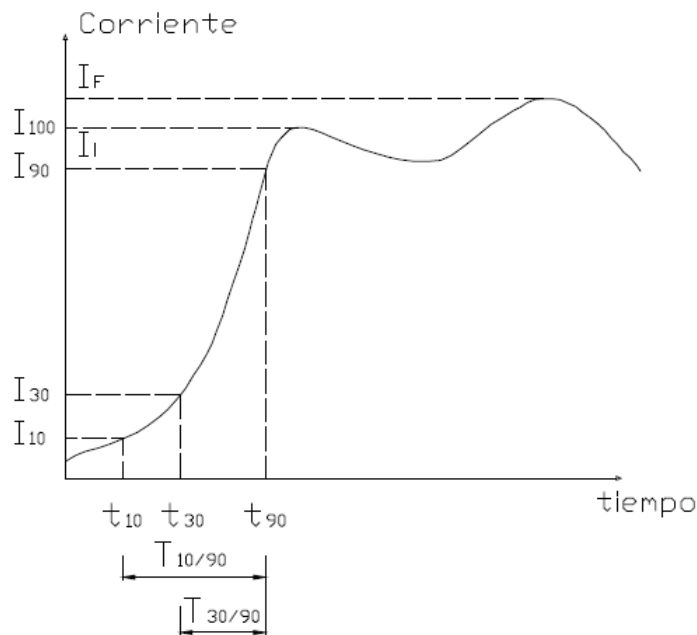


Figura 2.15: Forma de onda de una descarga atmosférica.

Q1= carga de impulso de una descarga

### 2.7.2. Función de distribución de la corriente acumulada ( $P(I \geq i_0)$ )

La distribución estadística de la corriente de descarga atmosférica debería conocerse para cada región donde queremos realizar una estimación del número de rayos en las líneas para determinar los índices de fallas producidas en dichas líneas.

La función de distribución acumulada permite calcular la probabilidad de que la corriente de pico de un rayo,  $I$ , sea igual o más grande que un valor determinado,  $i_0$ . Para fines prácticos, la densidad de probabilidad acumulada  $f_1(I)$  para la primera descarga  $I_f$ , puede describirse con la siguiente aproximación de CIGREE.

$$f_1(I) = \left( \frac{1}{\sqrt{(2\pi)\theta_{\ln}(I)}} \right) \cdot e^{-\frac{(\ln I/\bar{I})^2}{2\theta_{\ln}^2}} \quad (2.7)$$

$$I < 20\text{KA} \quad \bar{I} = 61.1\text{KA} \quad \theta_{\ln} = 1.33$$

$$I > 20\text{KA} \quad \bar{I} = 33.3\text{KA} \quad \theta_{\ln} = 0.605$$

Integrando la ecuación 2.7 se obtiene la probabilidad acumulada de que la corriente de la primera descarga  $I_f$  excede un valor dado  $I$  y este también se puede expresar en forma

aproximada por:

$$P(I \geq i_0) = \frac{1}{1 + (i_0/\bar{I}_{first})^{2,6}} \quad (2.8)$$

Dónde  $\bar{I}_{first} = 31KA$

Dada la gran variabilidad de cada uno de los parámetros eléctricos de la descarga, se recurre a representaciones que indican el % de probabilidad que tal valor sea superado en función de una escala de valores.

Tomamos como ejemplo los valores que proponen la CIGREE y la IIEE, para dos valores muy significativas en la caída de un rayo. Se notan discrepancia entre valores propues-

$I_k[kA]$	3	4	5	10	30	40	50	100	200	Referencia
Probabilidad [%]	99	98	96	85	40	30	20	6	1	CIGRE
$I_k[kA]$		2	7	10	11	20	24	50	100	
Probabilidad [%]		99.8	90	74	70	40	20	7	1	IEEE

Figura 2.16: Valor máximo de la corriente de cresta

$(\Delta I/\Delta t)$ máx. [kA/us]	2	5	10	20	50	100	Referencia
Probabilidad [%]	99.7	96	82	58	20	5	IEEE

Figura 2.17: Variación de la pendiente máxima de la corriente en el tiempo

tos por distintos autores, atribuibles muy posiblemente a las distintas experiencias que sirvieron como fuentes de datos. De cualquier forma estos valores sirven como marco de referencia para aceptar valores, que uno misma pueda obtener.

### 2.7.2.1. Función de probabilidad para el tiempo de frente de la onda de corriente de un rayo ( $p(tf)$ )

De forma similar a la corriente de pico, la densidad de probabilidad del tiempo de frente de la onda de corriente de un rayo,  $p(tf)$ , se puede obtener a partir de la siguiente expresión:

$$p(tf) = \frac{1}{\theta_{\ln tf} tf \sqrt{2\pi}} \cdot e^{\left[ \frac{-\frac{1}{2} \ln tf - \ln \bar{tf}}{\theta_{\ln tf}} \right]^2} \quad (2.9)$$

donde  $\bar{tf}$  y  $\theta_{\ln tf}$  son el valor medio y la desviación estándar del logaritmo del tiempo de frente de onda. Generalmente se asumen los siguientes valores:  $\theta_{\ln tf} = 0.55$ ,  $\bar{tf} = 3.83 \mu s$ .

### 2.7.2.2. Función de probabilidad conjunta para la corriente y el tiempo de frente de un rayo ( $p(I,tf)$ )

La función densidad de probabilidad conjunta,  $p(I,tf)$ , para una combinación de la corriente de pico de un rayo,  $I$ , y del tiempo de frente de la onda,  $tf$ , viene expresada por:

$$p(I, tf) = \frac{1}{(2\pi)(I \cdot tf)(\theta_{lnI} \cdot \theta_{ln tf}) \cdot \sqrt{1 - \rho^2}} \cdot e^{\left[ \frac{-0,5}{(1 - \rho^2)} \ln I \right]} \quad (2.10)$$

donde  $\rho$  es el coeficiente de correlación. Si la intensidad y el tiempo de frente están distribuidos independientemente,  $\rho = 0$ , y la densidad de probabilidad conjunta queda de la siguiente forma:

$$p(I, tf) = p(I) \cdot p(tf) \quad (2.11)$$

La función densidad de probabilidad conjunta se puede calcular de dos maneras diferentes dependiendo de los valores que se hayan escogido para los parámetros estadísticos que definen a la intensidad de la descarga.

- Dos tipos de parámetros estadísticos para la intensidad Para valores de intensidad menores o iguales que 20 kA:

$$\theta_{lnI}=1.33, \bar{I}=61.1 \text{ kA}; \theta_{ln tf}=0.55, \bar{tf}=3.83\mu s$$

y para valores más grandes que 20 kA:

$$\theta_{lnI}=0.60, \bar{I}=33.3 \text{ kA}; \theta_{ln tf}=0.55, \bar{tf}=3.83\mu s$$

Coeficiente de correlación de  $\rho = 0.47$ .

- Un solo tipo de parámetros estadísticos para la intensidad

Para cualquier valor de intensidad:

$$\theta_{lnI}=0.65, \bar{I}=29.96 \text{ kA}; \theta_{ln tf}=0.55, \bar{tf}=3.83\mu s$$

Coeficiente de correlación de  $\rho = 0.47$ . En este trabajo se ha considerado la Ec. 2.11 con dos tipos de parámetros estadísticos para la corriente de pico del rayo, y con las dos variables, intensidad y tiempo de frente, distribuidas independientemente, es decir  $\rho = 0$ .

## 2.8. Modelo Electrogeométrico

### 2.8.1. Aplicación del modelo

Este modelo permite calcular el ancho de zona sin proteger,  $X_s$ , dentro de la cuál un rayo impactará directamente en la línea de distribución. La base de este modelo es el establecimiento de una relación entre la intensidad de la corriente del rayo y la región de alcance del extremo de la descarga, la que permite establecer que un rayo en su trayectoria hacia la tierra tiene preferencia en alcanzar los objetos más próximos.

En la figura 2.14 puede observarse que el rayo A saltará solamente sobre el cable de guarda, dado que para cualquier punto sobre el arco OP la distancia al conductor de fase será siempre mayor que  $S$ . El rayo C sólo podrá saltar a una distancia  $\beta S$  ya que para cualquier punto sobre QR la distancia al conductor de fase es muy grande (normalmente  $\beta = 0.9$  para líneas de distribución). El rayo B, tan pronto alcanza el arco PQ, sólo podrá saltar hacia la fase. La distancia  $X_s$  corresponde a una zona no protegida en la cuál los rayos que normalmente alcanzarían la tierra incidirán en cambio sobre la fase.

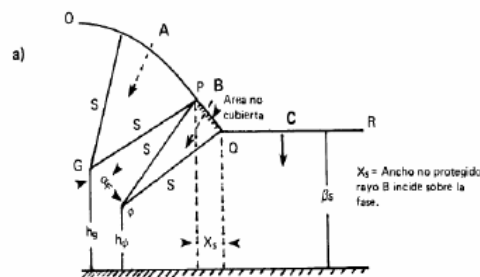


Figura 2.18: Modelo Electrogeométrico (Cálculo de zona no apantallada).

La zona de atracción de los conductores se calcula por medio de la expresión:

$$S = 10 \cdot I^{0,65} \quad (2.12)$$

Donde:

S: Distancia mínima crítica de atracción del rayo (m)

I: Corriente del rayo (KA)

Para calcular el ancho de zona sin proteger,  $X_s$ , dada la geometría del conductor con el cable de guarda, se presentan dos casos:

Si  $\beta.S > Y\phi$  (ordenada en el conductor fase)

$$X_s = S[\cos \theta + \sin(\alpha - W)] \quad (2.13)$$

Donde:  $X_s$  es el ancho no protegido

$$\theta = \arccos \left( \frac{\beta.S - Y\phi}{S} \right), W = \arccos \left( \frac{F}{2S} \right), \alpha = \arctan \left( \frac{X_\phi - X_{cg}}{-Y_{cg} - Y\phi} \right) \quad (2.14)$$

F: Separación entre el cable de guarda y fase (m)

$\alpha$ : Ángulo de apantallamiento

$X_\phi$ : Abscisa del conductor de fase (m)

$X_{cg}$ : Abscisa del conductor de guarda (m)

$Y\phi$ : Ordenada del conductor de fase (m)

$Y_{cg}$ : Ordenada del conductor de guarda (m)

Si  $\beta.S < Y\phi$

$$X_s = S[1 + \sin(\alpha - W)] \quad (2.15)$$

## 2.8.2. Apantallamiento efectivo

Para lograr un apantallamiento efectivo,  $X_s = 0$ , (figura 2.), la coordenada de la fase se toma como referencia (igual a cero) y se calcula la coordenada  $X_{cg}$  (negativa por estar el cable de guarda localizado a la izquierda de la fase).

$$X_{cg} = \sqrt{S^2 - (\beta.S - Y_\phi)} - \sqrt{S^2 - (\beta.S - Y_{cg})^2} \quad (2.16)$$

Donde:

$X_{cg}$ : Abscisa del cable de guarda para apantallamiento efectivo (m)

$Y_{cg}$  y  $Y_\phi$  : Ordenadas del cable de guarda y fase, respectivamente (hm, h $\phi$ )

A partir de aquí podemos obtener el ángulo de apantallamiento efectivo,  $\alpha_E$ :



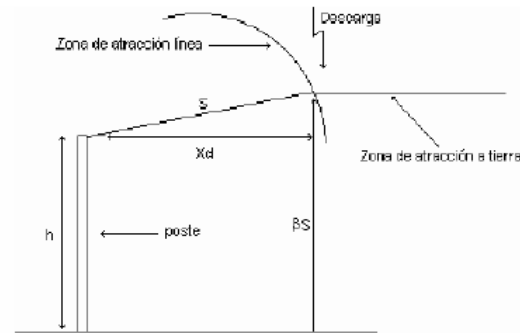


Figura 2.20: Distancia a partir de la cual se producen sobretensiones inducidas

La distancia mínima,  $X_d$ , por debajo de la cual un rayo impactará directamente en la línea, conductores de fase o cable de tierra, se obtiene a partir de la Ec. 2.18 y utilizando la figura 2.14. La anchura expuesta al rayo por un conductor de fase,  $X_s$ , es la diferencia ( $X_d - X_{dct}$ ).

## 2.8.4. Sobretensiones originadas por rayos directos

### 2.8.4.1. Impacto en un conductor de fase

En la figura muestra un diagrama con el impacto de un rayo en un conductor de fase, que generalmente será el conductor situado en una posición más elevada. La corriente del rayo se dividirá en dos partes iguales que darán lugar a dos tensiones que se propagarán en ambos sentidos. La tensión máxima originada en el conductor donde impacta el rayo vendrá dada por ley de Ohm, considerando que la onda de tensión se divide hacia ambos lados de la línea:

$$V_{cl} = Z_c \cdot \left(\frac{I}{2}\right) \quad (2.19)$$

siendo  $Z_c$  la impedancia característica del conductor en  $\Omega$ , e  $I$  la intensidad máxima del rayo en A. La impedancia de onda de un conductor se encuentra en función de su altura media  $h$  y de su radio  $r_c$ , y se puede calcular de la siguiente forma:

$$Z_c = 60 \cdot \ln \left(\frac{2h}{r_c}\right) \quad (2.20)$$

En las otras fases de la línea también se originarán sobretensiones por acoplamiento. Si  $K$  es el factor de acoplamiento entre dos fases, la tensión máxima inducida en otra fase

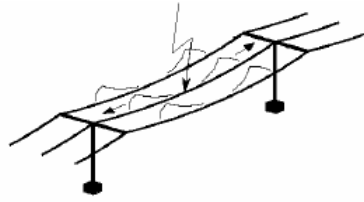


Figura 2.21: Impacto en un conductor de fase.

será:

$$V_{c2} = K.V_{cl} = K.Z_c \cdot \left(\frac{I}{2}\right) \quad (2.21)$$

Las sobretensiones en la línea pueden originarse:

Entre conductores de fase si la diferencia de tensiones

$$V_{cl} - V_{c2} = (1 - k) \cdot Z_c \cdot \left(\frac{I}{2}\right) \quad (2.22)$$

es superior a la rigidez dieléctrica entre los conductores. En la cadena de aisladores más próxima al impacto si las tensiones que se propagan desde el punto de impacto superan la tensión crítica de la sobretensión.

#### 2.8.4.2. Impacto en el hilo de guarda

En la figura se muestra las dos posibilidades que se pueden presentar: el rayo impacta en el hilo de guarda en un punto situado en medio del vano o justo en el poste. Si el impacto se produce en el hilo de guarda el análisis inicial es similar al anterior. Las tensiones originadas en el hilo de guarda y en el conductor de fase serán:

$$V_{ct} = Z_{ct} \cdot \left(\frac{I}{2}\right) \quad (2.23)$$

$$V_c = k.V_{ct} \quad (2.24)$$

siendo:  $Z_{ct}$  la impedancia característica del hilo de guarda, y  $K$  el factor de acoplamiento entre el hilo de guarda y el conductor de fase. Este coeficiente de acoplamiento se puede obtener a partir de la impedancia característica del cable de tierra,  $Z_{ct}$ , y a partir de la impedancia mutua entre el hilo de guarda y el conductor fase,  $Z_{(ct-c)}$ , según la siguiente expresión:

$$k = \frac{Z_{(ct-c)}}{Z_{ct}} \quad (2.25)$$

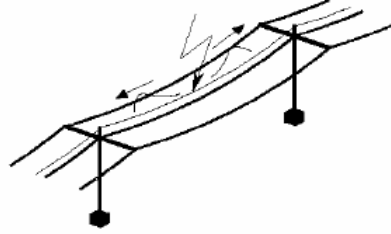


Figura 2.22: a) En medio de un vano.

$$Z_{ct} = 60 \ln \left( \frac{2h_{ct}}{r_{ct}} \right) \quad (2.26)$$

$$Z_{(ct-c)} = 60 \ln \left( \frac{D_{ct-c}}{d_{ct-c}} \right) \quad (2.27)$$

Donde  $h_{ct}$  es la altura del hilo de guarda en m,  $r_{ct}$  es el radio del hilo de guarda en m,  $D_{(ct-c)}$  es la distancia entre la imagen del hilo de guarda y el conductor en m, y es  $d_{(ct-c)}$  la distancia entre el hilo de guarda y el conductor en m. Si la diferencia entre las tensiones obtenidas a partir de

$$V_{ct} - V_c = (1 - k) \cdot V_{ct} \quad (2.28)$$

entonces la sobretensión se producirá entre el hilo de guarda y el conductor de fase en el punto de impacto. Si no es así, las ondas de tensión que se produjeron en el punto de impacto alcanzarán los postes más próximos donde se originarán ondas que viajarán a tierra. A partir de este punto el proceso será más complejo y la sobretensión se calcula como si el impacto se hubiese dado en el poste.

Si el impacto se produce directamente en el punto de conexión con el poste, la corriente de la descarga atmosférica se dividirá entre una parte que viajará a tierra a través del poste, y otra que se dividirá a su vez en dos partes iguales que se propagarán en ambos sentidos a través del hilo de guarda, Figura b.

Para calcular la tensión que aparece en los aisladores como consecuencia del impacto de un rayo en el hilo de guarda o en un poste, y para calcular la corriente crítica del rayo a partir de la cual se originará la sobretensión. La figura 2.20 muestra el modelo simplificado utilizado para calcular la tensión,  $V_t$ , que aparece en la parte alta del poste, ver Ec. 2.31, obtenida para un tiempo  $t$  de subida del rayo de  $2\mu s$ . Se tienen en cuenta las reflexiones en el apoyo adyacente.

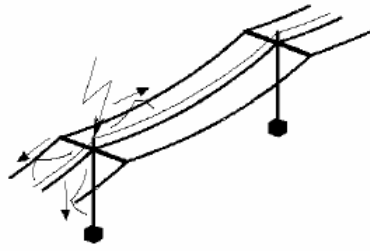


Figura 2.23: b) En un poste.

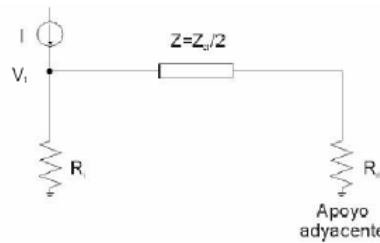


Figura 2.24: Modelo simplificado.

$$V_t = \frac{t}{2} \left[ Z_I \frac{Z_W(1 - \phi^N)}{1 - \phi} \right] + \tau \cdot Z_W \left[ \frac{(1 - \phi^N)}{(1 - \phi)^2} - \frac{N\phi^N}{1 - \phi} \right]$$

$$Z_W = \frac{2R_i^2 Z \cdot (Z - R_n)}{(Z + R_i)^2 \cdot (Z + R_n)}, Z_I = \frac{R_i \cdot Z}{Z + R_i}, \phi = \frac{(Z - R_i)(Z - R_n)}{(Z + R_i)(Z + R_n)} \quad (2.29)$$

donde  $V_t$  es la tensión en función del tiempo en la parte alta del apoyo en kV.s/kA,  $Z_{ct}$  es la impedancia característica del hilo de guarda en  $\Omega$ ,  $R_i$  es la resistencia de puesta a tierra en  $\Omega$ ,  $R_n$  es la resistencia de puesta a tierra del apoyo adyacente en  $\Omega$ ,  $\tau$  es el tiempo de propagación de la onda de tensión a lo largo del vano, y  $N$  es el número de onda en el que se alcanza el instante  $t/2\tau$ . La tensión que aparece en un conductor se calcula mediante la expresión

$$V_c = V_t \cdot (1 - k) \quad (2.30)$$

donde  $K$  es el factor de acoplamiento entre cable de tierra y conductor calculado según Ec. 2.27

La corriente crítica del rayo a partir de la cual se originará la sobretensión se obtiene de la siguiente expresión:

$$I_c = \frac{V_{max}}{V_c} \quad (2.31)$$

donde  $V_{max}$  es la tensión máxima de contorneamiento que puede ser calculada a partir de la tensión crítica de contorneamiento (CFO ? Critical FlashOver Voltage) según la siguiente expresión:

$$V_{max} = 1,5.CFO \quad (2.32)$$

### 2.8.5. Sobretensiones originadas por rayos indirectos

### 2.8.6. Tensiones inducidas en líneas de distribución

Entre los fenómenos de mayor relevancia se encuentra las descargas atmosféricas que impactan en las cercanías de los sistemas de distribución, produciéndose un acople electromagnético entre el rayo y la red de distribución, comúnmente denominado como tensiones inducidas. Llegando a ser un grave problema en líneas con bajos niveles de aislamiento como es común en los sistemas de distribución [15] [22]. Pero la magnitud de la sobretensión transitoria depende también de la amplitud de la corriente de retorno, la altura de la nube de la tormenta y la distancia entre el punto de impacto y la línea (línea iluminada)[11]

Las magnitudes de tensiones inducidas aceptadas internacionalmente se encuentran menores a un valor de 300 kV. Donde casi todas las mediciones de tensiones inducidas han sido inferiores a este valor. La tensión inducida en una línea aérea, tiene cuatro componentes [17] [21] [12]

- La nube cargada sobre la línea de transmisión induce limitadas cargas sobre dicha línea, mientras ésta se encuentra electrostáticamente al potencial de tierra.
- Las cargas debidas a los líderes escalonados, cumplen con el mismo proceso descrito en el enunciado anterior.
- Las cargas durante la descarga de retorno, inducen un campo electrostático en la vecindad de la línea, el cual a su vez induce tensiones en la línea.
- La rata de cambio de la corriente de la descarga de retorno, produce una inducción magnética sobre la línea

### 2.8.6.1. Metodología de Rusck

Este método determina la tensión inducida modelando la línea sin pérdidas, el canal de la descarga como una antena vertical de velocidad y distribución constantes y bajo la premisa que el análisis para sistemas multiconductores es el mismo que para sistemas monoconductores que ocupen la misma posición espacial. El modelo de tensión inducida desarrollado por Rusck, sobre la base de este método, se encuentra en las recomendaciones establecidas en la norma IEEE Std. 1410-2004. La expresión adoptada por Rusck para calcular la tensión inducida en una línea por descargas que caen a tierra en sus cercanías es la siguiente (referencia: Rusck, S., "Induced Lightning Overvoltages on Power Transmission Lines with Special Reference to the Overvoltage Protection of Low Voltage Networks," Transactions of the Royal Institute of Technology, Stockholm, no. 120, 1958.)

$$V = \frac{Z_0 \cdot I \cdot h}{y} \left[ 1 + \frac{1}{\sqrt{2} \cdot \frac{v}{c} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{1}{2} \left(\frac{v}{c}\right)^2}}} \right] \quad (2.33)$$

donde  $y$  es la distancia perpendicular entre la descarga y la línea en m,  $I$  es la intensidad del rayo en A,  $h$  es la altura de la línea en m,  $v$  es la velocidad de retorno del rayo en m/s,  $c$  es la velocidad de la luz en el vacío en m/s, y  $Z_0$  una impedancia que se calcula a partir de la siguiente expresión

$$Z_0 = (1/4\pi) \sqrt{(\mu_0/\epsilon_0)} = 30\Omega \quad (2.34)$$

### 2.8.6.2. Líneas con hilo de guarda

La tensión inducida en un conductor de fase, debido a descargas que caen a tierra en las cercanías de la línea, se ve reducida por la presencia de un cable puesto a tierra a través de los postes. En este caso, el cable de tierra tiene el mismo efecto tanto si se coloca por encima como por debajo del conductor de fase. Analizando el efecto de un cable de tierra, Rusck asume que si un cable es puesto a tierra a través de una resistencia  $R$ , la intensidad que circula a través de dicha resistencia vendrá dada por la expresión

$$I = \frac{V_{ct}}{\frac{Z_{ct}}{2} + R} \quad (2.35)$$

donde  $V_{ct}$  es la tensión inducida en kV en el hilo de guarda debida a descargas a tierra, y  $Z_{ct}$  es la impedancia característica de dicho cable de tierra en  $\Omega$ .

La tensión inducida en el conductor de fase por esta intensidad será

$$\Delta V_c = -\frac{Z_{ct} - c}{Z_{ct} + R} V_{ct} \quad (2.36)$$

donde  $Z_{ct}-c$  es la impedancia mutua entre el cable de tierra y el conductor en  $\Omega$ .

$$V'_c = V_c + \Delta V_c = V_c - \frac{Z_{ct} - c}{Z_{ct} + 2R} V_{ct} \quad (2.37)$$

Puesto que la tensión inducida es directamente proporcional a la altura, el factor de protección o de apantallamiento vendrá dado por la expresión

$$pr = 1 - \frac{h_{ct}}{h_c} \frac{Z_{ct} - c}{Z_{ct} + 2R} \quad (2.38)$$

La tensión inducida en el conductor teniendo en cuenta la presencia de un cable de tierra se calculará según la siguiente expresión

$$V' = pr.V \quad (2.39)$$

donde  $V$  es la tensión inducida cuando no hay hilo de guarda, ver Ec. 2.35, y  $pr$  el factor de apantallamiento del cable de tierra.

### 2.8.7. Protecciones contra la descarga atmosférica.

La derivación y el blindaje (hilos de guarda) son dos métodos básicos utilizados para proteger las líneas. Con método de derivación, el relámpago está permitido golpear los conductores de fase, y la corriente de la descarga atmosférica se deriva al suelo ya sea por flashover o por descargadores.

Con blindaje, se instala un conductor separado (llamado cable de conexión a tierra) encima del conductor de fase, y la corriente de la descarga atmosférica se dirige a tierra sin fluir a través de la fase conductores. El blindaje se usa principalmente en líneas de transmisión. La derivación se usa principalmente en líneas de distribución. El cable blindado intercepta

la descarga. Esto se logra a alturas de línea de distribución mediante el uso de un ángulo protector de  $30^\circ$ . (Este es el ángulo entre la vertical y una línea recta entre el escudo cable y el conductor de la fase externa). Es importante que haya suficiente aislamiento entre el conductor de fase y el sistema de escudo para evitar flashover. Cuando una descarga atmosférica golpea el cable blindado (hilo de guarda), viaja por el escudo hacia la primera estructura y hacia abajo el polo tierra a tierra. El flujo de corriente en la tierra del polo produce un voltaje entre él y los conductores de fase. Si la resistencia del aislamiento (es decir, BIL de la línea) es excedida por este voltaje ocurre flashover. Dado que la corriente de la descarga atmosférica en el circuito de tierra en lugar del conductor de fase, el fenómeno se conoce como la backflash. Por otro lado, cuando una descarga atmosférica golpea una línea directamente, la tensión elevada, en el punto de contacto, se propaga en forma de onda móvil en ambas direcciones y aumenta el potencial de la línea al voltaje del líder descendente. Si la línea no está protegida adecuadamente contra dicha sobretensión, dicha tensión puede exceder la tensión soportada en el suelo de la falla de aislamiento de la línea, o preferiblemente la operación del descargador, establece un camino desde el conductor de línea a tierra para la corriente de sobretensión causada por la descarga atmosférica. Para lograr un rendimiento razonable con un sistema de protección en las líneas de distribución. Se requiere que la trayectoria entre los aisladores y el polo tierra esté en el rango de 500-600 kV, y la impedancia de tierra del poste debe ser inferior a  $10 \Omega$ . Además, se requiere que cada polo tenga un polo suelo instalado. En general, el costo de un sistema de escudo diseñado adecuadamente excederá considerablemente el costo de un sistema protegido contra las descargas atmosféricas. Una línea protegida por un descargador generalmente experimentará menos interrupciones a un menor costo. Por esta razón, no se recomiendan cables blindados en las líneas de distribución. La protección contra descargas atmosféricas tiene el beneficio adicional de reducir el daño al equipo y las quemaduras de línea. Los flashovers inducidos también se pueden reducir mediante un diseño mejorado. Además, construir una línea de distribución en la estructura de transmisión no es una buena opción de diseño. Esto se debe a la cantidad de huelgas por milla de la línea de transmisión será mayor que para una línea de distribución. Además, la tensión de contragolpe debido a golpes al cable blindado causará flashover en la línea de distribución, especialmente si la tierra del polo de la línea de transmisión está muy cerca de la línea de distribución aislantes, con muy poca madera en el circuito [2].

