



**BUAP**

# **B**ENEMÉRITA **U**NIVERSIDAD **A**UTÓNOMA DE **P**UEBLA

**Facultad de Ingeniería**

**Secretaría de Investigación y Estudios de Posgrado**

**Análisis del efecto transitorio por descargas atmosféricas en redes de distribución**

## **TESIS**

Que para obtener el grado de

**MAESTRO EN INGENIERÍA CON OPCIÓN TERMINAL EN  
SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA**

Presenta:

**Sergio Moreno Martínez**

Director de tesis:

**M.I Victorino Turrubiates Guillen**

Codirector de tesis:

**Dr. Juan Carlos Escamilla Sánchez**

**MAYO 2025**



# Análisis del efecto transitorio por descargas atmosféricas en redes de distribución

## OFICIO DE AUTORIZACIÓN DE TEMA DE TESIS



Oficio No. SIEP/1856/2024

**C. Sergio Moreno Martínez**

Matrícula: 223470014

Alumno de la Maestría en Ingeniería con opción terminal  
en Sistemas Eléctricos de Potencia, 11ª. gen.

Facultad de Ingeniería, BUAP.

Presente

Por medio del presente, el suscrito M.I. Angel Cecilio Guerrero Zamora, Director de la Facultad de Ingeniería, de acuerdo a su solicitud de aprobación de Tema de Tesis, le autoriza desarrollar el tema titulado: **Análisis del efecto transitorio por descargas atmosféricas en redes de distribución**. Para obtener el grado de Maestro en Ingeniería con opción terminal en Sistemas Eléctricos de Potencia. Asignándose como Director de tesis al M.I. Victorino Turrubiates Guillén y Codirector al Dr. Juan Carlos Escamilla Sánchez.

Sin otro particular de momento, reciba un cordial saludo.

Atentamente

"Pensar bien, para vivir mejor"

H. Puebla de Zaragoza, a 19 de octubre de 2024.

**M.I. Angel Cecilio Guerrero Zamora**  
Director



C.c.p. M.I. Victorino Turrubiates Guillén y Dr. Juan Carlos Escamilla Sánchez, Director y Codirector del tema de tesis.

C.c.p. Archivo

JCES/sco\*

Facultad  
de Ingeniería

Bvld. Valsequillo y Av. San Claudio  
s/n, edif. ING - 4, Col. San Manuel,  
Ciudad Universitaria,  
Puebla, Pue. C.P. 72570  
222 229 55 00 Ext. 7610



### DEDICATORIAS

Primeramente, a Dios por permitirme existir cada día, cada paso y cada éxito obtenido ha sido gracias a Él.

A mis padres: por cada esfuerzo realizado, cada sacrificio. Gracias por ser mi fuerza, porque nunca han dejado de creer en mí, a pesar de que hemos estado lejos, ustedes siempre han estado ahí. Gracias por tomarse el tiempo y llevarme siempre en sus oraciones. Gracias por prepararme para enfrentarme ante cualquier situación.

A mis hermanos: Gracias por su cariño, por preocuparse por mí, por darme siempre su apoyo les dedico cada éxito obtenido. A mis sobrinitos por brindarme cada día su alegría y motivarme a seguir adelante.

A mi esposa e hijos: Gracias por estar cada momento que necesité, por ser mi apoyo día a día. Saben que son parte de este triunfo, de corazón muchas gracias, gracias porque nunca dejaron de creer en mí, los amo.



### AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer en primer lugar a mi asesor de tesis, **M.I. Victorino Turrubiates Guillen**, por su confianza y permitirme trabajar con él, por su apoyo y dedicación de tiempo en compartirme su conocimiento.

Un agradecimiento muy especial al **M. en C. Carlos Moran Ramírez** y **M. en C. Ismael Albino Padilla**, por haber compartido su conocimiento y por su tiempo en coadyuvar en revisión y asesoramiento para realizar este trabajo.

Al personal docente y administrativo del área de posgrado de la facultad de Ingeniería de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.

A todos aquellos amigos y compañeros, a cada uno de ustedes gracias por su apoyo, fue un gusto haber compartido con ustedes 2 años de muchas batallas, de muchas risas, pero sobre todo de muchos éxitos, les deseo lo mejor y mucho éxito en su vida profesional.



## ÍNDICE

|                                                                                   |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----|
| OFICIO DE AUTORIZACIÓN DE TEMA DE TESIS.....                                      | I   |
| DEDICATORIAS .....                                                                | II  |
| AGRADECIMIENTOS .....                                                             | III |
| ÍNDICE DE FIGURAS .....                                                           | VI  |
| ÍNDICE DE TABLAS.....                                                             | IX  |
| GLOSARIO.....                                                                     | X   |
| CAPITULO I. INTRODUCCIÓN .....                                                    | 1   |
| 1.1 ANTECEDENTES.....                                                             | 1   |
| 1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....                                              | 2   |
| 1.3 JUSTIFICACIÓN.....                                                            | 3   |
| 1.4.1 OBJETIVO GENERAL.....                                                       | 3   |
| 1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....                                                  | 3   |
| 1.5 METODOLOGÍA .....                                                             | 3   |
| 1.6 ALCANCES Y METAS .....                                                        | 4   |
| CAPITULO II. MARCO REFERENCIAL.....                                               | 5   |
| 2.1 FORMACIÓN DE LAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS.....                                  | 5   |
| 2.1.1 DESCARGAS ELÉCTRICAS ATMOSFÉRICAS .....                                     | 5   |
| 2.1.2 DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EN LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS DE<br>POTENCIA.....       | 5   |
| 2.1.3 TIPOS DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS .....                                       | 5   |
| 2.1.4 FORMACIÓN DE UNA DESCARGA ATMOSFÉRICA.....                                  | 6   |
| 2.1.5 FORMA DE ONDA DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS .....                               | 8   |
| 2.1.6 EFECTOS DE LAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EN LAS REDES DE<br>DISTRIBUCIÓN ..... | 10  |
| 2.2 SOBRETENSIONES .....                                                          | 15  |
| 2.2.1 CONCEPTOS .....                                                             | 15  |
| 2.3 ONDAS VIAJERAS.....                                                           | 22  |
| 2.4 SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN.....                                                  | 24  |
| 2.4.1 DEFINICIÓN DE SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN .....                                 | 24  |
| 2.4.2 LÍNEAS PRIMARIAS DE DISTRIBUCIÓN .....                                      | 25  |
| 2.4.3 REDES SECUNDARIAS DE DISTRIBUCIÓN .....                                     | 26  |
| 2.4.4 TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN .....                                       | 26  |
| 2.4.5 CORTACIRCUITOS FUSIBLES .....                                               | 27  |
| 2.4.6 AISLADORES .....                                                            | 31  |
| 2.5 SUBESTACION TIPO POSTE.....                                                   | 32  |
| 2.6 SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE APARTARRAYOS.....                                   | 32  |
| 2.6.1 DEFINICIÓN DE APARTARRAYOS .....                                            | 32  |
| 2.6.2 TENSIÓN MÁXIMA DE DISEÑO (VM).....                                          | 33  |
| 2.6.3 TENSIÓN NOMINAL .....                                                       | 33  |
| 2.6.4 TENSIÓN RESIDUAL (VR) DE UN APARTARRAYOS .....                              | 33  |
| 2.6.5 TENSIÓN DE DESCARGA POR IMPULSO (VP) DE UN APARTARRAYOS<br>.....            | 34  |



## Análisis del efecto transitorio por descargas atmosféricas en redes de distribución

|                                                                                |     |
|--------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 2.6.6 TENSIÓN RESISTENTE AL IMPULSO NOMINAL POR MANIOBRA (O<br>POR RAYO) ..... | 34  |
| 2.6.7 CORRIENTE DE DESCARGA DEL APARTARRAYOS (ID) .....                        | 34  |
| 2.6.8 APLICACIONES .....                                                       | 34  |
| 2.7 SISTEMA DE TIERRAS .....                                                   | 42  |
| 2.7.1 DEFINICIÓN DE SISTEMA DE TIERRAS .....                                   | 42  |
| 2.7.2 ERROR DE APANTALLAMIENTO EN LA LÍNEA .....                               | 42  |
| 2.7.3 RESISTENCIA A TIERRA DE ELECTRODOS.....                                  | 43  |
| 2.7.4 MATERIAL DE LOS CONDUCTORES DE PUESTA A TIERRA .....                     | 43  |
| CAPITULO III. DESARROLLO .....                                                 | 44  |
| 3.1 DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA ATP-EMTP.....                                     | 44  |
| 3.1.1 DESCRIPCIÓN DEL ENTORNO DE TRABAJO ATP-EMTP .....                        | 45  |
| 3.2 REPRESENTACIÓN DE DESCARGA ATMOSFÉRICA EN ATP .....                        | 46  |
| 3.3 LÍNEA DE DISTRIBUCIÓN DE MEDIA TENSIÓN .....                               | 47  |
| 3.4 DATOS DEL APARTARRAYOS .....                                               | 49  |
| 3.5 CÁLCULO DE LAS RESISTENCIAS VARIABLES A0 Y A1.....                         | 51  |
| 3.6 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE APARTARRAYOS MARCA IUSA FIGURA<br>A4.....      | 52  |
| 3.6.1 PRUEBAS DE CALIBRACIÓN DE APARTARRAYOS EN ATP DRAW,<br>FIGURA 20.....    | 53  |
| 3.7 DATOS DE CORTACIRCUITOS FUSIBLES .....                                     | 56  |
| 3.8 TRANSFORMADOR MONOFÁSICO.....                                              | 56  |
| 3.9 IMPEDANCIA DE POSTE DE CONCRETO .....                                      | 58  |
| 3.10 SISTEMA DE PUESTA A TIERRA.....                                           | 61  |
| 3.10.1 MEDICIÓN DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA EN CAMPO                  | 65  |
| 3.10.2 SISTEMA DE PUESTA A TIERRA EN ATP DRAW.....                             | 70  |
| 3.11 PRIMER ESCENARIO .....                                                    | 71  |
| 3.12 SEGUNDO ESCENARIO .....                                                   | 72  |
| CAPÍTULO IV. RESULTADOS .....                                                  | 74  |
| CONCLUSIONES .....                                                             | 95  |
| RECOMENDACIONES .....                                                          | 96  |
| TRABAJOS FUTUROS .....                                                         | 96  |
| BIBLIOGRAFÍA.....                                                              | 97  |
| APÉNDICES .....                                                                | 100 |



## ÍNDICE DE FIGURAS

|                                                                                                    |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1. Tipos de descargas atmosféricas. ....                                                    | 6  |
| Figura 2. Proceso de la descarga atmosférica. ....                                                 | 8  |
| Figura 3. Forma de onda característica de sobretensión por descarga atmosférica. ....              | 9  |
| Figura 4. Representación del modelo Electrogeométrico. ....                                        | 13 |
| Figura 5. Zonas de impacto de una descarga atmosférica. ....                                       | 15 |
| Figura 6. Clases, formas de onda y tiempos característicos de sobretensiones. ....                 | 18 |
| Figura 7. Clasificación de los sistemas aterrizados. ....                                          | 22 |
| Figura 8. Concepto fundamental de las ondas propagantes. ....                                      | 23 |
| Figura 9. Red primaria trifásica, cuatro hilos. ....                                               | 25 |
| Figura 10. Transformador trifásico. ....                                                           | 27 |
| Figura 11. Cortacircuitos fusible. ....                                                            | 28 |
| Figura 12. Tipos de aisladores. ....                                                               | 31 |
| Figura 13. Apartarrayos de óxidos metálicos de porcelana y polimérico. ....                        | 33 |
| Figura 14. Principales conceptos que intervienen en la localización de los apartarrayos. ....      | 38 |
| Figura 15. Margen de protección de apartarrayos. ....                                              | 41 |
| Figura 16. Forma de onda de corriente de rayo y elemento Heidler type 15 en ATP DRAW. ....         | 46 |
| Figura 17. Formato de opción "Model" para modelo J. Martí. ....                                    | 48 |
| Figura 18. Formato de opción "Date" para modelo J. Martí. ....                                     | 49 |
| Figura 19. Circuito equivalente de modelo IEEE de apartarrayos. ....                               | 50 |
| Figura 20. Modelo de apartarrayos para prueba Ures en ATP DRAW. ....                               | 54 |
| Figura 21. Corriente tipo rayo y voltaje residual de apartarrayos. ....                            | 54 |
| Figura 22. Curva voltaje - Corriente de resistencia variable Ao. ....                              | 55 |
| Figura 23. Curva voltaje - Corriente de resistencia variable A1. ....                              | 55 |
| Figura 24. Cortacircuitos fusibles de 15 Kv en ATP DRAW. ....                                      | 56 |
| Figura 25. Primera parte de la ventana de configuración de transformador modelo BCTAN. ....        | 57 |
| Figura 26. Segunda parte de la ventana de configuración de transformador modelo BCTAN. ....        | 58 |
| Figura 27. Geometría de un poste de hormigón. ....                                                 | 59 |
| Figura 28. Definición de radios y alturas en un PCR-600. ....                                      | 60 |
| Figura 29. Representación de impedancia de PCR-600. ....                                           | 61 |
| Figura 30. Probador Digital de resistencia de tierra UNI-T UT522. ....                             | 62 |
| Figura 31. Estructura del probador y accesorios. ....                                              | 62 |
| Figura 32. Cables para realizar una medición. ....                                                 | 63 |
| Figura 33. Conexiones de los cables para medición. ....                                            | 64 |
| Figura 34. Transformador autoprotegido tipo poste de 10 kVA. ....                                  | 66 |
| Figura 35. Protecciones de media tensión de transformador autoprotegido tipo poste de 10 kVA. .... | 66 |
| Figura 36. Conexión de probador Digital UNI-T UT522. ....                                          | 67 |
| Figura 37. Conexión de los 3 cables probador Digital UNI-T UT522. ....                             | 67 |
| Figura 38. Resistencia de electrodo puesto a tierra de transformador autoprotegido de 10 kVA. .... | 68 |
| Figura 39. Transformador autoprotegido tipo poste de 10 kVA. ....                                  | 68 |
| Figura 40. Protecciones de media tensión de transformador autoprotegido tipo poste de 10 kVA. .... | 69 |
| Figura 41. Conexión de probador Digital UNI-T UT522. ....                                          | 69 |
| Figura 42. Resistencia de electrodo puesto a tierra de transformador autoprotegido de 10 kVA. .... | 70 |
| Figura 43. Representación de resistencia de puesta a tierra en ATP DRAW. ....                      | 70 |
| Figura 44. Unifilar de primer caso de estudio. ....                                                | 71 |



## Análisis del efecto transitorio por descargas atmosféricas en redes de distribución

|                                                                                                                                                |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 45. Modelo en ATP de primer caso de estudio. ....                                                                                       | 72 |
| Figura 46. Unifilar de segundo caso de estudio. ....                                                                                           | 73 |
| Figura 47. Modelo en ATP de segundo caso de estudio. ....                                                                                      | 73 |
| Figura 48. Voltaje pico en el primario del transformador con resistencia de puesta a tierra de 10 Ohms y una corriente de 5 kA de rayo. ....   | 74 |
| Figura 49. Voltaje pico en el secundario del transformador con resistencia de puesta a tierra de 10 Ohms y una corriente de 5 kA de rayo. .... | 75 |
| Figura 50. Corriente pico en la puesta a tierra de 10 Ohms, para una corriente del rayo de 5 kA. ....                                          | 75 |
| Figura 51. Voltaje pico en el primario del transformador con resistencia de puesta a tierra de 10 Ohms y una corriente de 5 kA de rayo. ....   | 76 |
| Figura 52. Voltaje pico en el secundario del transformador con resistencia de puesta a tierra de 10 Ohms y una corriente de 5 kA de rayo. .... | 76 |
| Figura 53. Corriente pico en la puesta a tierra de 10 Ohms, para una corriente del rayo de 5 kA. ....                                          | 77 |
| Figura 54. Voltaje pico en el primario del transformador con resistencia de puesta a tierra de 60 Ohms y una corriente de 5 kA de rayo. ....   | 77 |
| Figura 55. Voltaje pico en el secundario del transformador con resistencia de puesta a tierra de 60 Ohms y una corriente de 5 kA de rayo. .... | 78 |
| Figura 56. Corriente pico en la puesta a tierra de 60 Ohms, para una corriente del rayo de 5 kA. ....                                          | 78 |
| Figura 57. Voltaje pico en el primario del transformador con resistencia de puesta a tierra de 60 Ohms y una corriente de 5 kA de rayo. ....   | 79 |
| Figura 58. Voltaje pico en el secundario del transformador con resistencia de puesta a tierra de 60 Ohms y una corriente de 5 kA de rayo. .... | 79 |
| Figura 59. Corriente pico en la puesta a tierra de 60 Ohms, para una corriente del rayo de 5 kA. ....                                          | 80 |
| Figura 60. Voltaje pico en el primario del transformador con resistencia de puesta a tierra de 10 Ohms y una corriente de 7 kA de rayo. ....   | 80 |
| Figura 61. Voltaje pico en el secundario del transformador con resistencia de puesta a tierra de 10 Ohms y una corriente de 7 kA de rayo. .... | 81 |
| Figura 62. Corriente pico en la puesta a tierra de 10 Ohms, para una corriente del rayo de 7 kA. ....                                          | 81 |
| Figura 63. Voltaje pico en el primario del transformador con resistencia de puesta a tierra de 10 Ohms y una corriente de 7 kA de rayo. ....   | 82 |
| Figura 64. Voltaje pico en el secundario del transformador con resistencia de puesta a tierra de 10 Ohms y una corriente de 7 kA de rayo. .... | 82 |
| Figura 65. Corriente pico en la puesta a tierra de 10 Ohms, para una corriente del rayo de 7 kA. ....                                          | 83 |
| Figura 66. Voltaje pico en el primario del transformador con resistencia de puesta a tierra de 60 Ohms y una corriente de 7 kA de rayo. ....   | 83 |
| Figura 67. Voltaje pico en el secundario del transformador con resistencia de puesta a tierra de 60 Ohms y una corriente de 7 kA de rayo. .... | 84 |
| Figura 68. Corriente pico en la puesta a tierra de 60 Ohms, para una corriente del rayo de 7 kA. ....                                          | 84 |
| Figura 69. Voltaje pico en el primario del transformador con resistencia de puesta a tierra de 60 Ohms y una corriente de 7 kA de rayo. ....   | 85 |
| Figura 70. Voltaje pico en el secundario del transformador con resistencia de puesta a tierra de 60 Ohms y una corriente de 7 kA de rayo. .... | 85 |



## **Análisis del efecto transitorio por descargas atmosféricas en redes de distribución**

|                                                                                                                                                 |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 71. Corriente pico en la puesta a tierra de 60 Ohms, para una corriente del rayo de 7 kA. ....                                           | 86 |
| Figura 72. Voltaje pico en el primario del transformador con resistencia de puesta a tierra de 10 Ohms y una corriente de 10 kA de rayo. ....   | 86 |
| Figura 73. Voltaje pico en el secundario del transformador con resistencia de puesta a tierra de 10 Ohms y una corriente de 10 kA de rayo. .... | 87 |
| Figura 74. Corriente pico en la puesta a tierra de 10 Ohms, para una corriente del rayo de 10 kA. ....                                          | 87 |
| Figura 75. Voltaje pico en el primario del transformador con resistencia de puesta a tierra de 10 Ohms y una corriente de 10 kA de rayo. ....   | 88 |
| Figura 76. Voltaje pico en el secundario del transformador con resistencia de puesta a tierra de 10 Ohms y una corriente de 10 kA de rayo. .... | 88 |
| Figura 77. Corriente pico en la puesta a tierra de 10 Ohms, para una corriente del rayo de 10 kA. ....                                          | 89 |
| Figura 78. Voltaje pico en el primario del transformador con resistencia de puesta a tierra de 25 Ohms y una corriente de 10 kA de rayo. ....   | 89 |
| Figura 79. Voltaje pico en el secundario del transformador con resistencia de puesta a tierra de 25 Ohms y una corriente de 10 kA de rayo. .... | 90 |
| Figura 80. Corriente pico en la puesta a tierra de 25 Ohms, para una corriente del rayo de 10 kA. ....                                          | 90 |
| Figura 81. Voltaje pico en el primario del transformador con resistencia de puesta a tierra de 25 Ohms y una corriente de 10 kA de rayo. ....   | 91 |
| Figura 82. Voltaje pico en el secundario del transformador con resistencia de puesta a tierra de 25 Ohms y una corriente de 10 kA de rayo. .... | 91 |
| Figura 83. Corriente pico en la puesta a tierra de 25 Ohms, para una corriente del rayo de 10 kA. ....                                          | 92 |



### ÍNDICE DE TABLAS

|                                                                                                                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1. Constantes para el cálculo de la distancia disruptiva. ....                                                                                              | 12 |
| Tabla 2. Clasificación de eventos transitorios por rangos de frecuencia.....                                                                                      | 18 |
| Tabla 3. Niveles de aislamiento normalizados para equipo categoría 1. ....                                                                                        | 20 |
| Tabla 4. Valores de pendientes de frente de onda para rangos de tensiones nominales del sistema a proteger. ....                                                  | 38 |
| Tabla 5. Distribución de las corrientes de descarga de apartarrayos en subestaciones.....                                                                         | 39 |
| Tabla 6. Factor para la determinación de la corriente de descarga. ....                                                                                           | 40 |
| Tabla 7. Datos para “Model” para el modelo J. Martí. ....                                                                                                         | 47 |
| Tabla 8. Datos de formato de opción “Date” para el modelo J. Martí .....48                                                                                        |    |
| Tabla 9. Valores de parámetros A0 y A1. ....                                                                                                                      | 52 |
| Tabla 10. Voltajes de las resistencias no lineales A0 y A1.....                                                                                                   | 53 |
| Tabla 11. Características de un poste de hormigón armado. ....                                                                                                    | 59 |
| Tabla 12. Especificaciones técnicas UNI-T UT522. ....                                                                                                             | 64 |
| Tabla 13. Sobretensiones en primario y secundario de transformador en dos escenarios diferentes variando corriente de rayo y resistencia de puesta a tierra. .... | 93 |
| Tabla 14. Corriente drenada por bajante de tierra en dos escenarios diferentes variando corriente de rayo y resistencia de puesta a tierra. ....                  | 94 |



### GLOSARIO

**Flashover:** Descarga disruptiva a través del aire o sobre superficie de un aislante sólido. Entre partes de diferente potencial o polaridad, generada por una tensión eléctrica.

**Corriente de fuga:** Corriente que circula sobre la superficie de un aislador cuando se encuentra energizado.

#### Lista de símbolos

**IEC:** International Electrotechnical comisión

**IEEE:** Institute of Electrical and Electronics Engineers

**CFO:** Voltaje critico de flameo

**DCCIAMBT:** Construcción de instalaciones aéreas en media y baja tensión

**ATP:** Alternative Transient Program

**EMTP:** Electromagnetic Transient Program

**Ng:** Densidad de descargas a tierra.

**CCF:** Cortacircuitos Fusible

**BIL:** Nivel Básico de Aislamiento

**DPS:** Descargador de sobretensión

**kV:** Kilovolt

**kA:** Kiloampere

**kVA:** Kilovolt Ampere

**μs:** Microsegundo

**ms:** Milisegundo

**ZnO:** Apartarrayos de Óxido de Zinc



### **CAPITULO I. INTRODUCCIÓN**

#### **1.1 ANTECEDENTES**

Mantener índices de confiabilidad óptimos en las redes de distribución de media tensión para el suministro de energía eléctrica es una ardua labor, por lo que las descargas atmosféricas tienen una gran influencia en el funcionamiento de las redes de distribución. Al momento se han establecido múltiples normas y estándares para la protección de las líneas de distribución en media tensión ante estos fenómenos atmosféricos. Es necesario mencionar que ningún sistema de distribución se encuentra exento de sufrir alteraciones en su funcionamiento al verse inmerso en una tormenta eléctrica [1].

Las sobretensiones en las redes de media tensión pueden sobrecargar la rigidez dieléctrica de los transformadores de distribución secundarios y otros equipos de línea instalados en la red, lo que provoca fallas. Estas sobretensiones pueden generarse por eventos externos como la caída de descargas atmosféricas o por condiciones internas como fallas, conmutación, ferresonancia, rechazo de carga, pérdida de conexión a tierra o una combinación de dichas condiciones [2].

Usualmente las redes de distribución en media tensión que dan servicio de electricidad al sector residencial por medio de transformadores se ven afectados con sobretensiones producidas por descargas atmosféricas que impactan ya sea directamente sobre la línea o lugares cercanos a la misma. Por lo cual es de suma importancia que los transformadores cuenten con protecciones contra descargas atmosféricas, con el fin de evitar que se superen los niveles de aislamiento estándar del transformador [3].

Las descargas atmosféricas son eventos naturales sobre los cuales el hombre no tiene ni un poder y representan un factor que pone en riesgo la seguridad de los seres vivos y el adecuado funcionamiento de los dispositivos, equipos, sistemas eléctricos y electrónicos [4].

Las descargas atmosféricas generan sobretensiones de naturaleza impulsiva que se propagan por la red, que pueden dañar al propio equipamiento (transformadores, transformadores de medición, etc.) y producir interrupciones del servicio. Dentro de las fallas que puede generar una descarga atmosférica, se encuentra el contorno de los



## **Análisis del efecto transitorio por descargas atmosféricas en redes de distribución**

---

aisladores que sostienen a los conductores de una línea aérea cuando las sobretensiones generadas superan la rigidez dieléctrica del aislamiento.

La implementación de apartarrayos nos permite reducir la posibilidad de falla por los fenómenos antes mencionados, otra ventaja es que no se anexa otro punto posible de falla al sistema, esto se debe a que no están conectados siempre a la línea y se descarta además la posibilidad de falla de los apartarrayos por desgaste en los varistores [5].