### **2.8.8. Sistema de protección contra las descargas atmosféricas.**

En todos los sistemas de energía eléctrica pueden ocurrir sobretensiones en las líneas eléctricas originadas por descargas atmosféricas directas o indirectas, por esta razón, para

lograr la confiabilidad de las líneas de distribución se recurre a diferentes sistemas de protección contra estas sobretensiones. La protección a ser aplicada implica la coordinación del sistema de aislamiento con la instalación de los dispositivos de protecciones apropiados. Con la instalación de estos equipos y sistemas de protección se logra disminuir los efectos destructivos por descargas atmosféricas. Según los mismos los métodos y esquema de protección corresponden a los Hilos de Guarda y descargadores del tipo de óxido metálico (ZnO)[5] utilizados de manera individual sobre cada alimentador, cabe mencionar la falta de protección de algunos alimentadores.

- Descargadores
  
- Hilo de Guarda

#### **2.8.8.1. Descargadores**

La protección más completa y segura para limitar las sobretensiones de origen atmosférico a valores no peligrosos para el aislamiento se obtiene con la instalación de los descargadores.

Se denominan, en general, descargadores a los dispositivos destinados a descargar las sobretensiones producidas por descargas atmosféricas, por maniobras o por otras causas que, en otro caso, se descargarían sobre los aisladores o perforando el aislamiento, ocasionando interrupciones en el sistema eléctrico y, en muchos casos, desperfectos en los generadores, transformadores, etc.

Cada descargador es conectado entre cada fase y tierra es decir entre los bornes de los aparatos a proteger, sometiéndose permanentemente a la tensión de servicio, donde su resistencia es muy elevada y la corriente por ella es pequeña (corrientes de fuga del orden de microamperios). Cuando la tensión supera un valor prefijado en el descargador, su resistencia disminuye muy rápidamente aumentando bruscamente la corriente drenada, presentándose corrientes sobre este elemento de varios miles de amperios; En cuanto a la tensión en bornes del aparato a proteger quedará reducida con respecto a la correspondiente sin la resistencia variable. Una vez que la tensión ha alcanzado su valor normal, la resistencia vuelve a ser muy elevada y el sistema está de nuevo en las condiciones anteriores a la sobretensión, lo cual sirve para que el nivel de sobretensión que llega al elemento a proteger esté regulado por el funcionamiento del descargador. Debido a fenómenos de reflexión de las ondas de sobretensión, los descargadores por lo general se encuentran cercanos a los elementos a proteger [3].

En la Figura 2.25 se puede evidenciar las curvas del nivel básico de aislamiento del elemento a proteger (azul) y del descargador de sobretensiones (rojo), donde se debe asegurar que actué primero el descargador de sobretensiones ante la tensión de descarga. La diferencia que debe existir entre el nivel básico de aislamiento y la máxima tensión que puede aparecer en el descargador, se le conoce como margen de protección, el cual debe ser como mínimo del 20% para impulsos por rayo y 15% para impulsos por maniobra, según las especificaciones dadas por Codensa [24]. Para que el descargador pueda mantener la tensión en bornes del aparato protegido por debajo de un determinado valor, deben cumplirse ciertos requisitos :

- Debe existir una coordinación entre las curvas tensión-duración del equipo protegido y el dispositivo de protección en el sentido de que la curva de este último esté siempre por debajo de la del equipo protegido ver Figura 2.25 .
- La tensión residual en el dispositivo de protección corresponde al valor de tensión que aparece entre los terminales de un descargador de sobretensión ocasionada por el paso de una corriente de descarga
- El dispositivo de protección debe ser capaz de disipar la energía liberada por el paso de la corriente de la descarga a través del mismo. Esta energía depende de la duración de la descarga y del valor de la corriente.
- Que la tensión resistida de impulso atmosférico, onda 1,2/50  $\mu$ s que es de mayor o igual de 125 kV [6]

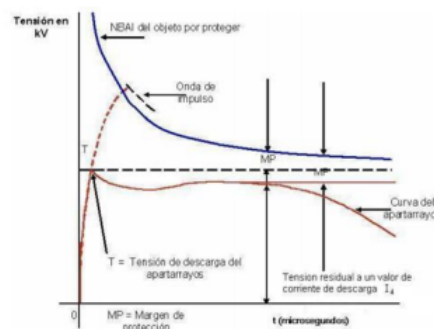


Figura 2.25: Curva del DPS

En la figura 2.26 se puede observar un descargador de sobretensión.



Figura 2.26: Descargador de sobretension

### 2.8.8.2. Hilo de guarda

El hilo de guarda es un conductor que está diseñado con menor resistencia para que las descargas atmosféricas caigan en él sin afectar el sistema, conduciendo la descarga a tierra, por lo que se disipa en el sistema de puesta a tierra (SPAT) hasta eliminarse.

Los hilos de guarda instalados en las redes de distribución, son cables sin tensión que se colocan en la parte más alta en las redes, se conectan a la misma estructura a través de bayonetas y sirven para varios motivos. Uno es el generar un equipotencial de tierra en todo el trazado de la línea, rebajando al mínimo la resistencia de tierra ya que con el cable se unen todas las estructuras y por defecto todas las tomas de tierra del trazado. Otro motivo es para intentar captar la durante las tormentas y conducirlo a tierra.

Resulta perjudicial a nivel de seguridad eléctrica y del propio transporte de energía es cuando la descarga atmosférica impacta en el cable, éste sufre una degradación de material, es decir, la energía generada del rayo en el punto de contacto del cable, crea la fusión del material y pérdida de éste, por un lado, y por otro, la modificación de su resistencia mecánica. Un cable afectado por rayo, es un peligro inminente para el suministro eléctrico, ya que se puede partir y cortocircuitar los cables de tensión que están por debajo de él, creando más chispazos y fusión de los cables de tensión. El problema no es la desconexión del servicio, el problema es que seguramente este deterioro no se percibe en el momento de la reparación y más adelante puede aparecer el accidente de verdad [8].

La eficacia del hilo de guarda en las líneas de distribución depende en gran medida del aislamiento proporcionado entre el cable de tierra y los conductores de fase. Si el cable de tierra está en contacto con el poste en toda su altura, es difícil proporcionar un aislamiento adecuado. Se necesita un nivel de aislamiento de más de 250 300 kV para que la aplicación del cable blindado sea efectiva.

La efectividad del hilo de guarda depende en gran medida de la conexión a tierra. Para que un diseño sea eficaz, las resistencias de tierra deben ser inferiores a 10  $\Omega$ . [19]



Figura 2.27: Hilo de guarda

### 2.8.8.3. Puesta a tierra

Un sistema de puesta a tierra es una conexión conductora, por medio de la cual un circuito eléctrico o equipo se conecta a la tierra por medio de un conjunto de elementos formados por electrodos, cables, conexiones y líneas de tierra física de una instalación eléctrica dentro de un área determinada, este permite conducir, drenar y disipar corrientes no deseadas provocadas por descargas atmosféricas o fallas así como limitar las sobretensiones generales [24].

La finalidad de un sistema de puesta a tierra (SPT) es proteger la vida de las personas, evitar daños en los equipos por sobretensiones, mejorar la efectividad de las protecciones eléctricas y la compatibilidad electromagnética, al proporcionar una adecuada conducción de la corriente de falla a tierra, así como servir de referencia para el sistema eléctrico [7].

Un buen diseño de puesta a tierra debe reflejarse en el control de las tensiones de paso y de contacto. Sin embargo, la limitación de las tensiones transferidas principalmente en subestaciones y líneas de media y alta tensión es igualmente importante. En razón a que la resistencia de puesta a tierra es un indicador que limita directamente la máxima elevación de potencial y controla las tensiones transferidas, pueden tomarse como referencia los siguientes valores máximos de resistencia de puesta a tierra de la Tabla que se muestra en la figura 2.28 [7] adoptados de las normas técnicas IEC 60364-4-442, ANSI/IEEE 80, NTC 2050 Y NTC4552. El cumplimiento de estos valores, no exonera al diseñador y constructor de garantizar que las tensiones de paso, contacto y transferidas aplicadas al ser humano en caso de una falla a tierra, no superen las máximas permitidas.

Aplicación	Valores máximos de Resistencia de puesta a tierra ( $\Omega$ )
Estructuras de líneas de transmisión (y metálicas o con cable de guarda en líneas de distribución)	20
Subestaciones de alta y extra alta tensión	1
Subestaciones de media tensión	10
Protección contra rayos	10
Neutro con acometida de baja tensión	25

Figura 2.28: Valores de referencia para el sistema de puesta a tierra

En el espectro de frecuencias de las descargas atmosféricas la permeabilidad del suelo puede ser asumida constante, mientras que la resistividad y la permitividad presentan variaciones significativas. Son varios los factores que tienen influencia en los valores de la resistividad y la permitividad del suelo a una frecuencia fija. Entre ellos tenemos principalmente: la humedad, tipo de suelo, tipos de sales minerales retenidas, la granulometría, la compactación y la temperatura .

En cuanto a la resistividad se refiere, es clara su disminución con el aumento de la frecuencia y, particularmente, se nota la diferencia entre los valores de resistividad en el rango de frecuencias dominantes de los fenómenos transitorios y aquellos en el rango de frecuencias en que usualmente son medidas. Un aumento en la humedad, resulta en una disminución de la resistividad. Un factor que altera la impedancia transitoria del sistema de puesta a tierra es la no-linealidad que manifiesta en ocasiones cuando una descarga lo impacta [8].

Cuando la corriente del rayo busca despejarse por el sistema de puesta a tierra produce disrupción en el suelo; generando vapor debido al aumento de temperatura y su interacción con la humedad del suelo, que de forma simultánea se evidencia en arcos; Dentro de las zonas de formación de arcos, la resistividad disminuye desde su valor original, hasta un valor límite que se aproxima a cero. Esta descomposición del suelo puede ser vista como el aumento del diámetro y la longitud de la varilla como se muestra en la Figura 2.29. A medida que aumenta la ionización, la forma de la zona se vuelve más esférica [12].

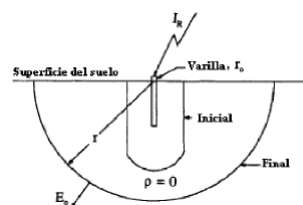


Figura 2.29: Modelo de una varilla al circular una alta corriente

**2.8.8.3.1. Puesta a tierra de protección atmosférica.** Como su nombre lo indica, se destina para drenar a tierra las corrientes producidas por descargas atmosféricas sin mayores daños a personas y propiedades.

La resistencia a tierra en cualquier punto del sistema, no debe ser mayor a 10 ohm, para lo cual, en caso necesario, se implementarán arreglos de electrodos en Delta.

**2.8.8.3.2. Resistividad del terreno.** Para conocer el comportamiento del terreno se debe estudiar desde el punto de vista eléctrico, como elemento encargado de disipar

las corrientes de defecto que lleguen a través de los electrodos, se debe de conocer la resistividad. La resistencia del terreno es la resistencia que presenta al paso de la corriente, se mide en ohm.

### **2.8.9. Aisladores**

La función eléctrica de los aisladores es proveer el aislamiento para líneas y equipos; asimismo, la retención mecánica de los conductores, cables, etc. Estos equipos están sometidos a coediciones de viento, contaminación, esfuerzos de cortocircuito que generan esfuerzos y tensiones sobre ellos.[16]. El diseño debe asegurar que los aisladores conserven sus características eléctricas y mecánicas a lo largo de los años, aun en condiciones adversas de esfuerzos de cortocircuito (sobrecargas y transitorios), condiciones de viento y contaminación ambiental.

#### **2.8.9.1. Condiciones eléctricas y mecánicas del aislador**

Todo aislador debe cumplir con las siguientes condiciones.[4]

Rigidez dieléctrica suficiente para ,que su tensión de perforación sea muy superior a su tensión de servicio, con el objeto.de que soporten las sobretensiones que puedan presentarse en la línea, sin peligro de perforación. La rigidez dieléctrica de un aislador depende; especialmente, del material que lo constituye y del espesor dado a este material. Forma adecuada para evitar las descargas de contorneamiento entre el-conductor en contacto con los aisladores y los soportes metálicos que fijan estos mismos aisladores y que a su vez, se fijan a los apoyos de la línea. Disminuir la corriente de fuga entre aislador y soporte, hasta que su valor sea prácticamente despreciable; esto para las condiciones más desfavorables; es decir cuando el aislador está sometido a la lluvia. Resistencia mecánica suficiente para que trabaje en buenas condiciones de seguridad, bajo la acción de los esfuerzos que el conductor transmite al aislador ha de ser, por lo menos, igual a la del conductor que debe soportar, aplicada dicha carga en la sección de amarre del conductor al aislar. Efecto de envejecimiento lo menor posible, para evitar gastos de reposición y de mantenimiento.

### **2.8.10. Fuera de servicio.**

Los fueros de servicio son eventos que ocurren cuando ocurre una falla en las líneas de distribución o en cualquier parte del sistema eléctrico, muchas veces es el resultado de la

actuación de las protecciones que cumplen la función de proteger al sistema y otras veces un fuera de servicio significa que un componente del sistema eléctrico dejó de funcionar. En cualquiera de los casos los fueros de servicios son eventos desagradables y molestos tanto a los usuarios como a la empresa concesionaria que debe preocuparse por encontrar el problema, solucionarlo y restablecer el servicio eléctrico.

## 2.9. Simulación utilizando el programa ATP

### 2.9.1. Introducción

Se realiza un estudio del comportamiento de las líneas de distribución frente a descargas atmosféricas directas, determinando la magnitud de las sobretensiones ocasionadas por dicho fenómeno, para lo que se ha implementado un modelo con el programa de transitorios electromagnéticos ATP [22] (Aitemative Transients Program), describiremos brevemente su funcionamiento y representación de componentes, para luego poder modelar los sistemas deseados. Las magnitudes de las sobretensiones se obtienen mediante simulaciones digitales en dicho programa. También es presentar los resultados del análisis de la simulación el efecto transitorio que se realizan para los casos de impacto de descarga en un conductor de fase.

También se realiza el estudio paramétrico mediante el cual se determinan los parámetros de mayor influencia en los valores máximos de las sobretensiones producidas por dicho fenómeno.

Para la simulación del evento se inicia con la descripción del evento, las condiciones previas del mismo y su configuración. Luego con esta información se construye y simula el modelo del sistema bajo el suceso dinámico con el ATP; para luego analizar e interpretar los resultados numéricos - gráficos, así como las consecuencias y soluciones adoptadas después de la falla en el sistema.

### 2.9.2. Programa de simulación ATP

El programa computacional ATP (Alternativa Transients Programs), es un software que nos permite simular los fenómenos transitorios que son de naturaleza electromagnética, electromecánica y de sistemas de control en sistemas polifásicos y monofásicos de un sistema eléctrico de potencia.

EL ATP fue desarrollado a fines de la década del sesenta por el Dr. Hermann W. DOMMEL, quien cedió el programa a la Benevitle Power Administration (BPA). La comercialización del producto comenzó en 1984 por el EMTP Devetopment Coordination Group y por el Electric Power Research Institute (EPRI) de Pato Alto, California. El nombre de ATP recién se lo da en 1984 cuando los doctores Meyers y Liu no aprobaron la comercialización del producto EMTP por parte de BPA -Entonces el doctor Meyers en su tiempo libre comenzó un nuevo programa basado en una copia del EMTP de BPA que era de dominio público. Desde entonces el software ATP ha estado desarrollándose continuamente por medio de contribuciones internacionales.

Cabe recalcar que ATP no es un software libre, esto quiere decir que para utilizarlo se debe obtener una licencia, la licencia es gratis para todo aquel que no ha participado en la venta o comercio de EMTP.

ATP es una herramienta diseñada para analizar, tanto en individualidad como en su conjunto, los diferentes elementos que componen un sistema eléctrico, así como los sistemas de control asociados a los equipos eléctricos.

Los estudios que utilizan ATP tienen objetivos que se pueden clasificar en 2 categorías:

- 1) Es el diseño en el cual se incluyen el dimensionamiento de los equipos, coordinación de aislamiento, nivel de tensión, diseño de los elementos de protección.
- 2) Es la solución de los problemas de operación, estos suelen ser fallas en las líneas, análisis de sobretensiones, análisis de transitorios.

### **2.9.3. Estructura de funcionamiento del ATP**

Existe el ATP en los sistemas operativos (SO) más usuales, el programa que se utiliza en este trabajo, corren bajo el SO Windows de la Microsoft. El ATP es un programa modular, su simulación se realiza generalmente en tres pasos que se entrelazan y son:

#### **2.9.3.1. Pre-procesador ATP**

Es un programa en entorno Windows, que actúa como programa central del paquete completo, ya que se pueden controlar la ejecución de cualquier programa integrado en el paquete desde el ATPDraw. Es un editor gráfico (GUI Interfaz de Usuario Gráfica) que dispone de una lista muy completa de modelos de los componentes necesarios para representar un sistema eléctrico en código ATP. Entonces se selecciona el componente del

circuito y se tiene que especificar algunos parámetros:

- Editor interno para crear y corregir archivos de datos.
- Editor de iconos para objetos definidos por el usuario, permite además la modificación de los iconos instalados por defecto.
- Posibilidad de emplear varias ventanas.
- Prestaciones para copiar, pegar, importar, exportar, ect.
- Ayuda en línea.

### 2.9.3.2. Procesador TPBIG

Es el programa principal (NÚCLEO), el ejecutable en modo texto para simular redes eléctricas. en el dominio del tiempo y de la frecuencia. La simulación de un proceso transitorio con TPBIG se basa en el método de Dommel, que combina la regla trapezoidal de integración y el método de Bergeron, resuelve las ecuaciones de red en pasos discretos de tiempo ( $\Delta t$ ), en lenguaje de programación Fortran; aunque el programa ha sido desarrollado para simulaciones de procesos transitorios, también puede ser empleado para obtener el régimen permanente sinusoidal de una red lineal.

### 2.9.3.3. Postprocesadores gráficos

Son programas para procesar los resultados de una simulación de forma gráfica (oscilogramas), llamados también GUI's PLOT (Interfaces de Usuario Gráfica de Curvas), entre los más conocidos son: PlotXY, GTPPLOT, TOP y otros. Las características principales del programa son:

- Una interfaz gráfica para fácil comunicación entre usuario y programa.
- Corre en código de 32 bits, operación más rápida.
- Escala automática y cursos para ver los valores en formato numérico.
- Graficar hasta tres archivos diferentes en forma simultanea y cada archivo hasta con 8 curvas.

El funcionamiento modular del ATP se muestra en la figura 2.30

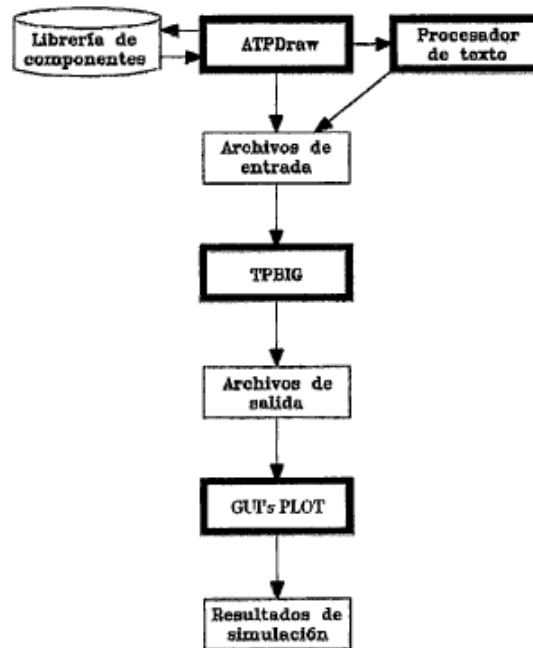


Figura 2.30: Diagrama de funcionamiento del ATP.

#### 2.9.4. Aplicaciones del ATP

Las aplicaciones que se pueden realizar con el ATP, han sido agrupadas en dos grandes secciones:

- 1) Desarrollo de modelos.
- 2) Librerías de componentes y Tipos de estudios a su vez, en este último grupo se tiene (análisis de transitorios, etc.).

En el análisis de transitorios en sistemas eléctricos de potencia, los transitorios son originados por operaciones de maniobra, averías y otras principalmente como las descargas atmosféricas.

Estos procesos pueden originar sobretensiones, sobrecorrientes, tensiones anormales y transitorios-electromecánicos. El análisis de este tipo de procesos son de utilidad para estudiar la coordinación entre componentes del sistema y dispositivos de protección o escoger el valor nominal del mencionado.

La simulación de procesos transitorios es un aspecto importante en el diseño de componentes y dispositivos de protección, así como en estudios de coordinación entre ambos.

## 2.10. Definición de términos básicos

- Línea: Es el conductor físico por medio del cual se transporta energía eléctrica, a niveles de tensión alto y medio, principalmente desde los centros de generación a los centros de distribución y consumo.
- Alimentador: Es una línea de energía de voltaje que transfiere energía desde una subestación de distribución a los transformadores de distribución.
- Falla: Es una alteración o daño permanente o temporal en cualquier parte del equipo, que varía sus condiciones normales de operación y que generalmente causa un disturbio. Perturbación que impide la operación normal.



## Parte II

### Resumen Ejecutivo



# Capítulo 3

## Resumen Ejecutivo

### 3.1. Descripción del trabajo

El trabajo consistió en el estudio del esquema de protección contra descargas atmosféricas en las líneas aéreas desnudas de distribución de media tensión de la ANDE. Como muestra se tomaron los alimentadores COV08 y el CYO04, de la Estación COV y CYO de la ANDE respectivamente.

#### 3.1.1. Métodos y técnicas utilizadas

##### 3.1.1.1. Tipo de Investigación

Se adoptó una metodología con enfoque descriptivo y experimental. Es del tipo descriptivo ya que con esta investigación se logró caracterizar un objeto de estudio una situación concreta que fue sometido a análisis ya que se evaluó en sus diferentes aspectos, además, es del tipo experimental porque se realizó simulaciones computacionales con el cual se consiguió un acercamiento a la situación real del fenómeno en estudio.

##### 3.1.1.2. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.

Para la recolección de información en el presente trabajo de investigación, se utilizaron diversas técnicas de recolección de datos que se describen a continuación:

##### a) Análisis Documental

En este trabajo de investigación se recurrió a la la (Dirección de Meteorología e Hidrología)-DMH que es el centro de Meteorología Nacional, para la obtención de las estadísticas referentes a Descargas Atmosféricas en la región.

## **b) Entrevista Estructurada**

Un método que se empleó en este proyecto de grado para la recopilación de datos fueron observaciones directas de los alimentadores que fueron estudiados, además las entrevistas estructuradas, aplicadas a los ingenieros y técnicos de la empresa ANDE, y también mediante consultas a otras personas especialistas en la materia.

## **3.2. Justificación**

Con el presente proyecto se podrá llegar a determinar si la ANDE está utilizando de una manera correcta las protecciones contra las descargas atmosféricas o se debe implementar una nueva configuración lo cual es relevante para el buen funcionamiento de las líneas en Media Tensión (MT), ya que con ello se reduciría los inconvenientes de fueras de servicios y recierres ocasionadas por este fenómeno.

Al mejorar la calidad de la distribución de la energía eléctrica reduciendo los fueras de servicios, disminuirá las perdidas por energía no facturada, por lo que la realización de este proyecto de fin de grado beneficiará a la ANDE, que es la empresa encargada de suministrar la energía eléctrica, así como a los usuarios por la mejora del servicio que podrán recibir.

## **3.3. Finalidad del proyecto**

Con la elaboración este Proyecto Final de Grado se pretende:

- Mejorar la calidad y confiabilidad del servicio de la energía eléctrica de MT brindada por la ANDE.
- Ofrecer una alternativa efectiva a la ANDE para proteger sus líneas aéreas desnudas de media tensión contra las sobretensiones transitorias originadas por descargas atmosféricas.
- Ofrecer mejor servicio a los usuarios.

## 3.4. Metas

Elaborar al menos una propuesta de mejoramiento en el esquema de Protección contra descargas atmosféricas en las líneas aéreas desnudas de distribución de MT de la ANDE.

## 3.5. Objetivos

### 3.5.1. Objetivos generales

Estudiar el esquema de protección contra descargas atmosféricas en líneas de distribución de media tensión de la ANDE.

### 3.5.2. Objetivos específicos

- Recolectar datos de los sistemas de protección contra las descargas atmosféricas actualmente implementadas por la ANDE.
- Determinar metodologías para el estudio de análisis de los efectos causadas por las descargas atmosféricas en las líneas de distribución.
- Obtener parámetros para el análisis de los efectos de las descargas atmosféricas.
- Modelar los esquemas de protección contra descargas atmosféricas utilizadas por la ANDE.
- Realizar las simulaciones del desempeño de los esquemas de protección.

## 3.6. Beneficiarios

El beneficiario directo de éste proyecto es la empresa ANDE y los usuarios del suministro de la energía eléctrica, ya que los resultados obtenidos del estudio del esquema de protección contra sobretensiones originadas por descargas atmosféricas permitirá a la ANDE mejorar su servicio a sus usuarios.

### 3.7. Producto

Los principales productos obtenidos con este proyecto:

- Las técnicas para la evaluación y dopción de un esquema de protección contra descargas atmosféricas en líneas de distribución de MT.
- Propuesta de un esquema de protección efectiva para una mejor calidad de servicio.

### 3.8. Localización física y cobertura espacial

El alimentador sobre el cual se proyectó el estudio del esquema de protección contra descargas atmosféricas con hilo de guarda de la línea de distribución aérea en MT, corresponde al alimentador COV08 que alimenta la ciudad de San José de los Arroyo.

Este alimentador se encuentra conectado a la Estación transformadora de la ANDE de la ciudad de Coronel Oviedo que pertenece al Departamento de Caaguazú localizada en el barrio cruce aproximadamente a unos 800 metros de la terminal de Coronel Oviedo, todos los alimenatdores que salen de dicha estacion son aéreos con un sistema de distribución basada en conductores desnudos, siendo subterráneas solamente en la salida de la estación con un conductor de  $240 \text{ mm}^2$ .

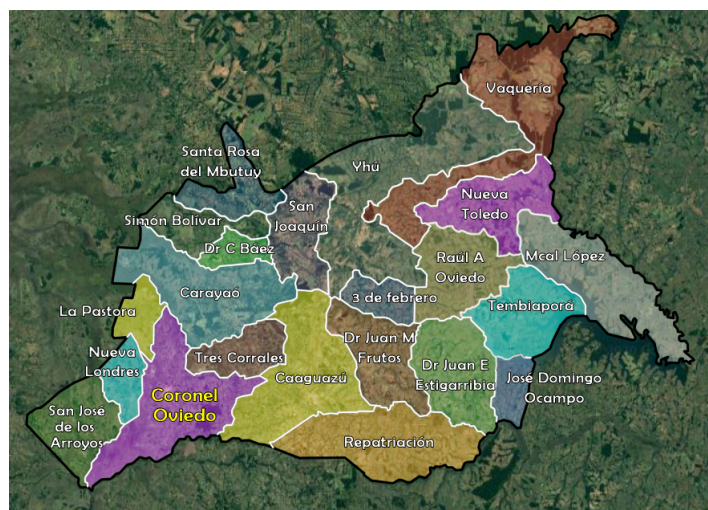


Figura 3.1: Mapa del de Departamento Caaguazú

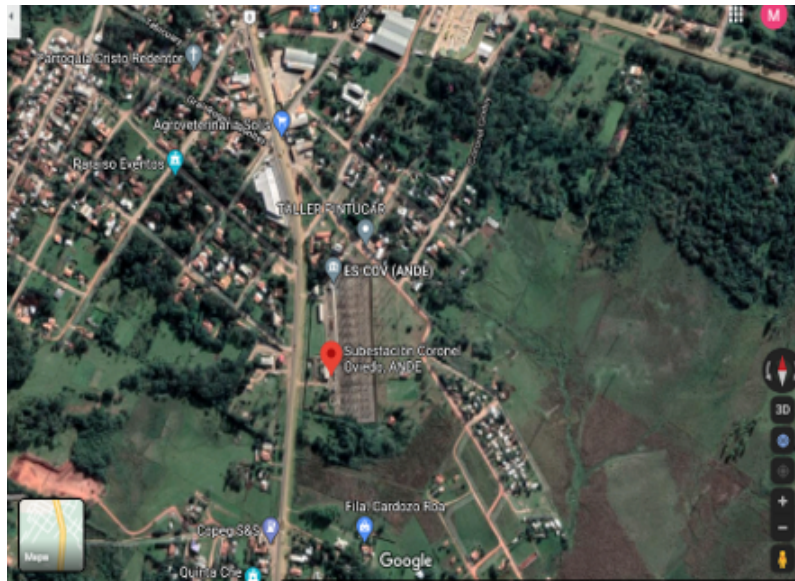


Figura 3.2: Ciudad de Coronel Oviedo del de Departamento Caaguazú

Para el estudio del esquema de protección contra descargas atmosféricas con descargadores se tomó como referencia el alimentador CYO04 correspondiente a la Estación CYO.

### 3.9. Especificaciones de actividades y tareas realizadas

En este proyecto final de grado se llevaron a cabo las distintas actividades que se describe a continuación:

- Revisión de materiales bibliográficos, trabajos de investigación artículos y Normas sobre descargas atmosféricas.
- Entrevista no estructurada al personal técnico e ingenieros relacionadas al área de estudio.
- Recolección de datos de los esquemas de protección contra las descarga atmosféricas de los alimentadores de estudio.
- Visualización directa de las redes de distribución aérea de MT de los equipos de protección contra descargas atmosféricas.
- Realización de la metodología analítica de los efectos causados por las descargas atmosféricas en redes de distribución.

- Simulaciones de los esquemas de protección a base de procesos computacionales.
- Planteamiento del diseño alternativo para la mejor esquema de protección.

## **3.10. Recursos necesarios**

### **3.10.1. Recursos humanos**

Para la realización de este proyecto final de grado el encargado es el alumno de la carrera de Ingeniería en Electricidad con la guía y acompañamiento del tutor asignado.

### **3.10.2. Recursos materiales**

Para la ejecución del presente proyecto final de grado fueron necesarios los siguientes materiales.

- Notebook (propio).
- Internet
- Impresora
- Materiales de oficina
- Libros
- Transporte (combustible, pasasje)
- Software de simulación ATPDRAW (Software Libre)

## **3.11. Factibilidad técnica**

Con él trabajo se pudo determinar que para las líneas de MT con hilo de guarda la protección es efectiva siempre y cuando la puesta a tierra se instale en cada poste, a diferencia de lo que utiliza la ANDE instalándolo en promedio cada 938 metros. Esto debido a que la puesta a tierra de las líneas con hilo de guarda tienen una influencia directa en cuanto a la efectividad de la disipación ante las sobretensiones inducidas por

descargas atmosféricas indirectas, también se determinó que es fundamental lograr un valor de resistencia de puesta a tierra de hasta 10 ohms.

Luego para las líneas de MT con descargadores se determinó que su uso efectivo se garantiza utilizándolos cada 1 km, no así como los utiliza la ANDE en el alimentador de estudio en donde están ubicados en promedio cada 1881 metros. También en este caso es fundamental que se cumpla con los valores de puesta a tierra igual o menores a 10 ohms.

Finalmente, con este trabajo se demostró que las líneas de distribución de MT de la ANDE pueden mejorar la protección contra este fenómeno utilizando de manera conjunta el hilo de guarda con los descargadores, con las puestas a tierras del hilo de guarda en cada poste y usando los descargadores cada 4 km para, con los cuales se puede reducir en mayor medida el impacto de las sobretensiones transitorias producidas por las descargas atmosféricas. Es decir, se aumenta la confiabilidad del sistema, ya que una disipación eficaz de la sobretensión garantiza un mejor desempeño de la línea de distribución y de esa forma un mejor servicio a los usuarios finales.



## Parte III

# Ingeniería de Diseño



# Capítulo 4

## Modelado

### 4.1. Sistema de distribución aérea de MT actual de la ciudad de Coronel Oviedo.

En la ciudad de Coronel Oviedo el sistema de distribución en MT existente está compuesto por líneas aéreas de conductores desnudos y protegidos, existiendo a la fecha 9 alimentadores en total.

Dichos alimentadores presentan inconvenientes debido a descargas atmosféricas según Centro de Operación Regional, siendo ello una de las causas de fuera de servicio o pesaños en el suministro de la energía eléctrica lo cual conduce a reducción de la disponibilidad del sistema de distribución que afecta tanto a la empresa encargada de la distribución y a los usuarios finales.

El desarrollo del presente proyecto de fin de grado se inició con la adquisición de datos sobre las protecciones actuales contra las descargas eléctricas atmosféricas. Se solicitó a la ANDE la lista de equipos de protecciones utilizados para mitigar las descargas atmosféricas en las líneas de distribución en media tensión.

Según Procedimientos para la Elaboración de Proyectos de Líneas de Distribución Alimentadoras de media tensión de la Administración Nacional de Electricidad (ANDE), se utilizan como medida de protección contra los efectos de las descargas atmosféricas los hilos de guarda o descargadores en los alimentadores, de manera indistinta, es decir no de manera conjunta. Es decir, si tomamos un alimentador este estará protegidos por unos de los métodos citados.

## 4.2. Características de los equipos de protección contra las descargas atmosféricas de MT utilizadas por la ANDE

### 4.2.1. Hilos de guarda

La ANDE utiliza un conductor  $35 \text{ mm}^2$  que van ubicados por encima de los conductores de fase sostenido por bayoneta. Están instalados a 1,85 metros del plano correspondiente a los conductores de fase.



Figura 4.1: Hilo de guarda del alimentador COV08

### 4.2.2. Características del descargador de sobretensión utilizado en ANDE

A continuación, se presentan las especificaciones técnicas de los descargadores utilizados por la ANDE.

#### 4.2.2.1. Características eléctricas del equipo.

- Tensión nominal, Ur: 21 KV
- Máxima tensión continua de trabajo, Uc: 17 KV
- Mínima tensión temporal soportada por 10 segundos: 21 KV

#### 4.2.2.2. Condiciones de instalación.

Se utiliza a la intemperie, fijado a la carcasa de los transformadores de distribución, o a crucetas, mediante soportes aptos para las mismas. [6]

#### 4.2.2.3. Condiciones ambientales.

- Temperatura máxima del aire: 45°C
- Temperatura media diaria máxima: 35°C
- Temperatura mínima del aire: 0°C
- Humedad relativa ambiente máxima: 100
- Nivel cerámico 50

#### 4.2.3. Características eléctricas de la red:

- Configuración del Sistema

Media Tensión: Trifásico Trifilar, conectado en estrella, neutro puesto a tierra sólidamente en el Centro de Distribución (Estación o Subestación).

- Tensión Nominal

- Entre fases: 23.000V  $\pm$  5 %
- Entre fase y neutro: 13.200V  $\pm$  5 %

- Corriente máxima del corto circuito del sistema(Media Tensión): 10 KA

## 4.3. Cálculo de las sobretensiones inducidas

En este apartado se realizaron los cálculos de sobretensiones inducidas en las líneas de distribución de MT de la ANDE con hilo de guarda y sin hilo de guarda.

Para la realización de dichos cálculos se optó por utilizar dos métodos. El primero es un método analítico que se basa en los cálculos matemáticos según las ecuaciones expuestas en la sección 2.8 y 2.9, dicho método está basado en las recomendaciones de [19]. Para el segundo método se utilizó un software para el cálculo de transitorios producidos por las descargas atmosféricas eléctricas en las líneas, llamado ATPDRAW descrita en la sección 2.10.

Para los cálculos se tomaron como base y valores iniciales los datos recabados de los alimentadores COV08 y CYO04.

### 4.3.1. Parámetros sistema de distribución de la ANDE utilizados para los cálculos

El estudio del esquema de protección contra descargas atmosféricas que se presenta en este trabajo está enfocada en el sistema de distribución de media tensión de la ANDE que está compuesto por líneas aéreas desnudas.

A continuación se describirán las características y los parámetros de los alimentadores que serán objeto de estudio, necesarios para los cálculos de las sobretensiones inducidas en las líneas de MT de la ANDE

#### 4.3.1.1. Datos del alimentador COV08

- Longitud media del vano:  $lv = 65 \text{ m}$
- Altura del Conductor de Fase:  $9,15 \text{ m}$
- Altura del Conductor de Guarda:  $11 \text{ m}$
- Los conductores de fase de la línea son conductor desnudo de aleación de aluminio de  $150 \text{ mm}^2$  de sección y de radio  $r_c = 0,007875 \text{ m}$
- El hilo de guarda es un conductor desnudo de  $35 \text{ mm}^2$  de sección y de radio  $r_{cg} = 0,0175 \text{ m}$

- Puesta a tierra del hilo de guarda en promedio cada 938 m
- Resistencia DC a 20 °C de los conductores de Fase: 0,2234  $\Omega/\text{km}$
- Resistencia DC a 20 °C del hilo de guarda: 0,9367  $\Omega/\text{km}$
- Distancia entre las fases más externas: 1,45 m
- Longitud total de la línea troncal COV08: 25,4 km

#### 4.3.1.2. Datos del alimentador COY4

- Longitud media del vano:  $lv = 65$  m
- Altura del Conductor de Fase: 9,15 m
- Disposición de los descargadores por la línea cada 1882 metros en promedio
- Los conductores de fase de la línea son conductor desnudo de aleación de aluminio de 150  $\text{mm}^2$  de sección y de radio  $r_c = 0,007875\text{m}$
- Resistencia DC a 20 °C de los conductores de Fase: 0,2234  $\Omega/\text{km}$
- Distancia entre las fases más externas: 1,45 m
- Longitud total de la línea troncal COY4: 33.9 km

Distancia entre las fases, Ver Figura 1

#### 4.3.1.3. Postes

- Altura: 12 m
- Peso: 760 kg
- Carga de trabajo: 1000 kg
- Resistencia de puesta a tierra: en este estudio se considera una resistencia de 10  $\Omega$  para las protecciones. Según Tabla de la figura 2.28. También se analizaron las influencias en la variación de la sobretensión inducida para valores de la resistencia de puesta a tierra mayores.

### 4.3.2. Cálculos de las sobre tensiones inducidas por método analítico

En esta sección se realizó el cálculo de las tensiones inducidas por las descargas atmosféricas directas e indirectas en la línea COV08 con hilo de guarda y también se consideró el caso sin hilo de guarda con la finalidad de analizar el comportamiento de la línea ante las tensiones inducidas para los dos casos ya que en algunas partes del alimentador existen hilos de guarda suelto. También se calcularon las zonas de atracción de los conductores, el tiempo de frente de la onda de corriente del rayo.

#### 4.3.2.1. Cálculo de sobretensiones por descargas directas

**4.3.2.1.1. Descargas directas al conductor de fase:** La tensión inducida esta dada por la ecuación

$$V_{cl} = Z_c \cdot \left(\frac{I}{2}\right)$$

Para una evaluación preliminar para el estudio de las tensiones inducidas por las descargas atmosféricas en las líneas aéreas se toma el alimentador COV08 que tiene las siguientes características.

- Impedancia del conductor de la línea

$$Z_c = 60 \cdot \ln\left(\frac{2h}{r_c}\right) = 465,05 \Omega$$

- Diámetro del conductor desnudo de aleación de aluminio = 15,75 mm  $\rightarrow$  r = 0,005375 m
- Intensidad de corriente promedio del rayo

Para la corriente promedio del rayo se tendrá en cuenta las corrientes de descargas atmosféricas relevados por la DMH<sup>1</sup>, Para apreciar mejor estos valores se realizó una distribución acumulada de corriente pico de tres años consecutivos. Se optó por el rango de años del 2014 a 2016, obteniéndose un promedio de **31,5** kA como se observa en la figura 4.2

---

<sup>1</sup>Dirección de Meteorología e Hidrología - DINAC

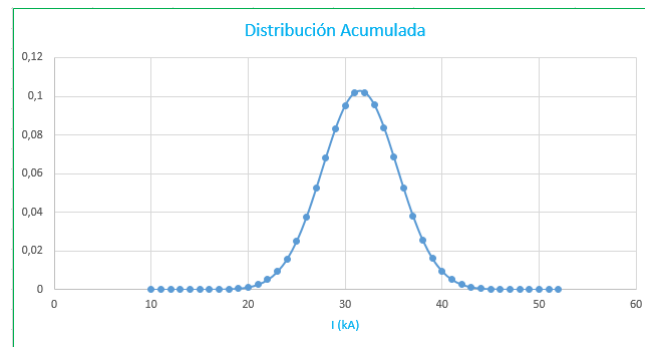


Figura 4.2: Distribución acumulada de la corriente de la descarga atmosférica

Además se realizó el cálculo de la densidad de probabilidad de la corriente pico  $P(I)$  para saber la probabilidad de las amplitudes de la corriente de pico de un rayo que ocurre con mas certeza.

Para realizar este cálculo de probabilidad  $p(I)$  se utilizó la Ec.2.5 del Capítulo 2 con parámetros de rayos de polaridad negativa, variando la corriente de retorno del rayo 1 kA a 200 KA.

Con los resultados obtenido podemos destacar que la probabilidad de caer un rayo con una amplitud entre los 15 y 35kA aproximadamente, es con más certeza que puede caer a tierra, lo cual puede causar daños a la línea de distribución.

En la figura 4.3 se puede observar que la corriente pico de una descarga eléctrica atmosférica tiene mayor probabilidad de tener valores entre los 15 y 35 KA aproximadamente, en tanto que intensidades superiores a los 200 KA son pocos probables; es decir que los datos que se obtuvieron en el cálculo del promedio de la distribución acumulada está entre la densidad de probabilidad con más ocurrencia.

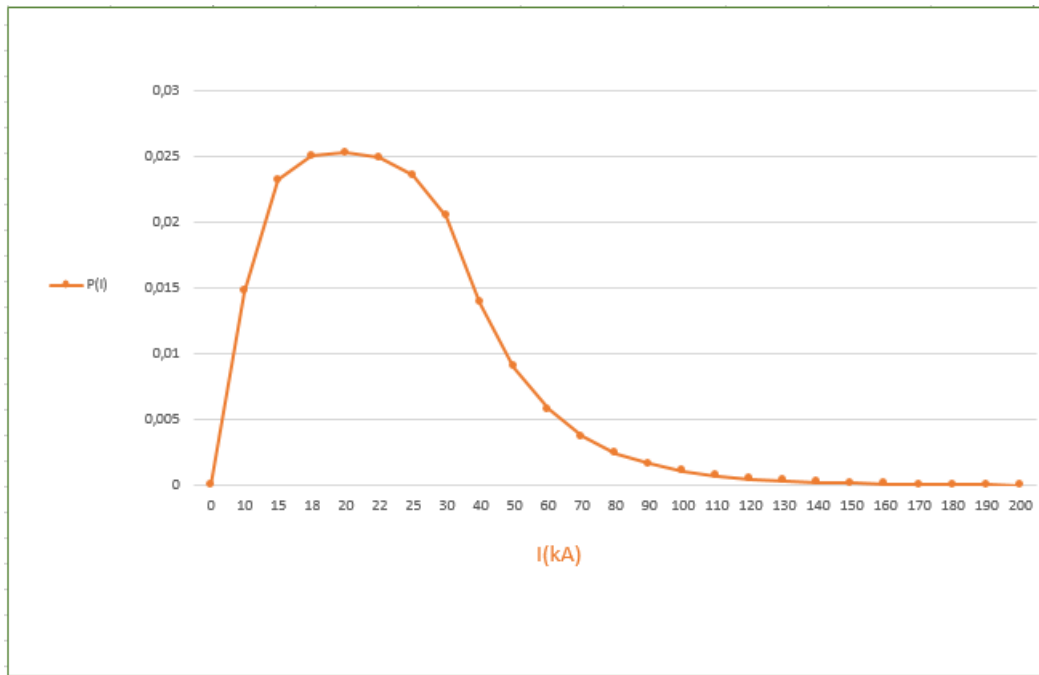


Figura 4.3: Función de densidad de probabilidad de la corriente pico de retorno del rayo

Se realizó el cálculo considerando la función de distribución acumulada de la corriente pico ( $P(I \geq i_0)$ ) para evaluar la probabilidad de ocurrencia de una corriente de retorno 31,5 kA obtenido del promedio de los datos de la DMH.

Además, se efectuó cálculo para lo cual se utilizó la Ec.2.8, según la función de distribución se tiene que a corrientes superiores a los 10 kA es casi la unidad.

Se describe en la Figura 4.4 que describe la expresión que las descargas atmosféricas que caen a tierra superan los 10 KA en la intensidad de su corriente de retorno, mientras que casi el 55 % de las veces los rayos tendrán una intensidad de aproximadamente mayor a 31.5 KA

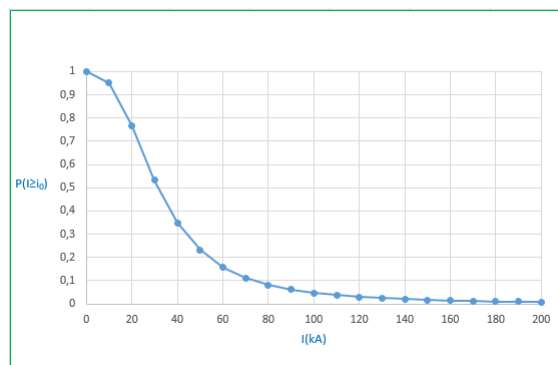


Figura 4.4: Función de distribución acumulada de la corriente pico de retorno del rayo

A continuación se calculó la sobretensión producida en un conductor al ser impactado por un rayo en función a la intensidad de corriente pico de retorno del rayo, teniendo en cuenta los datos obtenidos en cálculos anteriores.

En la figura 4.5 se puede observar que los voltajes que producen este tipo de descargas son tan elevados, que es poco probable que un sistema sin protección como el estudiado las soporte. La sobretensión llega a alcanzar los 7324 kV para la intensidad promedio que corresponde a los rayos de (31,5 kA).

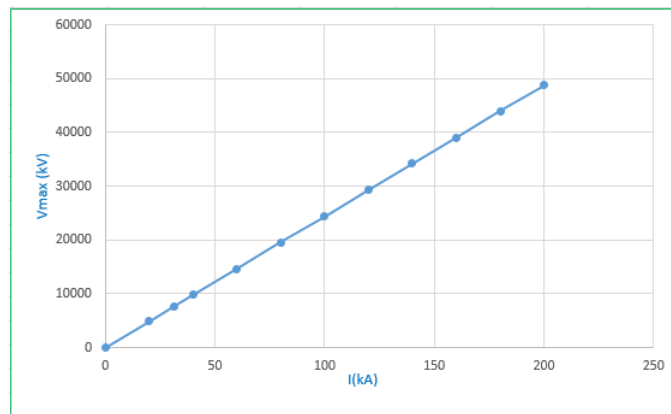


Figura 4.5: Sobretensión producida por descargas directas al conductor de fase

**4.3.2.1.2. Voltaje inducido en la fase más cercana:** Los datos a ser utilizados para el cálculo de voltaje inducido en la fase mas cercana son los siguientes:

- Impedancia característica del conductor de la línea

$$Z_c = 465,05 \Omega$$

- Distancia entre la imagen del conductor de fase impactado y el otro conductor de fase

$$D_{c-c} = 18,31m$$

- Distancia entre los conductores más cercana

$$d_{c-c} = 0,75m$$

- Impedancia mutua entre ambos conductores

$$Z_{c-c} = 200,294 \Omega$$

- Factor de Acoplamiento entre los conductores

$$K_{c-c} = \frac{Z_{c-c}}{Z_C}$$

$$K_{c-c} = 0,4306934$$

- El cálculo se realiza mediante la siguiente Ec.

$$V_{c2} = k.V_{cl} = K.Z_c \cdot \left(\frac{I}{2}\right)$$

En la Figura 4.6. Se puede observar que la tensión inducida en un conductor de fase cercano a otro que haya sido impactado por un rayo es muy elevada alcanzando los 20000 kV, provocando una sobretensión en esta línea. En la Figura 4.7 muestra la tensión que se induce en este conductor variando la corriente de retorno del rayo de 0 a 31,5 kA. Se nota que la tensión para la corriente promedio del rayo, que aparece en el conductor llega a alcanzar los 3154 kV.

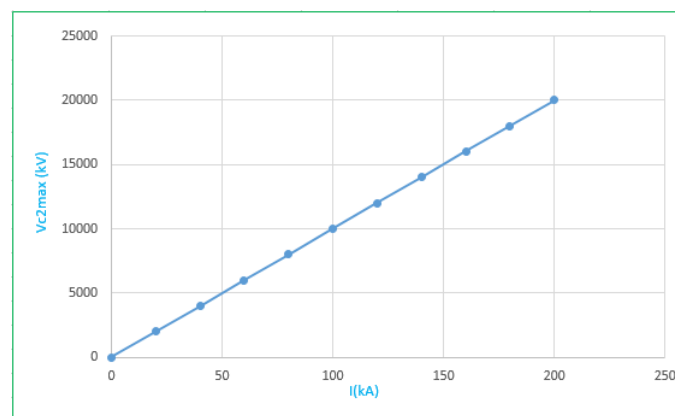


Figura 4.6: Tensión inducida en la línea más cercana al conductor de fase impactado por un rayo (I=0-200 kA).

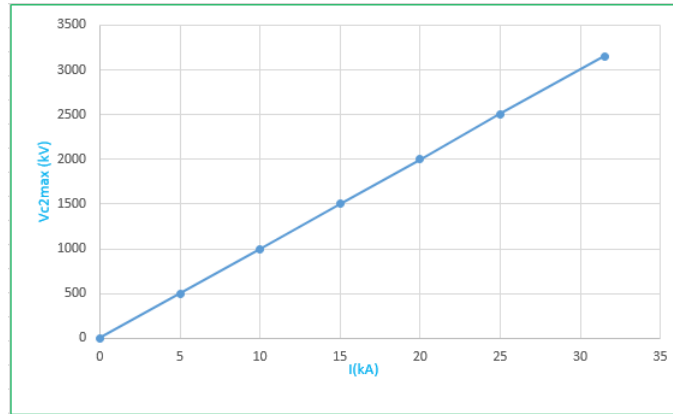


Figura 4.7: Tensión inducida en la línea más cercana al conductor de fase impactado por un rayo ( $I=0-31,5$  kA).

#### 4.3.2.2. Descargas directas al hilo de guarda

**4.3.2.2.1. En medio del vano:** Los datos a ser utilizados cuando la descarga impacta en el hilo de guarda son los siguientes:

- Diámetro del hilo de guarda  $r = 0.00378$  m
- Impedancia característica del conductor del hilo de guarda

$$Z_{hg} = 520,144\Omega$$

- Distancia entre la imagen del hilo de guarda y el conductor de fase

$$D_{hg-c} = 22,07m$$

- Distancia entre el hilo de guarda y el conductor de fase

$$d_{hg-c} = 1,85m$$

- Impedancia mutua entre el hilo de guarda y el conductor de fase

$$Z_{hg-c} = 148,742\Omega$$

- Factor de acoplamiento entre el hilo de guarda y el conductor de fase

$$K_{hg-c} = 0,28596291$$

- El cálculo se realiza mediante la Ec.

$$V_{hg} = Z_{hg} \cdot \left(\frac{I}{2}\right)$$
$$V_c = K \cdot V_{hg}$$

La Figura 4.8 muestra la sobretensión inducida en el conductor de fase más cercano al hilo de guarda impactado, este llega a los 14875 kV. Aún cuando el voltaje encontrado en la fase es suficientemente alto para producir sobretensión para la mayoría de los valores de intensidad de corriente de retorno del rayo, su valor disminuye considerablemente si lo comparamos al que se produce cuando el rayo impacta directamente en el conductor de fase.

Una muestra de esto se puede ver en la Figura 4.9 , donde el voltaje que se produce en la fase cuando la intensidad del rayo que impacta al conductor de guarda es de 31,5 kA, es de aproximadamente 2231 kV contra los 7324 kV que se producen si el impacto es sobre el conductor de fase, lo que representa una disminución de más de 5093 kV para ese valor de intensidad.

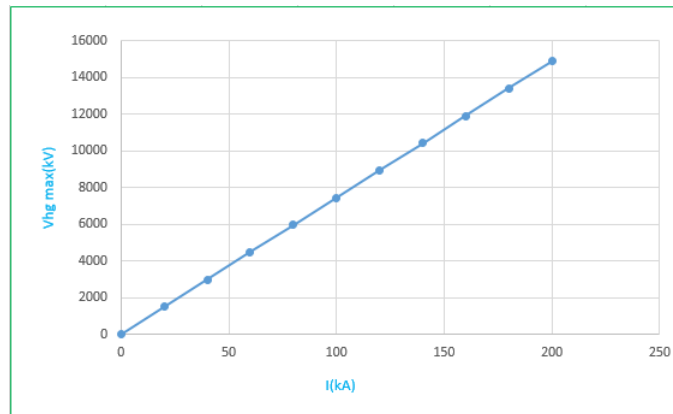


Figura 4.8: Sobretensión inducida en el conductor de fase por descargas directas al hilo de guarda (I=0-200 kA)

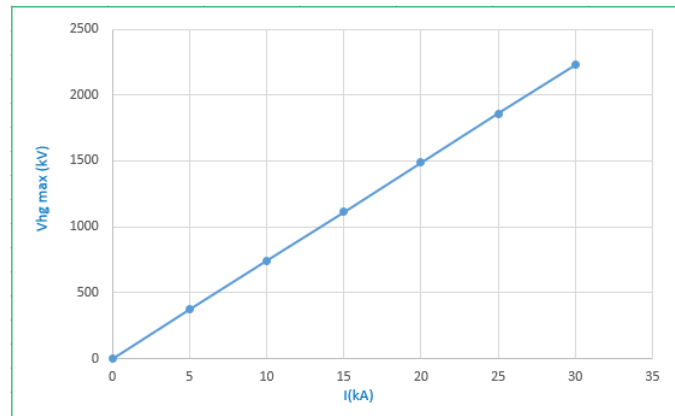


Figura 4.9: Sobretensión inducida en el conductor de fase por descargas directas al hilo de guarda (I=0-31,5 kA)

Para analizar el comportamiento de una línea de distribución con hilo de guarda ante una descarga atmosférica, se tuvo en cuenta lo mencionado en la sección 2.9.2, 2.9.3 y 2.9.4. Para el análisis de los efectos ante una descarga directa en el conductor de guarda es necesario determinar el las zonas de atracción.

Esto es necesario para poder determinar el apantallamiento efectivo ante las descargas, y la posibilidad de que se produzca flameo inverso. Para interpretar y analizar la posibilidad de que se produzcan dichos fenómenos se tuvo en cuenta los valores de sobretensión inducida que se obtuvieron en los cálculos anteriores. A continuación se presentan dichos cálculos.

#### 4.3.2.3. Zona de atracción de los conductores

Radio de atracción Ec 2.12

$$S = I * 10^{0,65}$$

Zona de atracción Ec 2.18

$$\text{Fase: } X_d = \sqrt{S^2 - (\beta \cdot S - h_c)^2} + 0,725$$

$$\text{Guarda: } X_{cg} = \sqrt{S^2 - (\beta \cdot S - h_{cg})^2}$$

$$\beta = 0,9$$

$$\text{Zona no protegida: } X_s = X_d - X_{cg}$$

En la Figura 4.10 muestra la zona de atracción del conductor de fase más expuesto. A medida que la intensidad de la corriente de retorno del rayo aumenta, la zona de atracción

es mayor, llegando a superar los 150 m para las intensidades de corriente del rayo más altas que pueden ocurrir.