Los apartarrayos de línea permiten evadir el flameo del aislamiento por descargas directas o indirectas y por su diseño (con entrehierro externo) se minimiza la posibilidad de flameo en las fases laterales de la misma estructura o el retorno del sobrevoltaje (generación de flameo inverso) desde la misma estructura a otras fases; como puede acontecer con los del tipo permanentes [5].

Los apartarrayos de línea que tienen entrehierro en aire están compuestos por un apartarrayos (10 kA), en el cual los elementos resistivos no lineales son varistores hechos de óxido de Zinc cubiertos de una envoltura de silicón. Además, tiene herrajes de aluminio para lograr sujeción ideal en la cruceta y electrodos del entrehierro en el lado del apartarrayos y también en el lado de línea [5].

### **1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Los transformadores de distribución son indispensables en las redes de distribución, ya que permiten la conversión de niveles de tensión para distribuir la energía eléctrica eficientemente. Sin embargo, siempre están expuestos a distintos riesgos, entre los cuales destacan las descargas atmosféricas que representan una amenaza para la confiabilidad e integridad para los transformadores de distribución.

En las Zonas de Distribución de la División Centro Oriente de la Comisión Federal de Electricidad protege los transformadores de distribución contra descargas atmosférica conforme se especifica la norma de construcción de instalaciones aéreas en media y baja tensión (DCCIAMBT), pero la zona Matamoros instalan la protección contra descargas atmosféricas de los transformadores de una forma alterna, los Ingenieros responsables de esa zona argumentan que al tener instalada la protección contra descargas de esa forma tiene menos salidas de operación del circuito al que está



## **Análisis del efecto transitorio por descargas atmosféricas en redes de distribución**

---

conectado el transformador, en comparación de tener instalada la protección contra descargas atmosféricas como lo especifica la DCCIAMBT.

### **1.3 JUSTIFICACIÓN**

Las descargas atmosféricas impactan en la calidad del suministro eléctrico y que en gran medida están fuera del control humano. Para poder reducir las interrupciones por descargas atmosféricas en toda red eléctrica es indispensable que tanto la selección como la ubicación de los apartarrayos sean eficientes. Cuando se habla de elementos eléctricos tales como transformadores, transiciones etc., la ubicación idónea de los apartarrayos es lo más cercana posible al equipo por proteger.

El suministro eléctrico confiable de energía a los usuarios depende de los transformadores aéreos de distribución por lo tanto estos equipos son de los más protegidos del sistema.

La presencia de fenómenos transitorios en los transformadores ocasionados por la incidencia de las descargas atmosféricas provoca una degradación en sus aislamientos, trayendo como consecuencias, la salida del equipo y la interrupción del servicio.

En este trabajo, se empleará un análisis mediante simulaciones en ATP DRAW, durante el desarrollo de este trabajo se busca aportar criterios y recomendaciones para la mejora de la red de distribución con respecto a la protección contra descargas atmosféricas de transformadores de distribución y tener menos interrupciones de servicio eléctrico y con mejor margen de calidad en cuanto a voltaje.

#### **1.4.1 OBJETIVO GENERAL**

Analizar el efecto transitorio por descargas atmosféricas en transformadores de distribución con distintos arreglos de instalación de apartarrayos, para verificar si la posición en que se instalan los apartarrayos tiene influencia en la salida de operación del circuito al que están conectados los transformadores al momento que los apartarrayos realizan su operación ante una descarga atmosférica.



### **1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Estudiar el comportamiento de la protección contra descargas atmosféricas (apartarrayos), utilizando el modelo matemático propuesto por la IEEE.
- Estudiar el comportamiento de la protección contra sobrecorriente (CCF) para transformadores de distribución.
- Realizar mediciones de sistema de puesta a tierra de transformadores aéreos de distribución.
- Simular mediante el software ATP DRAW, la protección contra descargas atmosféricas de un transformador monofásico de distribución.

### **1.5 METODOLOGÍA**

Para el estudio de protecciones aplicables a redes de distribución aéreas en media tensión para transformadores de distribución ante sobretensiones atmosféricas, es necesario conocer, modelar, probar, analizar y recomendar acciones que mejoren el comportamiento de las protecciones fundamentales de los transformadores aéreos de distribución ante sobretensiones de origen atmosférico desarrollando y comprendiendo los siguientes aspectos:

- Definir caso de estudio.
- Realizar mediciones de sistemas de puesta a tierra de transformadores aéreos de distribución en distintas zonas de la división centro oriente de la CFE.
- Estudiar y seleccionar apartarrayos y cortacircuitos fusibles con información de fabricantes.
- Realizar pruebas y análisis de resultados con simulación de sobrevoltaje por descargas atmosférica con software ATP/EMTP.
- Conclusiones y recomendaciones para mejorar la protección de transformadores de distribución ante sobretensiones atmosféricas.



### **1.6 ALCANCES Y METAS**

El trabajo se centra en el estudio de las protecciones del transformador de distribución ante descargas atmosféricas.

Se van a presentar dos escenarios, el primero trata de un transformador monofásico con apartarrayos aguas arriba a los cortacircuitos fusibles como lo especifica la norma de construcción de instalaciones aéreas en media y baja tensión (DCCIAMBT) con diferentes valores de resistencia de puesta a tierra.

El otro escenario consta de un transformador monofásico con apartarrayos aguas abajo a los cortacircuitos fusibles con diferentes valores de resistencia de puesta a tierra.

Con el presente trabajo se pretende dar recomendaciones para mejorar la protección de transformadores de distribución ante descargas atmosféricas, para tener más continuidad en servicio eléctrico y tener menor número de usuarios afectados ante la presencia de tormentas eléctricas



## **CAPITULO II. MARCO REFERENCIAL**

### **2.1 FORMACIÓN DE LAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS**

#### **2.1.1 DESCARGAS ELÉCTRICAS ATMOSFÉRICAS**

Una descarga atmosférica o “lightning” es un fenómeno meteorológico natural basado en una descarga eléctrica generado por un pulso electromagnético al interior de un condensador natural y que se propaga a través de un material dieléctrico como el aire para el caso de las descargas atmosféricas naturales, en este caso entre la superficie de la tierra y la electrosfera [6].

#### **2.1.2 DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EN LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA**

Las descargas atmosféricas generan sobretensiones que se consideran de origen externo los cuales pueden llegar a tener valores mucho mayores a las tensiones de operación del sistema e incluso mayores a las sobretensiones causadas por maniobra [7].

Una descarga puede ocasionar una falla en la línea, debido a la propagación de esta, la cual puede dañar de manera permanente el equipo al que se encuentra conectado al sistema [7].

#### **2.1.3 TIPOS DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS**

Berger (1978) fue el primero en plantear cuatro tipos de rayos en términos de la dirección del movimiento entre nube y tierra: ascendente o descendente y en términos del signo de la carga del líder que inicia la descarga: positivo o negativo. Esta clasificación según la polaridad de la carga efectiva transferida a tierra o en la dirección del líder inicial se encuentran: el ya mencionado rayo descendente negativo, rayo ascendente negativo, rayo descendente positivo. Nos encontramos con cuatro tipos de descargas atmosféricas los cuales se pueden observar en la figura 1 [8].

- 1) Descarga nube-tierra (descendente) negativa, que es la más habitual
- 2) Descarga tierra-nube (ascendente) positiva
- 3) Descarga nube-tierra (descendente) positiva
- 4) Descarga tierra-nube (ascendente) negativa

La categoría 1 (rayos negativos nube-tierra) es la más común. De acuerdo con estadísticas disponibles a nivel mundial, más del 90% de las descargas son de esta categoría.

Los tipos de descarga 1 y 3 son los que más se han estudiado en el mundo, debido a su interés práctico, son causa de daños en bienes y equipos electrónicos, muertes, perturbaciones en los sistemas de potencia eléctrica y comunicaciones e incendios forestales. Siendo los rayos de categoría 1 los que presentan mayor espectro de campos electromagnéticos [8].

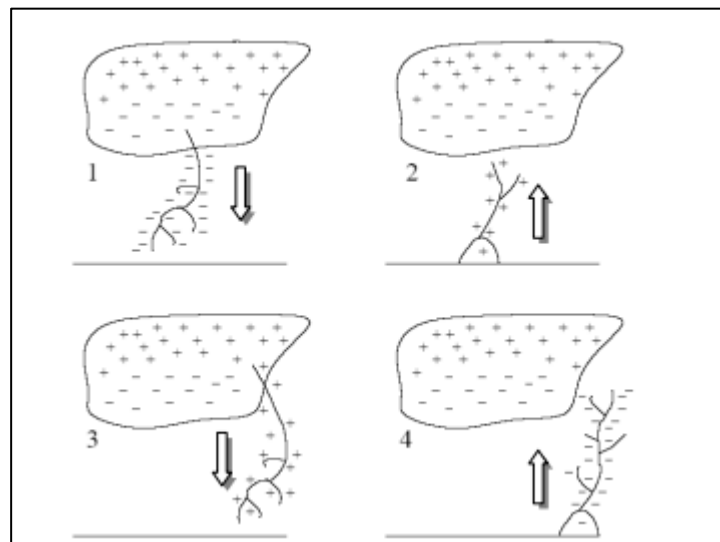


Figura 1. Tipos de descargas atmosféricas.

Los rayos procedentes de una nube tienden a impactar en tierra dentro de un área circular de aproximadamente 10 km de diámetro, dentro de esta área el impacto es casi aleatorio. Existe una probabilidad alrededor del 20% de que una segunda descarga caiga a 2, 3 o 4 km de la primera, y existe una probabilidad más pequeña de que una descarga caiga a unos 8 km o más de la primera, aunque estas descargas subsecuentes son comúnmente menores en magnitud que la primera descarga de retorno [8].

### 2.1.4 FORMACIÓN DE UNA DESCARGA ATMOSFÉRICA

El proceso de la descarga atmosférica comienza dentro de la nube. Se genera una separación de cargas dentro ella, quedando su parte superior con carga positiva y la



## **Análisis del efecto transitorio por descargas atmosféricas en redes de distribución**

---

inferior con carga negativa. Debido al gran tamaño que tiene la tierra en proporción a la nube, el gradiente de carga que se genera debajo de ella es muy alto, lo que provoca que las cargas se muevan hacia la tierra. Este movimiento que se inicia se le llama líder descendente [9].

La descarga del líder comienza con un valor reducido de corriente, entre 100 y 1000A, y se va propagando de a saltos totalmente aleatorios entre 50 y 100 m, a una velocidad de aproximadamente 0,05 % la velocidad de la luz, pudiendo incluso ramificarse. Entre cada paso se generan pausas de aproximadamente 50  $\mu$ s. Cuando el líder se encuentra próximo a la tierra, el campo eléctrico que induce localmente en ella aumenta, generando una acumulación local de cargas que son impulsadas hacia el, formando así una especie de líder ascendente. Cuando el líder ascendente conecta con la descendente queda formado un canal ionizado entre la nube y tierra, por el cual se produce una descarga rápida de retorno desde la tierra hacia la nube [9].

Esta corriente es de valor mucho más elevado, de decenas de kA, dado que la carga que sube es aproximadamente igual a la que bajo durante la descarga líder, pero la velocidad del movimiento de cargas es mucho mayor [9].

En la figura 2 se puede ver de forma esquemática el proceso de la descarga. En la parte de la izquierda de la figura se ve como queda la separación de cargas en la nube. Una vez que la acumulación de cargas en la parte inferior de la misma supera cierto valor de gradiente de campo, comienza a formarse el líder descendente. Este se propaga hacia la tierra hasta alcanzar el líder ascendente, momento en el cual se genera la primera descarga de retorno desde la tierra hacia la nube a través del canal ionizado [9].

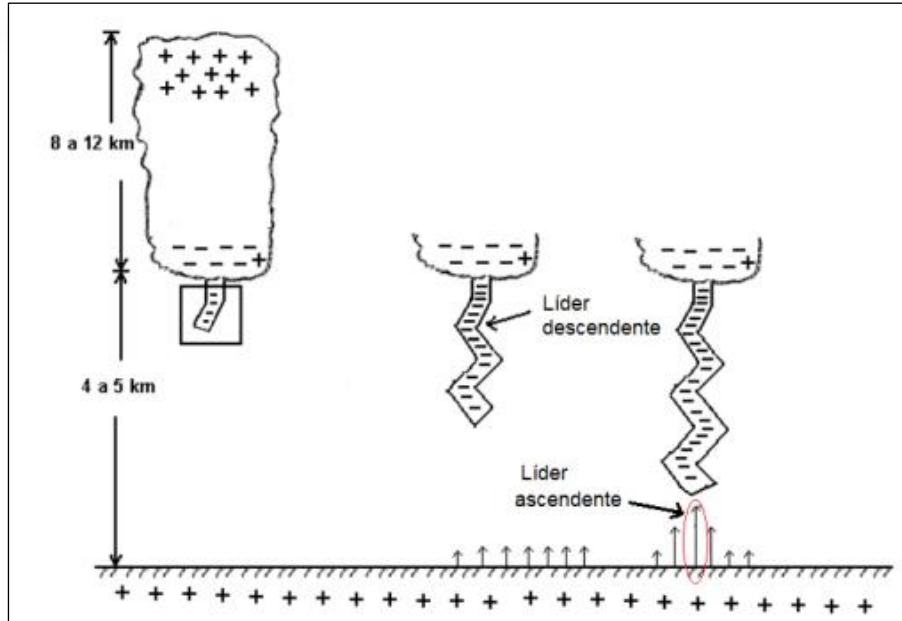


Figura 2. Proceso de la descarga atmosférica.

### 2.1.5 FORMA DE ONDA DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Uno de los parámetros más importantes que se relacionan con la descarga atmosférica, es la forma de onda, debido a que el aislamiento de línea de transmisión responderá de acuerdo con la tensión. Las corrientes de descarga atmosférica son clasificadas como de frente de onda rápido que tiene los siguientes límites [7];

$$0.3 < t_f < 30 \mu s$$

$$0.3 < t_c < 300 \mu s$$

$t_f$ =tiempo de frente de la onda de corriente de descarga

$t_c$ =tiempo medio de intensidad de la cresta de la corriente

La forma de onda normalizada de impulso por rayo es un impulso que tiene un tiempo virtual a la cresta de  $1.2 \mu s$  y un tiempo a la mitad de su valor de  $50 \mu s$  [10].

Esta forma de onda de tensión (Figura 3) es muy parecida a la forma de onda de corriente, ya que ambas ondas están relacionadas a través de la impedancia característica de línea [10].

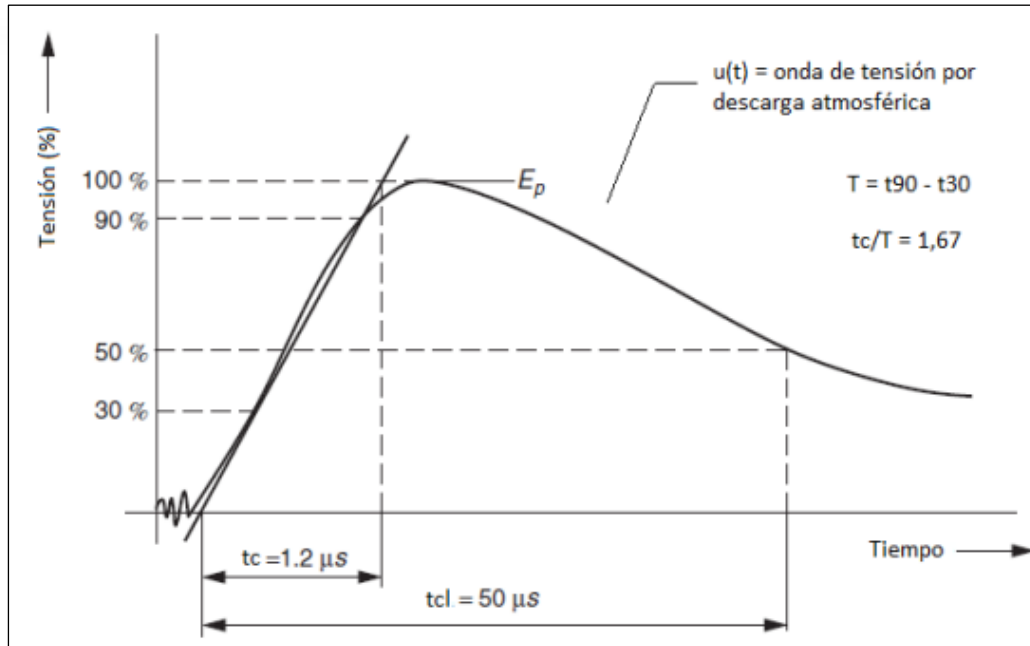


Figura 3. Forma de onda característica de sobretensión por descarga atmosférica.

El tiempo de crecimiento ( $t_c$ ), establecido en  $1,2 \mu s$ , se define como 1,67 veces el intervalo de tiempo entre el valor al 30 % y al 90 % del valor pico.

El tiempo de cola ( $t_{cl}$ ), establecido en  $50 \mu s$ , se define como aquel tiempo en que el valor de la onda alcanzó el 50 % de su valor de pico, en su fase descendente.

En cuanto al análisis de estas sobretensiones, hay que tener en cuenta la forma en que se generan las mismas, estando este hecho relacionado con la forma en que la descarga impacta sobre la instalación. En tal sentido, se determinan las siguientes categorías:

- Impacto directo de la descarga sobre los conductores de una línea, generando así una onda de corriente que se propaga a través de esta.
- Impacto de la descarga en las adyacencias de una línea, no haciéndolo sobre los conductores de esta.
- Impacto directo de la descarga sobre las torres o hilos de guarda de una línea.



### 2.1.6 EFECTOS DE LAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EN LAS REDES DE DISTRIBUCIÓN

Las descargas atmosféricas de líneas de media tensión pueden contribuir entre el 50% y el 80% de las fallas de equipos de media tensión. Muchas de las fallas de subestaciones tipo poste relacionadas con descargas atmosféricas son a causa de descargas directas de rayos sobre la red de media tensión [11].

Las descargas atmosféricas generan sobretensiones de naturaleza impulsiva que se propagan por la red, que pueden dañar al propio equipamiento (transformadores, transformadores de medición, etc.) y producir interrupciones del servicio. Dentro de las fallas que puede generar una descarga atmosférica, se encuentra la debida al contorno de los aisladores que sostienen a los conductores de una línea aérea (flashover) cuando las sobretensiones generadas superan la rigidez dieléctrica del aislamiento. Tres mecanismos pueden dar lugar a este fenómeno [12]

- 1) Descargas directas en el conductor de fase.
- 2) Descargas sobre las torres o los hilos de guardia.
- 3) Descargas que impactan en la cercanía de la línea.

#### 2.1.6.1 DESCARGAS DIRECTAS A LA LÍNEA

El número de rayos sobre la línea depende de la actividad de descarga para una cierta región. Esta actividad se define como densidad de rayos a tierra, denotado por  $N$  y es el número de rayos por unidad de área (normalmente  $\text{Km}^2$ ) y por año [13].

Para estimar el número de rayos que golpean directamente a una línea, se puede usar dos métodos diferentes.

- 1) Considerar el número de golpes directos con base a una función. En uno se propone la siguiente relación para líneas de distribución ecuación 1.

$$N = N_g \left( \frac{28h^{0.6} + b}{10} \right) \dots\dots\dots(1)$$

Donde

$N$ : Número de descargas en la línea (por  $100\text{Km}^2$  de línea).



$N_g$ : Densidad de rayos en la tierra ( $\text{Km}^2/\text{año}$ ).

b: Distancia horizontal entre los conductores exteriores (m).

h: Altura de la línea sobre la tierra (m).

2) Modelo Electrogeométrico: La base del método electrogeométrico es el concepto de distancia disruptiva o de cebado (striking distance), definida como la distancia entre la punta del líder escalonado y la estructura a tierra (o tierra) para la cual el campo eléctrico alcanza un valor tal que inevitablemente se producirá la disrupción en forma inmediata entre dichos puntos. De acuerdo con este modelo el líder escalonado no “decide” donde impactar hasta que se encuentre a cierta distancia crítica de alguna estructura puesta a tierra, momento en el que se produce la disrupción o salto final. La distancia disruptiva a terreno plano depende únicamente del potencial de la punta del líder escalonado, que a su vez depende de la distribución de carga en el canal guía. Además, como la corriente de retorno es el resultado de la neutralización de la carga acumulada en el canal, su valor pico dependerá de dicha distribución de carga. Es decir que cuanto mayor sea la carga del líder, mayor será la corriente de retorno. Esta relación entre el potencial del líder, la carga y la corriente de retorno hace posible expresar a la distancia disruptiva como una función de la corriente pico presunta. De esta forma, la distancia disruptiva se reduce al disminuir el valor pico de la corriente de retorno. Consecuentemente, para que se produzca el impacto a cierta estructura, un canal guía con menor corriente de retorno debe acercarse mucho más que un canal asociado a una mayor corriente.

La expresión general de la distancia disruptiva en función del pico de la primera corriente de retorno resulta ser la ecuación 2 [12]:

$$r = AI^b \dots\dots\dots(2)$$

Donde:

r: Radio de atracción ( $R_g$  para la tierra,  $R_c$  para los conductores).

I: Corriente pico prospectiva del rayo.

A,b: Parámetros del modelo electrogeométrico.

En general  $R_g$  y  $R_c$  no son consideradas de igual manera ( $R_g$ =tierra-rayo,  $R_c$ =conductor-rayo), como se muestra en la tabla 1. El punto esperado del golpe de rayo es aquel cuya



## Análisis del efecto transitorio por descargas atmosféricas en redes de distribución

zona de atracción sea cruzada primero por la trayectoria considerada del rayo. Nótese que cada arco está calculado de acuerdo con la corriente prospectiva del rayo. Normalmente, las distancias a los hilos de guarda y a los conductores son consideradas iguales [13].

| Fuente                                                                                                                                              | Tierra   |          | Conductor |          |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|----------|-----------|----------|
|                                                                                                                                                     | <i>A</i> | <i>b</i> | <i>A</i>  | <i>b</i> |
| Wagner                                                                                                                                              | 14.2     | 0.42     | 14.2      | 0.42     |
| Young                                                                                                                                               | 27.0     | 0.32     | (1)       | 0.32     |
| Armstrong, Whitehead                                                                                                                                | 6.0      | 0.8      | 6.7       | 0.8      |
| Brown, Whitehead                                                                                                                                    | 6.4      | 0.75     | 7.1       | 0.75     |
| Love                                                                                                                                                | 10       | 0.65     | 10        | 0.65     |
| IEEE 1243                                                                                                                                           | (2)      | 0.65     | 10        | 0.65     |
| IEEE 998                                                                                                                                            | 8        | 0.65     | 8         | 0.65     |
| (1):<br>$A=27$ para $h<18$ [m]<br>$A=12000/(462-Ht)$ para $h>18$ [m]<br><br>(2) $A=(3.6+1.7*\ln(43-yc))$ para $h<40$ [m]<br>$A=5.5$ para $h>40$ [m] |          |          |           |          |

Tabla 1. Constantes para el cálculo de la distancia disruptiva.

La aplicación del modelo electrogeométrico, se indica en la figura 4 para el caso de dos conductores sobre terreno plano, donde el más elevado representa al hilo de guarda. Las distancias disruptivas fueron determinadas para cierto valor de la corriente de retorno. Se graficaron arcos de radio centrados en los conductores y una línea horizontal a la distancia del terreno. Si un líder descendente, que tiene cierta corriente de retorno para la cual las distancias fueron graficadas, toca el arco entre A y B, se asume que el rayo impactará en el conductor de fase. En cambio, si toca primero el arco entre B y C se asume que impactará en el hilo de guarda. Más allá del punto A el rayo impactará en el terreno [12].

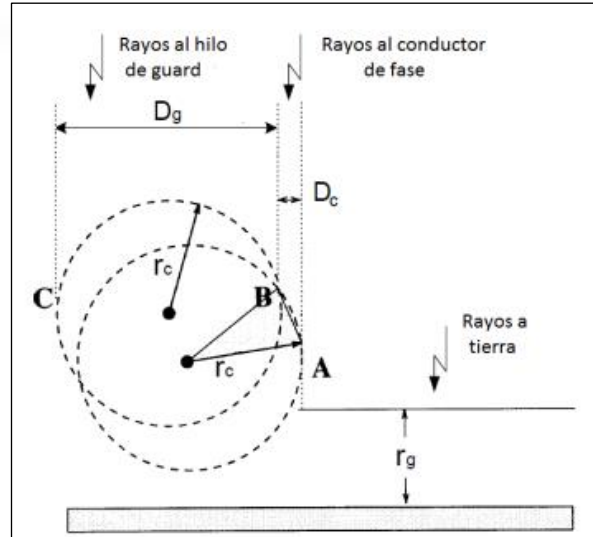


Figura 4. Representación del modelo Electrogeométrico.

## 2.1.6.2 DESCARGAS CERCANAS

El máximo voltaje inducido en una línea debido a una descarga cercana es una función de diferentes parámetros, como son: valor pico de la corriente de rayo, el tiempo de cresta, la velocidad de retorno del rayo, la altura de la línea y la distancia entre la línea y el punto de golpe de rayo. Si el valor de este voltaje es mayor que el nivel básico de aislamiento (BIL) de la línea, puede existir un flameo [13].

Según la fórmula simplificada de Rusck, el voltaje máximo  $V_{max}$  que se induce en una fuente de alimentación la línea en el punto más cercano al trazo viene dada por [14]:

$$V_{max} = \frac{Z_0 I_0 h}{y} \left( 1 + \frac{v}{c} \frac{1}{\sqrt{2 - (v/c)^2}} \right) \dots\dots\dots (3)$$

Donde:

$Z_0$ : Impedancia del canal de la descarga 30 ohm o  $\frac{1}{(4\pi\sqrt{\mu_0/\epsilon_0})}$ .

$I_0$ : Es el pico de la primera corriente de retorno (kA).

$h$ : Es la altura promedio de la línea de distribución sobre el nivel del suelo (m).