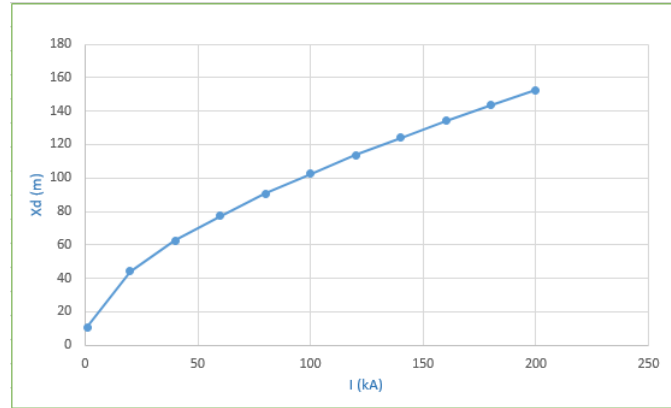


Figura 4.10: Zona de atracción del conductor de fase

En la Figura 4.11 se ilustra la zona de atracción del conductor de guarda, muestra un comportamiento similar a la del conductor de fase, con algunas diferencias pequeñas en sus valores debido a las posiciones geométricas distintas entre ellas.

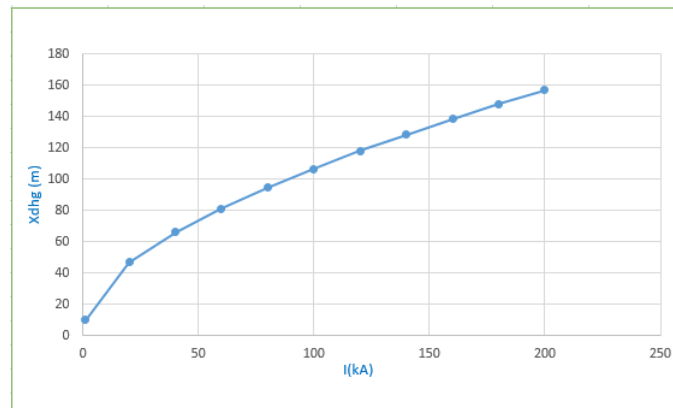


Figura 4.11: Zona de atracción del hilo de guarda

Esta diferencia puede visualizarse en la Figura 4.12 desde 1 kA hasta 200 kA y la Figura 4.13 desde 1 kA hasta 5 kA que muestra la zona sin proteger por el conductor de guarda; es decir, el área expuesta del conductor de fase.

En esa Figura se puede observar que para intensidades de corriente superiores a aproximadamente los 3.85 kA, el sistema se encuentra perfectamente apantallado, independientemente de la distancia en la que caiga el rayo respecto al conductor de fase, lo que significa que rayos con intensidades de corriente superiores a los 3.85 kA caerán directamente sobre el conductor de guarda.

**Apantallamiento efectivo** Teniendo en cuenta la Función de Distribución Acumulada de la corriente pico de retorno del rayo según la Figura 4.4 se puede observar que la probabilidad de que ocurra una falla de apantallamiento es poco probable ya que la probabilidad de que caiga un rayo de intensidad menor a 3,85 kA es poco probable.

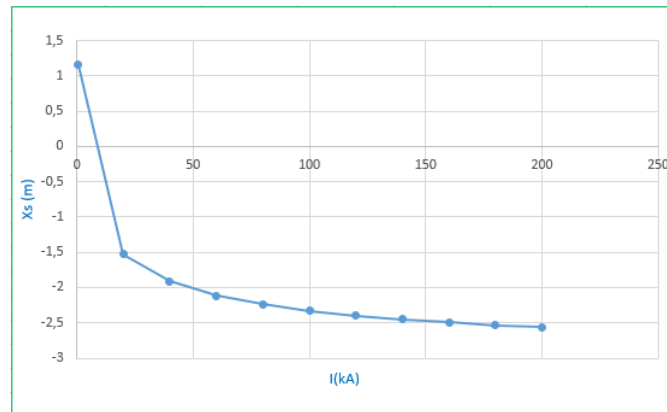


Figura 4.12: Zona sin proteger (1-200 kA)

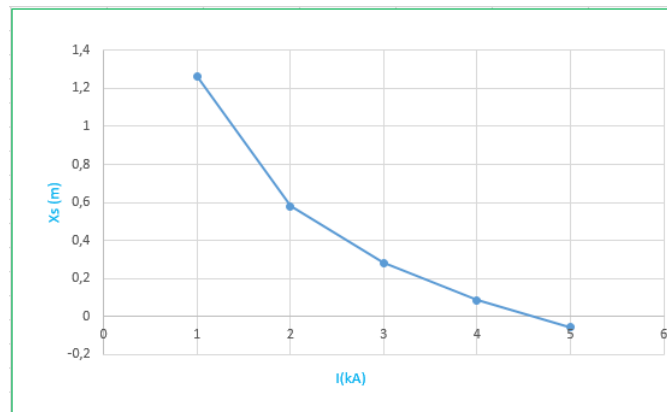


Figura 4.13: Zona sin proteger (1-5 kA)

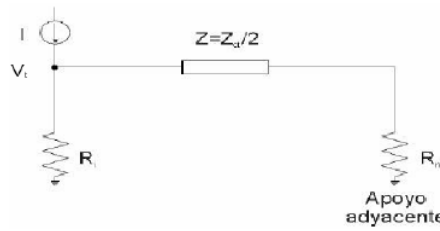
#### 4.3.2.4. En el Poste

El cálculo de las sobretensiones inducidas en los conductores de fase debidas a impactos de rayos en los postes o a ondas de tensión que impactan en el hilo de guarda y viajan hasta el poste (Flameo Inverso), se realiza mediante el procedimiento adoptado por [2] el IEEE Working Group on Lightning Performance of Distribution Lines.

Los datos a ser utilizados para el cálculo cuando la descarga impacta en el poste (columna) son los siguientes:

- Diagrama usado para el cálculo
- Para el cálculo de la tensión,  $V_t$ , se usará un tiempo  $t$  de subida del rayo de  $2 \mu s$  adoptado por <sup>2</sup>

<sup>2</sup>IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines



- Tiempo de propagación de la onda de tensión a lo largo del vano esta dada por la Ec.

$$\tau = \frac{d}{c} = \frac{0,65km}{299793km/s} = 0,21\mu s$$

- Tiempo de subida de la onda

$$t = 2\mu s$$

- Tiempo  $t_N$

$$t_N = t/2\tau = 4,76s$$

- Frecuencia típica para descargas atmosféricas

$$f = 100kHz$$

- Número de ondas en el que se alcanza  $t_N$

$$N = t_N \cdot f = 4,76 \cdot 100k = 476190 \text{ ondas}$$

Como la tensión inducida se expresa en kV.s/kA, se debe multiplicar por el valor de corriente pico de retorno del rayo (I) y dividirlo entre el tiempo (t) para obtener la sobretensión en el poste, llamada  $V_{ti}$  :

Entonces

$$V_{ti} = V_t \cdot \frac{I}{t}$$

Ahora bien se tiene que la tensión inducido en el conductor de fase está dado por:

$$V_c = V_{ti} \cdot (1 - k)$$

La Figura 4.14 muestra la tensión inducida en el conductor de fase como consecuencia de una descarga que cae en el poste, o de una onda de tensión que llega al poste después que un rayo impactó en un conductor de guarda. Se puede observar, en la Figura 4.15, para la corriente promedio de retorno del rayo la sobretensión inducida en la fase.

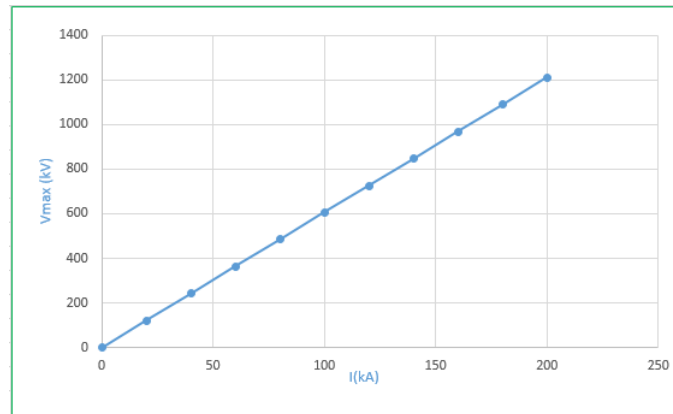


Figura 4.14: Sobretensión inducida en el conductor de fase cuando la descarga atmosférica incide sobre el poste

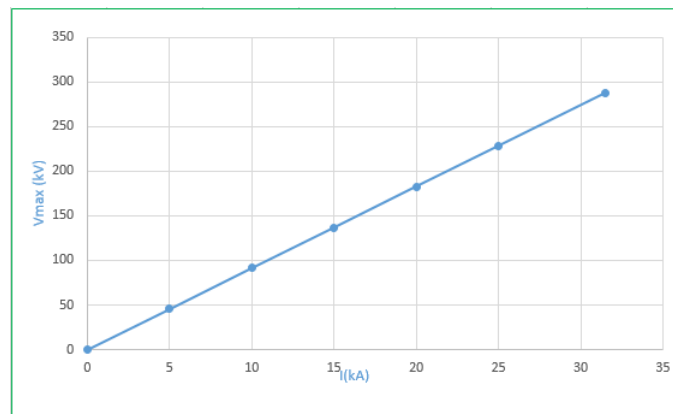


Figura 4.15: Sobretensión inducida en el conductor de fase cuando la descarga atmosférica incide sobre el poste para una corriente de 31,5 kA

#### 4.3.2.5. Comparación entre los sistemas con hilos de guarda y sin hilos de guarda

En la Figura 4.16 muestra la comparación entre la tensión inducida en un conductor de fase a raíz del impacto directo para el sistema con hilo guarda y el sistema sin hilo de guarda, calculadas mediante el método analítico. Se puede observar una atenuación significativa de la sobretensión en los sistemas que esta protegido con hilo de guarda, que se incrementa a medida que aumenta la intensidad de corriente de retorno del rayo.

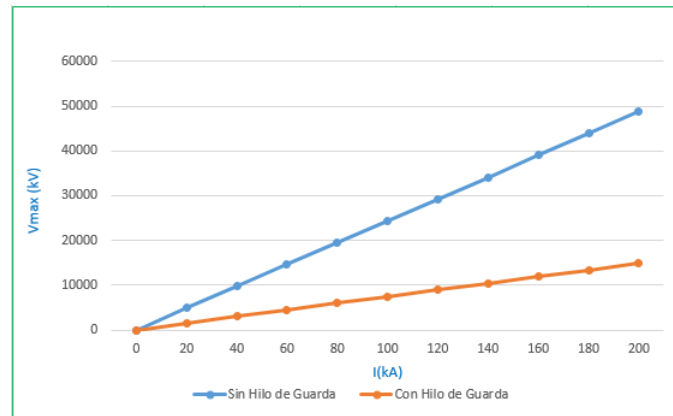


Figura 4.16: Comparación de la tensión inducida entre sistemas con Hilo de Guarda y sin Hilo de Guarda

#### 4.3.2.6. Cálculo de sobretensiones por descargas indirectas

**4.3.2.6.1. Cálculo de sobretensiones por la Metodología de Rusck:** El modelo de Rusck se elige para los voltajes inducidos debido a su simplicidad, porque ha demostrado ser matemáticamente correcto y por qué se ha demostrado que es algo consistente con los resultados experimentales.

De acuerdo con la fórmula simplificada de Rusck, la ecuación da la tensión máxima inducida en una línea de alimentación en el punto más cercano de ella. De esta metodología se obtiene la tensión inducida a la línea de parte de las descargas atmosféricas indirectas.

**4.3.2.6.2. Líneas sin hilo de guarda:** Los cálculos se realizarán con la siguiente ecuación.

$$V = \frac{Z_0 \cdot I \cdot h}{y} \left[ 1 + \frac{1}{\sqrt{2} \cdot \frac{v}{c} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{1}{2} \left( \frac{v}{c} \right)^2}}} \right]$$

#### Influencia de la distancia perpendicular entre la descarga y la línea (y)

Se mantiene constante los siguientes valores.

$$I = 31,5 \text{ kA}$$

$$v = 240000 \text{ km/s}$$

$$h = 9,15 \text{ m}$$

$$Z_0 = 30\Omega$$

Se varía  $y$  desde 56 m hasta 1000 m. Para una intensidad de 31,5 kA todas las descargas por debajo de los 56 m caerán directamente en la línea. El resultado se muestra en la Figura 4.17 Se observa como disminuye la tensión inducida en la línea a medida que aumenta la distancia perpendicular entre la descarga y la línea, llegando a ser de menos de 50 kV a partir de los 400 m.

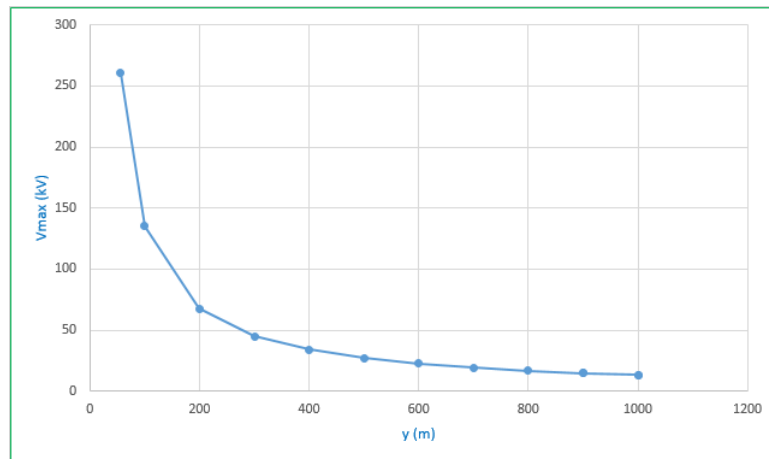


Figura 4.17: Influencia de la distancia perpendicular ( $y$ ) en la sobretensión inducida

### Influencia de la velocidad de retorno del rayo ( $v$ )

Se mantiene constante los siguientes valores.

$$I = 31,5kA$$

$$y = 56$$

$$h = 9,15m$$

$$Z_0 = 30\Omega$$

Se varía  $v$  entre 20000 y 280000 Km/s. La Figura 4.18 muestra como se incrementa la sobretensión inducida en la línea cuando aumenta la velocidad de retorno del rayo. Esta velocidad puede tomar valores cercanos a la velocidad de luz, presentándose en esos casos los valores más elevados de sobretensión.

### Influencia de la corriente pico del rayo ( $I$ )

Para este caso se estudió la influencia de  $I$  para tres distancias distintas:

$$y = 50 \quad y = 100 \quad y = 150$$

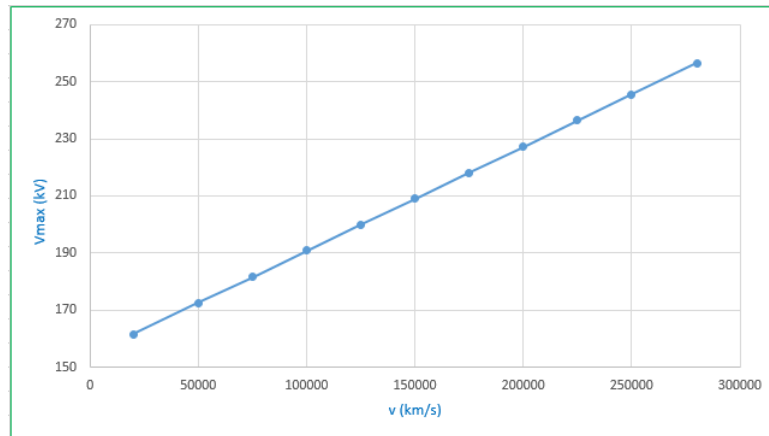


Figura 4.18: Influencia de la velocidad de retorno ( $v$ ) en la Sobretensión Inducida

Para todos los estudios se mantendrán constantes los siguientes valores:

$$v = 240000 \text{ km/s}$$

$$h = 9,15 \text{ m}$$

$$Z_0 = 30 \Omega$$

Con  $y = 50 \text{ m}$ , se varía  $I$  entre 1 kA y 25 kA (a esta distancia, descargas con intensidades mayores caerán directamente sobre el conductor) En la Figura 4.19 se puede apreciar el valor más alto de sobretensión que se produce, alcanza los 215 kV, para la intensidad de 25 kA aproximadamente.

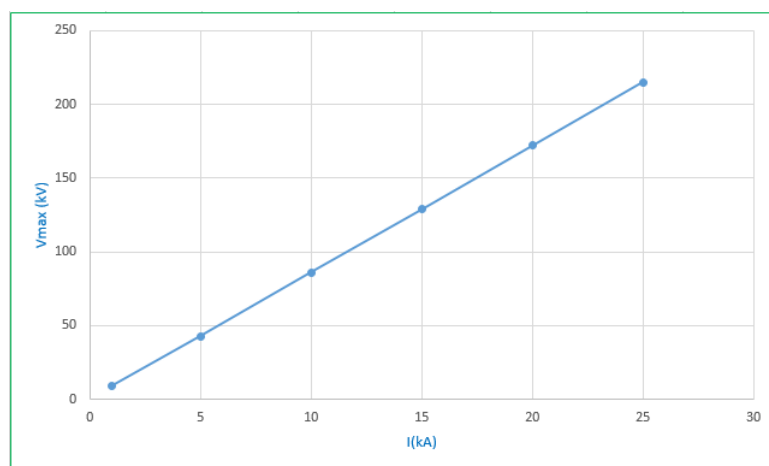


Figura 4.19: Influencia de  $I$  en la sobretensión inducida (con  $y=50 \text{ m}$ )

Con  $y = 100 \text{ m}$ , se varía  $I$  entre 1 kA y 90 kA (a esta distancia, descargas con intensidades mayores caerán directamente sobre el conductor). El resultado se muestra en la figura

4.20 y 4.21, se observa que una intensidad de 31,5 kA producirá una sobretensión en la línea de unos 135 kV aproximadamente

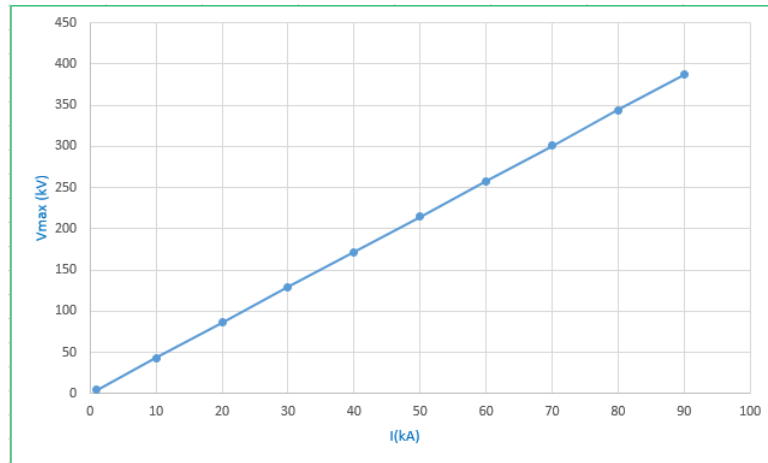


Figura 4.20: Influencia de I en la sobretensión inducida (con  $y=100$  m,  $I=1-90$  kA)

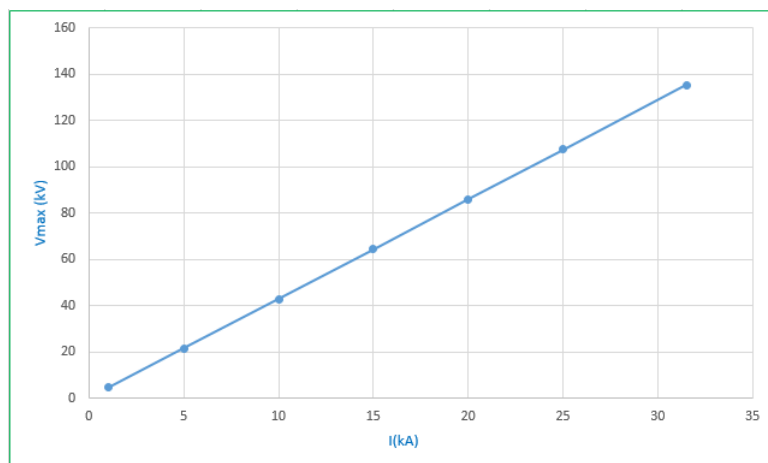


Figura 4.21: Influencia de I en la sobretensión inducida (con  $y=100$  m,  $I=1-31,5$  kA)

Con  $y=150\text{m}$ , se varía  $I$  entre  $1\text{ kA}$  y  $192\text{ kA}$  (a esta distancia, descargas con intensidades mayores caerán directamente sobre el conductor). Las Figuras 4.22 y 4.23 muestran los resultados, en estas figuras podemos observar que a esta distancia, un rayo con una intensidad de corriente de retorno de  $31,5\text{ kA}$ , producirá una sobretensión que alcanza los  $90\text{ kV}$

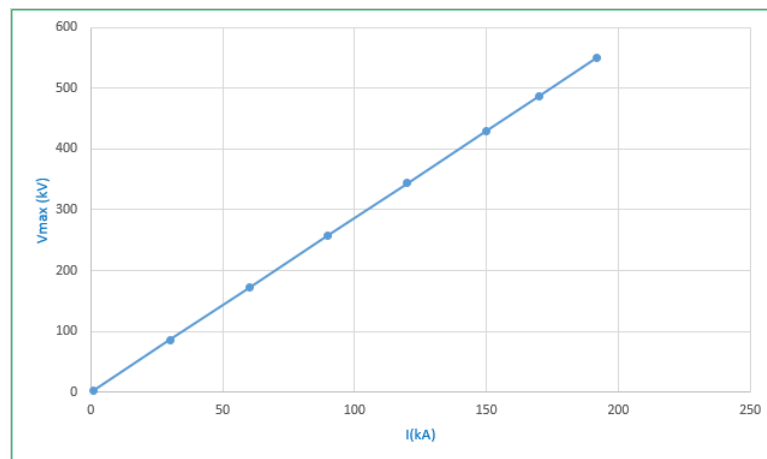


Figura 4.22: Influencia de  $I$  en la sobretensión inducida (con  $y=150\text{ m}$ ,  $I=1-192\text{ kA}$ )

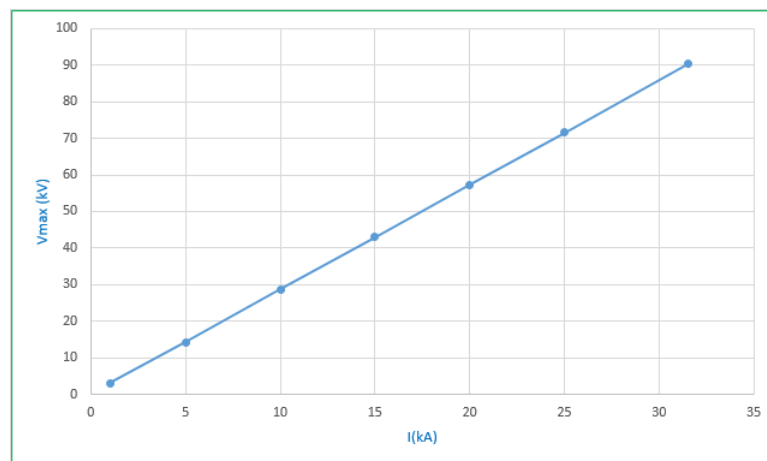


Figura 4.23: Influencia de  $I$  en la sobretensión inducida (con  $y=150\text{ m}$ ,  $I=1-31,5\text{ kA}$ )

**Influencia de la corriente pico del rayo (I) de las tres distancias  $y=50m$ ;  $y=100$ ;  $y=150m$  para una intensidad de corriente de  $31,5\text{ kA}$**

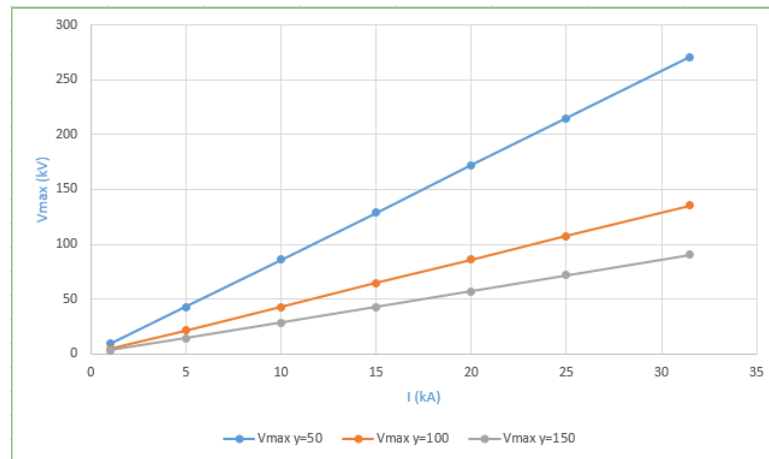


Figura 4.24: Influencia de I en la sobretensión inducida ( $y=50m$ ;  $y=100$ ;  $y=150m$   $I=1-31,5\text{ kA}$ )

**4.3.2.6.3. Líneas con hilo de guarda:** Se realizarán los mismos estudios anteriores considerando ahora la inclusión del hilo de guarda.

Los cálculos se harán según la Ec.

$$V' = pr.V$$

$$pr = 1 - \frac{h_{ct}}{h_c} \frac{Z_{ct-c}}{Z_{ct} + 2R}$$

Factor de apantallamiento:

$$pr = 0,6911029$$

**Influencia de la distancia perpendicular entre la descarga y la línea (y)**

Se mantiene constante los siguientes valores.

$$I = 31,5\text{ kA}$$

$$v = 240000\text{ km/s}$$

$$h = 9,15\text{ m}$$

$$Z_0 = 30\Omega$$

Se varía  $y$  desde 59 m hasta 1000 m. Para una intensidad de 31,5 kA todas las descargas por debajo de los 59 m caerán directamente en el hilo de guarda, se sabe que para intensidades mayores de aproximadamente 3,85 kA el sistema está perfectamente apantallado.

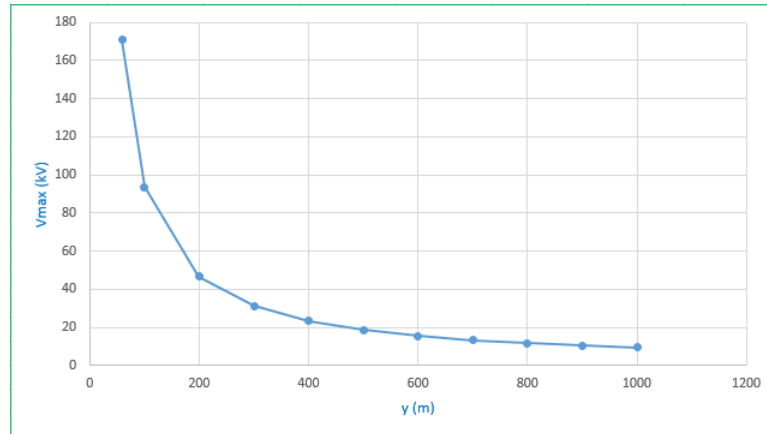


Figura 4.25: Influencia de la distancia perpendicular ( $y$ ) en la sobretensión inducida

### Influencia de la velocidad de retorno del rayo ( $v$ )

Se mantiene constante los siguientes valores.

$$I = 31,5kA$$

$$y = 59$$

$$h = 9,15m$$

$$Z_0 = 30\Omega$$

Se varía  $v$  entre 20000 y 280000 Km/s.

### Influencia de la corriente pico del rayo ( $I$ )

Para este caso se estudió la influencia de  $I$  para tres distancias distintas:

$$y = 50 \quad y = 100 \quad y = 150$$

Para todos los estudios se mantuvo constantes los siguientes valores:

$$v = 240000km/s$$

$$h = 9,15m$$

$$Z_0 = 30\Omega$$

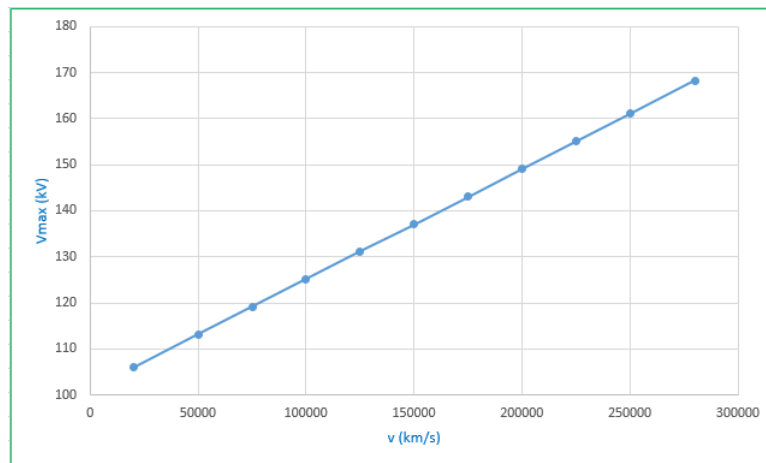


Figura 4.26: Influencia de la velocidad de retorno (v) en la Sobretensión Inducida

Con  $y = 50\text{m}$ , se varía I entre 1 kA y 24 kA (a esta distancia, descargas con intensidades mayores caerán directamente sobre el conductor de guarda).

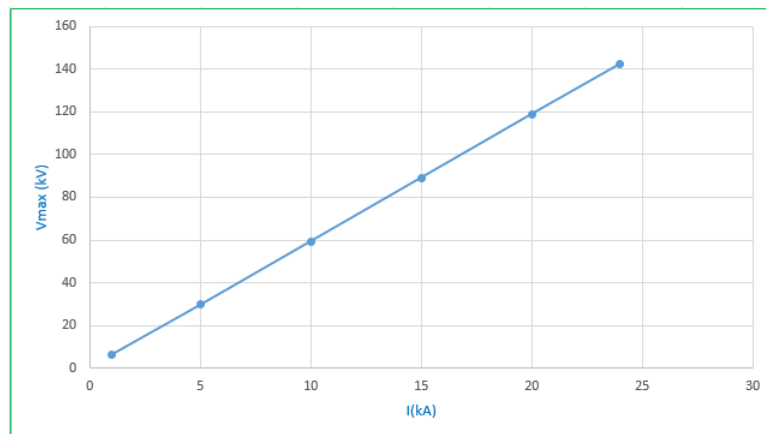


Figura 4.27: Influencia de I en la sobretensión inducida (con  $y=50\text{ m}$ )

Con  $y = 100\text{m}$ , se varía I entre 1 kA y 84 kA (a esta distancia, descargas con intensidades mayores caerán directamente sobre el conductor de guarda).

Con  $y = 150\text{m}$ , se varía I entre 1 kA y 187 kA (a esta distancia, descargas con intensidades mayores caerán directamente sobre el conductor de guarda).

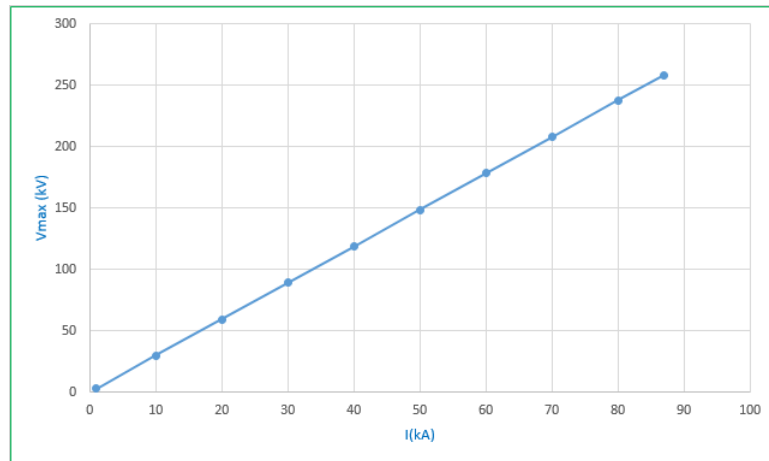


Figura 4.28: Influencia de I en la sobretensión inducida (con  $y=100$  m,  $I=1-84$  kA)

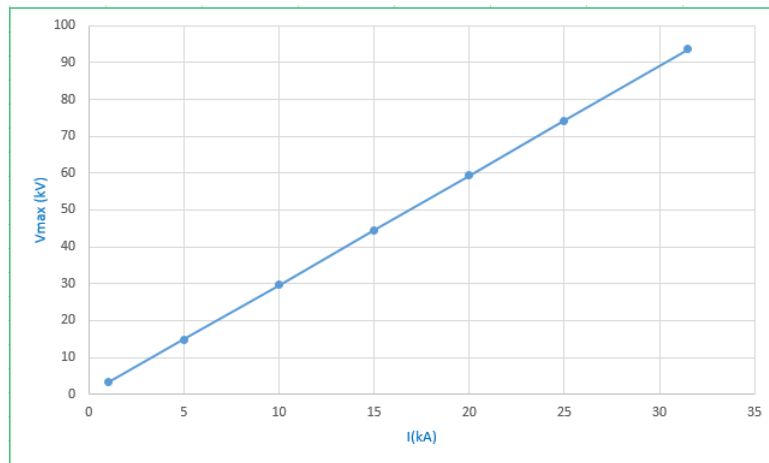


Figura 4.29: Influencia de I en la sobretensión inducida (con  $y=100$  m,  $I=1-31,5$  kA)

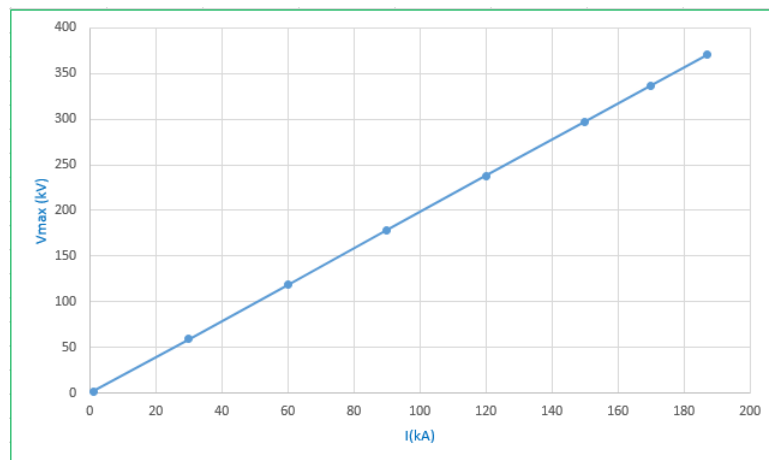


Figura 4.30: Influencia de I en la sobretensión inducida (con  $y=150$  m,  $I=1-187$  kA)

**Influencia de la Corriente Pico del rayo (I) de las tres distancias  $y=50$ m;**

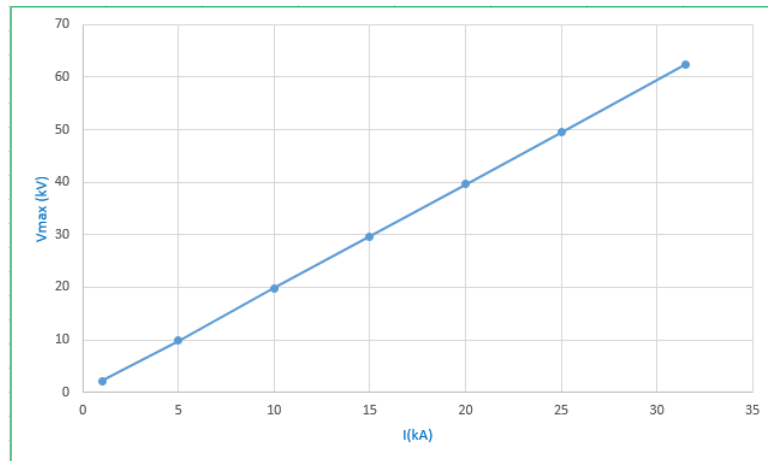


Figura 4.31: Influencia de I en la sobretensión inducida (con  $y=150$  m,  $I=1-31,5$  kA)

$y=100$ ;  $y=150$ m para una intensidad de corriente de 31,5 kA de una Línea con Hilo de Guarda

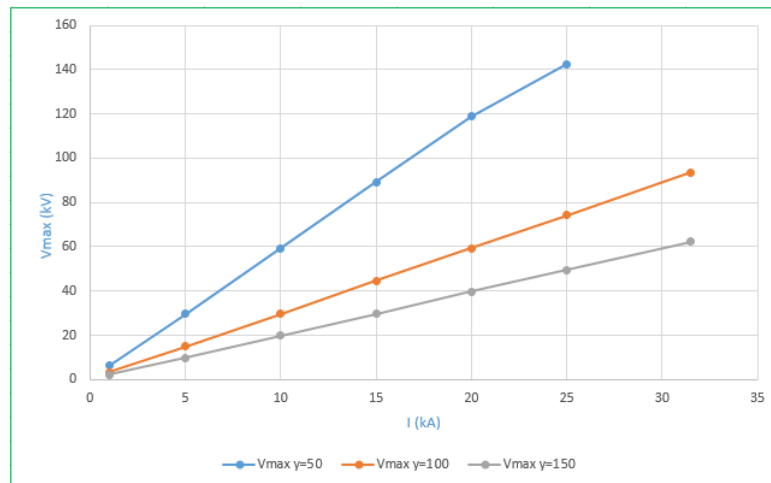


Figura 4.32: Influencia de I en la sobretensión inducida ( $y=50$ m;  $y=100$ ;  $y=150$ m  $I=1-31,5$  kA) de una línea con hilo de guarda

**4.3.2.6.4. Comparación entre las líneas con hilo de guarda y sin hilo de guarda:** Aquí se realizó una comparación gráfica entre los resultados obtenidos en el cálculo de sobretensiones por descargas indirectas, en las líneas de distribución con el sistema de protección con hilo de guarda y sin hilo de guarda

**Caso 1: Influencia de la distancia perpendicular entre la descarga y la línea (y)**

La Figura 4.33 muestra la comparación de la sobretensión inducida en la línea de distribución sin hilo de guarda y con hilo de guarda, como consecuencia de descargas que caen en las cercanías de las líneas.

Puede observarse una atenuación significativa de la sobretensión en el sistema con hilo de guarda respecto al sistema sin protección. Esta atenuación llega a ser de aproximadamente 100 kV en las descargas más cercanas a la línea, mientras que a medida que la distancia aumenta disminuye la magnitud de la misma.

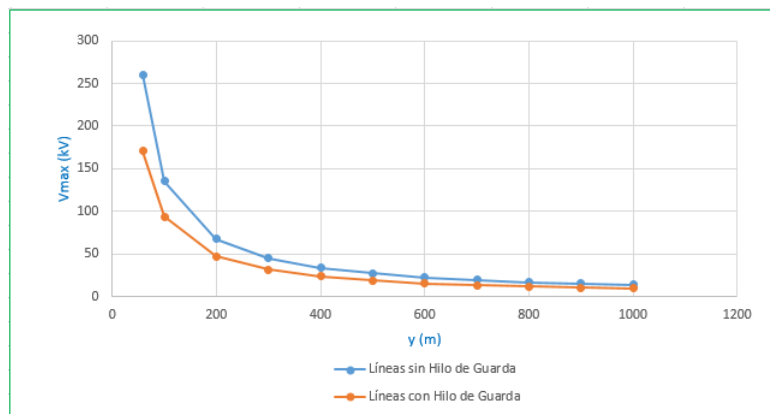


Figura 4.33: Influencia de la distancia perpendicular (y) en la sobretensión inducida

**Caso 2: Influencia de la velocidad de retorno del rayo (v)**

La Figura 4.34 muestra el resultado de esta comparación. Se puede observar que la magnitud de la disminución de la sobretensión como causa de la presencia de un hilo de guarda, es prácticamente constante para todas las velocidades de retorno del rayo, presentando un ligero aumento para las velocidades mayores.

**Caso 3: Influencia de la corriente pico del rayo (I)**

En la figura 4.35 se presenta la comparación de ambos sistemas con una distancia perpendicular entre el rayo y la descarga de 150 m. Se toma este único ejemplo ya que para las 3 distancias estudiadas el comportamiento de la atenuación de sobretensión es el mismo, siendo muy pequeña para las intensidades más bajas yaumentando a medida que la

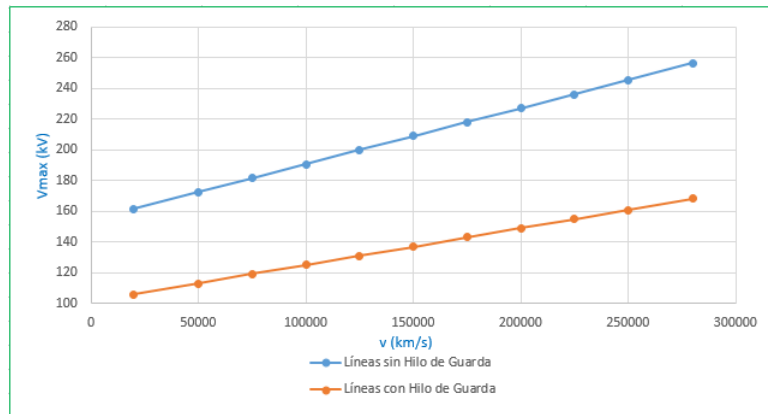


Figura 4.34: Influencia de la velocidad de retorno (v) en la Sobretensión Inducida

corriente se incrementa.

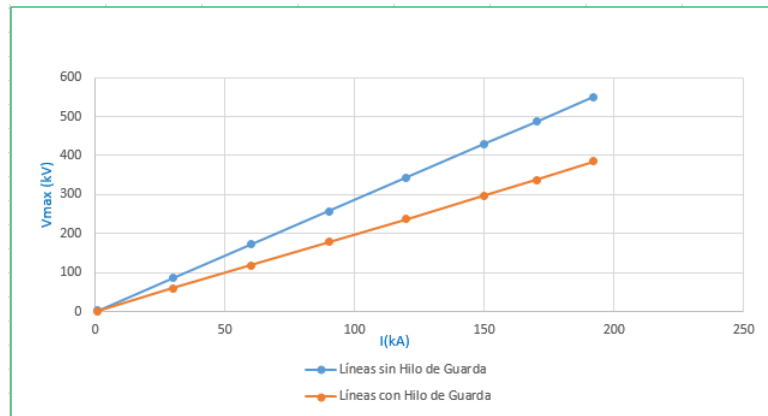


Figura 4.35: Influencia de I en la sobretensión inducida con y=150 m

### 4.3.3. Cálculo de probabilidad para el tiempo de frente de la onda de corriente del rayo (p(tf))

Usando la Ec 2.9 en el cual evalúa el tiempo de frente con mas ocurrencia probabilística en un rayo se encontró que este varía entre 1,5 y 3  $\mu$ s aproximadamente. Los rayos con duración de frente de onda de 10  $\mu$ s son poco probable que ocurran.

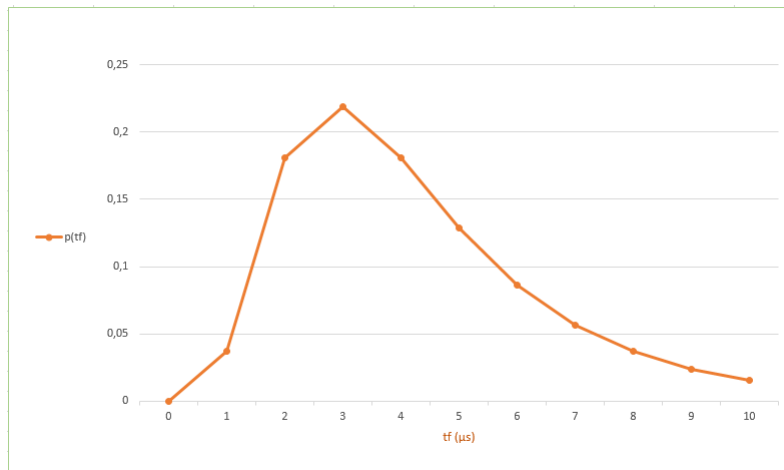


Figura 4.36: Función de densidad de probabilidad para el tiempo de frente

#### 4.3.4. Cálculo de sobretensiones producidas en las líneas de distribución mediante la simulación en ATPDRAW

En esta sección se utilizó ATPDRAW para calcular las sobretensiones producidas en las líneas de distribución por descargas directas. Posteriormente para evaluar el funcionamiento del sistema de protección contra la descarga atmosférica.

En este apartado se llevará a cabo la misma situación del método analítico, teniendo en cuenta siempre los parámetros correspondientes a las líneas de distribución evaluada.

#### Descripción de los componentes representados en el ATPDRAW

**Postes:** Cada uno de los elementos se puede modelar como un tramo de línea ideal sin pérdidas. La impedancia característica, medida en Ohms, según la forma cilíndrica del poste está dada por la Ecuación

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

Donde:

h: altura promedio del conductor

r: radio de la base del cilindro

Entonces  $Z = 286,74\Omega$

La distancia de los postes se dividen de acuerdo a los datos de campo relevados teniendo en cuenta la sección del conductor del alimentador estudiado.

Para realizar el modelado de los postes del alimentador en ATPDRAW, se utiliza el modelo CLARKE.

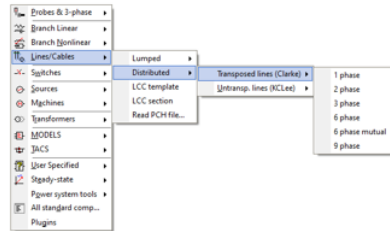


Figura 4.37: Modelo Clarke para la simulación de los postes

La estructura de los postes con sus impedancias correspondientes se puede observar en la figura 4.38

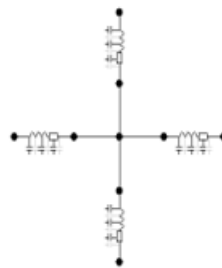


Figura 4.38: Modelo del poste en ATPDRAW

**Conductores:** En el caso de los conductores de fase se modelan como tres fases acopladas entre sí, mediante el modelo de LCC, a una frecuencia de 100 kHz (lo que se denomina el modelo Bergerón en el ATPDRAW).

La longitud promedio del vano del alimentador COV08 es de 65 m. La figura 4.39 muestra el modelo de línea utilizado.

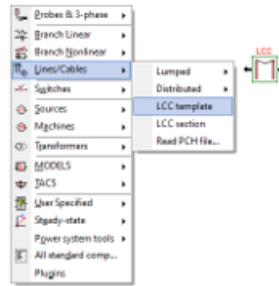


Figura 4.39: Modelo de la línea para el conductor de fase

Las características de las líneas de fase

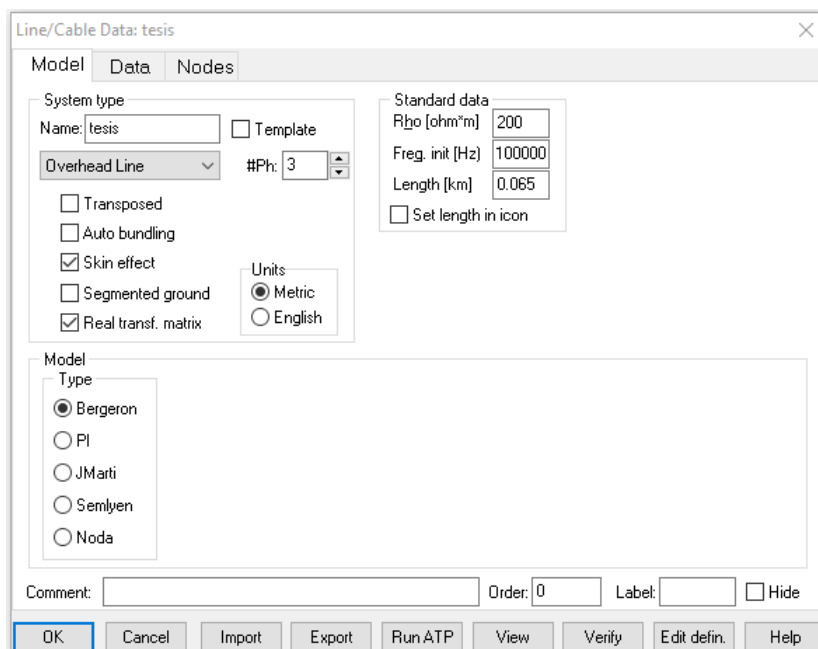


Figura 4.40: Características de la fase

#	Ph.no	Rin [cm]	Rout [cm]	Resis [ohm/km DC]	Horiz [m]	Vtower [m]	Vmid [m]
1	1	0	0.7875	0.2462	-1.1	9.15	9.15
2	2	0	0.7875	0.2462	0.35	9.15	9.15
3	3	0	0.7875	0.2462	0.75	9.15	9.15

Figura 4.41: Características y posición de las fases

**Aisladores:** Los aisladores se modelan como suiches tipo gap controlados por voltaje (figura 4.42). Para que se pueda observar perfectamente el voltaje que aparece sobre los aisladores, se coloca un voltaje de flameo alto con respecto al que normalmente aparecería sobre los mismos (50 MV por ejemplo).

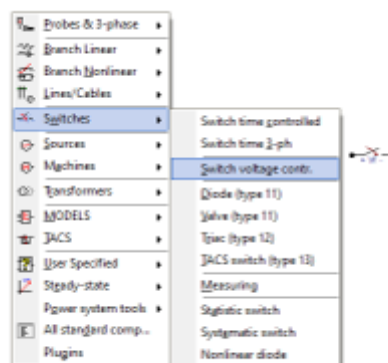


Figura 4.42: Modelo de aislador en ATPDRAW

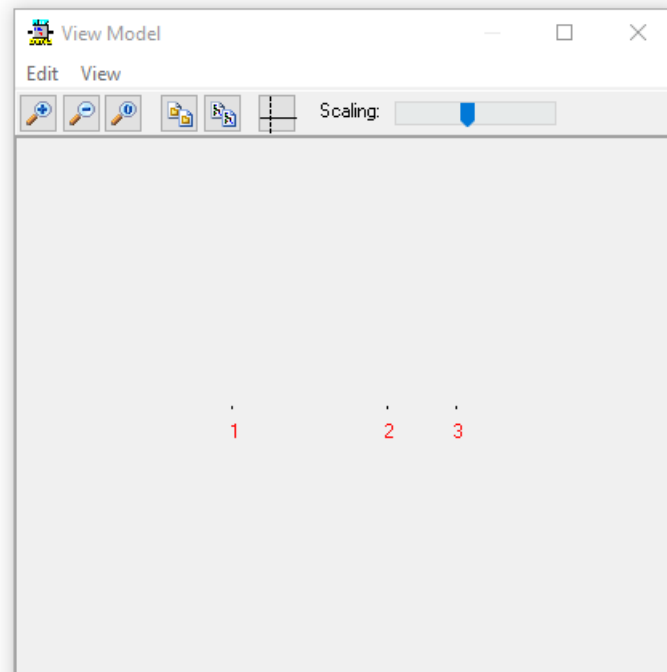


Figura 4.43: Posicion de los conductores

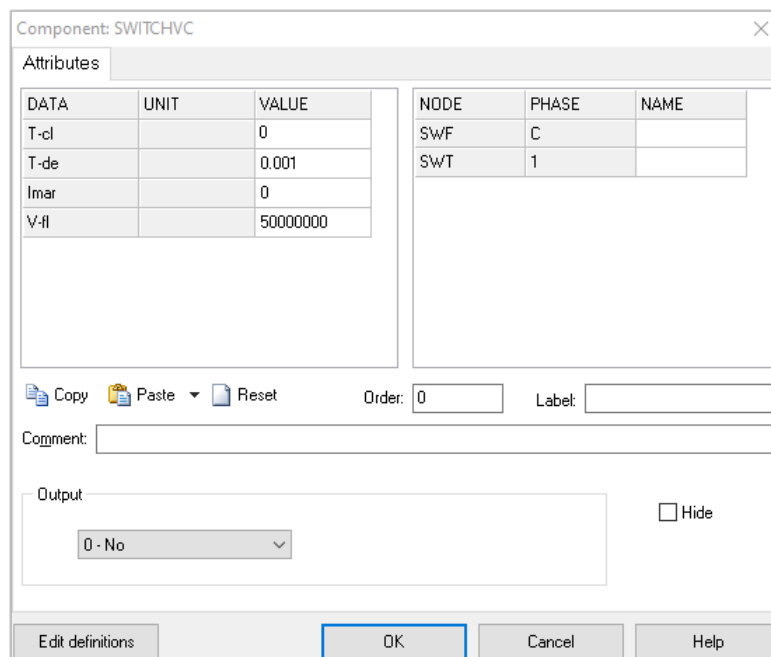


Figura 4.44: Característica del aislador en ATPDRAW

**Resistencia de puesta a tierra:** La resistencia de puesta a tierra se modela como una del tipo concentrado (figura 4.45 ), con el valor correspondiente de  $10 \Omega$  como lo indica la IEC para descargas atmosféricas.

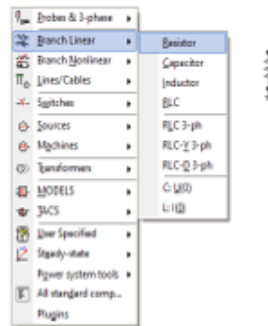


Figura 4.45: Modelo de la resistencia de la puesta a tierra en ATPDRAW

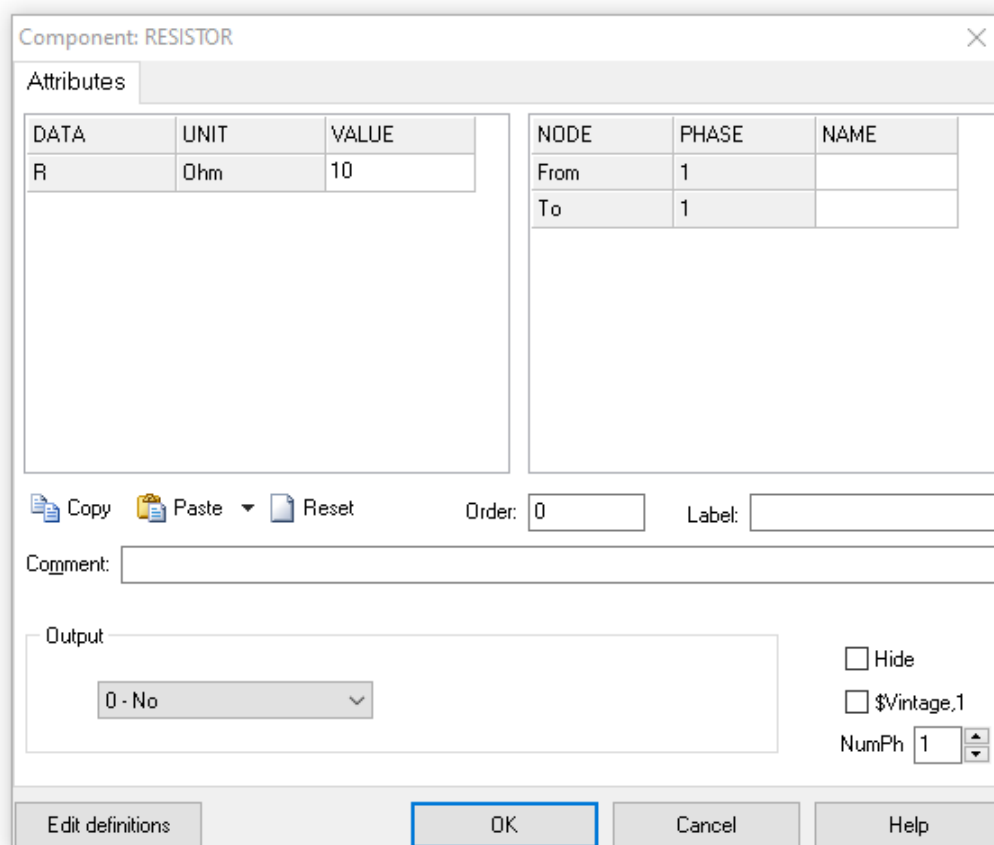


Figura 4.46: Modelo de la resistencia de la puesta a tierra en ATPDRAW

**Corriente del rayo:** Para corriente de rayo en esta simulación se utilizó la fuente de corriente tipo 15 con una amplitud de 31.500 A y una onda de 1.2/50  $\Omega$ s (figura 3.18).