$y$ : Es la distancia más cercana entre el rayo y la línea (m).

$v$ : Es la velocidad de retorno (m/s), típicamente  $c/3$ .



c: Es la velocidad de la luz en el espacio libre  $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ .

La distancia máxima  $y_{\max}$  para cada pico de corriente, se calcula en el intervalo en el que los rayos pueden producir una descarga disruptiva del aislamiento de la línea de distribución [14].

Esto se obtiene resolviendo la ecuación 3, tomando  $I_0$  como el límite de corriente inferior del intervalo, y tomando  $v_{\max} = 1.5 * CF0$ . El factor 1,5 es una aproximación que tiene en cuenta el aumento de la curva tensión-tiempo de aislamiento. Esta aproximación se utiliza para cálculos de tensión inducida, OHGW y espaciamiento de apartarrayos. Se supone que estos voltajes tienen formas de onda de duración mucho más corta que la onda de prueba estándar de 1.2/50  $\mu\text{s}$  [13].

La distancia mínima  $y_{\min}$  para la cual el rayo no se desviará hacia la línea se calcula a partir de la ecuación 4. Para esto,  $r_s$  y  $r_g$  se calculan tomando la parte superior límite del intervalo actual [13].

$$y_{\min} = \sqrt{r_s^2 - (r_g - h)^2} \dots\dots\dots(4)$$

Donde:

$y_{\max}$ : Distancia mínima a la que debe caer un rayo (m).

$r_s$ : Radio de impacto directo del rayo sobre la línea (m).

$r_g$ : Radio de impacto del rayo sobre la tierra (m).

$h$ : Altura promedio de la línea de distribución con respecto al suelo (m).

La ecuación para  $y_{\min}$  se obtiene del modelo electrogeométrico para impactos de rayos, donde los radios de impacto ( $r_s$  y  $r_g$ ) ecuación 5 y ecuación 6 [14]:

$$r_s = 10 * I_0^{0.65} \dots\dots\dots(5)$$

$$r_g = 0.9 * r_s \dots\dots\dots(6)$$

Donde:

$r_s$ : Radio de impacto directo del rayo sobre la línea (m).

$r_g$ : Radio de impacto del rayo sobre la tierra (m).

$I_0$ : Es el pico de la primera corriente de retorno (kA).

En la figura 5 representa un esquema de impacto de una descarga atmosférica, tomando como eje referencia ( $Y=0$ ) el trazado de la línea, las distancias mínimas y máximas ( $y_{min}$  y  $y_{max}$ ) y finalmente se define las zonas de impactos directos y la de impactos indirectos [3].

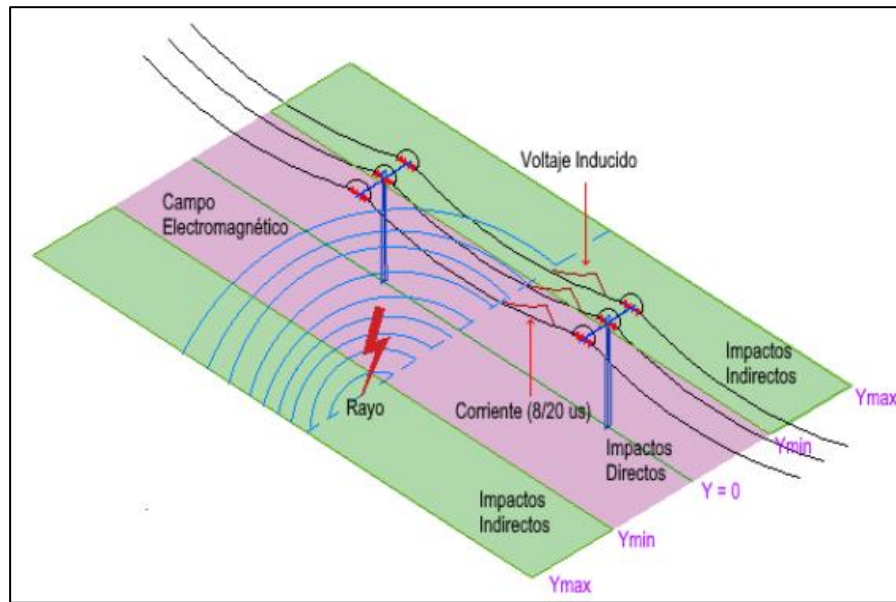


Figura 5. Zonas de impacto de una descarga atmosférica.

## 2.2 SOBRETENSIONES

### 2.2.1 CONCEPTOS

Los sobrevoltajes o también llamado sobretensiones son un incremento de voltaje que perturba la red de energía eléctrica a través de las líneas de transmisión o distribución causando fallas en el suministro de energía como suspensión del servicio. Las sobretensiones en ocasiones causan daño no solo por la magnitud si no por la longitud de onda [15].

Las sobretensiones transitorias se dan por las operaciones de maniobra de apertura o de cierre cambiando las condiciones de operación al que está configurado la red, también



las descargas eléctricas atmosféricas pueden perturbar la red ocasionando daños a los equipos de sistema de potencia, este tipo de descargas se pueden proteger por medio de los hilos de guarda o de blindaje que están conectados a la tierra a través de las torres de transmisión [15].

**Tensión nominal de un sistema trifásico (Vn):** Valor eficaz de la tensión entre fases con que se designa el sistema y al que están referidas ciertas características de operación de este [10].

**Tensión máxima de un sistema trifásico (Vm):** valor eficaz de la tensión de operación entre fases mas alto el cual ocurre en condiciones normales de operación, a cualquier tiempo y en cualquier punto del sistema [10].

**Tensión máxima de diseño del equipo (Vd):** Valor eficaz de la tensión entre fases más alto para el cual está diseñado el equipo con respecto a su aislamiento y a otras características asociadas con esta tensión. En las normas relativas al equipo [10].

**Sobretensión:** Cualquier valor de tensión entre un conductor de fase y tierra o entre conductores de fase, que tiene un valor pico que excede la correspondiente tensión máxima del sistema o del equipo, como se muestra en la ecuación 7 y 8 [7].

$$U_{st}^{ft} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} U_m \dots\dots\dots(7)$$

$$U_{st}^{ff} = \sqrt{2} U_m \dots\dots\dots(8)$$

Donde

$U_{st}^{ft}$  = Valor de cresta de la sobretensión fase a tierra.

$U_{st}^{ff}$  = Valor de cresta de la sobretension fase a fase

Sobretensión fase a tierra en p.u: Relación de la sobretensión fase a tierra del sistema

$U_{st}^{ft}$  sistema con la sobretensión fase a tierra de referencia  $U_{st}^{ft}$  ecuación 9 [7].

$$U_{st}^{ft} p. u = \frac{U_{st}^{ff} sistema}{U_{st}^{ff}} \dots\dots\dots (9)$$

De acuerdo con su forma y duración (Figura 6), las sobretensiones se clasifican en:



**Sobretensión temporal:** Es una tensión oscilatoria de más larga duración que un periodo de la frecuencia del sistema, la cual no está amortiguada o tiene un débil amortiguamiento [10].

**Sobretensión transitoria:** Sobretensión de corta duración, que no sobrepasa de unos milisegundos, oscilatoria o no, generalmente fuertemente amortiguada. Las sobretensiones transitorias pueden ser inmediatamente seguidas por sobretensiones temporales. Si es así, los dos tipos de sobretensiones se consideran como acontecimientos separados.

Sobretensiones de corta duración de pocos milisegundos, la cual puede ser oscilatoria o no oscilatoria, usualmente altamente amortiguada. Puede estar sobrepuesta a una sobretensión temporal, estas sobretensiones se clasifican de la siguiente forma [10].

**Sobretensiones de frente lento (maniobra):** Sobretensión transitoria usualmente unidireccional, con duración en el frente entre  $20\ \mu\text{s}$  y  $5000\ \mu\text{s}$  y duración en la cola menor a  $20\ \mu\text{s}$  [16].

**Sobretensiones de frente rápido (rayo):** Sobretensión transitoria, usualmente unidireccional, con duración en el frente de entre  $0.1\ \mu\text{s}$  y  $20\ \mu\text{s}$ , y duración de la cola de  $300\ \mu\text{s}$  [16].

**Sobretensiones de frente muy rápido:** Sobretensión transitoria unidireccional con duración en el pico de  $0.1$  a  $0.5\ \mu\text{s}$  con una duración total menor de  $3\ \mu\text{s}$  y con oscilaciones superpuestas de frecuencias desde  $30\ \text{KHz}$  hasta  $100\ \text{MHz}$ .



## Análisis del efecto transitorio por descargas atmosféricas en redes de distribución

| Clases de sobrevoltajes                             | Baja Frecuencia                                                     |                                                                                        | Transitorios                                                                       |                                                                           |                                                                                                                    |
|-----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                     | Permanente                                                          | Temporal                                                                               | Frente lento                                                                       | Frente Rápido                                                             | Frente Muy Rápido                                                                                                  |
| Forma de onda de voltajes y sobrevoltajes           |                                                                     |                                                                                        |                                                                                    |                                                                           |                                                                                                                    |
| Rango de formas de onda de voltajes y sobrevoltajes | $f = 50 \text{ Hz or } 60 \text{ Hz}$<br>$T_1 \geq 3 \text{ 600 s}$ | $10 \text{ Hz} < f < 500 \text{ Hz}$<br>$0,02 \text{ s} \leq T_1 \leq 3 \text{ 600 s}$ | $20 \mu\text{s} < T_p \leq 5 \text{ 000 } \mu\text{s}$<br>$T_2 \leq 20 \text{ ms}$ | $0,1 \mu\text{s} < T_1 \leq 20 \mu\text{s}$<br>$T_2 \leq 300 \mu\text{s}$ | $T_r \leq 100 \text{ ns}$<br>$0,3 \text{ MHz} < f_1 < 100 \text{ MHz}$<br>$30 \text{ kHz} < f_2 < 300 \text{ kHz}$ |
| Parámetros de voltaje estandarizado                 |                                                                     |                                                                                        |                                                                                    |                                                                           | a                                                                                                                  |
|                                                     | $f = 50 \text{ Hz or } 60 \text{ Hz}$<br>$T_1^a$                    | $48 \text{ Hz} \leq f \leq 62 \text{ Hz}$<br>$T_1 = 60 \text{ s}$                      | $T_p = 250 \mu\text{s}$<br>$T_2 = 2 \text{ 500 } \mu\text{s}$                      | $T_1 = 1,2 \mu\text{s}$<br>$T_2 = 50 \mu\text{s}$                         |                                                                                                                    |
| Ensayo de voltaje tolerado normalizado              | a                                                                   | Ensayo a frecuencia industrial de corta duración                                       | Ensayo de impulso tipo maniobra                                                    | Ensayo de impulso tipo rayo                                               | a                                                                                                                  |

Figura 6. Clases, formas de onda y tiempos característicos de sobretensiones.

En la tabla 2 muestra las clasificaciones de eventos transitorios por rangos de frecuencias [17].

| Tipo de sobretensiones              | Rango de frecuencias | Características del fenómeno                                                  |
|-------------------------------------|----------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| Sobretensiones temporales           | 0.1 Hz - 3 kHz       | Oscilación de baja frecuencia.                                                |
| Sobretensiones por maniobra         | 50/60 Hz - 20 kHz    | Sobretensiones originadas por maniobra.                                       |
| Sobretensiones de frente rápido     | 10 kHz - 3MHz        | Sobretensiones por descargas atmosféricas.                                    |
| Sobretensiones de frente muy rápido | 100 kHz - 50 MHz     | Sobretensiones por reencendido y fallas en subestaciones aisladas en gas SF6. |

Tabla 2. Clasificación de eventos transitorios por rangos de frecuencia.



**Sobretensión estadística de frente lento (o de frente rápido):** Es un transitorio de frente lento (o frente rápido) que se presenta en un punto del sistema, cuyo valor de cresta tiene una probabilidad de excederse del 2% [10].

**Sobretensión convencional máxima de frente lento (o frente rápido):** es un transitorio de frente lento (o frente rápido) que se presenta en un punto del sistema, cuyo valor de cresta es improbable que se exceda. Para el caso de equipo protegido este transitorio será relacionado con el nivel de dispositivo de protección [10].

**Tensiones o sobretensiones representativas:** Son aquellas tensiones supuestas que producen el mismo efecto dieléctrico sobre el aislamiento, como ocurre con las tensiones en servicio dependiendo estas de sus diferentes orígenes [10]. Se designa como:

- Tensión de aguante supuesta o convencional. Cuando la probabilidad de referencia se supone de 100%.
- Tensión de aguante estadístico. Cuando la probabilidad de referencia de 90%.

**Tensión de aguante para coordinación:** Es el valor de la tensión de aguante del aislamiento, para cada clase de tensión referido a las condiciones reales de servicio, que cumple con el criterio de comportamiento [7].

**Tensión de aguante requerida:** Es el valor de tensión de aguante que se requiere para asegurar que el aislamiento al ser instalado en condiciones reales de servicio cumpla con la tensión de aguante para coordinación de todo el tiempo de servicio. La tensión de aguante requerida debe considerar todos los elementos (condiciones atmosféricas normalizadas, configuración del aislamiento, número y condiciones de los objetos probados como son equipos nuevos, envejecimiento artificial, etc.), además de la tensión de la prueba de aguante normalizado, seleccionada para verificarlo [10].

### **Coordinación de aislamiento**

Es la selección de la tensión de aguante del equipo e instalación en relación con las sobretensiones que puedan presentarse en un punto del sistema, considerando las características de los dispositivos de protección, para reducir a un nivel técnico y económicamente aceptable, la probabilidad de que los esfuerzos dieléctricos puedan ocasionar falla del aislamiento y/o afectar la continuidad del servicio [10].



### Nivel básico de aislamiento por impulso de rayo (NBAI)

Conocido por sus siglas en inglés (BIL), es el valor de cresta de la sobretensión que como máximo pueda soportar un aislamiento sin que se produzca una descarga disruptiva de un aislante

$$BIL = K_e * NPR$$

Donde

$K_e$  = Factor de seguridad según el nivel de tensión

NPR = Nivel de protección para impulso atmosférico

En la tabla 3 se muestra niveles de aislamiento normalizados para equipo categoría 1 [10].

| Tensión nominal del sistema $V_n K_n$ (eficaz) | Tensión máxima de diseño del equipo $V_d - K_v$ (eficaz) | Tensión de aguante nominal a 60 Hz de fase a tierra kV (eficaz) | Tensión de aguante nominal de impulso por rayo (NBAI) |
|------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| 4.4 (1)                                        | 5.5                                                      | 19                                                              | 45<br>60<br>75                                        |
| 6.9 (1)                                        | 7.2                                                      | 20                                                              | 40<br>60                                              |
| 13.8 (2)                                       | 15.5                                                     | 35                                                              | 75<br>95<br>110                                       |
| 23 (2)                                         | 27                                                       | 50<br>60                                                        | 95<br>125<br>150                                      |
| 34.5 (2)                                       | 38                                                       | 70                                                              | 125<br>150<br>200                                     |
| 44 (1)                                         | 52                                                       | 95                                                              | 250                                                   |
| 69 (2)                                         | 72.5                                                     | 140                                                             | 325<br>350                                            |
| 85 (3), 115 (2)                                | 123                                                      | 185<br>230                                                      | 450<br>550                                            |
| 138 (3)                                        | 145                                                      | 230<br>275                                                      | 550<br>650                                            |
| 150 (1), 161 (3)                               | 1700                                                     | 275<br>325                                                      | 650<br>750                                            |
| 230 (2)                                        | 245                                                      | 360<br>395<br>460                                               | 850<br>900<br>950<br>1050                             |

Tabla 3. Niveles de aislamiento normalizados para equipo categoría 1.



**Aislamiento nominal:** Es el conjunto de tensiones de aguante nominales suficientes para comprobar que si cumplen con todas las tensiones de aguante requeridas de aislamiento [10], para:

- a) Equipo con su tensión máxima  $\leq 245$  kV. El aislamiento nominal comprende las tensiones de aguante nominales de impulso por rayo y la de corta duración a la frecuencia del sistema.
- b) Equipo con su tensión máxima  $> 245$  kV. El aislamiento nominal comprende las tensiones nominales de aguante de impulso por maniobra y por rayo.

Factor de falla tierra  $K_{ft}$ : El factor de falla a tierra se define de acuerdo con la ecuación 10 [7].

$$K_{ft} = \frac{\text{valor máximo de la tensión de fase a tierra durante la falla (fases sanas)}}{\text{valor eficaz de la tensión de fase a tierra (en condiciones de operación)}} \dots\dots\dots (10)$$

Este factor es una relación numérica mayor de 1 y caracteriza en términos generales las condiciones de conexión a tierra en un sistema, como es visto desde el punto seleccionado, independientemente del valor de tensión de operación en ese punto, en la figura 7 muestra el factor de conexión a tierra a utilizar dependiendo el tipo de sistema [10].

| Tipo de sistema                                          |   | Límite de los valores $X0/X1$ | Límite de los valores $R0/X1$ | Coefficiente de aterrizamiento en % |
|----------------------------------------------------------|---|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|
| A<br>T<br>E<br>R<br>R<br>I<br>Z<br>A<br>D<br>O           | A | $\ll 3$                       | $\ll 1$                       | $\approx 70$                        |
|                                                          | B | $\leq 3$                      | $\leq 1$                      | 80                                  |
|                                                          | C | $> 3$                         | $> 1$                         | 100                                 |
| N<br>O<br>A<br>T<br>E<br>R<br>R<br>I<br>Z<br>A<br>D<br>O | D | $-\infty$ a $-40$             | $\approx 0$                   | 100                                 |
|                                                          | E | $-40$ a $0$                   | .....                         | Requiere tensión nominal especial   |

**Notas:**

Tipo A - Es un sistema compuesto de 4 hilos, multiterrizado directamente y con neutro común, se utiliza en algunos sistemas de distribución.

Tipo B - Es un sistema conectado en estrella con el neutro efectivamente conectado a tierra.

Tipo C - Es un sistema conectado en estrella y aterrizado a través de resistores, reactores, neutralizadores o transformadores de tierra.

Tipo D - Es un sistema compuesto de circuitos no aterrizados (delta o estrella).

Tipo E - Es un sistema compuesto de circuitos no aterrizados de gran longitud y con capacitancia elevada.

Figura 7. Clasificación de los sistemas aterrizados.

Tensión máxima de operación continua: máxima tensión eficaz a frecuencia del sistema que puede ser aplicada entre los bornes de la línea y tierra del descargador en forma continua [7].

## 2.3 ONDAS VIAJERAS

El análisis de ondas viajeras permite modelizar la propagación de impulso atmosférico en una línea de transporte, y caracterizar el comportamiento de los impulsos ante la presencia de una discontinuidad de línea o conexiones a esta [18].

Al producirse el impacto de una descarga atmosférica en la estructura o en los conductores de la línea, se producen ondas que viajan por las líneas de transporte aéreas

a una velocidad muy próxima a la velocidad de la luz hasta alcanzar un punto de discontinuidad, es decir, un cambio en la impedancia característica del circuito, en donde surgen ondas incidentes (voltaje y corriente) que van hacia adelante de la línea y ondas reflejadas (voltaje y corriente) que regresan por la misma línea y sobreponen las ondas principales, pero debido a las pérdidas de la línea son atenuadas y van desapareciendo conforme transcurren algunas reflexiones. Las ondas reflejadas, incidentes y transmitidas se producen cuando existen discontinuidades [18].

En la Figura 8 se presenta de manera básica el principio las ondas viajeras, ilustrando como estas responden en el momento que se produce una falla en la línea de transporte de energía [19].

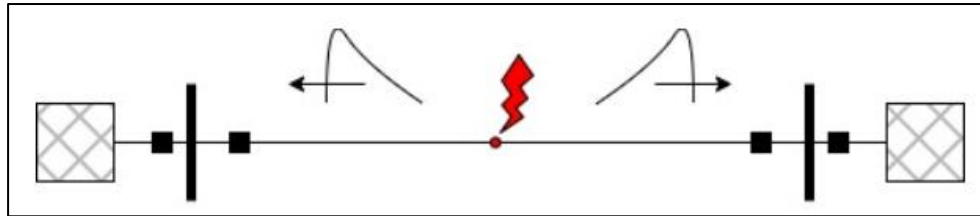


Figura 8. Concepto fundamental de las ondas propagantes.

Las ondas propagantes se generan como resultado de la resolución de un sistema que se deriva de la respuesta de un conjunto de ecuaciones matemáticas de tipo diferencial con comportamiento lineal vinculadas a las líneas de transporte de energía, frecuentemente referidas como ecuaciones de propagación en líneas. De este modo, la relación matemática que define la celeridad con la que la onda se extiende a través del medio se establece en la ecuación 11 [19].

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}} \dots \dots \dots (11)$$

Por otro lado, la impedancia propia  $Z_c$  asociada a la línea de transmisión, varía en función de la frecuencia, permeabilidad, permitividad y geometría de la línea. Sin embargo, para este escenario, se encuentra definida en la ecuación 12 [19].



$$Z_c = \sqrt{\frac{L}{C}} \dots \dots \dots (12)$$

$L$  Inductancia normalizada de la línea

$C$  Capacitancia distribuida por unidad de longitud

## 2.4 SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN

### 2.4.1 DEFINICIÓN DE SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN

Se define un sistema de distribución de energía eléctrica al conjunto de equipos eléctricos, mecánicos e instalaciones (transformadores, interruptores, cables, seccionadores, etc.), encargados de suministrar la energía desde una subestación de potencia hasta el usuario, que en México manejan niveles de 34.5 kV, 23 kV y 13.5 kV para media tensión y de 220 V, 127 V para baja tensión [20].

El sistema de distribución canaliza la energía eléctrica desde la subestación reductora hasta los consumidores finales y se divide, en su forma más simple, en tres sectores fundamentales: subestación de distribución, distribución primaria y distribución secundaria [20].

El tema de interés de este trabajo consta de una red de distribución primaria aérea.

En los sistemas aéreos, la distribución primaria y secundaria se realiza a través de postes de concreto y acero, donde también se ubican los transformadores de distribución. Las redes de distribución aéreas son las más utilizadas en México. Aunque son menos costosas que las redes subterráneas, el riesgo de fallas en el suministro aumenta debido a condiciones atmosféricas como: lluvia, granizo, viento, polvo, sismos, lluvia ácida, rayos ultravioletas, gases contaminantes, descargas atmosféricas, etc. Otros factores de riesgo son: el contacto con ramas de árbol, vandalismo, choques automovilísticos, etc.

De la definición anterior se deduce que un sistema de distribución forma parte de un sistema eléctrico, ya que éste comprende la generación, la transmisión y la distribución. Debido a la complejidad que han alcanzado los sistemas eléctricos de potencia y de distribución, prácticamente en todo el mundo existe una separación en el estudio de ambos.

La distribución de energía eléctrica debe realizarse de tal manera que el cliente reciba un servicio continuo, sin interrupciones, con un valor de tensión adecuado que le permita operar sus aparatos eficientemente, y que la forma de onda senoidal sea pura, es decir que esté libre de armónicas. La distribución de energía eléctrica debe llevarse a cabo con redes bien diseñadas que soporten el crecimiento propio de la carga, y que además sus componentes sean de la mejor calidad para que resistan el efecto del campo eléctrico y los efectos de la intemperie a que se verán sometidas durante su vida útil.

### 2.4.2 LÍNEAS PRIMARIAS DE DISTRIBUCIÓN

Las líneas primarias de distribución (figura 9) son los cables encargados de conducir la energía desde las subestaciones de potencia hasta los transformadores de distribución. La estructura de una línea primaria de distribución se forma con: troncales y ramales. Los troncales de la red primaria son los cables de mayor capacidad que transmiten la energía.

Los ramales son los cables que se derivan de los troncales y a ellos se conectan los transformadores de distribución y servicios privados suministrados en media tensión.

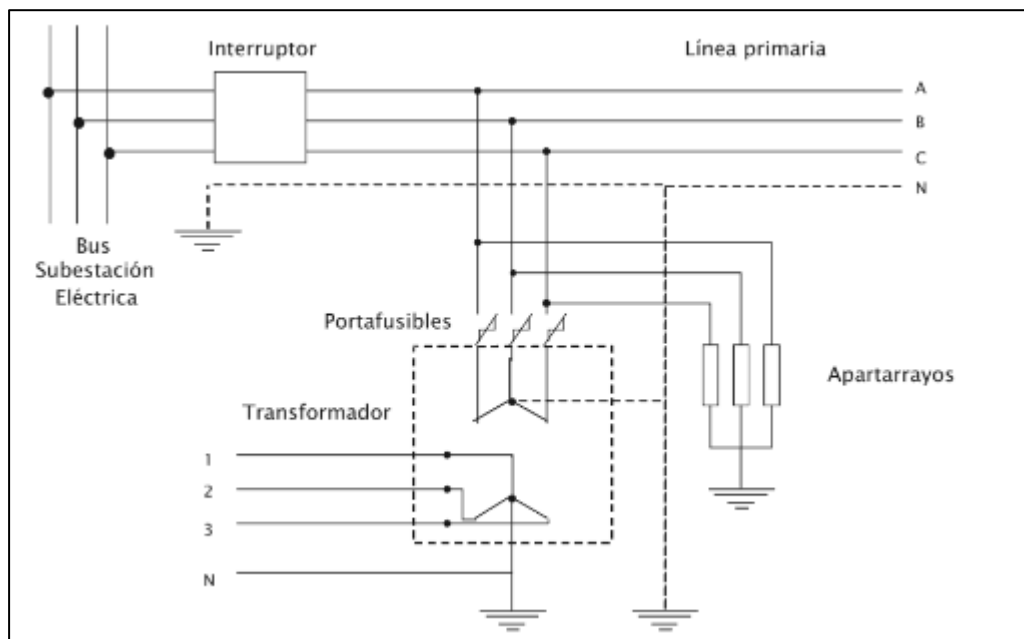


Figura 9. Red primaria trifásica, cuatro hilos.



### **2.4.3 REDES SECUNDARIAS DE DISTRIBUCIÓN**

Las redes secundarias conducen la energía desde los transformadores de distribución hasta las acometidas de los usuarios.

En la mayoría de los casos los circuitos secundarios son de operación radial, salvo en las redes subterráneas malladas (comúnmente conocidas como redes automáticas) en las que el flujo de energía no siempre sigue la misma dirección. Los sistemas secundarios de distribución, por el número de hilos se clasifican en:

1. Monofásico dos hilos
2. Monofásico tres hilos
3. Trifásico tres hilos
4. Trifásico cuatro hilos

### **2.4.4 TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN**

Los transformadores de distribución son los equipos encargados de cambiar la tensión primaria a un valor menor de tal manera que el usuario puede utilizarla sin necesidad de equipos e instalaciones costosas y peligrosas ver figura 10. En si el transformador de distribución es la liga entre la red primaria y la red secundaria.

El número de fases del transformador es función del número de fases de la alimentación primaria.

En muchas ocasiones la política de selección del número de fases de los transformadores de distribución, que decide emplear una compañía suministradora, es el elemento que obliga a usar motores monofásicos o trifásicos. Esto a su vez dicta la política de fabricación de motores monofásicos o trifásicos en un cierto país, o en una cierta región comercial. La magnitud de la impedancia de un transformador afecta la regulación de la tensión y el valor de las corrientes de corto circuito que fluyen por los devanados ante fallas en la red secundaria. Para valores bajos de impedancia se tendrán valores altos de regulación y de corrientes de corto circuito; es por esto por lo que el valor de la impedancia se debe seleccionar tratando de encontrar un punto económico de estos dos factores.



Figura 10. Transformador trifásico.

### 2.4.5 CORTACIRCUITOS FUSIBLES

También son conocidos como cuchillas fusibles o cajas primarias y son de uso común en sistemas de distribución. Están diseñadas para la protección de transformadores y los equipos (incluyendo el seccionamiento de derivaciones de red) en circuitos de hasta 34.5 kV. y 200 ampers continuos. Su construcción fuerte en bronce o aluminio, contactos resortados plata – plata y otros buenos materiales lo hacen prácticamente libre de mantenimiento durante toda su vida útil [21].

Se pueden encontrar comercialmente de acuerdo con su aplicación clasificados como: tipo interior, tipo intemperie (con y sin portafusibles), tipo hilo de apertura y fusión, en aceite, en arena (empleados en sistemas de distribución subterráneas). La figura 11 muestra un cortacircuitos fusible tipo intemperie (usado en redes aéreas) y se indican cada uno de sus componentes [21].

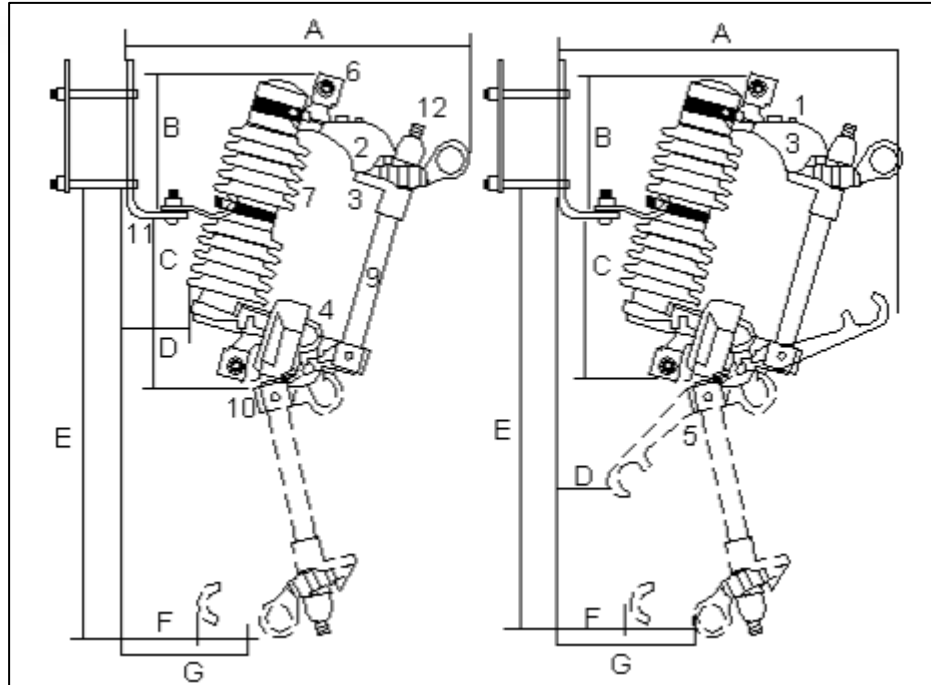


Figura 11. Cortacircuitos fusible.

1. Coraza: Guía los contactos durante la operación de cerrado garantizando un ajuste perfecto. Cuando el cortacircuitos está cerrado la coraza provee de aseguramiento por enganche positivo de modo que el aparato no se abra debido a vientos fuertes o vibraciones del poste.

2. Contactos (Plata-Plata): Los contactos se fabrican en aleación especial de cobre al berilio (material de propiedades eléctricas y mecánicas ideales para contactos eléctricos) con baño de plata.

Los contactos son autolimpiantes y están provistos de topes que evitan daños por operaciones bruscas.

3. Anillo de operación.

4. Anillo de remoción de la vela: Estos componentes diseñados para trabajo pesado dan completo control al operario para la remoción y colocación de la cañuela cuando se necesite cambiar el fusible.

5. Articulación: La alta resistencia de esta estructura permite cerrar el cortacircuitos con fuerza, desde posiciones diferentes a la frontal.



## **Análisis del efecto transitorio por descargas atmosféricas en redes de distribución**

---

6. Terminal tipo tornillo de ojo (Fundición de bronce, galvanizado en caliente): Adaptables para cualquier calibre estándar de cable de Aluminio o Cobre, desde No. 6 sólido hasta 4/0 A.C.S.R.
7. Aislador: En porcelana sólida, con herrajes de sujeción embutidos para mayor fortaleza estructural.
8. Sistema de eyección: Compuesto por un trinquete resortado en acero inoxidable el cual evita que al cerrar el cortacircuito el fusible se someta a esfuerzos excesivos, también ayuda a la separación rápida del fusible en el momento de una falla. Adicionalmente el Portafusible tiene otro resorte de acero inoxidable que facilita la operación de apertura y garantiza que no se quedará pegado en caso de una corriente de falla.
9. Tubo Portafusible: En fibra de vidrio reforzada con resinas epóxicas (o resinas fenólicas para bajas capacidades de interrupción), en el momento de una falla libera gases a alta presión que contribuyen a la extinción de arco.
10. Tope de fin de carrera: Limita el recorrido de la cañuela al abrirse el cortacircuito.
11. Herraje de montaje tipo NEMA.
12. Tapón renovable, Durante fallas de baja intensidad el tapón permanece en su sitio causando una gran turbulencia en los gases liberados de modo que actúen más eficientemente en la extinción del arco. Durante fallas de alta intensidad, la alta presión alcanzarla por los gases hace que el disco del tapón sea expulsado permitiendo la expulsión de gases por ambos lados de la vela, el doble venteo hace mínimo el esfuerzo (causado por la reacción a chorro de los gases liberados) sobre el cortacircuito y sus estructuras de soporte. Los tapones de repuesto son suministrados por la fábrica a un costo mínimo.
13. Ganchos para apertura bajo carga con herramienta para apertura con carga (Load Break-tool).

La mayoría de las cuchillas fusible operan bajo el principio de expulsión para lo cual, el tubo que contiene el elemento fusible (listón fusible) que puede ser de fibra emite gases desionizantes para confinar el arco eléctrico producto de la interrupción.



El principio de operación es relativamente simple. Cuando se interrumpe la corriente de falla, el tubo de fibra de vidrio (con recubrimiento de ácido bórico en su interior) se calienta cuando se funde el elemento fusible emitiendo gases desionizantes que se acumulan dentro del tubo forzando, comprimiendo y refrigerando el arco dentro del tubo, los gases escapan por la parte inferior del tubo [21].

La presencia de los gases desionizantes impide el restablecimiento del arco eléctrico auxiliándose en esta función por la turbulencia y presión de los gases, haciendo que se aumente la resistencia dieléctrica del aire atrapado dentro del tubo [21].

La fusión y separación del elemento fusible libera también el mecanismo de enganche del cortacircuito, de modo que el soporte del fusible (cañuela portafusible) cae a la posición de abierto y puede ser localizado con facilidad por el personal de operaciones. La cañuela portafusible también puede conmutarse en forma manual con un bastón de maniobra. También puede adicionarle al cortacircuitos, accesorios de ruptura de carga de modo que se puede operar como un interruptor de ruptura de carga [21].

### **2.4.5.1 LISTÓN FUSIBLE O ELEMENTO FUSIBLES**

El fusible es el dispositivo de sobrecorriente más común y económico en sistemas de distribución. Es también uno de los más confiables pues prestan servicio sin mantenimiento por muchos años [21].

Interrumpir y disponer de un ambiente dieléctrico para prevenir el restablecimiento del arco cuando la corriente pasa por cero. El siguiente es el proceso [21]:

1. Detección: calentamiento y fusión.
2. Iniciación del arco: separación.
3. Manipulación del arco: alargamiento, refrigeración, desionización, presurización.
4. Interrupción de corriente: corriente cero.

Para que el fusible funcione apropiadamente, este debe:

1. Detectar las condiciones difíciles de proteger.
2. Interrumpir la falla rápidamente.
3. Coordinarse con otros dispositivos de protección para minimizar el número de usuarios afectados por la acción del fusible.

### 2.4.6 AISLADORES

Los Aisladores sujetan a los conductores para mantenerlos separados de los soportes y proporcionan la rigidez dieléctrica necesaria para evitar la derivación de la corriente de línea a tierra [17].

Los aisladores constituyen el punto mecánico de soporte de los conductores en los postes y herrajes, cumpliendo además con la función de proporcionar el aislamiento requerido entre conductores y estructura; proporcionando para esto, la distancia dieléctrica en aire.

Normalmente, los aisladores se fabrican en porcelana, vidrio y polímeros. Las redes de distribución aéreas en circuitos primarios utilizan aisladores de tensión y tipo alfiler, y para circuitos secundarios del tipo carrete ver figura 12.

Los aisladores deben soportar la carga mecánica que el conductor transmite al apoyo a través de ellos. Estos deben aislar eléctricamente los conductores de los apoyos, soportando la tensión en condiciones normales y anormales y sobretensiones hasta las máximas previstas que los estudios de coordinación del aislamiento definen con cierta probabilidad de ocurrencia. La tensión debe ser soportada tanto por el material aislante propiamente dicho como por su superficie y por el aire que rodea al aislador.



Figura 12. Tipos de aisladores.



### **2.5 SUBESTACION TIPO POSTE**

Una instalación tipo poste (figura A1) consta de un transformador de media/baja tensión, un conjunto de pararrayos para proteger el transformador contra impulsos de rayos y conjunto de fusibles de media tensión para aislar una instalación defectuosa de la red [11].

Las líneas de distribución tienen la característica de estar orientadas directamente a los usuarios y tener una gran cantidad de postes. Su equipamiento básico es enorme y complejo. El pararrayos es el principal dispositivo de protección contra sobretensiones de las líneas de distribución. La conexión en paralelo entre el pararrayos y el aislador puede reducir eficazmente la tasa de disparos por rayos y la tasa de accidentes. Muchos estudios creen que la reducción de la resistencia de puesta a tierra favorece la descarga [22].

### **2.6 SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE APARTARRAYOS**

La selección del apartarrayos es la pregunta que normalmente resulta ser la más sencilla de responder por que existen gran cantidad de tratados, procedimientos y normativas para poder hacerlo. Sin embargo, para seleccionar el punto de ubicación y el espaciamiento de los apartarrayos en las líneas de distribución se utiliza principalmente la experiencia y el conocimiento de la red por parte de los ingenieros o linieros, esto frecuentemente suele observarse en los trayectos de los circuitos de distribución tanto urbanos como rurales, en donde el espaciamiento de los apartarrayos no es uniforme si es que éstos existen. El objetivo es reducir las salidas de la línea debido a descarga atmosférica y sobre todo si se trata de circuitos que alimentan cargas tales como hospitales, edificios gubernamentales, escuelas, industrias, zonas residenciales, etc. [23].

#### **2.6.1 DEFINICIÓN DE APARTARRAYOS**

El apartarrayos (figura 13) es un dispositivo de protección cuya función es la de proteger el sistema eléctrico ante sobretensiones provocadas por el impacto de descargas atmosféricas o por maniobra de interruptores. Estos dispositivos limitan las sobretensiones que se generan en los sistemas eléctricos de potencia a valores por

debajo de los máximos permisibles por el sistema de aislamiento. Si el sistema eléctrico de potencia no contara con estos dispositivos las sobretensiones pueden llegar a provocar fallas en el aislamiento. Estas fallas pueden llegar a ocasionar la salida del sistema y en peor de los casos, daños a equipos principales como son los transformadores [7].

El apartarrayos presenta el principal elemento para la coordinación de aislamiento en las subestaciones eléctricas estableciendo una correlación entre sus características de protección y los niveles básicos de aislamiento de los equipos por proteger, con particular referencia a los aislamientos internos.



Figura 13. Apartarrayos de óxidos metálicos de porcelana y polimérico.

### 2.6.2 TENSIÓN MÁXIMA DE DISEÑO (VM)

Es el valor máximo de tensión entre fases para el cual está diseñado el equipo con relación a su aislamiento, así como por otras características que se refieren a esta tensión en las normas relativas al equipo [24].

### 2.6.3 TENSIÓN NOMINAL

Es la tensión de designación del apartarrayos [24].

### 2.6.4 TENSIÓN RESIDUAL (VR) DE UN APARTARRAYOS

Es la tensión que aparece entre la terminal de línea y tierra de un apartarrayos durante el paso de la corriente de descarga con una onda de  $8/20 \mu s$ . Este concepto no es aplicable a apartarrayos de óxido de zinc [24].



### 2.6.5 Tensión de Descarga por Impulso (VP) de un Apartarrayos

Este es el valor más alto de tensión obtenida con un impulso de onda y polaridad dadas (1.2/50 ó 250/2500  $\mu$ s para impulso por rayo o por maniobra respectivamente), aplicada entre las terminales de línea y tierra del apartarrayos [24].

### 2.6.6 Tensión Resistente al Impulso Nominal por Maniobra (o por Rayo)

Es el valor cresta dado de una tensión resistente al impulso (o por rayo) que caracteriza a los aislamientos de un equipo con respecto a las pruebas resistentes [24].

### 2.6.7 Corriente de Descarga del Apartarrayos (ID)

Esta corriente se calcula a partir de las características de protección y nivel básico de aislamiento del sistema, generalmente se expresa en kilo amperes kA [24].

### 2.6.8 APLICACIONES

#### 2.6.8.1 Características de Aplicación de los Apartarrayos.

Las características de los apartarrayos que se deben tomar en consideración para su aplicación son principalmente las siguientes [24]:

##### a) Tensión nominal ( $V_n$ ).

A esta tensión también se le conoce como tensión de designación del apartarrayos y su valor se puede obtener en forma simple de acuerdo con la ecuación 13:

$$V_n = K_e V_{\max} \dots\dots\dots(13)$$

Donde:

$V_n$  = Tensión nominal del apartarrayos en kV.

$K_e$  = Factor de conexión a tierra cuyo valor depende de las relaciones:

$$\frac{R_0}{X_1} \text{ y } \frac{X_0}{X_1}$$



Siendo:

$R_0$  = La resistencia de secuencia cero equivalente del sistema.

$X_0$  = La reactancia de secuencia cero del sistema.

$X_1$  = La reactancia de secuencia positiva del sistema.

$V_{max}$  = La tensión máxima de diseño en kV (de fase a fase) del sistema por proteger.

Para propósitos de cálculos aproximados, el valor de  $K_e$  se puede tomar como 0.8 para sistemas con neutro efectivamente aterrizado en los que se debe cumplir que:

$$\frac{R_0}{X_1} \leq 1.0 \quad y \quad \frac{X_0}{X_1} \leq 3.0$$

Para sistemas con neutro flotante el valor de  $K_e$  se toma como 1.0. Este método para determinar la tensión nominal del apartarrayos sólo es aplicable para la protección contra sobretensiones por rayo. Tratándose de sobretensiones por maniobra de interruptores, el procedimiento es diferente.

### **b) Localización**

Debe ser tal, que proporcione un margen de protección cuyo valor debe ser al menos, mayor de los mínimos recomendados (20% para impulso por rayo y 15% para impulso por maniobra).

En la misma forma que es importante seleccionar las características adecuadas de un apartarrayos para proporcionar una protección efectiva al equipo, se debe analizar cuidadosamente la localización de éstos en la subestación, ya que de no hacerlo se puede perder el criterio de coordinación de aislamiento adoptado. En principio, se puede establecer que los apartarrayos se deben instalar tan cerca del equipo por proteger como sea posible, esta solución puede resultar costosa en algunas subestaciones, ya que no siempre es posible ubicarlos como en las redes de distribución, en donde a los transformadores tipo poste se les protege instalando los apartarrayos en una cruceta muy cercana al transformador o directamente en el tanque como es el caso de los transformadores autoprotegidos [24].

En subestaciones eléctricas de tensiones superiores, por razones técnicas – económicas se debe determinar cuál es la zona de protección de un apartarrayos ya que como se sabe su protección es máxima en el lugar de la instalación y disminuye a medida que se aleja de ese punto, permitiendo que aparezcan tensiones superiores. En la determinación



## Análisis del efecto transitorio por descargas atmosféricas en redes de distribución

de la zona de protección del apartarrayos intervienen básicamente las características de éste, pero principalmente su tensión de operación (tensión de descarga con onda de 1.2/50  $\mu$ s) y el índice de elevación de tensión o pendiente del frente de onda expresado en kV/ $\mu$ s [24].

En la figura 14, se ilustran los principales conceptos que intervienen en la localización de los apartarrayos.

L= Distancia del apartarrayos hacia ambos lados del punto de su instalación.

AP= Apartarrayos.

T= Transformador.

$V_{(x)} = E_0$  = Tensión que aparece en cualquier punto x de la instalación medida a partir del punto de localización del apartarrayos.

E= Onda incidente en kV.

Se puede observar que a medida que se aleja el apartarrayos, la tensión que aparece en la instalación  $V_{(x)}$  es mayor, si se hace un análisis por el método de las reflexiones sucesivas se obtiene que la tensión que aparece en un objeto a una distancia x del apartarrayos se calcula con la ecuación 14 [24]:

$$V_{(x)} = V_p + 2 st \dots\dots\dots (14)$$

s= Pendiente del frente de onda (índice de elevación) en kV/ $\mu$ s.

$V_p$  = Tensión de arqueo del apartarrayos en kV.

t= Tiempo de recorrido de la onda en  $\mu$ s.

Como en conductores aéreos la onda de sobretensión viaja a la velocidad de la luz, entonces:

$$v = 300 \text{ Kv}/\mu\text{s}$$

Por lo tanto, el tiempo de recorrido de la onda se calcula con las ecuaciones 15 y 16.

$$t = \frac{x}{v} \mu\text{s} \dots\dots\dots (15)$$

$$t = \frac{x}{300} \mu\text{s} \dots\dots\dots (16)$$



## Análisis del efecto transitorio por descargas atmosféricas en redes de distribución

Tratándose de cables de potencia la velocidad de onda se obtiene con la ecuación 17:

$$t = \frac{300}{\sqrt{\xi}} \text{ m}/\mu\text{s} \dots\dots\dots (17)$$

Siendo

$\xi$  = Constante dieléctrica del cable.

La tensión a la distancia x es con la ecuación 18:

$$V_{(x)} = V_p + \frac{2sx}{300} \dots\dots\dots (18)$$

Entonces, ecuación 19

$$x = \frac{300(V_{(x)} - V_p)}{2s} \dots\dots\dots (19)$$

Donde

x= Distancia eléctrica del apartarrayos al objeto por proteger, en metros.

La tensión  $V_{(x)}$  no debe exceder al valor  $V_p$  para el tiempo de ida y retorno de la onda (2t).

El valor de la pendiente de frente de onda en los apartarrayos autovalvulares, alcanza un valor de 100 kV /  $\mu$ s por cada 12 kV de tensión nominal de designación.

El efecto de la distancia es despreciable para ondas por maniobras de interruptores debido a que el frente de onda tiene una pendiente muy baja [24].

La pendiente de frente de onda se calcula con la ecuación 20:

$$s = \frac{100}{12} V_n \text{ kV}/\mu\text{s}. \dots\dots\dots (20)$$

$V_n$  = Tensión nominal del apartarrayos.

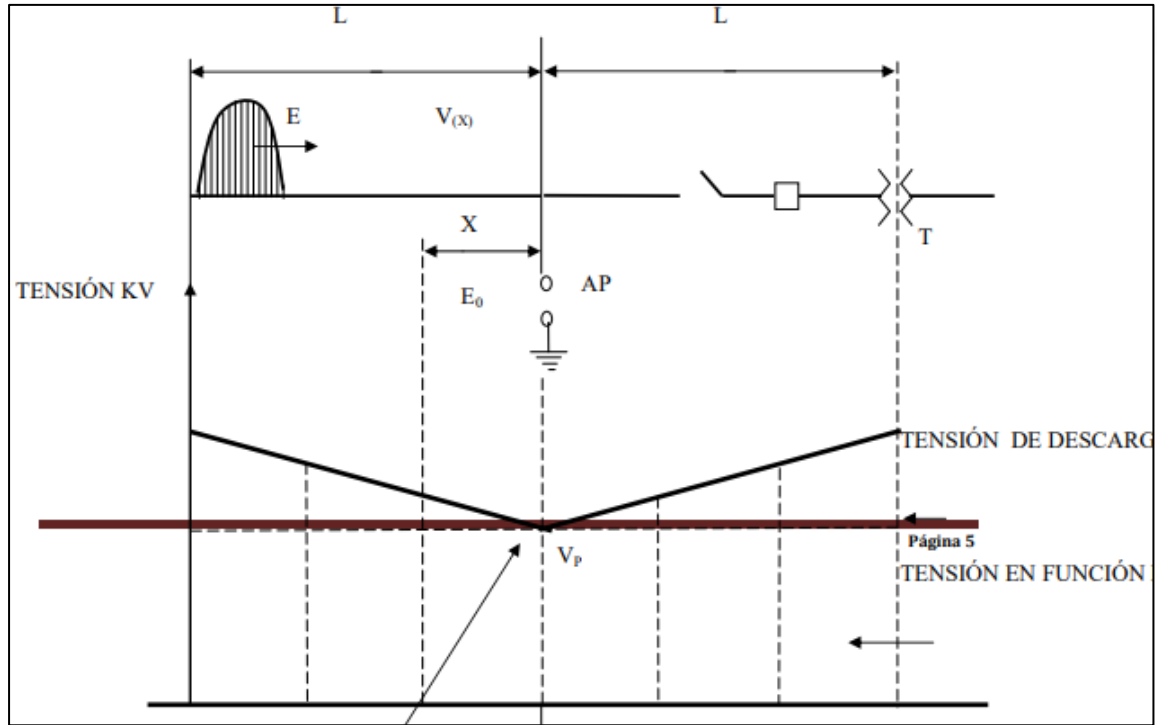


Figura 14. Principales conceptos que intervienen en la localización de los apartarrayos.

En la tabla 4 siguiente, se indican valores de pendientes de frente de onda para rangos de tensiones nominales del sistema a proteger [24].

| Tensión nominal del sistema (kV) | Pendiente de frente de onda por cada kV de tensión nominal kV/ $\mu$ s. |
|----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| Menos de 3                       | 10                                                                      |
| 3-240*                           | 100/12                                                                  |

\* Para más de 240 la pendiente del frente de onda es de 1200 KV/ $\mu$ s.

Tabla 4. Valores de pendientes de frente de onda para rangos de tensiones nominales del sistema a proteger.

Con relación a la selección de la corriente de descarga de los apartarrayos, se puede mencionar que sólo las descargas cercanas a las subestaciones someten a los apartarrayos a condiciones severas de operación y para determinar este aspecto cuantitativamente se requiere de la determinación de datos estadísticos de mediciones de corriente de rayo [24].



## Análisis del efecto transitorio por descargas atmosféricas en redes de distribución

Para dar una idea de este aspecto se puede mencionar, que la norma americana ANSI C 62.2 (Standard Guide for Application of Valve Arresters for A. C. Systems), muestra que las corrientes de descarga de los apartarrayos en las subestaciones tienen una distribución como la indicada en la tabla 5 [24].

| Porcentaje de las corrientes del rayo que pueden exceder a los valores de corriente indicados | Valor en kA |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| 5%                                                                                            | 65          |
| 10%                                                                                           | 50          |
| 20%                                                                                           | 35          |
| 70%                                                                                           | 9           |

Tabla 5. Distribución de las corrientes de descarga de apartarrayos en subestaciones.

### c) Corriente de descarga.

La corriente de descarga del apartarrayos se calcula a partir de las características de protección y nivel básico de aislamiento (NBI) del sistema, generalmente se expresa en kiloamperes (kA) a partir de la ecuación 21 [24]:

$$I_d = \frac{2E - V_r}{z_0 + R} \quad (\text{kA}) \dots\dots\dots (21)$$

Donde:

$I_d$  = Corriente de descarga en kA.

$E$  = Es la magnitud de la onda entrante a la subestación a través de la línea de transmisión expresada en kV, que se puede determinar cómo:

$E = \frac{2e}{n}$  Siendo  $e$  el valor de la onda incidente y  $n$  el número de líneas entrantes a la subestación.

$V_r$  = Tensión residual del apartarrayos (kV). (Excepto los apartarrayos de óxido de zinc).

$z_0$  = Impedancia característica de la línea en ohms.