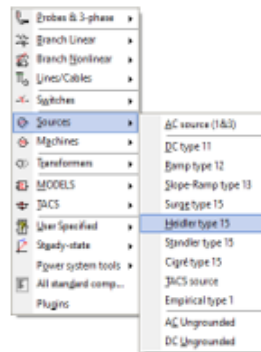


Figura 4.47: Modelo de la corriente del rayo en ATPDRAW

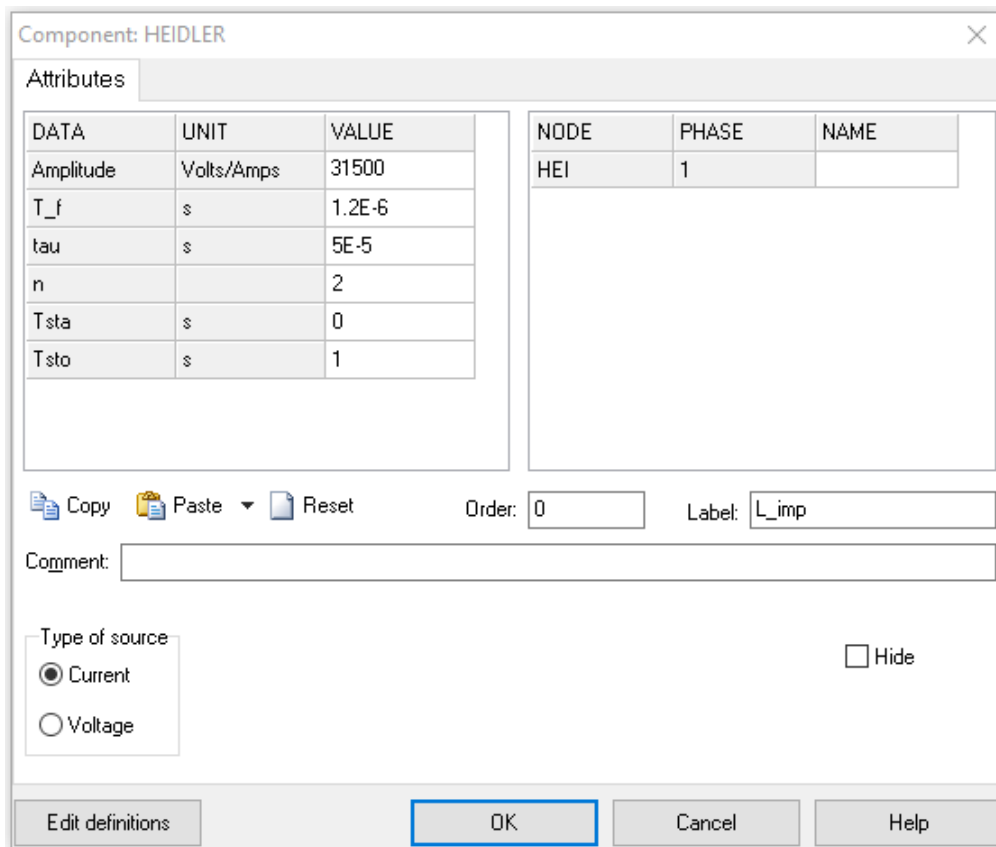


Figura 4.48: Características del rayo en ATPDRAW

### Modelo general del sistema de línea de distribución en ATPDRAW:

En la figura 4.49 muestra el modelo en ATP-Draw para el caso de la línea de distribución se presenta un tramo del sistema estudiado, compuesto por todos los parámetros descriptos.

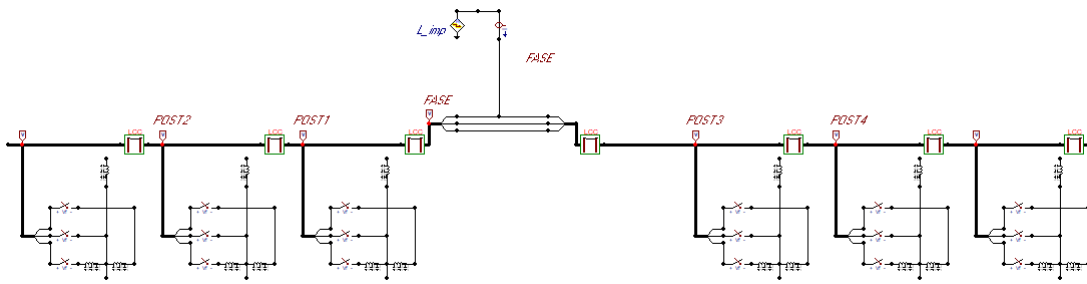


Figura 4.49: Modelo de la línea en ATPDRAW

#### 4.3.4.1. Descargas directas al conductor de fase

En la Figura 4.50 muestra la sobretensión inducida en la fase que es impactada por la descarga atmosférica con una intensidad de corriente de 31.5 kA. Llegando a alcanzar una sobretensión máxima de 7037 kV.

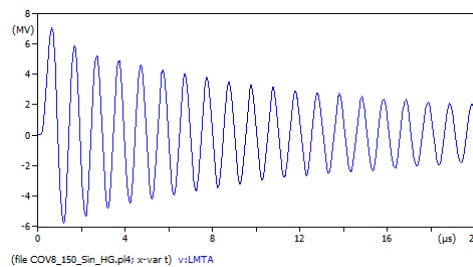


Figura 4.50: Sobretensión inducida en la fase impactada

#### 4.3.4.2. Voltaje inducido en la fase más cercana

En la Figura 4.51 se puede apreciar que la tensión inducida en la fase más cercana a ésta por acoplamiento entre líneas, llega a alcanzar una sobre tensión inducida de 2860 kV como máximo, la fase mas cercana se aprecia en la Figura 4.52.

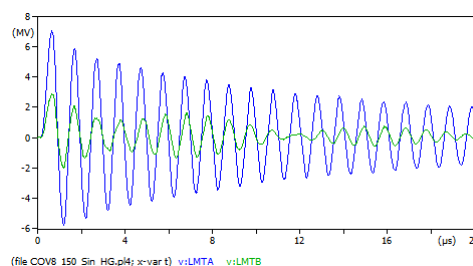


Figura 4.51: Sobretensión inducida en la fase más cercana a la fase impactada por el rayo

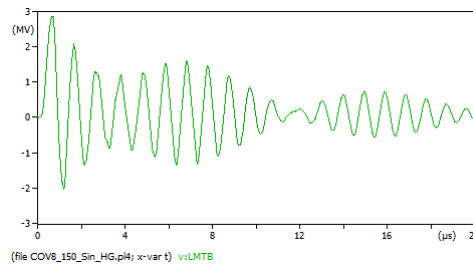


Figura 4.52: Sobretensión pico inducida en la fase más cercana a la fase impactada por el rayo

#### 4.3.4.3. Descargas directas al hilo de guarda

##### Descripción de los componentes representados en el ATPDRAW de la línea de distribución con hilo de guarda

Para las líneas de distribución, el modelamiento se realizó mediante el modelo Bergeron. Este modelo debido a que se basa en los fundamentos ondas viajeras es uno de los modelos más acertados para realizar análisis ante transitorios producidos por descargas atmosféricas. Se seleccionó debido a que se puede aplicar en líneas cortas (características de las líneas de distribución rural).

**Conductores:** Los conductores de las líneas de fase conjuntamente con el Hilo de Guarda se modelan como cuatros fases acoplados entre sí. El modelo utilizado es LCC lo que se define como modelo BERGERON en ATPDRAW.

La longitud de los vanos según reglamento de Media Tensión de la ANDE para líneas de distribución con un conductor de  $150 \text{ mm}^2$  debe estar a 60 metros cada vano, pero para el presente caso de análisis según datos relevados de del alimentador COV08 cada vano está a 65 metros entre sí.

En la Figura 4.53 se puede observar el modelo del conductor utilizado y en la Figura 4.54, 4.55, 4.56 se muestran las características y posiciones de las líneas con el hilo de guarda.

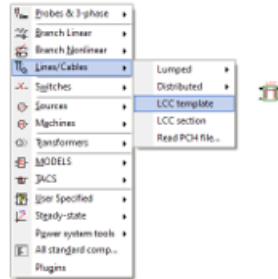


Figura 4.53: Modelo de la línea para el conductor de fase con el hilo de guarda

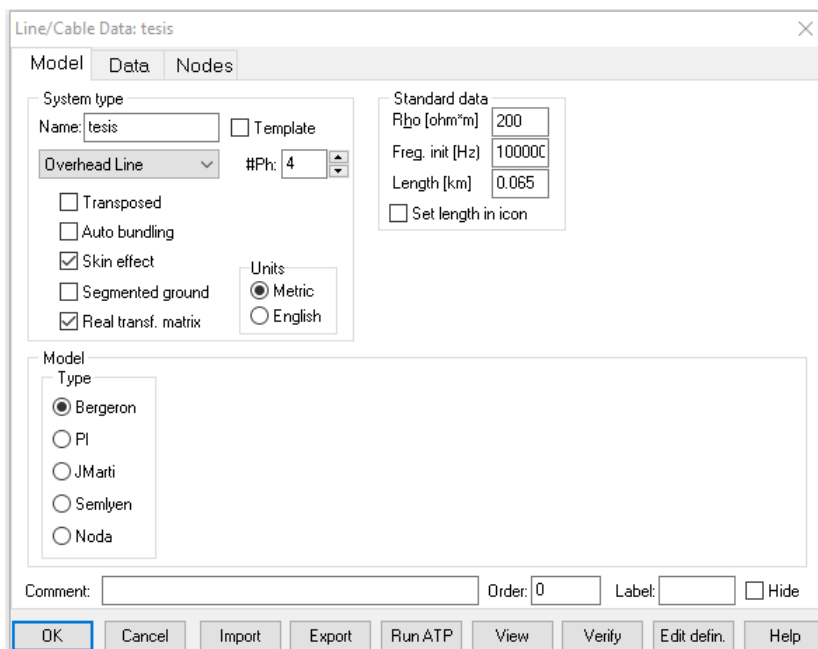


Figura 4.54: Características de la fase con hilo de guarda

#	Ph.no.	Rin [cm]	Rout [cm]	Resis [ohm/km DC]	Horiz [m]	Vtower [m]	Vmid [m]
1	1	0	0.7875	0.2462	-1.1	9.15	9.15
2	2	0	0.7875	0.2462	0.35	9.15	9.15
3	3	0	0.7875	0.2462	0.75	9.15	9.15
4	4	0	0.378	1.0552	0	11	11

Figura 4.55: Características y posición de las fases con hilo de guarda

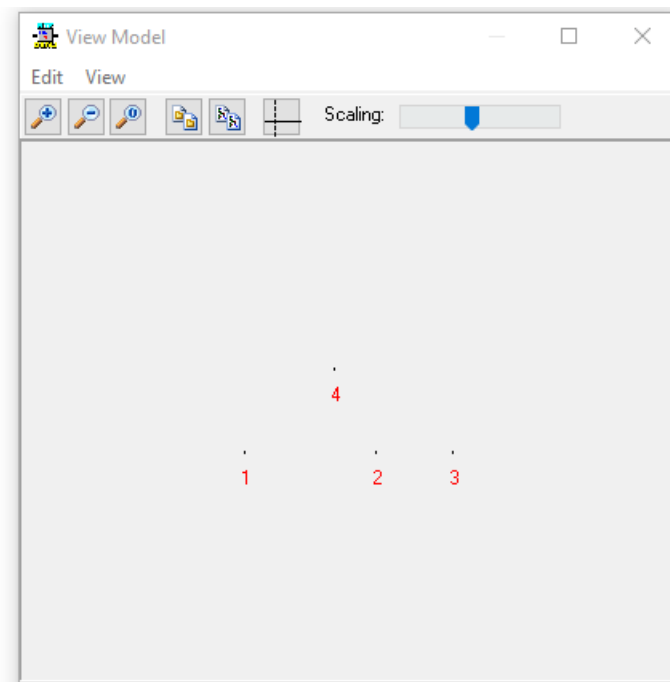


Figura 4.56: Posición de los conductores de fase con hilo de guarda

#### 4.3.4.4. Descargas directas al hilo de guarda en el alimentador COV08

Se realizó el análisis para ver el comportamiento de la línea del alimentador COV08, impactando la descarga atmosférica en el medio del vano tendiendo en cuenta los datos relevados de campo, la línea tiene la puesta a tierra en promedio cada 938 metros Anexo 3 Tabla 6, la descarga impacta la línea en medio de las distancias de las puesta a tierra.

En la Figura 4.57 muestra el modelo de la línea en ATP-Draw.

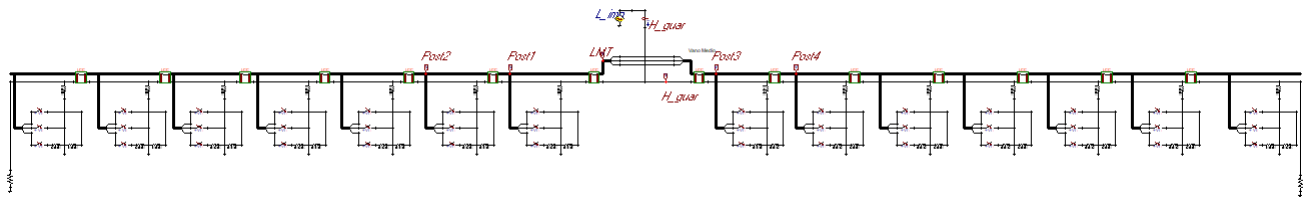


Figura 4.57: Modelo de la Líneas con Hilo de Guarda del Alimentador COV08

Cuando la descarga atmosférica se produce en el hilo de guarda, se puede observar en la Figura 4.58 las formas de ondas de la tensión inducida al hilo de guarda y a las 3 fases cuando el rayo impacta, la sobretensión mas alta se produce en el hilo de guarda alcanzando los 7100 kV.

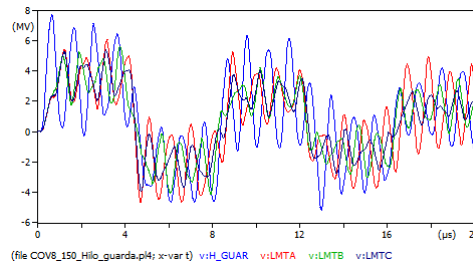


Figura 4.58: Sobretensión inducida al hilo de guarda y a las 3 fases

En la Figura 4.59 se muestra la sobretensión inducida a las 3 fases y en la Figura 4.60 la sobretensión inducida en el conductor de fase más cercano al hilo de guarda el cual llega a alcanzar los 6047 kV.

En la figura 4.61 se realizó la medición a las líneas de la fase A de los postes adyacentes del vano donde se produjo la descarga atmosférica, la tensión inducida es 4246 kV.

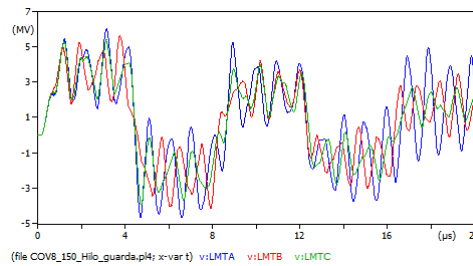


Figura 4.59: Sobretensión inducida en las 3 fases cuando el rayo impacta al hilo de guarda

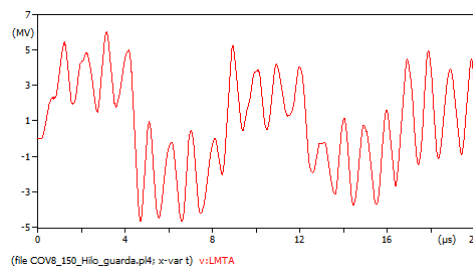


Figura 4.60: Sobretensión inducida en la fase más cercana al hilo de guarda

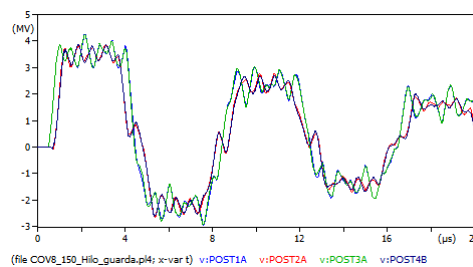


Figura 4.61: Medición de voltaje a los postes adyacentes en donde se produjo el impacto del rayo

#### 4.3.4.5. Descargas directas al hilo de guarda

En la Figura se 4.62 muestra el modelo en ATP-Draw para el caso de la línea de distribución con hilo de guarda del alimentador COV08, para este caso se tuvo en cuenta las remondaciones de [19] utilizando puesta a tierra en cada poste.

Se va a analizar el comportamiento de la red ante los transitorios presentados por descargas atmosféricas impactando sobre el hilo de guarda de la línea.

Para este caso se simula un rayo impactando al medio del vano del hilo de guarda para ver el efeco transitorio.

Cuando incide la descarga atmosférica en el hilo de guarda, se puede observar en la Figura 4.63 las formas de ondas de la tensión iducida al hilo de guarda y a las 3 fases cuando el

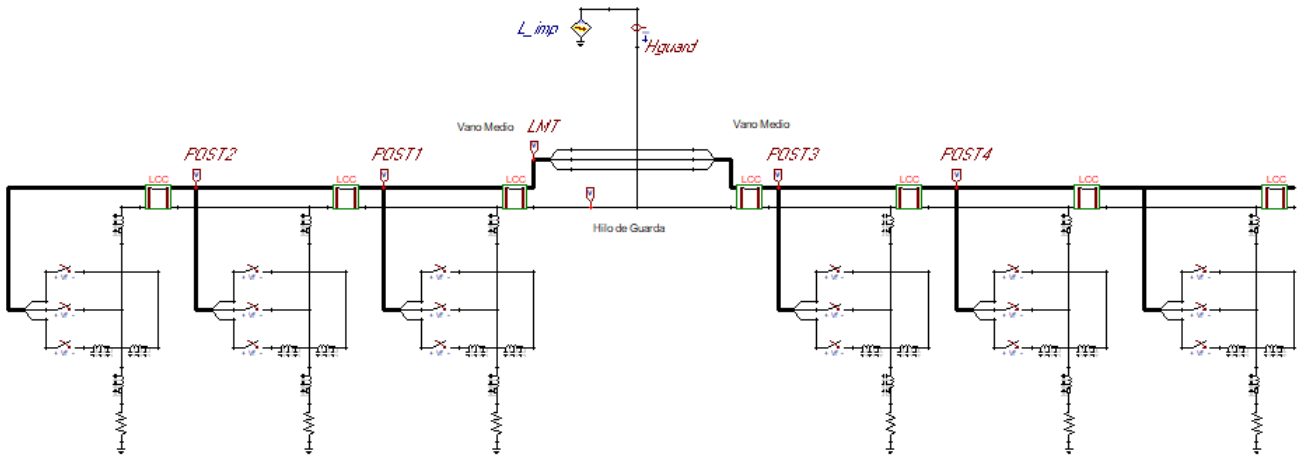


Figura 4.62: Modelo de la línea con hilo de guarda en ATDRAW

rayo impacto en el medio mismo del vano de hilo de guarda, llevando la sobretensión mas alta la misma.

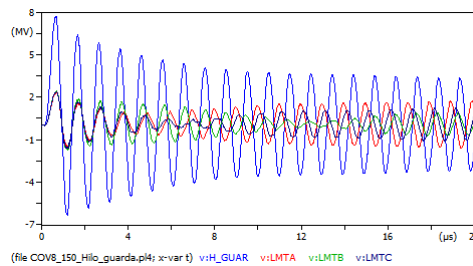


Figura 4.63: Sobretensión inducida en el hilo de guarda y las fases

En la Figura 4.64 se muestra la sobretensión inducida a las 3 fases y en la Figura 4.65 la sobretensión inducida en el conductor de fase más cercano al hilo de guarda llegando a alcanzar los 2478 kV.

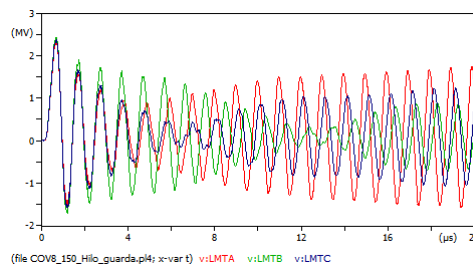


Figura 4.64: Sobretensión inducida en las 3 fases cuando el rayo impacta al hilo de guarda

En la Figura 4.66 se realizó la medición a las líneas de la fase A de los postes adyacentes del vano donde se produjo la descarga atmosférica, la tensión inducida es 491 kV.

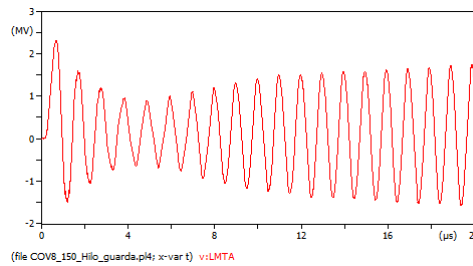


Figura 4.65: Sobretensión inducida en la fase con mayor sobre tensión

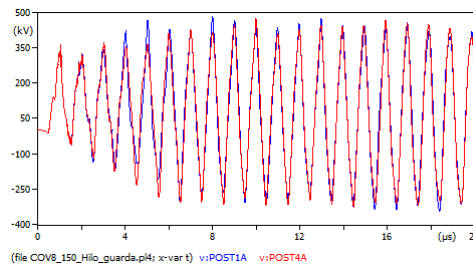


Figura 4.66: Medición de voltaje a los postes adyacente en donde se produjo el impacto del rayo

En la Figura 4.67 se puede ver la tensión inducida que esta al lado de los postes adyacentes donde se produjo las descargas atmosféricas, la tensión inducida máxima que llegas hasta hace punto es de 157 kV

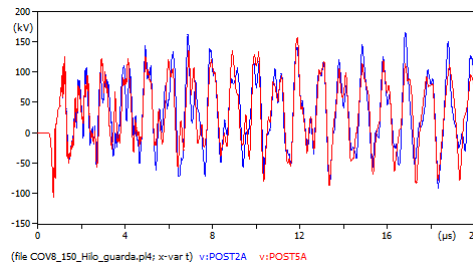


Figura 4.67: Medición de voltaje a lado de los postes adyacente en donde se produjo el impacto del rayo

#### 4.3.4.6. Variación de la distancia de puesta a tierra

En este apartado se realizó el análisis para los casos en que la puesta a tierra del hilo de guarda no se instalen en cada poste, para el estudio se fue variando la distancia de la puesta a tierra del hilo de guarda, para ver el comportamiento de la línea bajo esas condiciones de operación, se colocó en postes de por medio en la Figura 4.68 se ve el modelado de la protección. Para este caso se simuló un rayo impactando al medio del vano del hilo de guarda como en el caso anterior. Se hizo la medición de la tensión inducida en en las tres fases en el punto de impacto, Figura 4.69

En la Figura 4.70 muestra la tensión inducida del poste adyacente al punto de impacto, este poste tiene la puesta a tierra del hilo de guarda, en este caso se ve que la tensión inducida alcanza los 770 KV

En la Figura 4.71 se ve la tensión inducida en la fase del siguiente poste que tiene la puesta a tierra del hilo de guarda, como se puede observar la sobretensión causada por la descarga atmosférica se redujo a 156 kV

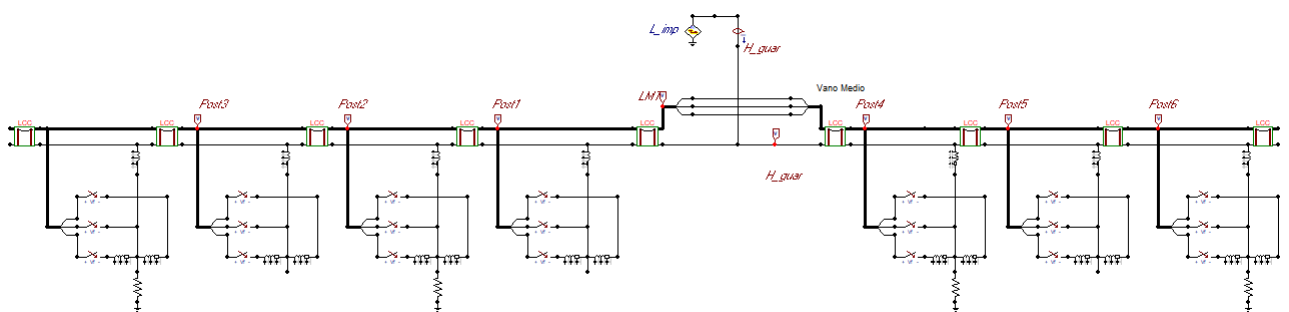


Figura 4.68: Sobretensión inducida en la fase con puesta a tierra cada dos vano.

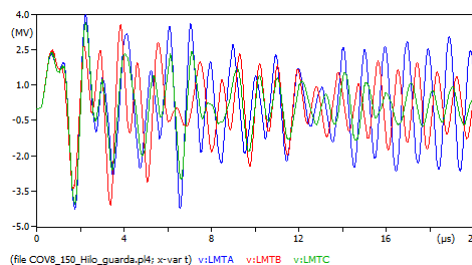


Figura 4.69: Sobretensión inducida en las 3 fases cuando el rayo impacta al hilo de guarda

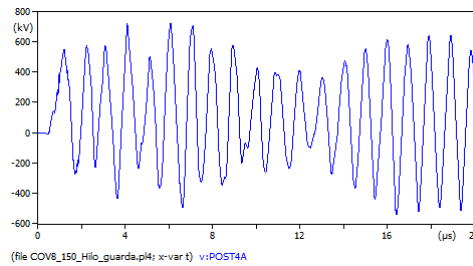


Figura 4.70: Medición de voltaje a lado de los postes adyacente en donde se produjo el impacto del rayo

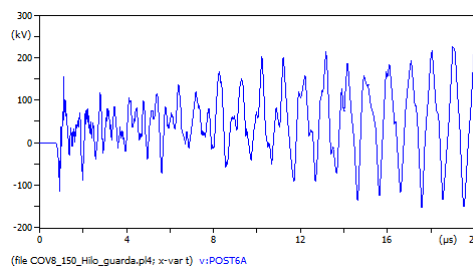


Figura 4.71: Medición de voltaje donde se produjo el impacto del rayo en el segundo poste con puesta a tierra

#### 4.3.4.7. Evaluación de las sobretensiones por descargas directas variando la resistencia de puesta a tierra.

Como se describió anteriormente para el modelado se utilizó un valor de la puesta a tierra en las protecciones con hilo de guarda de  $10 \Omega$ , se adoptó este valor de la resistencia de puesta a tierra teniendo en cuenta lo que indica [1] para descargas atmosféricas.

En este apartado se evaluaron las sobretensiones variando los valores de esta resistencia de puesta a tierra con el fin de observar el comportamiento de la línea ante esta situación. El estudio se hizo para dos valores de resistencia de puesta a tierra iguales a  $30 \Omega$  y  $20 \Omega$ , en las líneas con hilo de guarda.

**4.3.4.7.1. Resistencia de puesta a tierra del hilo de guarda con  $20 \Omega$  y  $30 \Omega$  en cada poste:** En la Figura 4.72, se puede ver la tensión inducida a la fases con el valor de la resistencia de puesta a tierra igual a  $30 \Omega$  para el caso de contar con puesta a tierra en cada poste.

En la Figura 4.73 se pueden observar la sobretensión que se producirían en el sistema con una resistencia de puesta a tierra de  $20 \Omega$ , para descargas atmosféricas directas en el hilo de guarda, también en caso de contar con puesta a tierra en cada poste.

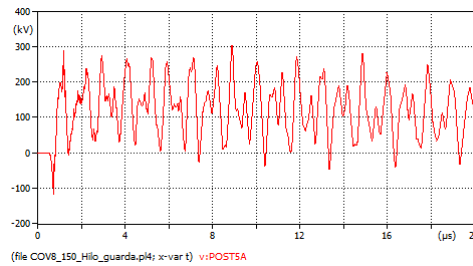


Figura 4.72: Sobretensión producida en la de la fase por descargas directas al hilo de guarda con una resistencia de 30 Ω

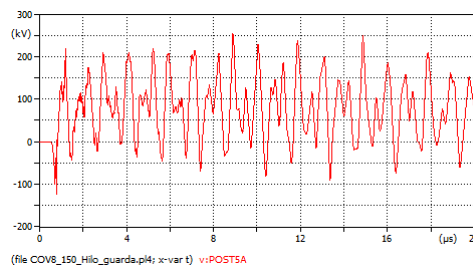


Figura 4.73: Sobretensión inducida en el conductor de fase por descargas directas al hilo de guarda con una resistencia de 20 Ω.

**4.3.4.7.2. Resistencia de puesta a tierra del hilo de guarda con 20 y 30 Ω en poste de por medio:** En las figuras se pueden observar los dos tipos de sobretensiones que se producirían en el sistema con una resistencia de puesta a tierra del mismo caso al anterior, con la diferencia de que la puesta a tierra del hilo de guarda se instaló en vanos de por medio.

La medición se hizo en el mismo poste del caso anterior en la Figura 4.74 se puede ver la sobre tensión inducida en la fase.

En la Figura 4.75 se pueden observar la sobretension que se producirían en el sistema con una resistencia de puesta a tierra de 20 Ω,

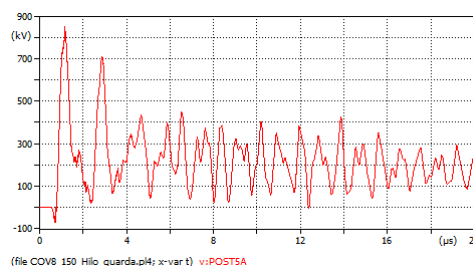


Figura 4.74: Sobretensión producida en la de la fase por descargas directas al hilo de guarda con una resistencia de 30 Ω en vanos de por medio

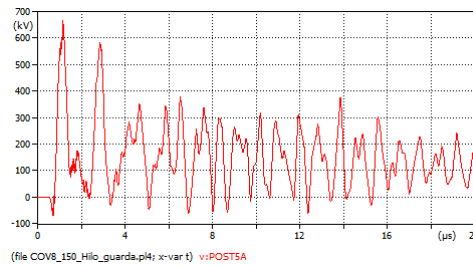


Figura 4.75: Sobretensión producida en la de la fase por descargas directas al hilo de guarda con una resistencia de  $20 \Omega$  en vanos de por medio

**4.3.4.7.3. Comparación de la sobretensión entre sistemas con distinta resistencia de puesta a tierra:** En las siguientes figuras muestran la comparación de los valores de sobretensión en las líneas de distribución.

Puede observarse, que la la disminución de los sobretensiones que se inducen en las mismas son menores cuando se tiene la puesta a tierra del hilo de guarda en cada poste.

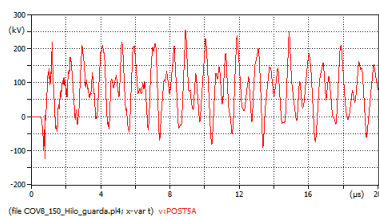


Figura 4.76: Sobretensión inducida en el conductor de fase por descargas directas al hilo de guarda con puesta a tierra en cada poste

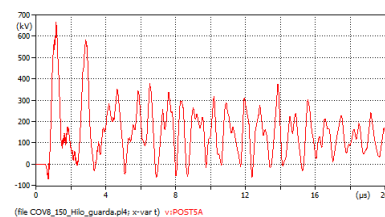


Figura 4.77: Sobretensión inducida en el conductor de fase por descargas directas al hilo de guarda con puesta a tierra en postes de por medio

#### 4.3.4.8. Descargas directas en el poste de la línea de distribución

En la Figura 4.78 muestra el modelo en ATP-Draw para el caso de la línea de distribución cuando el rayo impacta el poste.

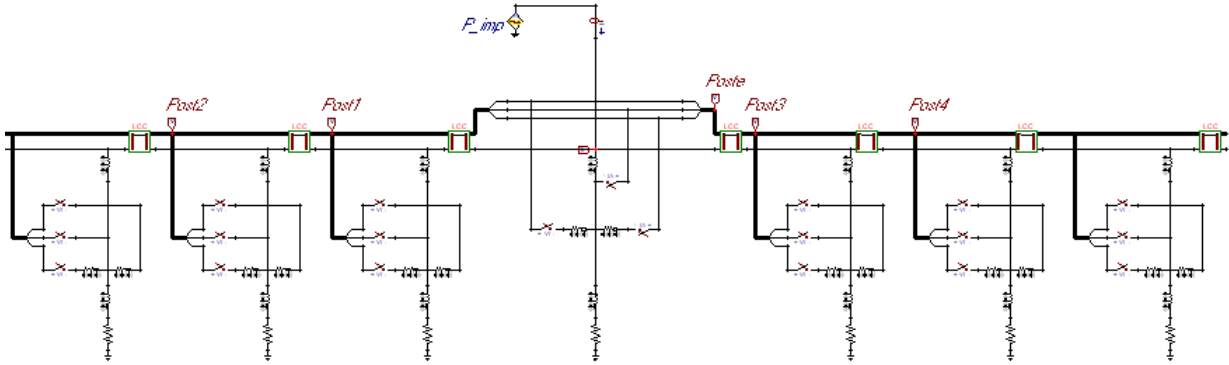


Figura 4.78: Sobretensión inducida en la fase cuando el rayo impacta al poste.

La Figura 4.79 muestra la sobretensión inducida en la fase como consecuencia de una descarga atmosférica sobre el poste, esta sobretensión se aproxima a los 120 kV.

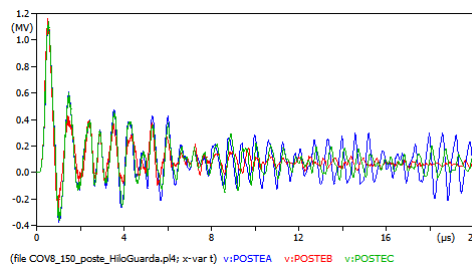


Figura 4.79: Sobretensión inducida en la fase cuando el rayo impacta al poste.

La Figura 4.80 muestra las tensiones inducidas a las líneas de los postes adyacentes donde hubo la descarga atmosférica, mostrando las fases más afectadas.

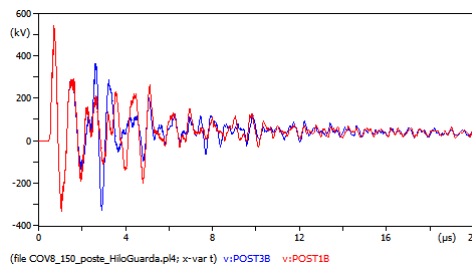


Figura 4.80: Sobretensión inducida en la fase en los postes adyacentes.

#### 4.3.4.9. Diferencia entre los sistemas con protección y sin protección, simulados en ATPDRAW

La presentación de resultados inicia a partir de lo establecido en el diseño conceptual y es hasta que se obtiene la información del procesamiento que se determinan por medios de simulaciones.

En la Figura 4.81 y 4.82 se puede observar la diferencia que existe entre un sistema sin protección y con protección ante la descarga atmosférica simulado en ATPDRAW, la diferencia que existe entre ellos es de 4559 kV de la disminución de sobretensión inducida en las líneas.

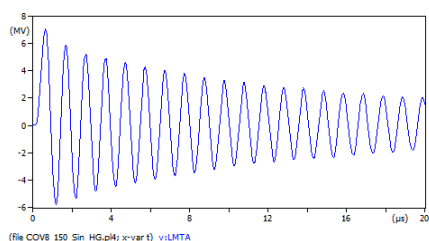


Figura 4.81: Sobretensión inducida en la fase impactada directamente

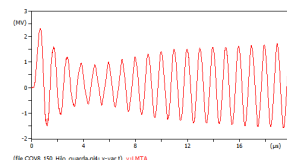


Figura 4.82: Sobretensión inducida en la fase más cercana al hilo de guarda

#### 4.3.5. Simulaciones del desempeño de los esquemas de protección con descargadores e hilos de guarda.

##### 4.3.5.1. Líneas aéreas con descargador

Los componentes y parámetros utilizados para este estudio son los mismos correspondientes a los casos anteriores. Incluyendo ahora un modelo de descargador autovalvulares, descrito a continuación:

El descargador o pararrayos que dispone el programa ATP y el cual fué utilizado es el modelo 91. Este modelo aproxima la curva tensión corriente del pararrayos a una curva de segmentos exponenciales consecutivos que empatan uno con otro. La característica voltaje-corriente de un pararrayos es función de la pendiente del impulso. El descargador debe ser modelado con la característica de operación para descargas atmosféricas (8/20  $\mu$ s) proporcionadas por los fabricantes.

### El modelo seleccionado para el descargador

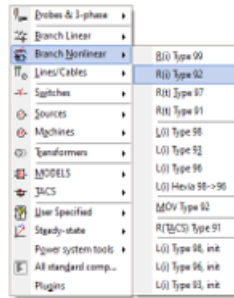


Figura 4.83: Modelo utilizado en ATDRAW para representar descargadores.

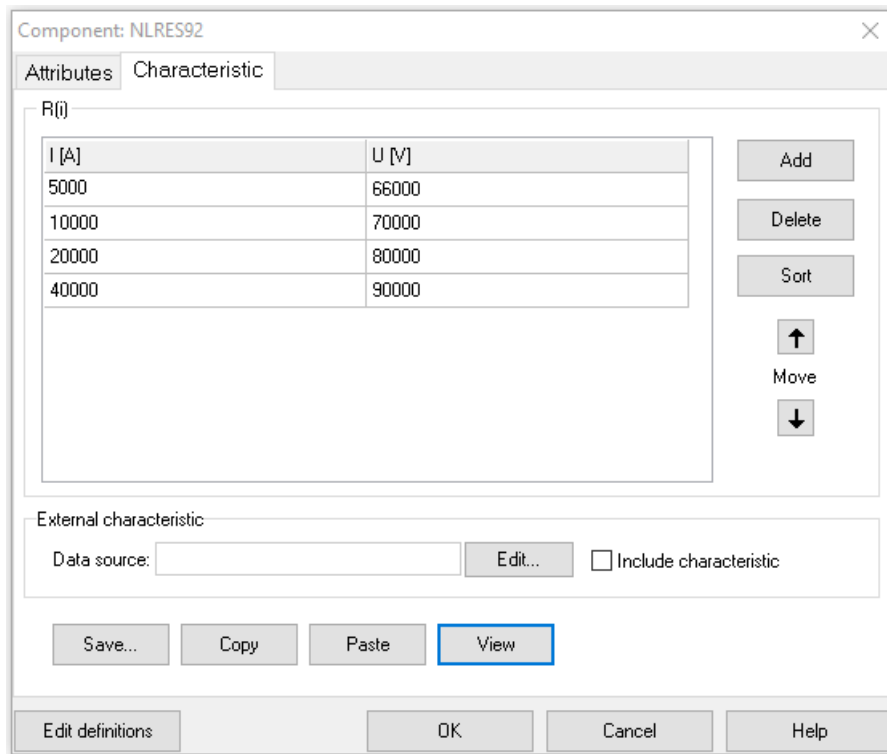


Figura 4.84: Características de operación frente a descargas atmosféricas del descargador en ATPDRAW

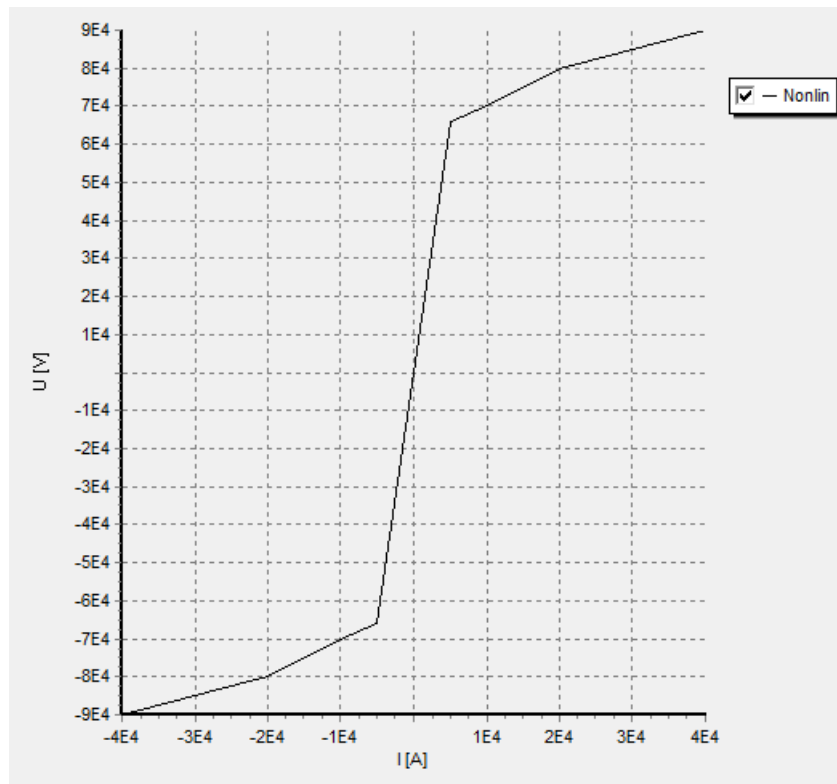


Figura 4.85: Curva tensión vs corriente del descargador en ATPDRAW

Las funciones de un descargador son:

- No conducir para voltajes de operación normal
- Conducir corriente durante sobre voltajes sin causar falla.

Para cumplir con las condiciones anteriores es necesario que la característica del descargador que se utilice tenga una resistencia extremadamente alta en operación normal y una resistencia relativamente baja en sobretensiones transitorias.

#### 4.3.5.2. Trayecto de la línea con descargador del alimentador CYO04

En esta sección se realizó las simulaciones correspondientes al Alimentador CYO04. Para ver a que separación entre los juegos de descargadores que protegerá más bien a la línea.

En esta simulación los juegos de descargadores de sobretensión están separados a 1882 metros entre sí según promedio del relevamiento de campo, ver Anexo Figura 7, en la Figura 4.86 se puede observar el modelado del esquema de protección con descargadores. Se evaluaron las sobretensiones inducidas en el caso más crítico.

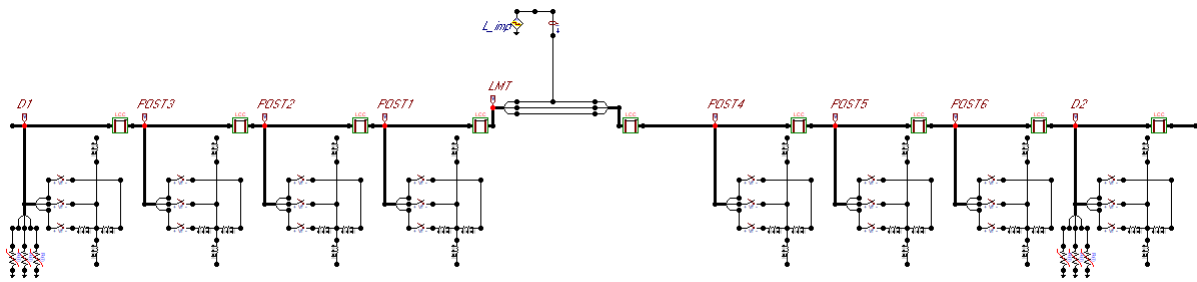


Figura 4.86: Modelado esquema de protección con descargadores en las Líneas de Distribución CYO04 en ATPDRAW

El caso más crítico que se presentó es el impacto de la descarga atmosférica sobre la línea en la fase A en la mitad misma de la separación de los descargadores, donde se produce la mayor sobretensión como se ve en la Figura 4.87, llegando incluso a alcanzar los 7978 kV, la disipación de la sobretensión inducida no es al instante, empieza a partir de los 10  $\mu$ s y va disminuyendo a medida que se acerca al punto dónde están los descargadores.

En la Figura 4.88 se puede observar que la sobretension inducida recién se va disipando casi a los 50  $\mu$ s

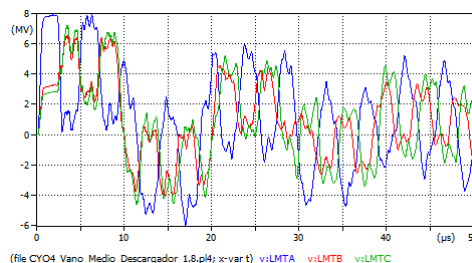


Figura 4.87: Medición de voltaje en el punto de impacto de la descarga para una separación entre descargadores de 1.88 Km.

Para este caso se seleccionó la medición de la sobretensión en el punto en donde están instalados los descargadores, para ver la disipación de la sobretensión producida en la fase A de cada descargador, la fase en donde se produce la mayor sobretensión es la que recibió el impacto. En la figura 4.88 se observa la sobretensión que se produce en ellas.

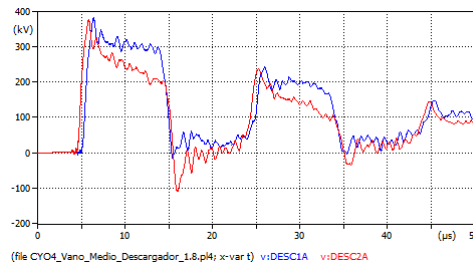


Figura 4.88: Medición de voltaje en el punto donde están instalados los descargadores cada 1.88 km

**Análisis:** para esta distancia de separación entre descargadores puede observarse la actuación del sistema de protección a los  $10 \mu s$  aproximadamente.

#### 4.3.5.3. Trayecto de la línea con descargador cada 1km del alimentador CYO04

Luego analizamos el caso en que la separación de los descargadores se varía a una distancia de 1 km entre sí. Para el análisis se tomo la medición obtenida en la fase A de la línea ya que esta fase es la que recibe el impacto de la descarga atmosférica. En la Figura 4.89 se observa que la disipación empieza a los  $6 \mu s$

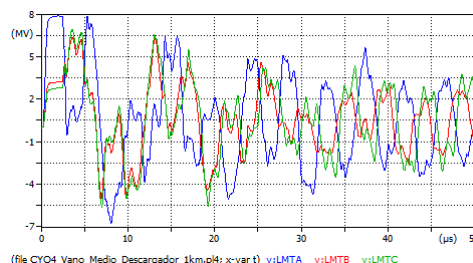


Figura 4.89: Medición de voltaje en el punto de impacto de la descarga para una separación entre descargadores de 1Km.

Para el caso de la Figura 4.90 se seleccionó la medición de la sobretensión en el punto en donde están instalados los descargadores cada 1 km, para ver la disipación de la sobretensión producida en la fase A de cada descargador, se observa la sobretensión que se produce en ellas llegando a la disipación mas mínima.

**Análisis:** para esta distancia de separación entre descargadores es eficiente para la protección de la línea ya que la sobretensión inducida es menor y la disipación es mas rápida.

#### Conclusión:

Una distancia de separación entre descargadores de 1 Km garantiza la protección del

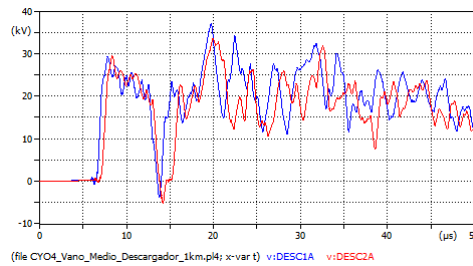


Figura 4.90: Medición de voltaje en el punto donde están instalados los descargadores cada 1 km

sistema. Para distancias menores el comportamiento es similar, lo que significa que un sistema de protección atmosférica que posea una distancia de 1 Km es suficiente para proteger al sistema contra descargas atmosféricas.

#### 4.3.5.4. Líneas con hilo de guarda y descargador

En esta sección se realizó el estudio de las descargas atmosféricas directas incluyendo el hilo de guarda y la representación de descargadores autovalvulares en ATPDRAW, con la intención de observar la disminución de la sobretensión en los conductores de línea cuando se combinan ambos elementos de protección, se quiere conocer la distancia de separación entre descargadores que produzca la mínima sobretensión posible. El estudio de descargas atmosféricas indirectas en ATPDRAW queda fuera del alcance de este proyecto, este tratado fue realizado en forma teórica.

Para el caso del estudio se tomó como referencia el alimentador CYO04 ya que tiene la misma características del alimentador COV08 por eso se realizó un solo caso de estudio incluyendo las dos protecciones conjuntamente, se la añadió al alimentador CYO04 el hilo de guarda.

Los componentes utilizados para este caso son los mismos correspondientes a la sección anterior con el modelo del descargador utilizado en el caso anterior. Este estudio se hizo para descargas directas al conductor de guarda en medio del vano, que es el caso de descargas atmosféricas en esta configuración de líneas en donde se produce la máxima sobretensión.

En la figura 4.91 se puede observar el modelado del esquema de protección

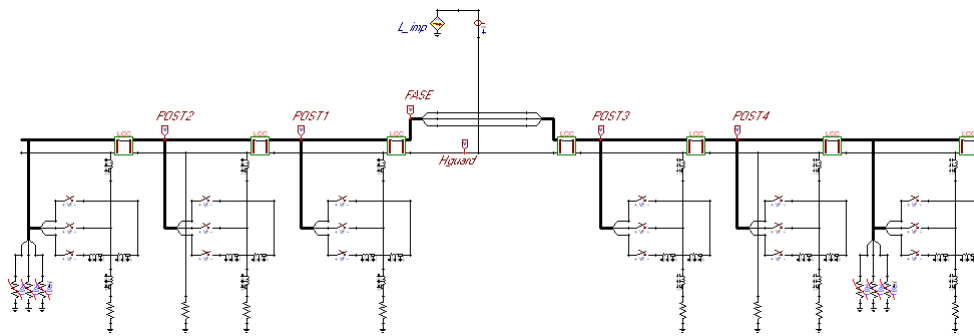


Figura 4.91: Configuración de la conexión del juego de descargadores con hilo de guarda en las Líneas de Distribución en ATPDRAW

#### 4.3.5.5. Estudio de la sobretensión en las líneas con descargadores e hilo de guarda

El estudio se realizó con la misma distancia de separación entre descargadores, lo que varía es la cantidad de juegos de descargadores. El procedimiento fue el mismo descrito en el caso anterior.

#### 4.3.5.6. Trayecto de la Línea con Hilo de Guarda y Descargador cada 4 km

- N° de juegos de descargadores: 2
- Separación entre descargadores: 4 km
- Punto de impacto de la descarga: en el centro de la línea, a una distancia de separación de 2000 metros de los descargadores.
- Puesta a tierra del hilo de guarda: En cada poste
- Medición del voltaje en el punto de impacto: la figura muestra la sobretensión en el punto de impacto de la descarga.

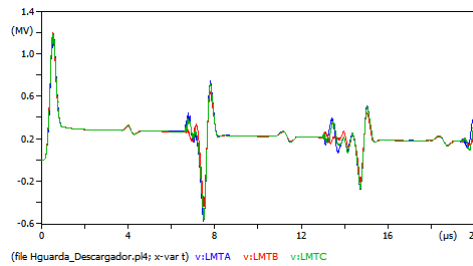


Figura 4.92: Medición de voltaje en el punto de impacto de la descarga para una separación entre descargadores de 4 Km.

**Análisis:** Aquí podemos observar una disminución considerable de la sobretensión respecto al sistema sin el descargador estudiado anteriormente en las líneas de distribución utilizando conjuntamente las protecciones.

Se añadió un juego de descargadores al sistema.

- **Nº de juegos de descargadores:** 3
- **Separación entre descargadores:** 2 km
- **Punto de impacto de la descarga:** en el centro de la línea, a una distancia de separación de 1000 metros de los descargadores.
- **Medición del voltaje en el punto de impacto:** la figura muestra la sobretensión en el punto de impacto de la descarga.

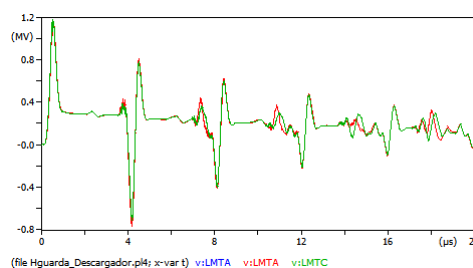


Figura 4.93: Medición de voltaje en el punto de impacto de la descarga para una separación entre descargadores de 2 Km..

**Análisis:** En este caso se aprecia un comportamiento de la sobretensión muy similar al estudio anterior, con la diferencia de una mínima reducción de la sobretensión producida al conductor mas cercano al hilo de guarda amortiguando en un tiempo mas corto las sobretensiones producidas en dichas líneas.

En la figura se puede observar la diferencia de sobrevoltajes producidos por las descargas atmosféricas con un sistema de protección hilo de guarda y descargadores.

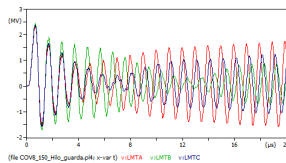


Figura 4.94: Protección contra descargas atmosféricas con Hilo de Guarda

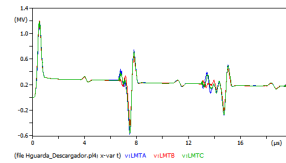


Figura 4.95: Protección contra descargas atmosféricas con Hilo de Guarda y Descargador

**Conclusión:** Con base en los resultados obtenidos, se puede decir que la protección más efectiva para esta configuración se presenta cuando los descargadores están separados por una distancia de 4 Km. Así, para el sistema de distribución estudiado con cable de guarda y descargadores de la línea representa la mejor forma de proteger las líneas de distribución ya que las sobrentesiones inducidas a las líneas son menores y es disipado con menor tiempo.

#### 4.3.5.7. Disipación del descargador

En la figura se puede observar las disipación de la sobretensión de las descargas atmosféricas en donde haya el juego de los descargadores.

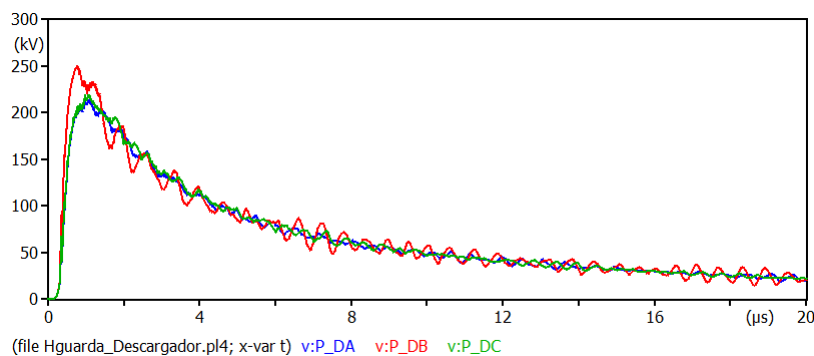


Figura 4.96: Sobretensión inducida en las fases donde están instalados los descargadores

### 4.3.6. Comparación gráfica entre el método teórico y la simula- ción en el software ATPDRAW

En esta parte se observa las gráficas de las sobretensiones producidas a las líneas de distribución a causa de las descargas atmosféricas, ya sea descargas directas e indirectas a las fases realizadas mediante el método teórico y la simulación en Atpdraw.

La comparación realizada a las líneas de distribución con y sin protección con el Hilo de Guarda.