$R$  = Resistencia del apartarrayos en Ohms.



## Análisis del efecto transitorio por descargas atmosféricas en redes de distribución

Para cálculos rápidos cuando el número de líneas entrante a la subestación es uno, que es el caso que nos ocupa para las subestaciones de particulares, la corriente de descarga se puede obtener en forma aproximada con la ecuación 22:

$$I_d = k \frac{2NBI}{z_0} \quad (\text{kA}) \dots\dots\dots(22)$$

Para lo cual:

$I_d$  = Corriente de descarga en kA.

NBI = Nivel básico de aislamiento del sistema en kV.

K = Factor que depende de la distancia al punto de descarga.

Para tomar en consideración el efecto de las reflexiones sucesivas de las ondas del rayo desde el punto de la descarga y que tienden a incrementar la corriente de descarga del apartarrayos, a las expresiones para el cálculo de esta corriente se les multiplica por un factor “K” que depende de la distancia al punto de la descarga (D) y de la longitud de la cola de onda pudiéndose tomar los valores que aparecen en la tabla 6, mostrándose a continuación [24]:

| D(mts) | Factor K |
|--------|----------|
| 700    | 3        |
| 1,600  | 2        |
| 3,200  | 1        |

Tabla 6. Factor para la determinación de la corriente de descarga.

La selección de los apartarrayos debería estar basada sobre las condiciones de sobretensiones máximas esperadas, de manera que el apartarrayos empleado debe ser capaz de soportar estas condiciones con un riesgo de falla mínimo en el mismo. En sistemas de extra alta tensión los apartarrayos se deben instalar tan cerca como sea posible de los equipos a proteger. Las características de protección del apartarrayos se usan con un margen de protección para determinar de esta forma los niveles básicos de aislamiento por impulso y por maniobra de interruptores para el equipo protegido [24].

Para niveles de extra alta tensión y ultra alta tensión (más de 400 kV) en el aislamiento autorecuperable, se determinan los niveles básicos de aislamiento por maniobra de interruptores (NBS) suponiendo que no hay acción del apartarrayos [24].

### 2.6.8.2 MARGEN DE PROTECCIÓN.

A la diferencia que debe existir, entre el nivel básico de aislamiento al impulso del aislamiento por proteger y la máxima tensión que puede aparecer en el apartarrayos, se le conoce como margen de protección. Se establece que debe ser como mínimo del 20% para impulsos por rayo y 15% para impulsos por maniobra, generalmente se expresa en por ciento y se obtiene con las siguientes expresiones [24]:

**Para impulso por rayos, ecuación 23:**

$$\text{Margen de protección} = \frac{(\text{NBAI}) - (\text{Máxima tensión en el apartarrayos})}{\text{Máxima tensión en el apartarrayos}} * 100 \dots\dots\dots(23)$$

**Para impulso por maniobra, ecuación 24:**

$$\text{Margen de protección} = \frac{(\text{NBAM}) - (\text{Máxima tensión en el apartarrayos})}{\text{Máxima tensión en el apartarrayos}} * 100 \dots\dots\dots(24)$$

La máxima tensión en el apartarrayos puede ser la tensión de descarga por impulso o la tensión residual, (la mayor de las dos) ver figura 15 [24].

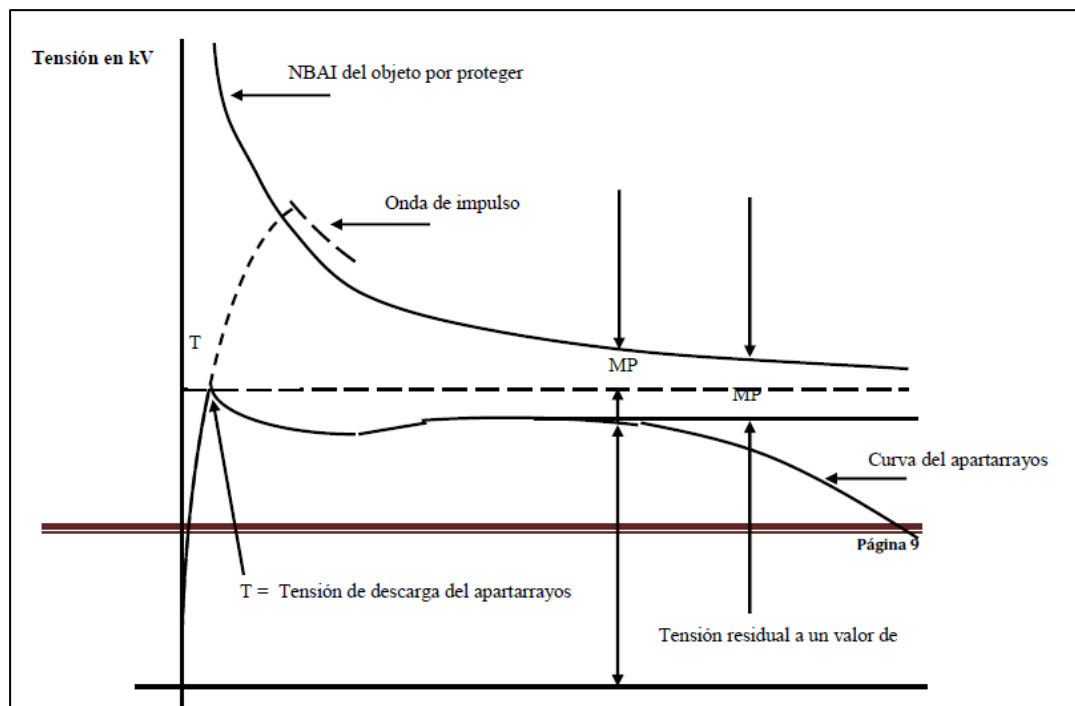


Figura 15. Margen de protección de apartarrayos.



### **2.7 SISTEMA DE TIERRAS**

#### **2.7.1 DEFINICIÓN DE SISTEMA DE TIERRAS**

Un sistema de tierras es un conjunto de conductores, apartarrayos, pararrayos, electrodos, etc., que conectados eficazmente entre si tienen la finalidad conectar a tierra las partes metálicas, elementos del circuito que lo requieran y que resulten altamente expuestos a descargas y sobretensiones peligrosas [25].

El rendimiento de los dispositivos de puesta a tierra bajo alta corriente de impulso juega un papel importante en la operación segura y confiable de los sistemas de distribución eléctrica. Los efectos de protección contra descargas atmosféricas de las líneas están relacionados con las características de impulso de los dispositivos de puesta a tierra para las estructuras que soportan las líneas de distribución. Reducir la resistencia de puesta a tierra de una estructura es una medida muy importante para mejorar las características de resistencia a descargas atmosféricas de las líneas [25].

Cuando un rayo golpea una línea de distribución, una alta corriente de rayo fluirá hacia el dispositivo de conexión a tierra y se disipará en el suelo. Como ya se ha demostrado en muchos estudios, las características de los dispositivos de puesta a tierra sujetos a una alta corriente de impulso son dramáticamente diferente a los dispositivos de baja frecuencia. La característica transitoria de un electrodo de puesta a tierra depende de muchos parámetros eléctricos y geométricos, que incluyen el tamaño y la estructura del dispositivo de puesta a tierra, los parámetros del suelo, los parámetros de la corriente de impulso y el punto de alimentación. Cuando la corriente de impulso de alta frecuencia se disipa en el suelo, la distribución de la carga eléctrica en el espacio varía con el tiempo [25].

No todas las descargas atmosféricas producen fallas en las líneas, solo ocurren al presentar problemas técnicos como:

#### **2.7.2 ERROR DE APANTALLAMIENTO EN LA LÍNEA**

Sabemos que existe un error en el apantallamiento cuando la descarga en vez de impactar el cable de guarda y sea despejada a tierra correctamente a través de las torres o estructuras más cercanas, impacta directamente a la línea pudiendo ocasionar la falla



o no de la misma dependiendo de la magnitud de la corriente de la descarga, impedancia de las fases, aislamiento, etc. [25].

### **2.7.2.1 RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA**

Es el sistema de puesta a tierra formado por varillas y conductores, para poder disipar la corriente del rayo en la tierra de forma eficiente. Si por ejemplo ocurre una descarga atmosférica e impacta el cable guarda y esta se trata de despejar a través de las estructuras próximas, donde los valores de puesta a tierra son altos, producirá que la sobretensión se vea reflejada y trate de llegar de nuevo a las líneas provocando los llamados flameos inversos que pueden arruinar directamente a los aisladores [25].

### **2.7.2.2 FALLAS EN EL AISLAMIENTO DE LA LÍNEA**

Este problema se presenta generalmente por la acumulación de partículas contaminantes en las cadenas de aisladores, perdidas de aislamiento o perforaciones, esto puede ocurrir en zonas muy contaminadas donde pasa la línea o cuando han existido flameos inversos o directos que han perforado los aisladores reduciendo la capacidad aislante [25].

### **2.7.3 RESISTENCIA A TIERRA DE ELECTRODOS**

El sistema de tierra debe consistir en uno o más electrodos conectados entre sí. Debe tener una resistencia a tierra baja para minimizar los riesgos al personal en función de la tensión de paso y de contacto (se considera aceptable un valor de 10 Ohms; en terrenos con alta resistividad este valor puede llegar a ser hasta de 25 Ohms) [26].

### **2.7.4 MATERIAL DE LOS CONDUCTORES DE PUESTA A TIERRA**

El material de los conductores de puesta a tierra debe garantizar la adecuada conducción de corrientes a tierra es decir, el conductor de puesta a tierra del apartarrayo debe ser continuo hasta el electrodo de puesta a tierra. Si los empalmes son inevitables, deben ser resistentes mecánicamente y a la corrosión, estar hechos y mantenidos de tal modo que no se incremente la resistencia del conductor. Para apartarrayos, el conductor de puesta a tierra debe ser tan corto y exento de dobleces cerrados (ángulos menores a 90°) como sea posible. Para apartarrayos primarios el conductor de puesta a tierra debe tener "ampacidad de tiempo corto", bajo las condiciones de corriente causada por un



disturbio. El conductor individual de puesta a tierra de un apartarrayos debe ser de tamaño no menor que 21.2 mm<sup>2</sup> (4 AWG) de cobre [26].

El punto de referencia de puesta a tierra del apartarrayos se conecta directamente al electrodo de puesta a tierra, y se hace una derivación para la puesta a tierra del tanque del transformador.

### **CAPITULO III. DESARROLLO**

#### **3.1 DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA ATP-EMTP**

ATP (Alternative Transients Program) o más conocido como EMTP (ElectroMagnetic Transients Program) es una herramienta software que permite llevar a cabo la simulación digital de fenómenos transitorios de naturaleza electromagnética y electromecánica con fines de diseño, especificaciones de equipos o definición de parámetros eléctricos fundamentales. Mediante este paquete es posible plantear y resolver la mayor parte de las situaciones que se pueden dar en las diferentes instalaciones eléctricas.

Se trata de una herramienta especialmente diseñada para analizar, tanto en su individualidad como en su conjunto, los diferentes elementos que componen un sistema eléctrico, así como los sistemas de control asociados a los equipos eléctricos. Algunas de las aplicaciones para las que resulta especialmente útil ATP-EMTP son las siguientes:

- Sobretensiones atmosféricas, temporales y de maniobra.
- Análisis de fallas.  
Análisis de armónicos.
- Conexión/desconexión de transformadores, reactancias y condensadores.
- Arranque de motores.
- Estabilidad transitoria.
- Coordinación de aislamiento.
- Análisis y ensayo de protecciones.
- Transporte en corriente continua.
- Compensadores estáticos de potencia reactiva: STATCOM, SVC, UPFC, TCSC.
- Ferro-resonancias.



## **Análisis del efecto transitorio por descargas atmosféricas en redes de distribución**

---

- Regímenes estacionarios sinusoidales, incorporando tanto, elementos línea les cómo no lineales.

El paquete software ATP-EMTP resuelve sistemas eléctricos (monofásicos o polifásicos) y calcula el valor que adquieren a lo largo del tiempo las distintas variables de este. Para ello, trabaja con modelos que caracterizan el comportamiento de sus distintos elementos constitutivos: resistencias, inductancias, capacitancias, elementos con parámetros concentrados y distribuidos, máquinas, interruptores, fuentes, etc. Lógicamente, todos estos elementos son fácilmente parametrizables y permiten flexibilizar sus características. Así, se pueden adecuar a las variaciones requeridas para modelizar los distintos tipos de elementos que se pueden encontrar en el sistema eléctrico. De esta forma, es posible incluir características no lineales en las resistencias e inductancias; introducir interruptores con tiempos de operación estadísticos, definidos por el usuario u operados por control de otras variables, o utilizar fuentes de tensión y corriente que generan las más variadas formas de onda. Adicionalmente, ATP-EMTP incorpora otro tipo de recursos que posibilitan llevar a cabo el estudio y análisis de los sistemas de control y operación que gobiernan las instalaciones eléctricas modelizadas.

En cuanto a su capacidad, ATP-EMTP permite afrontar con garantías la resolución de sistemas con estructuras de hasta 6000 nudos, 10000 ramas, 900 fuentes, 1200 interruptores, 90 máquinas síncronas y 2250 elementos no lineales.

### **3.1.1 DESCRIPCIÓN DEL ENTORNO DE TRABAJO ATP-EMTP**

El paquete software ATP-EMTP para el estudio de regímenes transitorios integra varias aplicaciones. Dentro de ellas se incluyen distintas versiones del compilador ATP y una serie de programas complementarios destinados a facilitar el uso de esta herramienta: editores de texto, un editor gráfico de circuitos eléctricos y aplicaciones específicas para la visualización gráfica de los resultados obtenidos.

Cada elemento involucrado en los sobrevoltajes producidos por descargas atmosféricas debe ser representado por un componente en ATP. Los elementos para representar son los siguientes:

- Línea de distribución

- Descarga atmosférica
- Apartarrayos
- Cortacircuitos fusible
- Resistencia de puesta a tierra del poste

### 3.2 REPRESENTACIÓN DE DESCARGA ATMOSFÉRICA EN ATP

Como se mencionó anteriormente una descarga atmosférica está caracterizada por la presencia de una onda de corriente de alta magnitud y corta duración. En el presente trabajo la descarga atmosférica es representada por una fuente de corriente.

Forma de onda de  $8/20 \mu s$  significa un pulso de  $8 \mu s$  de frente de onda y  $20 \mu s$  de tiempo de cola. La onda de corriente  $8/20 \mu s$  es utilizada para pruebas de corriente de rayo que producen sobretensiones inducidas por impactos indirectos (es el caso de los rayos que impactan en la tierra, el hilo de guarda o en la estructura) de una red eléctrica [3].

El ATP dispone de varios modelos de fuentes para la simulación de transitorios. Para el caso de la simulación de la corriente del rayo se utilizará la fuente de corriente Heidler type 15 pues es la fuente que se ajusta con mayor exactitud a la forma de onda de corriente propuesta por la norma IEC 61- 1, figura 16.

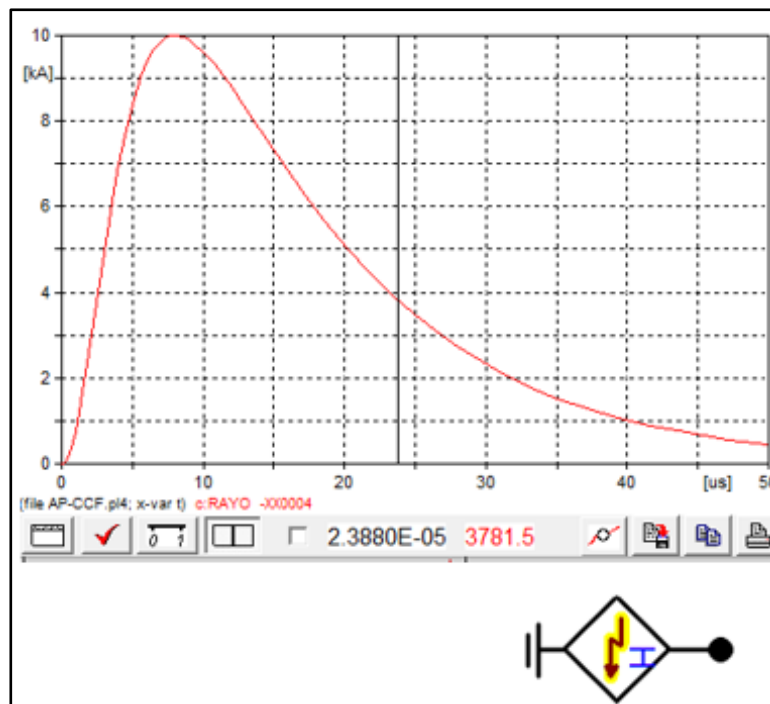


Figura 16. Forma de onda de corriente de rayo y elemento Heidler type 15 en ATP DRAW.



### 3.3 LÍNEA DE DISTRIBUCIÓN DE MEDIA TENSIÓN

El modelo empleado para la presente simulación es J. Martí que considera parámetros dependientes de la frecuencia, siendo este modelo el más difundido para análisis de transitorios.

El modelo de ATP\_LCC, permite ingresar los parámetros de la línea de distribución para crear el archivo ATP. Estos datos de entrada se agrupan en: “Model” y “Date”. En “Model” (Figura 17), se ingresan los datos requeridos para el modelo seleccionado como se describe en la tabla 7, mientras que en “Date” se ingresan las características de los conductores de fase y los datos físicos de la estructura de soporte [27].

Los parámetros de entrada que se deben ingresar al formato “Model” (Figura 18), para el modelo J. Martí son los que se describen en la tabla 8 [28].

| Datos               | Significado                                                  |
|---------------------|--------------------------------------------------------------|
| Rho (ohm*m)         | Resistividad del suelo en ohm*m de suelo Homogéneo           |
| Freq. Init (Hz)     | Frecuencia inicial para la escala logarítmica en Hz          |
| Length (Km)         | Longitud de la línea en Km                                   |
| # Phases            | Número de fases                                              |
| Overhead Line       | Línea aérea                                                  |
| Single Core Cable   | Cable unipolar                                               |
| Enclosing Pipe      | Cable con protección con envolvente metálica                 |
| Units               |                                                              |
| Metric/English      | Unidades/ métricas/ inglesas                                 |
| Transposed          | Para transposición de líneas                                 |
| Auto Bundling       | Agrupación automática de conductores                         |
| Skin Effect         | Efecto Piel                                                  |
| Segmented Ground    | Hilos de guarda segmentado                                   |
| Real Transf. Matriz | Matriz para cálculo de transitorio                           |
| Decades             | Número de décadas de la escala logarítmica                   |
| Point/Dec           | Número de puntos de frecuencia por década                    |
| Freq.matrix (Hz)    | Frecuencia de cálculo de matriz en Hz                        |
| Freq.SS (Hz)        | Frecuencia a la que se calculó los valores en estado estable |
| Use default fitting | Ajuste por defecto                                           |

Tabla 7. Datos para “Model” para el modelo J. Martí.

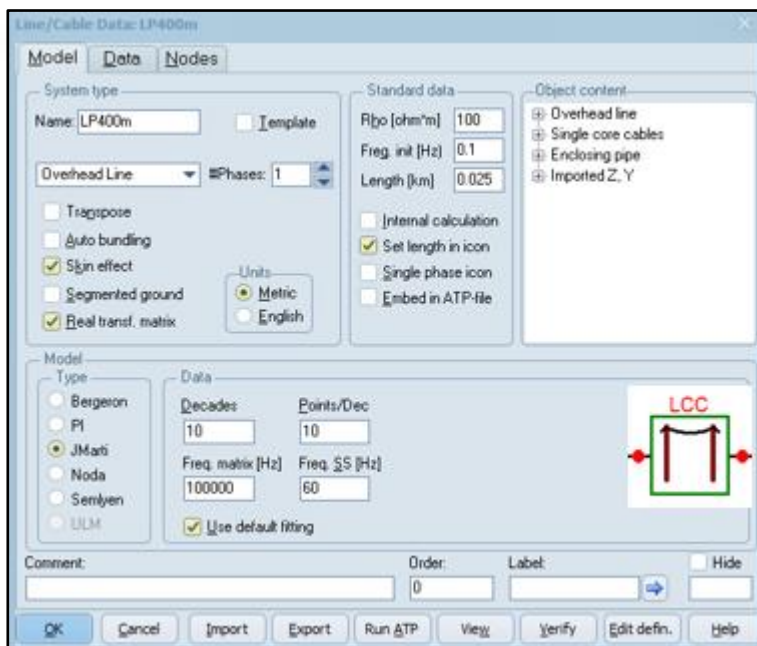
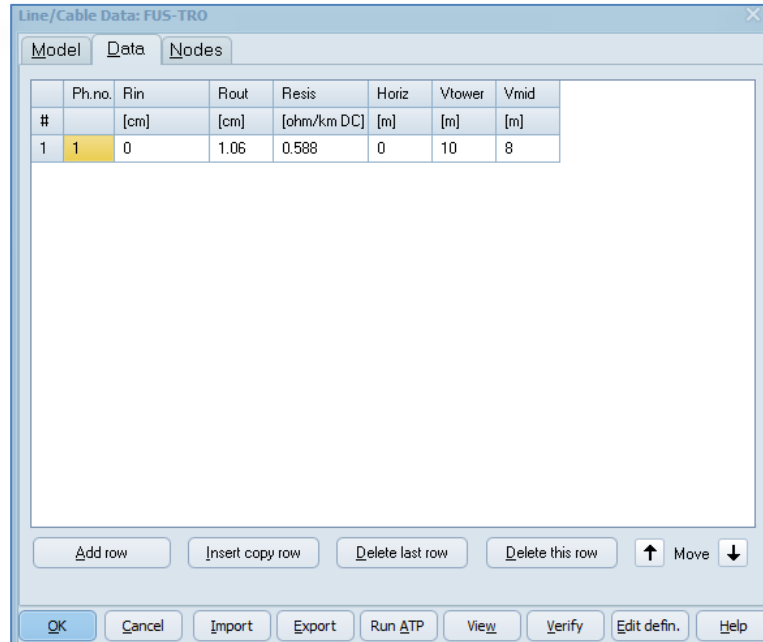


Figura 17. Formato de opción “Model” para modelo J. Martí.

Los parámetros de entrada para el formato “Date” se muestra en la tabla 10.

| Datos  | Significado                                                                               |
|--------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| Ph.no  | Número asignado a cada conductor de fase                                                  |
| Rin    | Radio interno en cm                                                                       |
| Rout   | Radio externo en cm                                                                       |
| Resis  | Resistencia del conductor ohm/km                                                          |
| Horiz  | Distancia horizontal del centro del conductor a un punto de referencia escogido en metros |
| Vtower | Altura vertical del conductor en la torre en metros                                       |
| Vmid   | Altura vertical del conductor a medio claro en metros                                     |
| Separ  | Distancia entre conductores en un haz de conductores en centímetros                       |
| Alpha  | Posición angular de un conductor de haz                                                   |
| NB     | Número de conductores de haz                                                              |

Tabla 8. Datos de formato de opción “Date” para el modelo J. Martí



| # | Ph.no. | Rin<br>[cm] | Rout<br>[cm] | Resis<br>[ohm/km DC] | Horiz<br>[m] | Vtower<br>[m] | Vmid<br>[m] |
|---|--------|-------------|--------------|----------------------|--------------|---------------|-------------|
| 1 | 1      | 0           | 1.06         | 0.588                | 0            | 10            | 8           |

Figura 18. Formato de opción “Date” para modelo J. Martí.

### 3.4 DATOS DEL APARTARRAYOS

El modelo IEEE Working Group 3.1.11 (figura 19) de descargadores de sobretensión presenta la curva V<sub>XI</sub> (característica no lineal Voltaje - Corriente) ajustada mediante los parámetros no lineales  $A_0$  y  $A_1$  como se muestra la figura 4 y dos filtros (de altas y bajas frecuencias) R-L que separan las dos regiones de operación de estos elementos no lineales. Así, para frentes de forma de onda lentos, las impedancias de las asociaciones  $R_0 - L_0$  y  $R_1 - L_1$  son muy bajas, haciendo que  $A$  y  $A_1$  estén prácticamente en paralelo. Para señales para frente de onda empinado, compuesto por altas frecuencias, la impedancia representada por  $R_1 - L_1$  se vuelve significativa y la corriente empieza a fluir principalmente por las resistencias variables representadas por  $A_0$  [28].

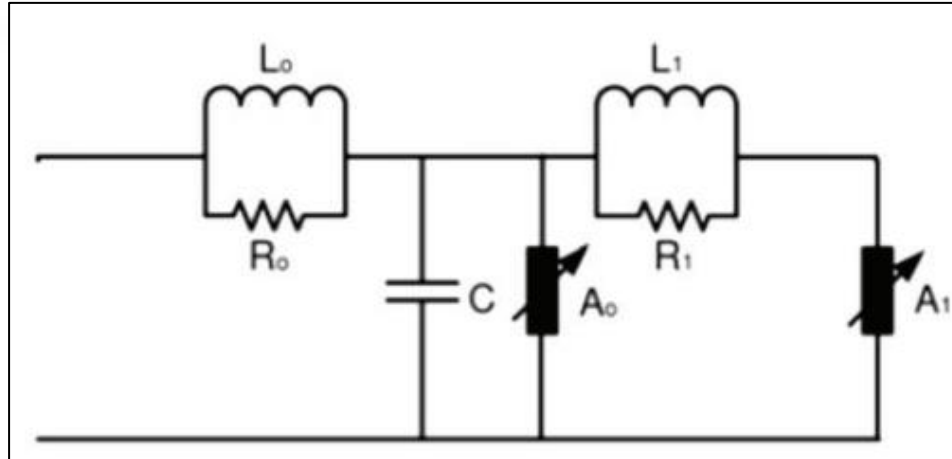


Figura 19. Circuito equivalente de modelo IEEE de apartarrayos.