#### 4.3.6.1. Líneas de distribución sin hilo de guarda

**4.3.6.1.1. Descargas directas al conductor de fase** En la Figura 4.97 se puede observar la sobretensión producida en la línea de distribución sin protección mediante el método teórico que es 7324 kV. En la figura 4.98 se muestra la sobretensión producida en ATP-Draw para el caso de la línea de distribución sin Hilo de guarda que es de 7037 kV.

La diferencia que existe entre las dos casos de estudio es de 287 kV

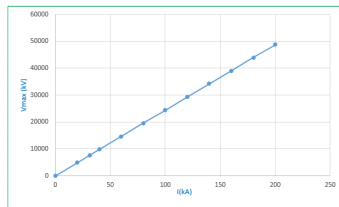


Figura 4.97: Sobretensión producida por descargas directas al conductor de fase

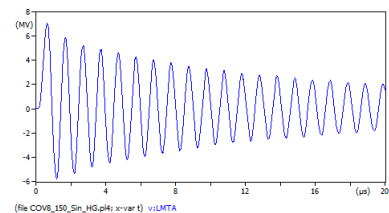


Figura 4.98: Sobretensión inducida en la fase impactada

**4.3.6.1.2. Tensión inducida a la fase más cercana** En la Figura 4.99 se observa la sobretensión inducida en la fase más cercana por el método teórico la sobretensión máxima alcanza los 3154 kV.

La Figura 4.100 muestra que en Atpdraw esta sobretensión alcanza los 2860 kV. Habiendo una diferencia de 294 kV

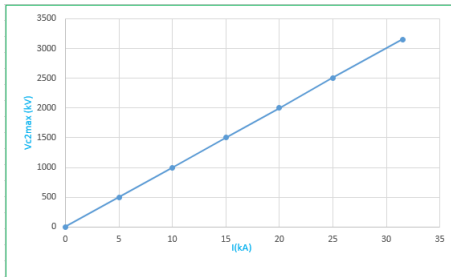


Figura 4.99: Tensión inducida en la línea más cercana al conductor de fase impactado por un rayo (I=0-31,5 kA)

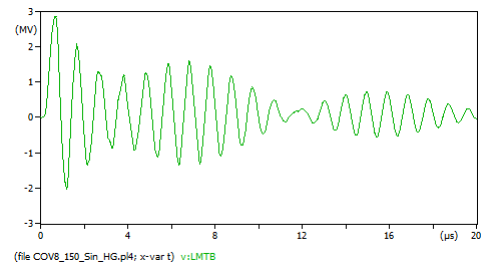


Figura 4.100: Sobretensión pico inducida en la fase más cercana a la fase impactada por el rayo

#### 4.3.6.2. Líneas de distribución con hilo de guarda

**4.3.6.2.1. Descargas directas al hilo de guarda** En la figura se puede observar la sobretensión producida en la línea de distribución de la fase mas cercana al hilo de guarda a través del método teórico que es 2231 kV.

En la figura se muestra la sobretensión producida en ATP-Draw para el caso de la línea de distribución más cercana al hilo de guarda que es de 2478 kV

La diferencia que existe entre las dos casos de estudio es de 247 kV

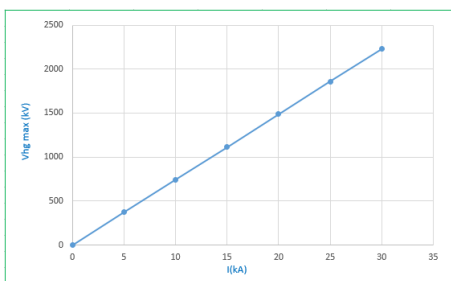


Figura 4.101: Sobretensión inducida en el conductor de fase por descargas directas al hilo de guarda (I=0-31,5 kA)

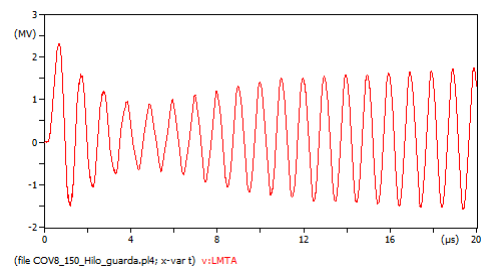


Figura 4.102: Sobretensión inducida en la fase más cercana al hilo de guarda

**4.3.6.2.2. Descargas directas en el poste de la línea de distribución:** En la figura se puede observar la sobretensión producida a la fase de la línea de distribución consecuencia de una descarga atmosférica en el poste través del método teórico que es 280 kV.

En la figura se muestra la sobretensión producida en ATP-Draw para el caso de la línea de distribución que es de 120 kV aproximadamente

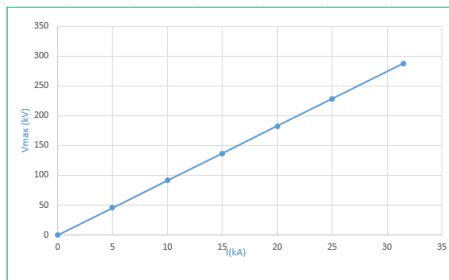


Figura 4.103: Sobretensión inducida en el conductor de fase cuando la descarga atmosférica incide sobre el poste para una corriente de 31,5 kA

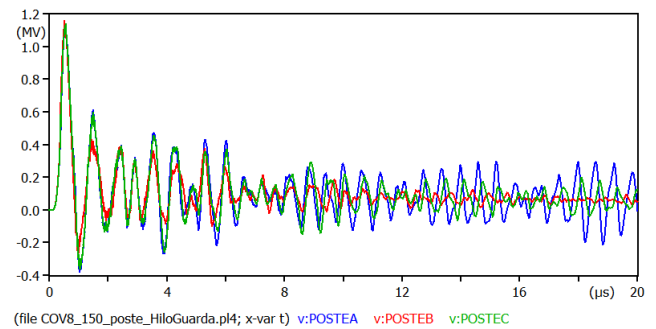


Figura 4.104: Sobretensión inducida en la fase cuando el rayo impacta al poste.

# Capítulo 5

## Resultados y Discusión

Con el relevamiento de datos realizados en la ANDE sobre los sistemas de protección contra las descargas atmosféricas se pudo recolectar el uso del hilo de guarda y los descargadores, además las recolecciones se han realizados en dos alimentadores diferentes correspondiente al COV08 y CYO04. Así mismo se tomó como referencia los métodos y esquema de protección corresponden a los hilos de guarda y descargadores del tipo de óxido metálico (ZnO)[5] utilizados de manera individual sobre cada alimentador. Al finalizar su pudo comprobar que la utilización se realiza en forma individual.

Se estudiaron analíticamente las sobretensiones generadas en las líneas aéreas por descargas directas e inducción debido a la incidencia de las descargas atmosféricas en las cercanías, ya que la probabilidad de que ocurra una descarga en las cercanías de las líneas es mucho más alta a que la descarga impacte sobre ésta, para el estudio se utilizó la metodología de Rusck[19], se ha obtenido un resultado en dónde los hilos de guarda disminuyen las sobretensiones inducidas por seados inverso.

La protección contra descargas atmosféricas se presenta con las características y parámetros de los alimentadores que fueron casos de estudios con la recolección de campo y según las especificaciones técnicas de la ANDE) [5] . Según relevamiento de campo se pudo verificar que la utilización de las protecciones contra descargas atmosférica no cumple con lo especificado en el reglamento para instalaciones eléctricas de media tensión para los alimentadores que fueron tomado como referencia para el estudio.

Se realizó el modelado correspondiente de los esquemas de protección utilizados por la ANDE en la actualidad y como indica[19], cómo también un nuevo esquema de protección utilizando conjuntamente el hilo de guarda y los descargadores.

Al realizar los estudios tanto con el método analítico como en las simulaciones con el programa ATPDRAW converge que la utilización del hilo de guarda protege ante las descargas atmosféricas directas siempre y cuando no haya falla en el apantallamiento ya que los impactos directos al conductor de fase son mucho más elevados que las originadas por impacto al hilo de guarda.

Se realizó una comparación entre el método analítico y las simulaciones en ATPDRAW para las líneas de MT sin hilos de guarda y se pudo comprobar que en los valores obtenidos hay una diferencia de 287 kV para una descarga directa a la fase, en tanto la tensión inducida a la fase más cercano para el mismo caso la diferencia es de 294 kV. Para las líneas con hilos de guarda la tensión inducida a la fase más cercana al hilo de guarda cuando el rayo impacta al mismo, la diferencia entre los dos métodos es de 247 kV, cuando el impacto es el poste teniendo como protección el hilo de guarda la diferencia es de 165 kV. Esto se debe a que en el modelo representado en ATPDRAW para calcular las sobretensiones inducidas se consideran algunos factores adicionales que en el método analítico no son considerados, como lo son, el nivel de aislamiento de las líneas, un modelo de corriente del rayo en forma doble exponencial, la frecuencia de la descarga, el valor de la resistencia de puesta a tierra, etc. (el valor de puesta a tierra no es considerado en el método analítico ya que surge de una estimación normalizada, sin embargo en el ATPDRAW se simula teniendo en cuenta éstos valores y la cantidad de puesta a tierra del esquema de protección. Por esta diferencias la simulación en el programa ATPDRAW ya que es más certera al incluirle muchos más parámetros ).

Durante la simulaciones realizadas en el programa ATPDRAW se analizaron detalladamente los posibles esquemas de protección, realizando el diseño para cada caso. Para la simulación del caso de líneas aéreas desnudas de MT, se relevaron los datos de dos alimentadores, COV08 que cuenta con hilo de guarda y CYO04 que cuenta con descargadores, se realizó el análisis del estado actual de los dos alimentadores con sus protecciones correspondientes, luego se simularon varios esquemas de protección con la finalidad de analizar el comportamiento de las líneas y así poder determinar un esquema con buen desempeño.

Para el alimentador COV08 se realizó las simulaciones del esquema de protección teniendo en cuenta los datos recabados en campo, de las disposiciones de la puesta a tierra. Se simuló un esquema de protección acorde a lo recomendado por [19] poniendo la puesta a tierra en cada poste, en este caso se tuvo más poca diferencia con el método analítico. Se puede observar en el caso de que las puestas a tierra en cada poste que la disipación de las tensiones inducidas son mucho más rápidas y reducen también con más rapidez las sobretensiones inducidos a las fases.

Para el estudio de la influencia de la puesta a tierra para las protecciones en las líneas aéreas de distribución se analizó dos casos, variando la distancia y los valores de la resistencia de puesta a tierra, en el primer caso se varió la distancia de la puesta a tierra del hilo de guarda obteniendo que se pueden colocar incluso puesta a tierra en postes de por medio siempre y cuando se repite un valor de resistencia de puesta a tierra de hasta  $10 \Omega$ , para el segundo caso se analizó la influencia del valor de la resistencia de puesta a tierra del hilo de guarda, la simulación se realizó para valores de resistencia de puesta a tierra de  $20$  y  $30 \Omega$  resultado que para un valor de  $20 \Omega$  todavía protege para el caso de puesta a tierra en cada postes y para el valor de  $30 \Omega$  ya no protege. Para los valores de resistencia de puesta a tierra de  $10 \Omega$  se pudo comprobar que la protección es la más efectiva, ya que se logra reducir más rápido la sobretensión que aparece en las líneas impactadas.

Para el estudio del esquema de protección con descargadores en las líneas de distribución de MT se realizó con el alimentador CYO04 en el programa ATPDRAW, realizando las simulaciones con la separación de los descargadores de  $1.8$  km entre sí con los datos recabos de campo. Resultando que la sobretensión inducida a las líneas con esta separación del esquema de protección empieza a disipar a los  $10$  microsegundos lo cuál nos es lo suficiente. Se disminuyó la distancia de la misma protección con una separación de  $1$  km entre sí , para este sistema se logró una mejor disipación llegando alcanzar disminución casi total en el punto en donde están instalados los descargadores.

Para el alimentador CYO04 se realizó la simulación utilizando las dos protecciones conjuntamente, con la puesta a tierra del hilo de guarda en cada poste. En tanto se varió la distancia de los descargadores, ara una distancia de  $4$  km de los descargadores entre si con el uso del hilo de guarda es la más efectiva para la protección de la línea de MT.



# Capítulo 6

## Conclusiones

- Se recolectaron los datos de los esquemas de protección contra la descarga atmosférica específicamente de los alimentadores COV08 y CYO04, logrando realizar con dichos datos, estudio de ambos casos, en escenarios de protecciones con hilo de guarda en el caso COV08 y la protección con descargadores en el caso de CYO04.
- Se determinaron dos metodologías, que consistió en un método analítico basado en cálculos matemáticos recomendados por[19] , el otro método adoptado fue el de la simulación con la ayuda del programa ATP-DRAW, posterior se realizaron comparación lo cual ente el primero se pueden obtener resultados de las descargas directas e indirectas, mientras el segundo se pudo ejecutar varias acciones como son las descargas directas e indirectas y el uso conjunto de las protecciones.
- Se obtuvieron los parámetros necesarios para el análisis de los efectos ante las descargas atmosféricas.
- Se realizó modelado de tres esquemas de protección contra descargas atmosféricas en los alimentadores COV08 y CYO04. Específicamente los esquemas que cuentan con hilo de guarda en el caso del alimentador COV08, el alimentador CYO04 se modelo considerando protección con descargadores y el uso conjunto de las protecciones.
- Se obtuvieron los resultados deseados por medio de los criterios y métodos adoptados, esto llevo a contrastar estos modelos considerando el caso en el que se implementa la protección del hilo de guarda y los descargadores en conjunto.



# Capítulo 7

## Recomendaciones

- Proteger todos los sistemas de las líneas de MT por medio de hilo de guarda y descargadores .
- Aterrizar en el mayor número posible los hilos de guarda, para que el voltaje inducido se descargue a tierra lo más rápido posible.
- Realizar de manera constante monitoreos de los descargadores si están en buenas condiciones en donde se hayan instalados.
- Formular un plan sistematizado para el mantenimiento del hilo de guarda como su puesta a tierra y descargadores. A fin de evitar mayores interrupciones eléctricas.



# Parte IV

## Anexo



## .1. Estructuras en Sistemas de Distribución Para Líneas Aéreas Desnudas

### .1.1. Parámetros Geométricos de los Postes

Los postes de concreto, tendrán las características geométricas establecidas en la Figura. Según el Reglamento de la ANDE. Donde el poste seleccionado para el caso de estudio es el que se encuentra resaltado de color rojo.

### .1.2. Poste de Hormigón Armado Para Sosten de Líneas Aéreas

Tabla 1: Poste de Hormigón con Ducto Embutido para Puesta a Tierra

ÍTEM N°	DESCRIPCIÓN
1	Poste de hormigón armado, sección doble T, 9 m /150 daN
2	Poste de hormigón armado, sección doble T, 9 m /200 daN
3	Poste de hormigón armado, sección doble T, 9 m /500daN
4	Poste de hormigón armado, sección doble T, 12 m /200 daN
5	Poste de hormigón armado, sección doble T, 12 m /300 daN
6	Poste de hormigón armado, sección doble T, 12 m /500 daN
7	Poste de hormigón armado, sección doble T, 12 m /800 daN
8	Poste de hormigón armado, sección doble T, 15 m /500 daN
9	Poste de hormigón armado, sección doble T, 15 m /800 daN

Tabla 2: Poste de Hormigon Armado Para Sosten de Líneas Aéreas

Item	Tipo	Longitud (m)	Carga Nominal (daN)	Peso máximo (kg)	Dimensiones (cm)						
					Cima	Base	M	F	J		
1	9/150	9	150	535	12	10	26,4	19	150	160	100
2	9/200	9	200	590	12	10	31,2	22	450	460	130
3	9/500	9	500	735	14	11	39,2	29	150	160	100
4	12/200	12	200	760	12	10	31,2	22	450	460	130
5	12/300	12	300	135	14	11	47,6	35	450	460	130
6	12/500	12	500	1400	22,4	17	56	41	450	460	130
7	12/800	12	800	1830	14	11	56	41	450	730	160
8	15/900	15	500	1810	22,4	17	64,4	487	450	730	160
9	15/800	15	800	1940	22,4	17	64,4	487	450	730	160

## .2. Parámetros Eléctricos Para Líneas Aéreas Desnuda

### .2.1. Parámetros de la Cruceta

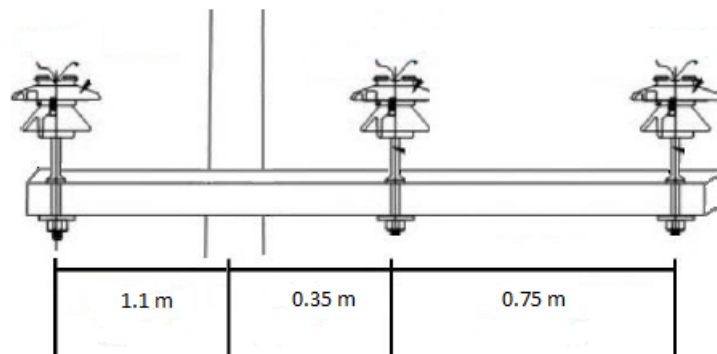


Figura 1: Cruceta de MT Para Líneas Aéreas Desnuda

### .2.2. Conductores de Lineas Aéreas Desnudas

Las características y condiciones que debe satisfacer el suministro del Conductor Desnudo de Aleación de Aluminio, para ser utilizado en Redes Aéreas de Distribución de MT de la ANDE.

Tabla 3: Dimensiones de los Conductores de Aluminio

ÍTEM	DESCRIPCIÓN
1	Conductor Desnudo de Aleación de Aluminio, de 35 mm <sup>2</sup>
2	Conductor Desnudo de Aleación de Aluminio, de 70 mm <sup>2</sup>
3	Conductor Desnudo de Aleación de Aluminio, de 95 mm <sup>2</sup>
4	Conductor Desnudo de Aleación de Aluminio, de 150 mm <sup>2</sup>
5	Conductor Desnudo de Aleación de Aluminio, de 240 mm <sup>2</sup>
6	Conductor Desnudo de Aleación de Aluminio, de 300 mm <sup>2</sup>

Tabla 4: Características Eléctricas

Sección(mm <sup>2</sup> )	Resistencia eléctrica máxima a 20°C en c.c (ohm/km)	(*) Ampacidad (A)
35	0,9367	≥ 160
70	0,4751	≥235
95	0,3523	≥300
150	0,2234	≥ 395
240	0,142	≥ 545
300	0,112	≥ 625

Tabla 5: Diámetro Interno y Externo de los Conductores

Sección (mm <sup>2</sup> )	Nº de alambres	Diámetro de c/alambre (mm)	Tolerancia Diámetro de c/alambre (mm)	Diámetro total del Cnductor, aprox. (mm)	Peso aprox. (Kg/Km)
35	7	2,52	0,03	7,56	95,5
70	19	2,15	0,03	10,75	189,6
95	19	2,52	0,03	12,6	260,4
150	37	2,25	0,03	15,75	405,1
240	37	2,85	0,03	19,95	650
300	61	2,52	0,03	22,68	839,6

## Calculo de la impedancia de linea

### Impedancia del conductor de la línea

$$Z_c = 60 \cdot \ln \left( \frac{2h}{r_c} \right) = 60 \cdot \ln \left( \frac{2 \cdot 9,15}{0,007875} \right) = 465,05 \Omega$$

### Distancia entre la imagen del conductor de fase impactado y el otro conductor de fase

$$D_{c-c} = \sqrt{d_{c-c}^2 + (2 \cdot h_c)^2} = \sqrt{(0,65)^2 + (2 \cdot 9,15)^2} = 18,31m$$

Donde  $d_{c-c}$  es la distancia mas cercana entre conductores.

### Impedancia mutua entre ambos conductores

$$Z_{c-c} = 60 \cdot \ln \left( \frac{D_{c-c}}{d_{c-c}} \right) = 60 \cdot \ln \left( \frac{18,31}{0,65} \right) = 200,294 \Omega$$

### Factor de Acoplamiento entre los conductores

$$K_{c-c} = \frac{Z_{c-c}}{Z_C} = \frac{200,294}{465,05} = 0,4306934$$

### Impedancia del conductor de Guarda

$$Z_{hg} = 60 \cdot \ln \left( \frac{2h}{r_c} \right) = 60 \cdot \ln \left( \frac{2 \cdot 11}{0,00378} \right) = 520,144 \Omega$$

### Distancia entre la imagen del hilo de guarda y el conductor de fase

$$D_{hg-c} = \sqrt{d_{hg-c}^2 + (2 \cdot h_{hg})^2} = \sqrt{(1,85)^2 + (2 \cdot 11)^2} = 22,07m$$

Donde  $d_{hg-c}$  es la distancia mas cercana entre el conductor y el Hilo de Guarda.

### Impedancia mutua entre el hilo de guarda y el conductor de fase

$$Z_{hg-c} = 60 \cdot \ln \left( \frac{D_{hg-c}}{d_{hg-c}} \right) = 60 \cdot \ln \left( \frac{22,07}{1,85} \right) = 148,742 \Omega$$

### Factor de acoplamiento entre el hilo de guarda y el conductor de fase

$$K_{hg-c} = \frac{Z_{hg-c}}{Z_{hg}} = \frac{148,742}{520,144} = 0,28596291$$

### .3. Relevamiento de Datos del Alimentador C0V8



Figura 2: Alimentador C0V8



Figura 3: Alimentador con Hilo de Guarda Suelto C0V8

Tabla 6: Promedio de la puesta a tierra del alimentador C0V08

<b>Distancia de la PT del Hilo de Guarda</b>	
P_H	0
P_H	453
P_H	595
P_H	448
P_H	1050
P_H	484
P_H	475
P_H	1342
P_H	1110
P_H	510
P_H	471
P_H	350
P_H	170
P_H	480
P_H	885
P_H	585
P_H	540
P_H	510
P_H	455
P_H	335
P_H	2140
P_H	910
P_H	1110
P_H	950
P_H	970
P_H	1050
P_H	953
P_H	980
P_H	970
P_H	1100
P_H	1050
P_H	985
<b>Promedio General</b>	<b>938</b>
<b>Distancia del troncal COV08</b>	<b>24416</b>
<b>P_H: Puesta a tierra de los hilos de guarda</b>	

## .4. Relevamiento de Datos del Alimentador CYO04

Tabla 7: Distancia de los Descargadores del Alimentador CYO04

<b>Distancia de Descargadores (m)</b>	
Salida de CYO04	0
Descargador 1	735
Descargador 2	1660
Descargador 3	1362
Descargador 4	1965
Descargador 5	2006
Descargador 6	2010
Descargador 7	2025
Descargador 8	1440
Descargador 9	2105
Descargador 10	2030
Descargador 11	1750
Descargador 12	2111
Descargador 13	1880
Descargador 14	2165
Descargador 15	2050
Descargador 16	2510
Descargador 17	2050
Descargador 18	2020
<b>Promedio</b>	<b>1881,888889</b>



Figura 4: Relevamiento de campo del Alimentador CYO04

<b>ANDE</b> Dirección de Gestión Regional División de Distribución Regional Centro Dpto. de Operación de Distribución Zona Centro						
ESTACIONES	NOMBRE	ALIMENTADOR	AJUSTE	Sección de salida/tramo mm <sup>2</sup>		
CD COV	CORONEL OVIEDO	COV01	300	185-70		
		COV02	300	185-70		
		COV03	360	150-70		
		COV04	300	70		
		COV05	360	185-70		
		COV06	360	185-150		
		COV07	300	150-70		
		COV08	348	185-150		
		COV09	348	185-70		
		COV12	348	185-150		
		CD CYO	CARAYAO	CYO01	260	150-70
				CYO02	350	150-70
CYO03	350			150-70		
CYO04	360			185-150		

Figura 5: Sección de los Alimentadores

# Bibliografía

- [1]
- [2] “Un procedimiento mejorado para la evaluación del rendimiento del rayo indirecto en la línea aérea de transmisión,” *Transacciones IEEE en Power*, vol. 141, no. 3, pp. 1410–1418, 1994.
- [3] M. Angel y R. Pozueta, “Sobretensión en los transformadores,” 2012.
- [4] J. P. Bautista Ríos, “Proyecto de transmisión en 50 kv oroya nueva-pachacutec, departamento de junín,” 1986.
- [5] D. de Estudios de Ingeniería, “Reglamento para instalaciones eléctricas de media tensión,” *Técnica Industrial*, 1975.
- [6] D. de Estudios de Ingeniería de Distribución – DD/ID, “Especificaciones técnicas de distribución – rev. 4,” *Técnica Industrial*, 2016.
- [7] EPM, “Puesta a tierra de redes de distribución eléctrica,” 2014.
- [8] H. Gómez y E. Velilla, “Modelación de puestas a tierra para evaluación de sobretensiones transitorias,” *Medellín. Proyecto de grado, Universidad de Antioquia*, 2002.
- [9] J. Gómez, “Sistemas de puesta a tierra, teoría, diseño medición y mantenimiento,” *León Guanajuato, México*, 2006.
- [10] T. Gonen, *Electric power distribution engineering*. CRC press, 2014.
- [11] S. D. Jiménez Rodríguez, “Relación entre descargas eléctricas atmosféricas a tierra y fallas en líneas de transmisión y distribución de energía-operador centrales eléctricas de norte de santander colombia,” *Ingeniería Eléctrica*.
- [12] M. A. Linares Vargas, “Simulación y análisis de transitorios electromagnéticos de frente rápido debido a descargas atmosféricas en instalaciones eléctricas de alta tensión,” 2013.

- [13] R. D. López, “Protección frente a sobretensiones en instalaciones de baja tensión,” *Técnica Industrial*, vol. 258, p. 42, 2005.
- [14] D. Machaca Cuba, “Evaluación de desempeño de la línea de transmisión 138 kv san gabán-mazuko ante descargas atmosféricas,” 2017.
- [15] M. Á. J. Manchado, “Análisis del comportamiento de líneas aéreas de distribución frente al rayo,” *Universitar Rovira I Virgili*, 2013.
- [16] S. Mejia Villegas, “Subestaciones de alta y extra alta tensión,” *Bogotá: HMV*, 2003.
- [17] O. J. Murillo Sánchez, “Determinación de la relación entre descargas atmosféricas y perturbaciones de corta duración (sags y sobretensiones),” *Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica*, 2012.
- [18] S. D. Orozco Andrade, D. E. Villegas Fuentes, J. J. García González, I. A. Castro Grunauer, G. M. Ruilova Aguirre, y A. R. Gadvay Barzallo, “Estudio, diseño e implementación de las protecciones eléctricas, puestas a tierra y pararrayos para los sistemas de comunicación de la ucsq, ubicado en la facultad de arquitectura.” 2010.
- [19] F. y N. C. A. Paolone, Mario y Rachidi-Haeri, “guía ieee para mejorar el rendimiento de rayos de las líneas aéreas de distribución,” *3<sup>er</sup> Congreso Nacional de Ingeniería Eléctrica*, *Tech.Rep.*
- [20] F. M. L. O. C. Porris, *PRINCIPIOS GENERALES DE ELECTRICIDAD ATMOSFERICA: DESCARGASELECTRICAS*. AREA DE PREDICCIÓN, 1992.
- [21] J. Ramírez y M. Martínez, “Influencia de las sobretensiones por descargas atmosféricas y comportamiento de los sistemas de puesta a tierra en líneas aéreas de transmisión y distribución,” *Apuntes curso tutorial. III Jornadas Latinoamericanas en alta tensión y aislamiento eléctrico*. Caracas, Venezuela, pp. 138–143, 1997.
- [22] E. A. Soto Ríos, “Estudio de las tensiones inducidas por rayos en redes de distribución aéreas ubicadas sobre terrenos no planos,” *Ingeniería Electrónica*, 2014.
- [23] H. Torres Sánchez *et al.*, *El rayo: Mitos, leyendas, ciencia y tecnología*. Unibiblos, 2002.
- [24] E. d. J. Vázquez Muñoz, “Diseño del sistema de puesta a tierra de una subestación eléctrica mediante dos metodologías.” 2017.