Los valores de cada parámetro del circuito dependen de las características físicas del descargador y de cómo se realizará la instalación, como se describe en la siguiente sección.

Las resistencias  $R_0$  y  $R_1$  tienen la función de constituir los circuitos R-L que separan las regiones de operación del descargador para diferentes longitudes de onda y también se utilizan para estabilizar la integración numérica en software como ATP. Sus valores se calculan con la ecuación 25 y 26 [28]:

$$R_0 = 100 \frac{d}{n} (\Omega) \quad (25)$$

$$R_1 = 65 \frac{d}{n} (\Omega) \quad (26)$$

Donde  $d$  es la altura de la columna de varistor con relación a tierra y  $n$  es el número de columnas en paralelo del apartarrayos.

La capacitancia  $C$  está relacionada con la corriente de fuga capacitiva a través del apartarrayos [27].

Este parámetro está directamente relacionado con la altura de la columna del varistor con referencia a tierra. El valor de  $C$  se calcula con la ecuación 27.

$$C = 100 \frac{n}{d} (pF) \quad (27)$$

El campo magnético presente en el entorno de los varistores hace que sea necesaria la presencia de las inductancias  $L_0$  y  $L_1$ , cuyos valores se calculan con las ecuaciones 28 y 29.



$$L_0 = 0.2 \frac{d}{n} (\mu H) \quad (28)$$

$$L_1 = 15 \frac{d}{n} (\mu H) \quad (29)$$

El parámetro  $L_1$  es uno de los mas importantes en el modelado y simulación de transitorios, especialmente para impulsos de origen atmosférico, por lo que debe ser ajustado con precisión. Dicho ajuste se realiza de forma iterativa hasta que el valor de la tensión residual en las terminales del apartarrayos y sea lo más cercano posible al valor proporcionado por el fabricante [28].

### 3.5 CÁLCULO DE LAS RESISTENCIAS VARIABLES A0 Y A1

Los parámetros  $A_0$  y  $A_1$  son los encargados de describir la curva  $V \times I$  de los apartarrayos y se calculan en valores en por unidad utilizando la tabla 9 proporcionada por la IEEE y tomando como tensión base la tensión residual medida a partir de la aplicación de una señal de corriente de 8/20  $\mu s$  ( $U_{r8/20}$ ) y amplitud de 10 kA [28].

Con esta base por unidad de voltaje que debe existir en cada resistencia ( $A_0$  y  $A_1$ ), calculamos los voltajes en función del voltaje residual del descargador al impulso de tipo rayo ( $U_{res}=36$  kV), con las ecuaciones 30 y 31 [3]:

$$V.A0[kV] = V.A0[P.U] * U_{res} \quad (30)$$

$$V.A1[kV] = V.A1[P.U] * U_{res} \quad (31)$$



| Corriente (KA) | Voltaje (p.u) A0 | Voltaje (p.u) A1 |
|----------------|------------------|------------------|
| 0.01           | 0.875            | 0                |
| 0.1            | 0.963            | 0.769            |
| 1              | 1.05             | 0.85             |
| 2              | 1.088            | 0.894            |
| 4              | 1.125            | 0.925            |
| 6              | 1.138            | 0.938            |
| 8              | 1.169            | 0.956            |
| 10             | 1.188            | 0.969            |
| 12             | 1.206            | 0.975            |
| 14             | 1.231            | 0.988            |
| 16             | 1.25             | 0.994            |
| 18             | 1.281            | 1                |
| 20             | 1.313            | 1.006            |

Tabla 9. Valores de parámetros A0 y A1.

### 3.6 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE APARTARRAYOS MARCA IUSA

#### FIGURA A4.

Tensión nominal del sistema Un: 13.8 kV

Tensión nominal del apartarrayos Ur: 12 kV

Tensión de operación continua Uc: 10.2 Kv

Tensiones residuales máximas al impulso de corriente por rayo Ures:44 kV.

$$n = 1$$

$$d = 147 \text{ mm} = 0.147 \text{ m}$$

Con los datos anteriormente descritos se selecciona el apartarrayos y podemos calcular los valores de cada parámetro del circuito del descargador.

$$R_0 = 100 * \left( \frac{0.147}{1} \right) = 14.7 \Omega$$

$$R_1 = 65 * \left( \frac{0.147}{1} \right) = 9.55 \Omega$$

$$C = 100 * \left( \frac{1}{0.147} \right) = 680.272 \text{ pF}$$

$$L_0 = 0.2 * \left( \frac{0.147}{1} \right) = 0.0294 \mu H$$

$$L_1 = 15 * \left( \frac{0.147}{1} \right) = 2.205 \mu H$$

$$L_1 \text{ajustado} = 1.28 \text{ mH}$$



En la tabla 10 se muestra los voltajes de las resistencias no lineales A0 y A1.

| Corriente (kA) | V.A0 (PU) | V.A1 (PU) | Ures (kV) | VA.0 (kV) | VA.1 (kV) |
|----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 0.01           | 0.875     | 0         | 44        | 38.500    | 0.000     |
| 0.1            | 0.963     | 0.769     | 44        | 42.372    | 33.836    |
| 1              | 1.05      | 0.85      | 44        | 46.200    | 37.400    |
| 2              | 1.088     | 0.894     | 44        | 47.872    | 39.336    |
| 4              | 1.125     | 0.925     | 44        | 49.500    | 40.700    |
| 6              | 1.138     | 0.938     | 44        | 50.072    | 41.272    |
| 8              | 1.169     | 0.956     | 44        | 51.436    | 42.064    |
| 10             | 1.188     | 0.969     | 44        | 52.272    | 42.636    |
| 12             | 1.206     | 0.975     | 44        | 53.064    | 42.900    |
| 14             | 1.231     | 0.988     | 44        | 54.164    | 43.472    |
| 16             | 1.25      | 0.994     | 44        | 55.000    | 43.736    |
| 18             | 1.281     | 1         | 44        | 56.364    | 44.000    |
| 20             | 1.313     | 1.006     | 44        | 57.772    | 44.264    |

Tabla 10. Voltajes de las resistencias no lineales A0 y A1.

### 3.6.1 PRUEBAS DE CALIBRACIÓN DE APARTARRAYOS EN ATP DRAW, FIGURA 20.

Prueba de calibración de voltaje residual por impulso de rayo con especificaciones técnicas de apartarrayos marca IUSA figura A4.

$I_{nom}$ : 10 kA forma de onda 8/20  $\mu$ s

Frente de onda: 8  $\mu$  (al 100% de la amplitud de la corriente)

Frente de onda: 20  $\mu$  (al 50% de la amplitud de la corriente)

Tensiones residuales máximas al impulso de corriente por rayo: 44 kV, figura 21.

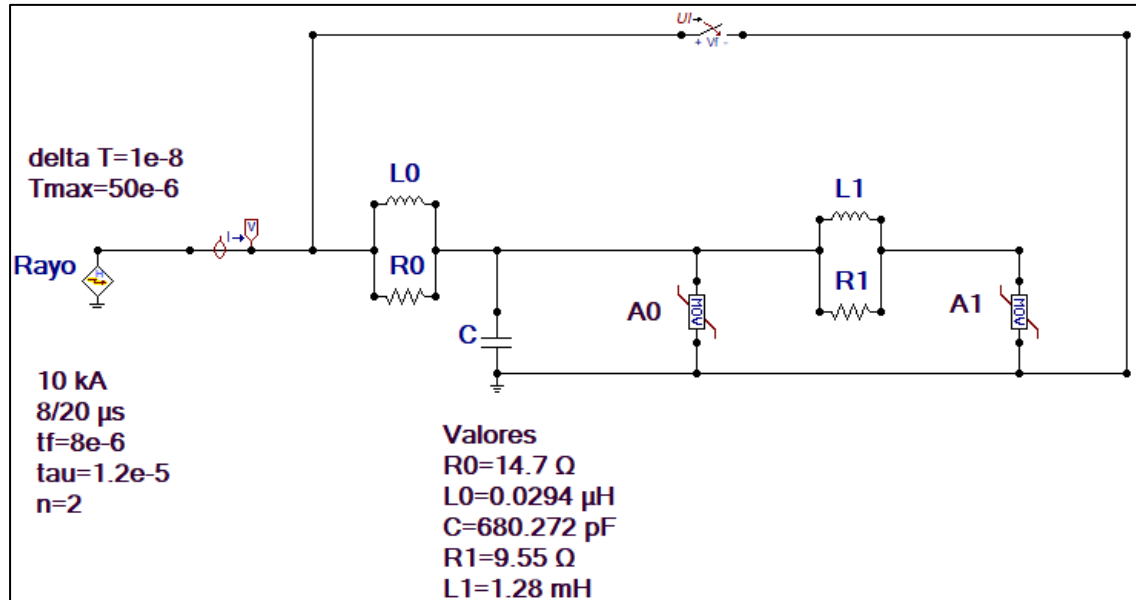


Figura 20. Modelo de apartarrayos para prueba Ures en ATP DRAW.

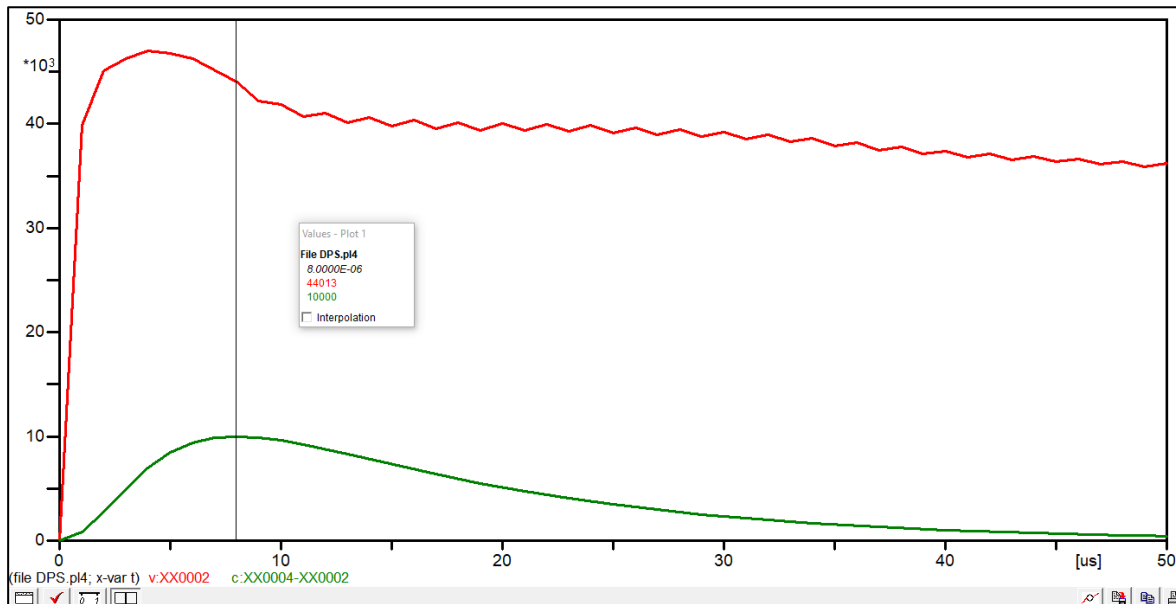


Figura 21. Corriente tipo rayo y voltaje residual de apartarrayos.



## Análisis del efecto transitorio por descargas atmosféricas en redes de distribución

En las figuras 22 y 23 se muestra las curvas voltaje corriente de las resistencias variables  $A_0$  y  $A_1$ .

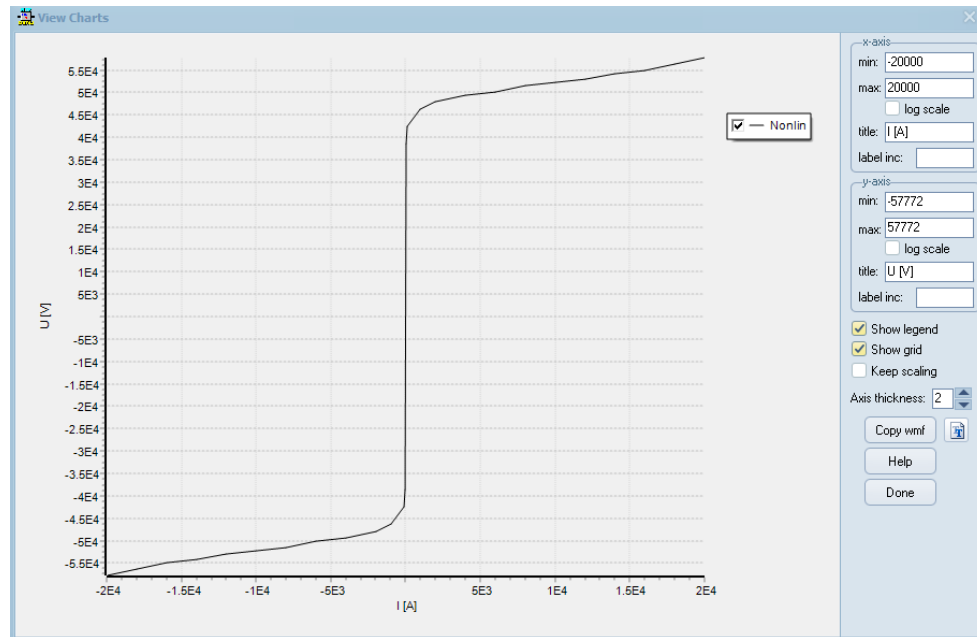


Figura 22. Curva voltaje - Corriente de resistencia variable  $A_0$

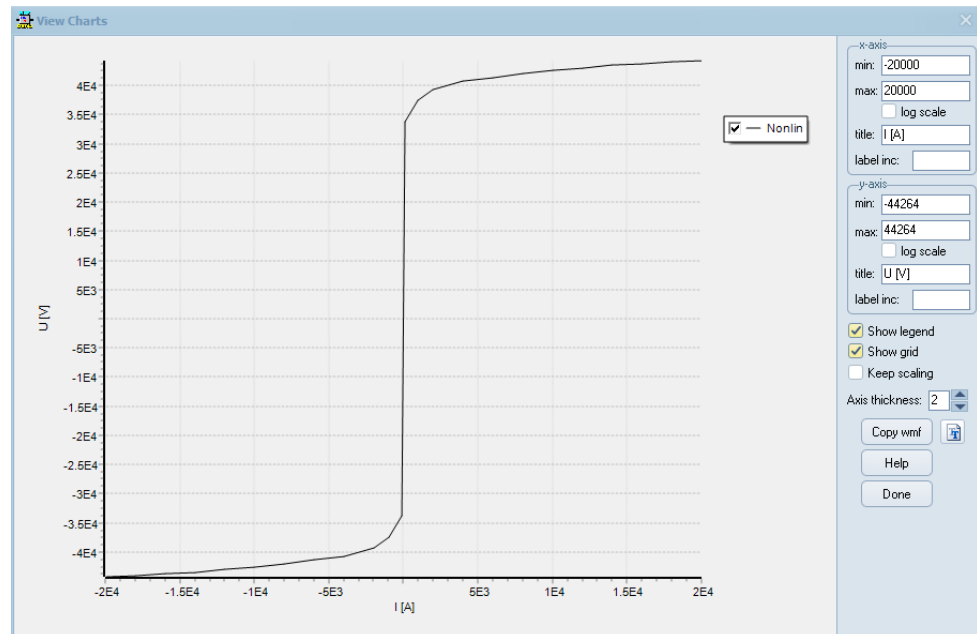
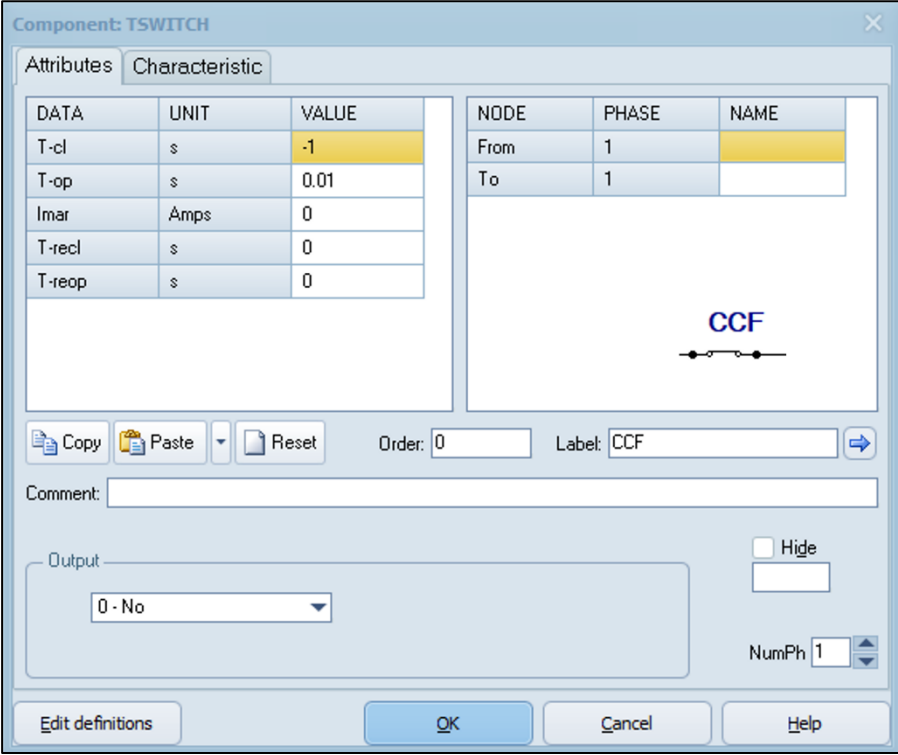


Figura 23. Curva voltaje - Corriente de resistencia variable  $A_1$

## 3.7 DATOS DE CORTACIRCUITOS FUSIBLES

Para simular los cortacircuitos fusibles se utilizó interruptor controlado por tiempo, e donde se ajusta el tiempo de despeje de la falla para efectos de estudio a 100 milisegundos posterior a la falla como se observa en la figura 24. En la figura A9 se pueden observar las curvas tiempo – corriente de eslabón fusible tipo expulsión marca EATON de donde se tomó el tiempo más rápido de despeje ante una falla.



**Component: TSWITCH**

Attributes Characteristic

| DATA   | UNIT | VALUE |
|--------|------|-------|
| T-cl   | s    | -1    |
| T-op   | s    | 0.01  |
| Imar   | Amps | 0     |
| T-recl | s    | 0     |
| T-reop | s    | 0     |

| NODE | PHASE | NAME |
|------|-------|------|
| From | 1     |      |
| To   | 1     |      |

CCF

Copy Paste Reset Order: 0 Label: CCF

Comment:

Output: 0 - No

Hide

NumPh 1

Edit definitions OK Cancel Help

Figura 24. Cortacircuitos fusibles de 15 Kv en ATP DRAW.

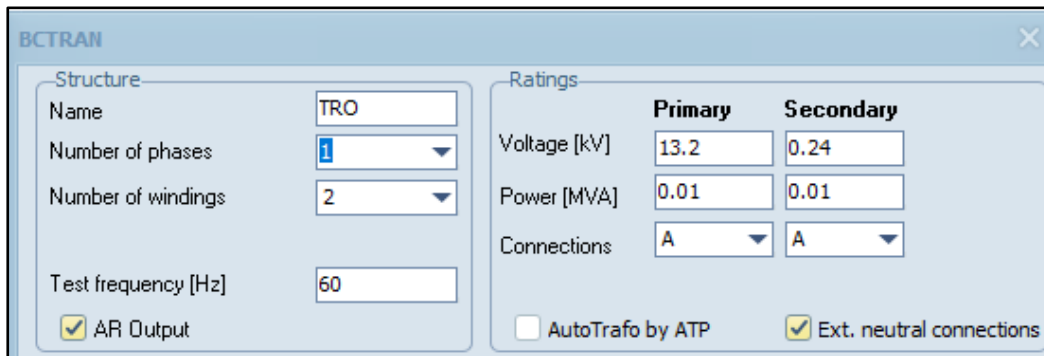
## 3.8 TRANSFORMADOR MONOFÁSICO.

El modelo de transformador BCTRAN surgió a partir de un modelo llamado Saturable, el cual presentaba grandes limitaciones en el momento de modelar transformadores trifásicos. El modelo Saturable incorporaba en su entrada de datos una tabla en la cual se introducían los valores eficaces de tensión y corriente del ensayo de vacío y el programa ATP utilizaba estos datos para crear una curva característica mediante la rutina SATURA y así se representaba el núcleo conectándolo finalmente al primario del transformador. Este modelo consideraba a sus elementos como desacoplados y era

ampliamente usado para representar transformadores monofásicos, mientras que no tuvo la misma aceptación para transformadores trifásicos. Por tanto, el modelo saturable evolucionó hasta llegar al modelo BCTRAN [29].

El modelo **BCTRAN** es una representación lineal simplificada de transformadores monofásicos y trifásicos de 2 ó 3 arrollamientos en forma de matrices de impedancias o admitancias en derivación teniendo en cuenta los acoplamientos mutuos entre devanados. La función para el cálculo de parámetros BCTRAN considera que, para un transformador trifásico con núcleo de tres columnas, la corriente de excitación para un ensayo de secuencia homopolar es relativamente alta y no puede ser despreciada. De esta forma, la admitancia en derivación de la rama de magnetización se calcula a partir de los datos del ensayo de excitación [29].

En la Figura 25 nos encontramos con una de las partes de la ventana de configuración del modelo BCTRAN. Como podemos observar, podremos elegir el número de fases (monofásico o trifásico), número de arrollamientos (2 ó 3), tipo de núcleo (banco de transformadores, acorazado). También nos da la opción de elegir el tipo de conexión, y las tensiones asignadas a los arrollamientos de Alta Tensión y los de Baja Tensión [29].



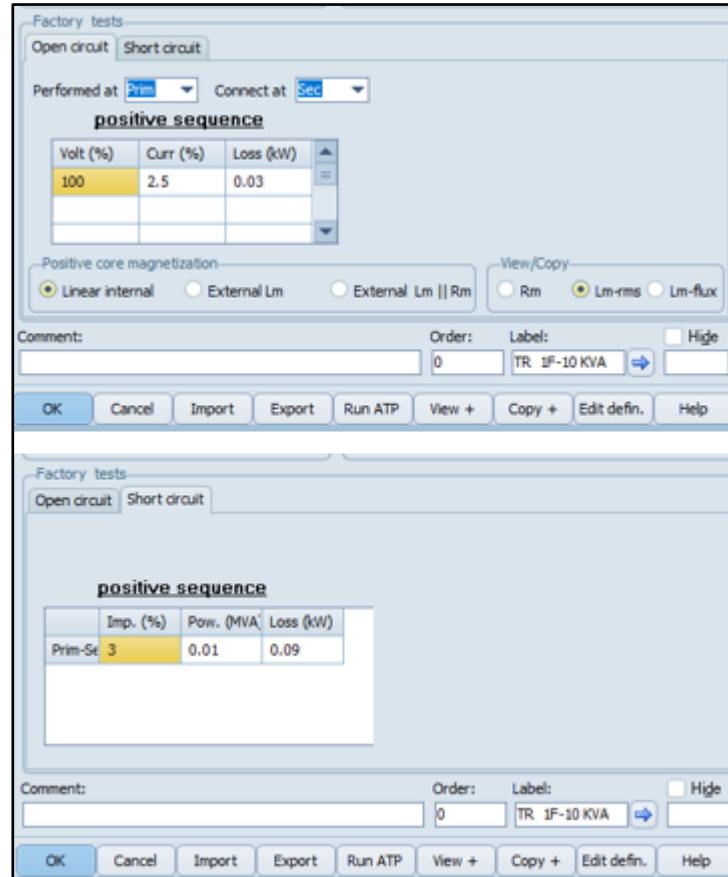
The screenshot shows the BCTRAN configuration window with two tabs: Structure and Ratings. The Structure tab is active, showing fields for Name (TRO), Number of phases (1), Number of windings (2), Test frequency [Hz] (60), and a checked box for AR Output. The Ratings tab is also visible, showing fields for Primary and Secondary Voltage [kV] (13.2 and 0.24), Power [MVA] (0.01 and 0.01), Connections (A and A), and checkboxes for AutoTrafo by ATP and Ext. neutral connections.

| Structure           |                                     |
|---------------------|-------------------------------------|
| Name                | TRO                                 |
| Number of phases    | 1                                   |
| Number of windings  | 2                                   |
| Test frequency [Hz] | 60                                  |
| AR Output           | <input checked="" type="checkbox"/> |

| Ratings                  |                                     |           |
|--------------------------|-------------------------------------|-----------|
|                          | Primary                             | Secondary |
| Voltage [kV]             | 13.2                                | 0.24      |
| Power [MVA]              | 0.01                                | 0.01      |
| Connections              | A                                   | A         |
| AutoTrafo by ATP         | <input type="checkbox"/>            |           |
| Ext. neutral connections | <input checked="" type="checkbox"/> |           |

Figura 25. Primera parte de la ventana de configuración de transformador modelo BCTRAN.

La segunda parte de la ventana de configuración del Modelo BCTRAN se representa en la Figura 26. Aquí se introducen los datos correspondientes a los ensayos de fábrica del transformador. Hay dos tipos de valores; uno para los ensayos de secuencia directa y otro para los ensayos de secuencia homopolar. Finalmente, para completar el modelo, se requieren los datos del ensayo de cortocircuito realizado al transformador.



The screenshot shows the 'Factory tests' window for a transformer model. It has two tabs: 'Open circuit' and 'Short circuit'. The 'Open circuit' tab is active. Below the tabs, there are dropdowns for 'Performed at' (Prim) and 'Connect at' (Sec). A table titled 'positive sequence' shows the following data:

| Volt (%) | Curr (%) | Loss (kW) |
|----------|----------|-----------|
| 100      | 2.5      | 0.03      |

Below the table, there are radio buttons for 'Positive core magnetization': 'Linear internal' (selected), 'External Lm', and 'External Lm || Rm'. To the right, there are radio buttons for 'View/Copy': 'Rm', 'Lm-rms' (selected), and 'Lm-flux'. At the bottom, there are fields for 'Comment:', 'Order:' (0), and 'Label:' (TR 1F-10 KVA). Buttons for 'OK', 'Cancel', 'Import', 'Export', 'Run ATP', 'View +', 'Copy +', 'Edit defin.', and 'Help' are at the bottom.

The 'Short circuit' tab is also visible, showing a table titled 'positive sequence' with the following data:

| Imp. (%)   | Pow. (MVA) | Loss (kW) |
|------------|------------|-----------|
| Prim-Set 3 | 0.01       | 0.09      |

Figura 26. Segunda parte de la ventana de configuración de transformador modelo BCTRAN.

## 3.9 IMPEDANCIA DE POSTE DE CONCRETO

Para poder conocer la impedancia característica de un poste de hormigón se usará de referencia. El poste de hormigón se considera como un elemento estático, con una impedancia al impulso eléctrico que se obtiene en base a la ecuación 32 [3].

$$Z_p = 60 \left( \ln \left( \frac{h}{r_{eq}} \right) \right) - 1 \quad (32)$$

Donde

$Z_p$  = Impedancia característica del poste.

$h$  = es la altura del poste.

$\frac{h}{r_{eq}}$  = es el radio equivalente obtenido de la geometría del poste. El radio equivalente del

poste se obtiene mediante la ecuación 33:

$$r_{eq} = \frac{r_1 h_2 + r_2 h + r_3 h_1}{2h} \quad (33)$$

( $h=h_1=h_2$ )

En la figura 27, se define la geometría de un poste de hormigón, en la tabla 11 se muestra las características de un poste comúnmente utilizado para una red de distribución de 13.8 kV [3].

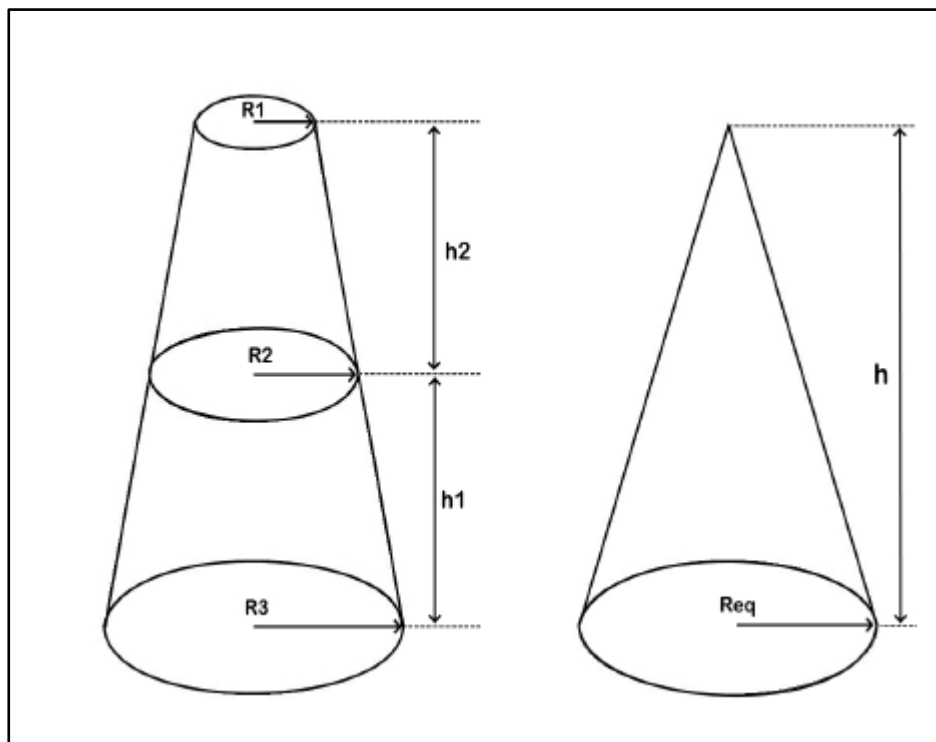


Figura 27. Geometría de un poste de hormigón.

| Descripción técnica                              | Altura de poste (m) | Carga nominal de rotura horizontal (kg) | Diámetro punta (cm) | Diámetro base (m) |
|--------------------------------------------------|---------------------|-----------------------------------------|---------------------|-------------------|
| Poste circular de hormigón armado, 13 m x 600 kg | 13                  | 600                                     | 14                  | 38                |

Tabla 11. Características de un poste de hormigón armado.

En la figura 28, se muestra la definición de radios y alturas de un poste de hormigón de 13 metros, 600 kg, para el cálculo de radio equivalente y finalmente la impedancia característica que presenta el poste ante una descarga atmosférica [3].

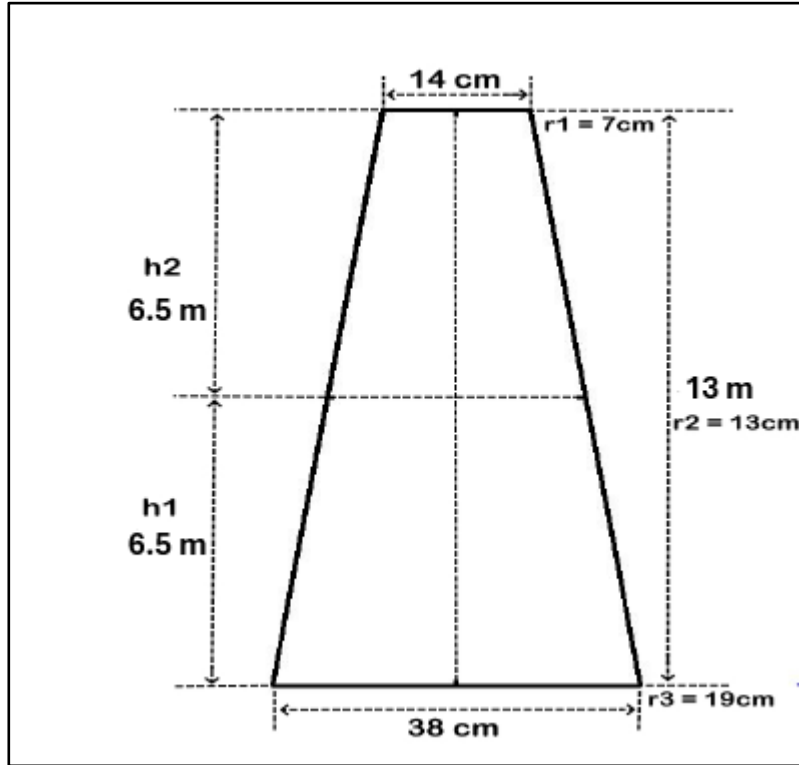


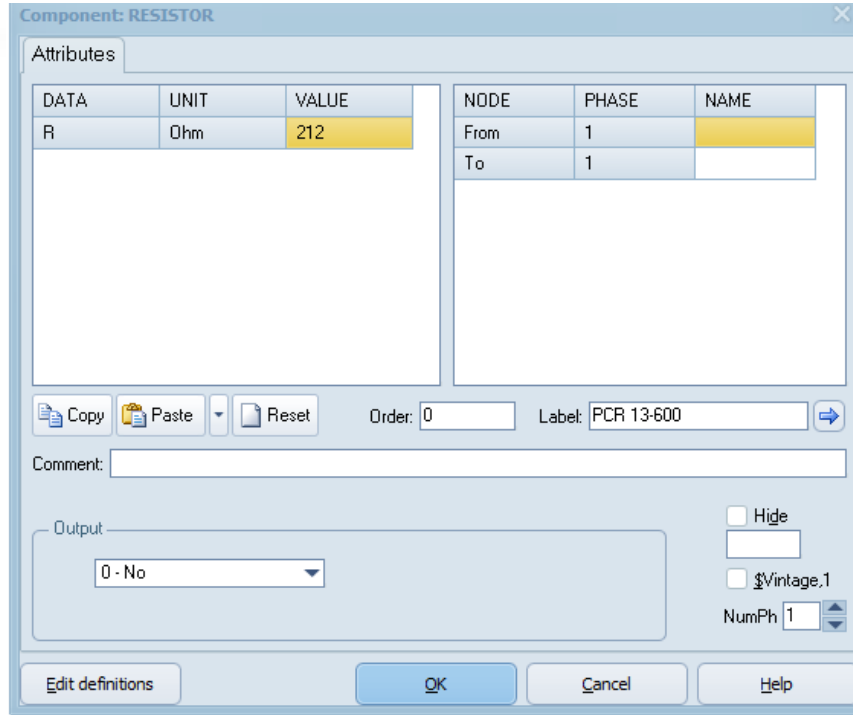
Figura 28. Definición de radios y alturas en un PCR-600.

De acuerdo con las ecuaciones 34 y 35, el radio equivalente y la impedancia característica del poste es;

$$r_{eq} = \frac{r_1 h_2 + r_2 h + r_3 h_1}{2h} = \frac{(0.07)(6.5) + (0.13)(13) + (0.19)(6.5)}{(2 \times 13)} = 0.13 \text{ (m)} \quad (34)$$

$$Z_p 60 \left( \ln \left( \frac{h}{r_{eq}} \right) - 1 \right) = 60 \left( \ln \left( \frac{12}{0.13} \right) - 1 \right) = 211.5 \text{ ohms} \quad (35)$$

Para representar el poste de concreto reforzado (PCR-600) en ATP DRAW será haré mediante el elemento de resistor (Figura 29), llenándolo con datos de impedancia calculados.



| DATA | UNIT | VALUE |
|------|------|-------|
| R    | Ohm  | 212   |

| NODE | PHASE | NAME |
|------|-------|------|
| From | 1     |      |
| To   | 1     |      |

Order: 0 Label: PCR 13-600

Comment:

Output: 0 - No

Hide ☐ \$Vintage.1 ☐ NumPh 1

Edit definitions OK Cancel Help

Figura 29. Representación de impedancia de PCR-600.

### 3.10 SISTEMA DE PUESTA A TIERRA

En este trabajo se realizarán mediciones de bajante a tierra de transformadores de distribución con el Probador Digital de resistencia de tierra UNI-T UT522.

#### Descripción

Probador de resistencia de Tierra Digital UT522 (figura 30), detector de voltaje de 400V, 4000Ohm, medidor de ohmios, retroiluminación LCD, 4000 cuentas.

El probador está diseñado con un chip microcontrolador inteligente para mantener una alta precisión y confiabilidad. Puede medir la resistencia a tierra de los dispositivos de puesta a tierra para instalaciones de energía eléctrica, aparatos eléctricos, sistemas de protección contra rayos, etc., y también medir la tensión de tierra (Se recomienda encarecidamente no utilizar el Probador en entornos exteriores severos, como lluvia o truenos) [30].



Figura 30. Probador Digital de resistencia de tierra UNI-T UT522.

**Estructura del probador y accesorios ver figura 31.**

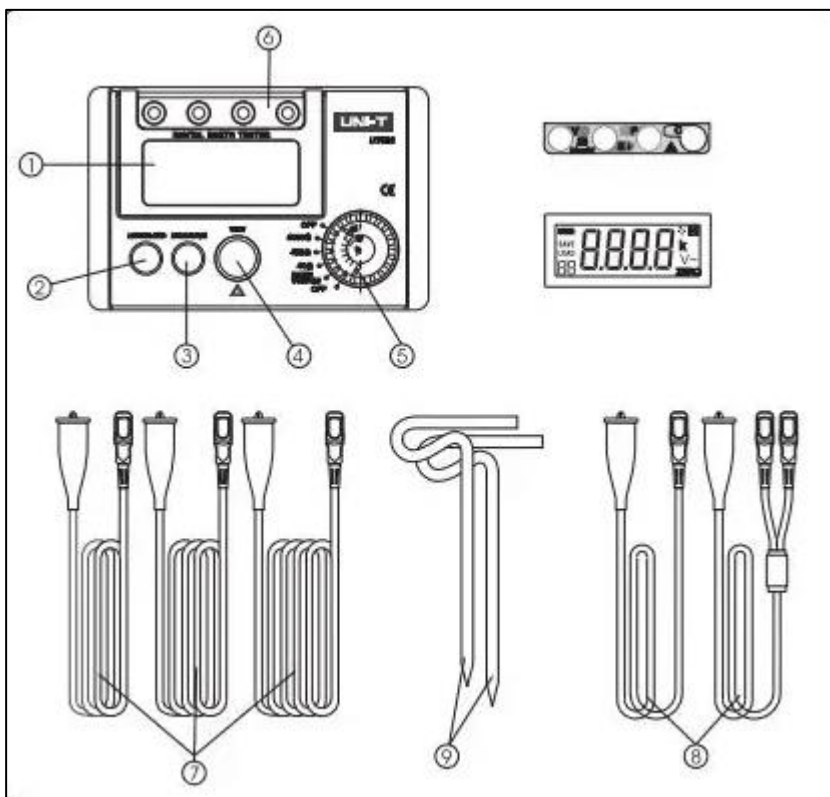


Figura 31. Estructura del probador y accesorios.

Donde:

1. Pantalla LCD
2. Botón LUZ/CARGA
3. Botón ESPERAR/GUARDAR
4. Botón TEST
5. Interruptor giratorio
6. Terminales de entrada
7. Cables de prueba estándar de 3 hilos
8. Cables de prueba simples de 2 hilos
9. Estacas auxiliares de tierra

La serie UT520 puede realizar una medición precisa de la resistencia a tierra de 3 cables y 2 cables (figura 32) para sistemas eléctricos y de energía, equipos de protección contra rayos y sistemas redondos de todos los equipos eléctricos. Esta serie es el probador introductorio de resistencia a la tierra de alto valor económico de la marca. Su diseño ligero es conveniente para el trabajo de campo [30].



Figura 32. Cables para realizar una medición.

## Especificaciones técnicas ver tabla 12

| Especificaciones                  | Rango                                                                                         | Precisión                                           |
|-----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| Modelo                            |                                                                                               | UT522                                               |
| Resistencia a tierra ( $\Omega$ ) | 0 ~ 40 $\Omega$<br>0 ~ 400 $\Omega$<br>0 ~ 4000 $\Omega$                                      | $\pm(2\% + 20)$<br>$\pm(2\% + 3)$<br>$\pm(2\% + 3)$ |
| Voltaje de tierra CA (V)          | 0 ~ 400V<br>Frecuencia: 50Hz/60Hz                                                             | $\pm(1\% + 6)$<br>N                                 |
| Características                   |                                                                                               |                                                     |
| Mostrar recuento                  |                                                                                               | 4000                                                |
| Rango manual                      |                                                                                               | N                                                   |
| Apagado automático                | Aproximadamente 10 minutos                                                                    | N                                                   |
| Indicación de batería baja        |                                                                                               | N                                                   |
| Retención de datos                |                                                                                               | N                                                   |
| Almacenamiento de datos           |                                                                                               | 20 grupos                                           |
| Retroiluminación LCD              |                                                                                               | N                                                   |
| Pantalla de icono completa        |                                                                                               | N                                                   |
| Protección de doble aislamiento   |                                                                                               | N                                                   |
| Contacto Indicación Badness       | El Puerto C o el puerto E no entran en contacto con la pantalla & rdquo;--- $\Omega$ & rdquo; | N                                                   |
| Exceso de rango                   | Pantalla OL                                                                                   | N                                                   |
| Prueba sencilla de 2 hilos        |                                                                                               | N                                                   |
| Prueba de precisión de 3 cables   |                                                                                               | N                                                   |
| Características generales         |                                                                                               |                                                     |
| Potencia                          | Baterías de 1,5 V (5 #) X 6 (NO)                                                              |                                                     |
| Tamaño LCD                        | 70,6mm X 34mm                                                                                 |                                                     |
| Color del producto                | Rojo y gris                                                                                   |                                                     |
| Peso neto del producto            | 560g                                                                                          |                                                     |
| Tamaño del producto               | 160mm X 100mm X 70,5mm                                                                        |                                                     |

Tabla 12. Especificaciones técnicas UNI-T UT522.

Medición de precisión (con uso de cables de prueba estándar) Inserte las estacas de tierra P y C profundamente en el suelo, asegúrese de que las estacas de tierra y el objeto probado estén en línea recta y a una distancia de 5 a 10 metros entre sí. ver la figura 33 para ver las conexiones de los cables [30].

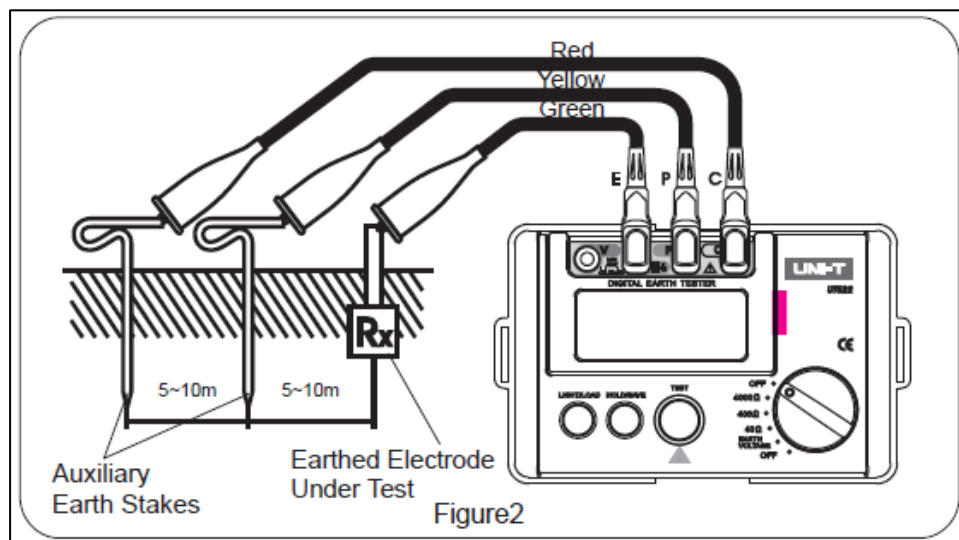


Figura 33. Conexiones de los cables para medición.



Donde:

C: Electrodo auxiliar

P: Electrodo potencial

E: Electrodo puesto a tierra bajo prueba

### **3.10.1 MEDICIÓN DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA EN CAMPO**

Se realizó mediciones de la resistencia de puesta a tierra de los electrodos puestos a tierra de dos transformadores monofásicos autoprotegidos con apoyo del Ingeniero Charles Hernández Valencia y con la ayuda del liniero LV Filemón Montes Palacio de la Zona Matamoros de la Comisión Federal de Electricidad. Se realizó la primera medición de resistencia de puesta a tierra en la calle 3 Sur Teacalco de Dorantes a transformador monofásico autoprotegido de 10 kVA (Figuras 34 a 38) siguiendo los siguientes pasos:

- 1) Colocar el interruptor giratorio en el rango de resistencia a tierra de 40  $\Omega$ .
- 2) Presione el botón "TEST", el botón se iluminará, indicando que el instrumento está en estado de medición. Y la pantalla LCD muestra el valor de resistencia de tierra medido. Si mide la resistencia a tierra:  $<400 \Omega$ , gire el interruptor giratorio al rango de 400  $\Omega$ ;  $<40\Omega$ , gire el interruptor giratorio al rango de 40 $\Omega$ .

Se puede seleccionar el rango de resistencia de tierra en orden que desee; sin embargo, para obtener un valor preciso, asegurarse de seleccionar el mejor rango para su medición.

Medición de tierras de transformadores realizadas en campo.



Figura 34. Transformador autoprotegido tipo poste de 10 kVA.



Figura 35. Protecciones de media tensión de transformador autoprotegido tipo poste de 10 kVA.



Figura 36. Conexión de probador Digital UNI-T UT522.



Figura 37. Conexión de los 3 cables probador Digital UNI-T UT522.



Figura 38. Resistencia de electrodo puesto a tierra de transformador autoprotegido de 10 kVA.

Se realizó la segunda medición de resistencia de puesta a tierra en la calle 2 Norte Teacalco de Dorantes a transformador monofásico autoprotegido de 10 kVA, figuras 39 a 42.



Figura 39. Transformador autoprotegido tipo poste de 10 kVA



Figura 40. Protecciones de media tensión de transformador autoprotegido tipo poste de 10 kVA.



Figura 41. Conexión de probador Digital UNI-T UT522.



Figura 42. Resistencia de electrodo puesto a tierra de transformador autoprotegido de 10 kVA.

## 3.10.2 SISTEMA DE PUESTA A TIERRA EN ATP DRAW

En la figura 43 se muestra la representación de sistema a tierra en ATP DRAW

Component: RESISTOR

Attributes

| DATA | UNIT | VALUE |
|------|------|-------|
| R    | Ohm  | 3     |

| NODE | PHASE | NAME |
|------|-------|------|
| From | 1     |      |
| To   | 1     |      |

Copy Paste Reset Order: 0 Label: SPT

Comment:

Output: 1 - Current

Hide  
\$Vintage,1  
NumPh 1

Edit definitions OK Cancel Help

Figura 43. Representación de resistencia de puesta a tierra en ATP DRAW.



### 3.11 PRIMER ESCENARIO

Primer escenario trata de un sistema de distribución que consta de un transformador monofásico con cortacircuitos fusibles aguas debajo de apartarrayos como se muestra en la figura 44, con los siguientes datos:

Línea de distribución de 13.2 Kv

Transformador monofásico de 10 kVA

Cortacircuitos fusible

Apartarrayos

Sistema de puesta a tierra

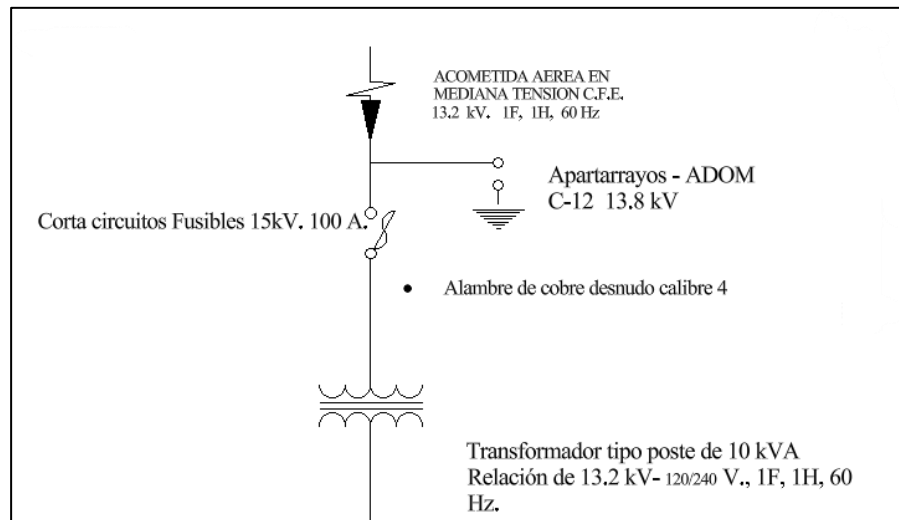


Figura 44. Unifilar de primer caso de estudio.

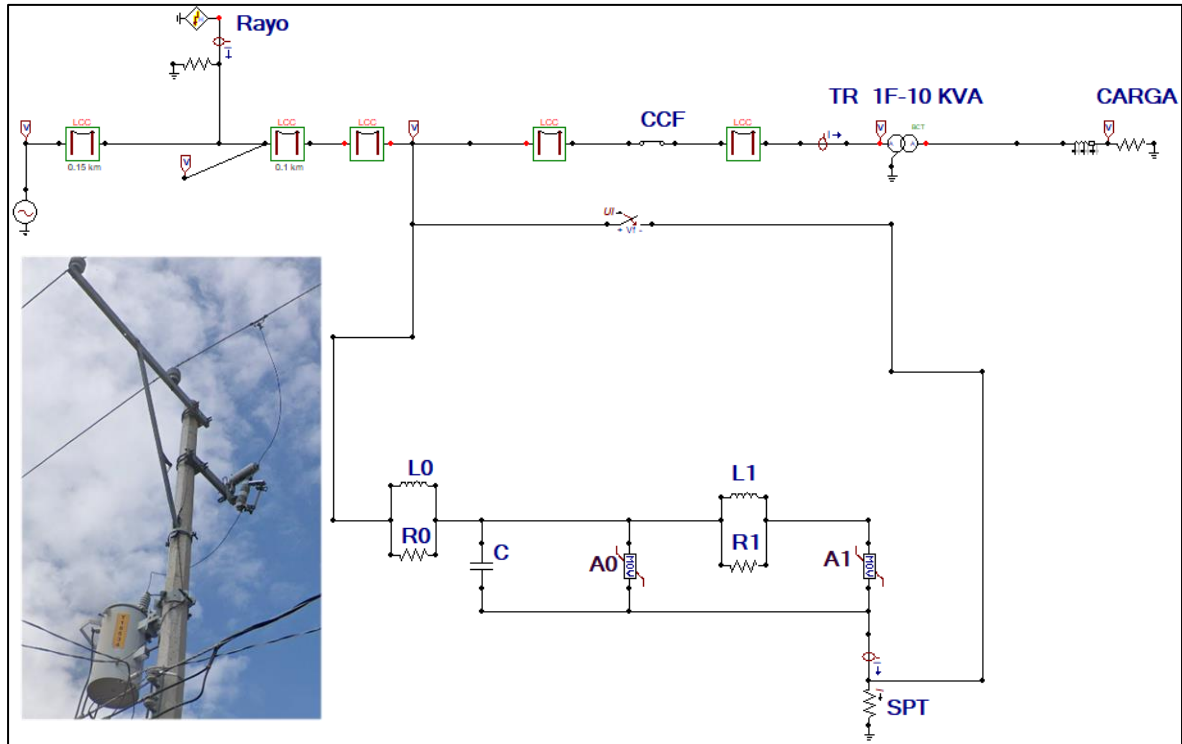


Figura 45. Modelo en ATP de primer caso de estudio.

## 3.12 SEGUNDO ESCENARIO

Primer escenario trata de un sistema de distribución que consta de un transformador monofásico con cortacircuitos fusibles aguas debajo de apartarrayos como se muestra en la figura 46, con los siguientes datos:

Línea de distribución de 13.2 kV

Transformador monofásico de 10 kVA

Cortacircuitos fusible

Apartarrayos

Sistema de puesta a tierra

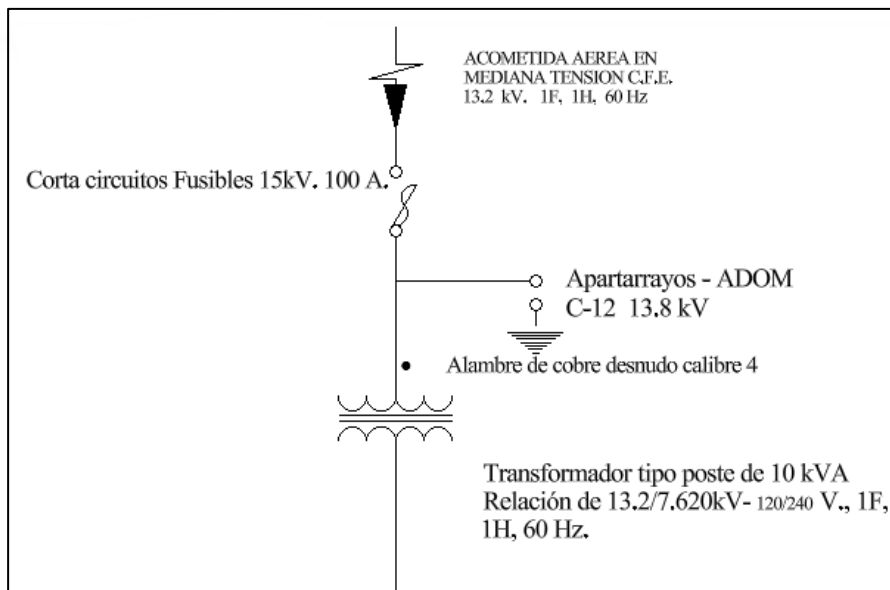


Figura 46. Unifilar de segundo caso de estudio.

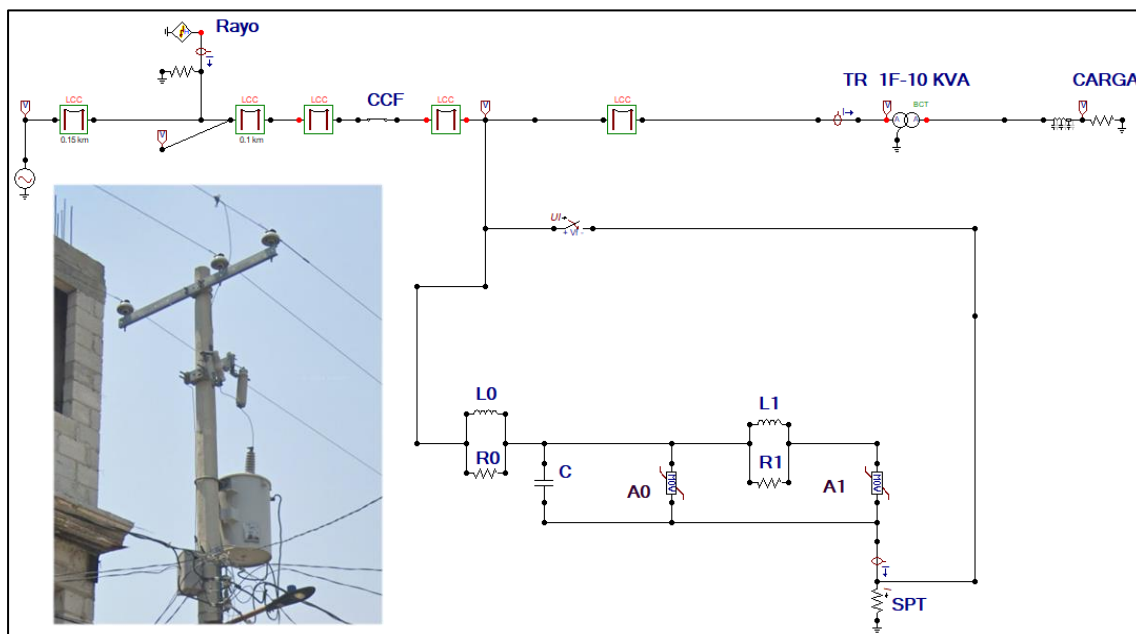


Figura 47. Modelo en ATP de segundo caso de estudio.

### CAPÍTULO IV. RESULTADOS

Mediante ATP DRAW se realizaron simulaciones de dos modelos distintos de una subestación tipo poste en donde se fue variando la corriente de descarga de rayo y la resistencia de puesta a tierra para poder comparar las tensiones máximas que le llegan al transformador.

Simulación de Escenario 1 que consta de un circuito de distribución, analizando el transitorio electromagnético provocado por una descarga atmosférica con una magnitud de corriente de **5 kA** y con resistencia de puesta a tierra de apartarrayos de **10 Ohms**, en la figura 48 y 49 se puede observar el voltaje en el primario y secundario respectivamente del transformador y en la figura 50 la corriente que es drenada por el electrodo puesto a tierra.

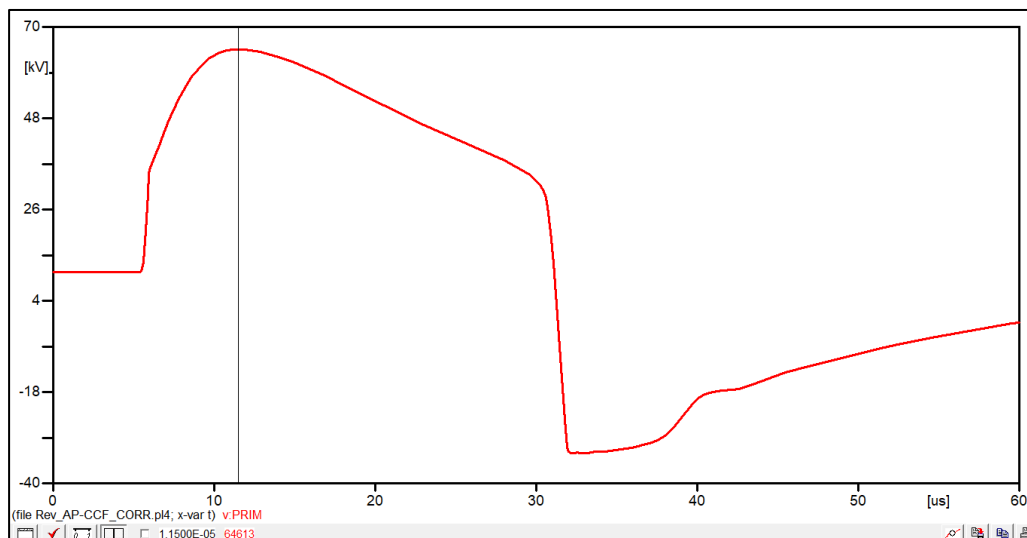


Figura 48. Voltaje pico en el primario del transformador con resistencia de puesta a tierra de 10 Ohms y una corriente de 5 kA de rayo.



## Análisis del efecto transitorio por descargas atmosféricas en redes de distribución

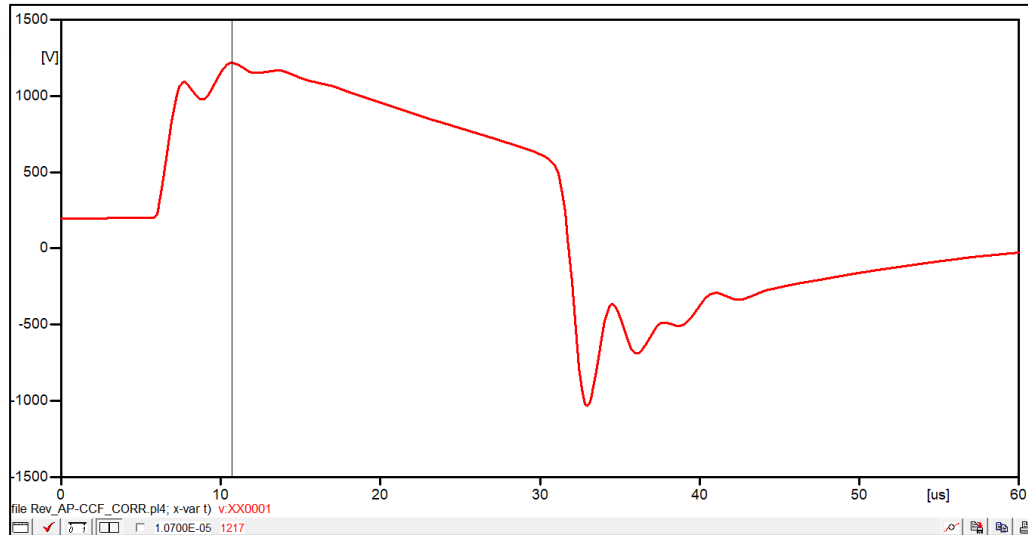


Figura 49. Voltaje pico en el secundario del transformador con resistencia de puesta a tierra de 10 Ohms y una corriente de 5 kA de rayo.

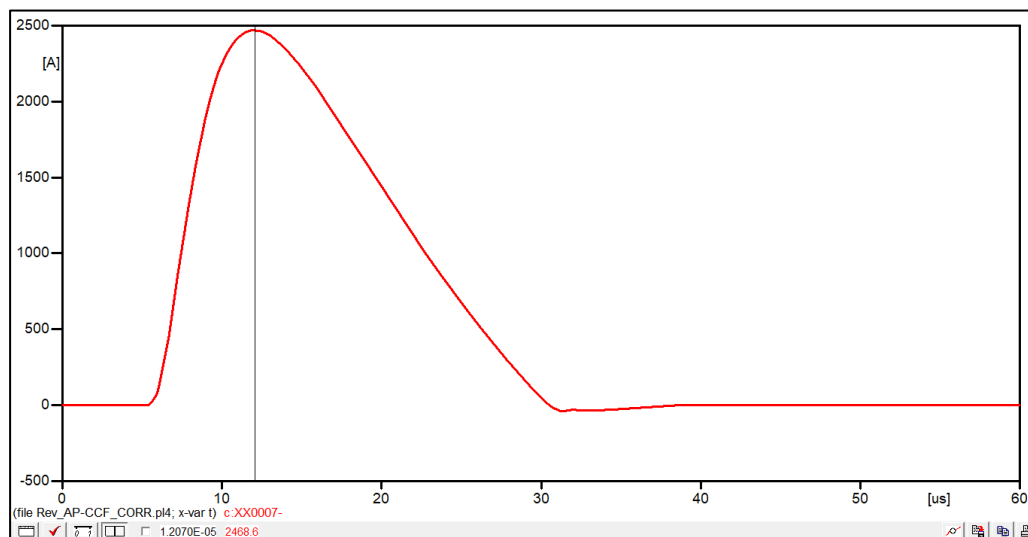


Figura 50. Corriente pico en la puesta a tierra de 10 Ohms, para una corriente del rayo de 5 kA.

Simulación de escenario 2 en ATP DRAW de un transitorio electromagnético provocado por una descarga atmosférica con una magnitud de corriente de **5 kA** y con resistencia de puesta a tierra del apartarrayos de **10 Ohms**, en la figura 51 y 52 se puede observar el voltaje en el primario y secundario del transformador y en la figura 53 la corriente drenada por el electrodo puesto a tierra.



## Análisis del efecto transitorio por descargas atmosféricas en redes de distribución

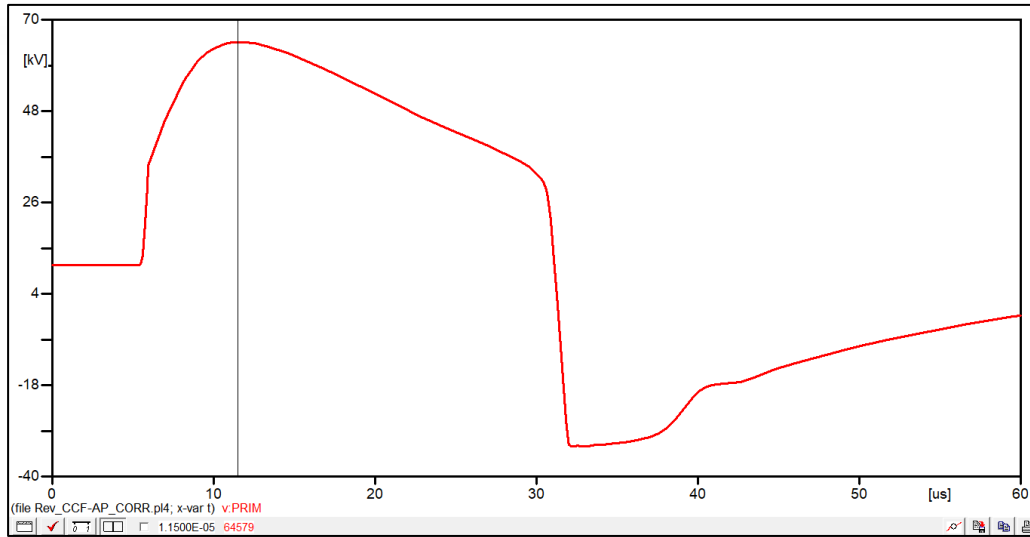


Figura 51. Voltaje pico en el primario del transformador con resistencia de puesta a tierra de 10 Ohms y una corriente de 5 kA de rayo.

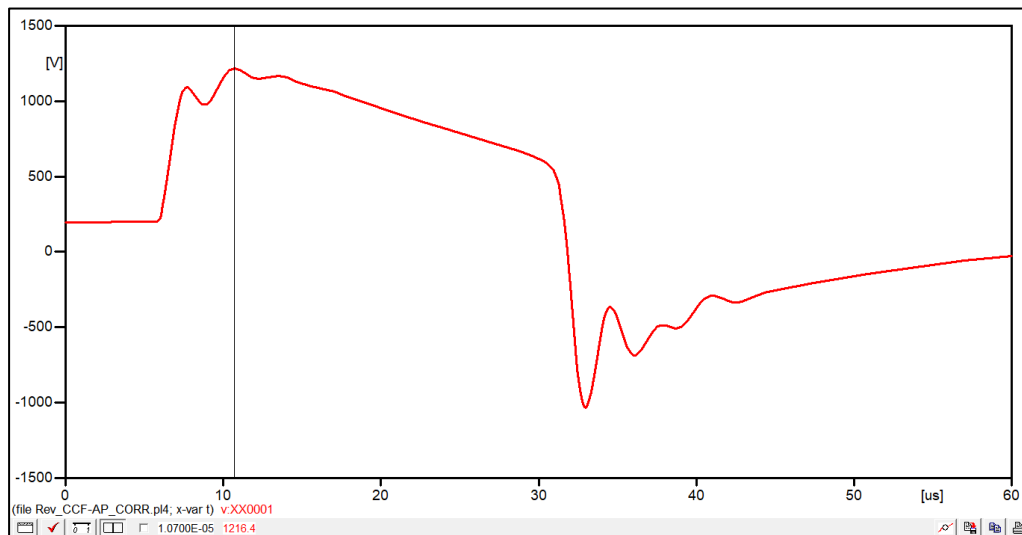


Figura 52. Voltaje pico en el secundario del transformador con resistencia de puesta a tierra de 10 Ohms y una corriente de 5 kA de rayo.

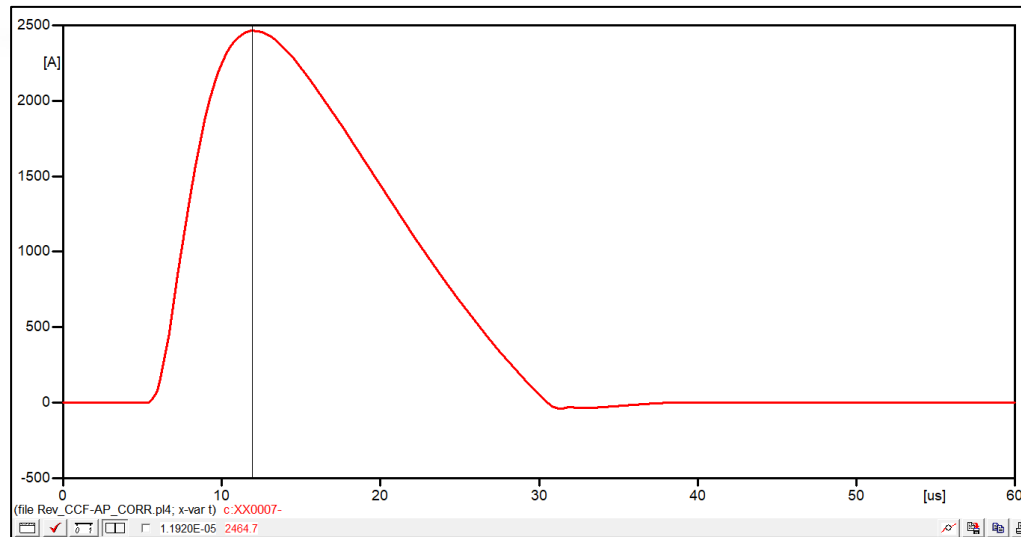


Figura 53. Corriente pico en la puesta a tierra de 10 Ohms, para una corriente del rayo de 5 kA.

De la simulación del escenario 1 se puede observar en las figuras 54 y 55 la tensión inducida en el primario y secundario del transformador por una descarga atmosférica de **5 kA** y en la figura 56 la corriente que es drenada por el electrodo puesto a tierra con una resistencia de puesta a tierra de **60 Ohms**.

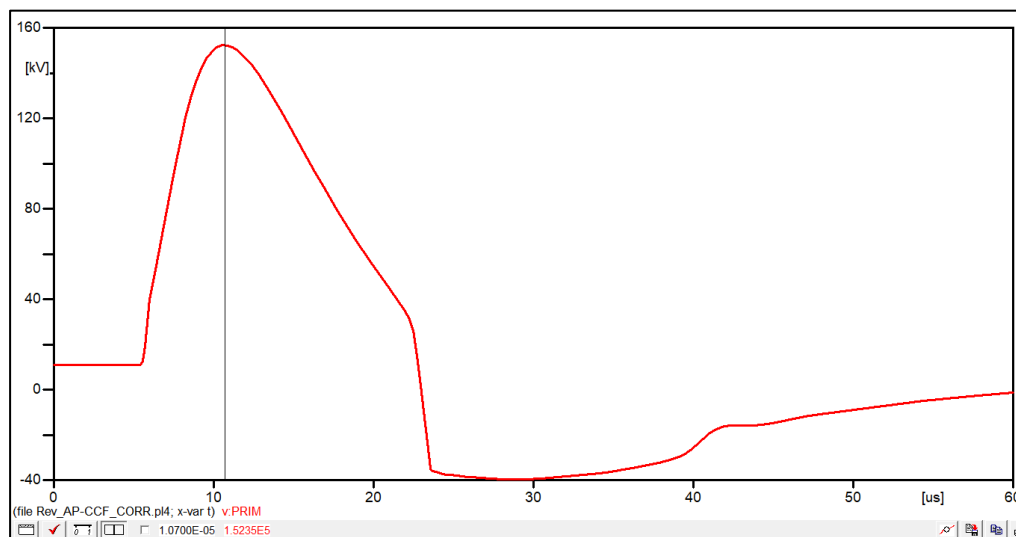


Figura 54. Voltaje pico en el primario del transformador con resistencia de puesta a tierra de 60 Ohms y una corriente de 5 kA de rayo.



## Análisis del efecto transitorio por descargas atmosféricas en redes de distribución

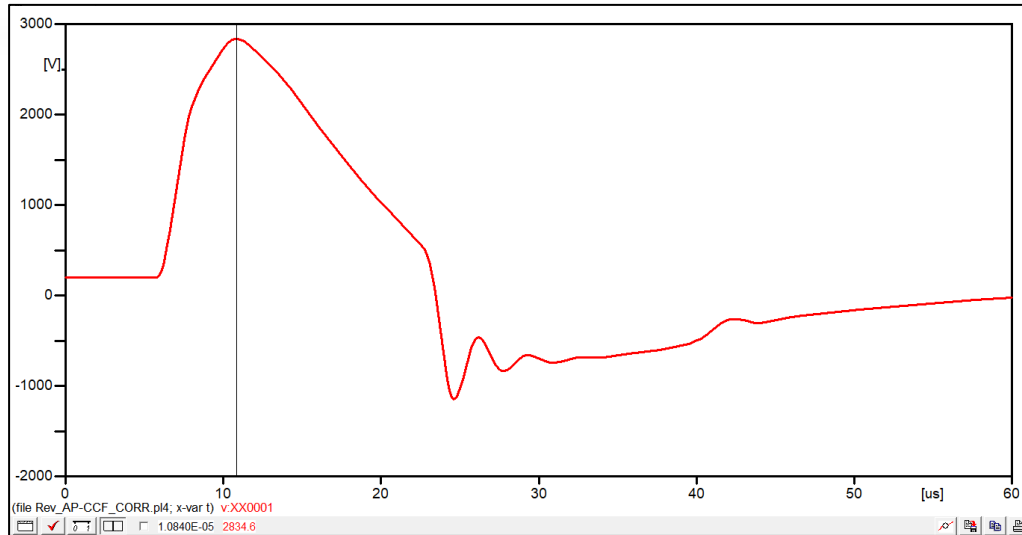


Figura 55. Voltaje pico en el secundario del transformador con resistencia de puesta a tierra de 60 Ohms y una corriente de 5 kA de rayo.

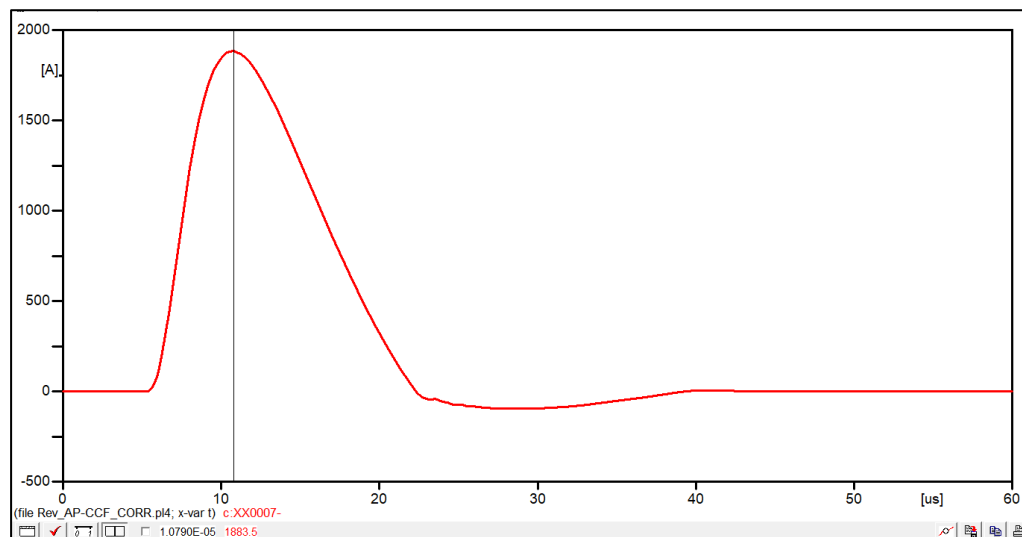


Figura 56. Corriente pico en la puesta a tierra de 60 Ohms, para una corriente del rayo de 5 kA

Simulación de escenario 2 en ATP DRAW de un transitorio electromagnético provocado por una descarga atmosférica con una magnitud de corriente de **5 kA** y con resistencia de puesta a tierra del apartarrayos de **60 Ohms**, en la figura 57 y 58 se puede observar el voltaje en el primario y secundario del transformador y en la figura 59 la corriente drenada por el electrodo puesto a tierra.



## Análisis del efecto transitorio por descargas atmosféricas en redes de distribución

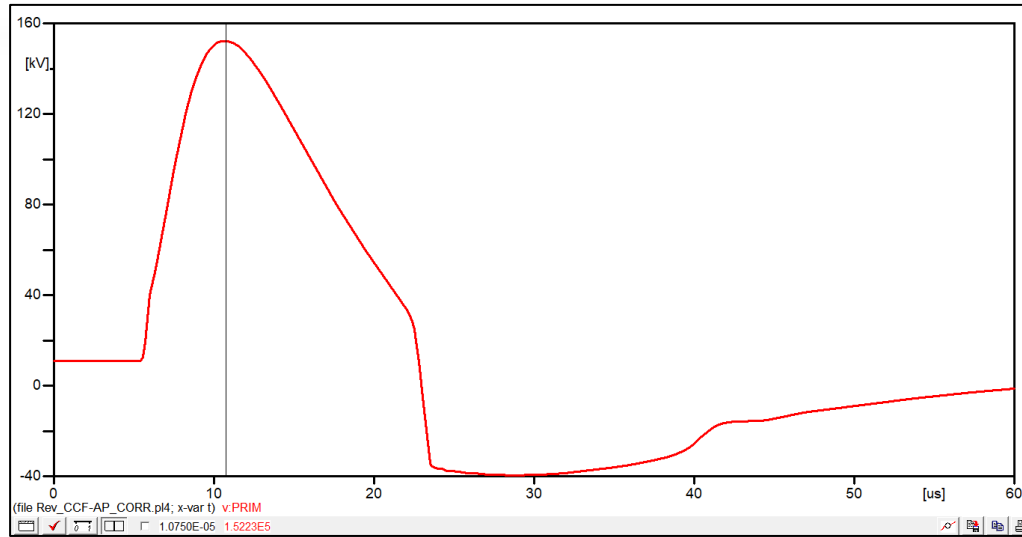


Figura 57. Voltaje pico en el primario del transformador con resistencia de puesta a tierra de 60 Ohms y una corriente de 5 kA de rayo.

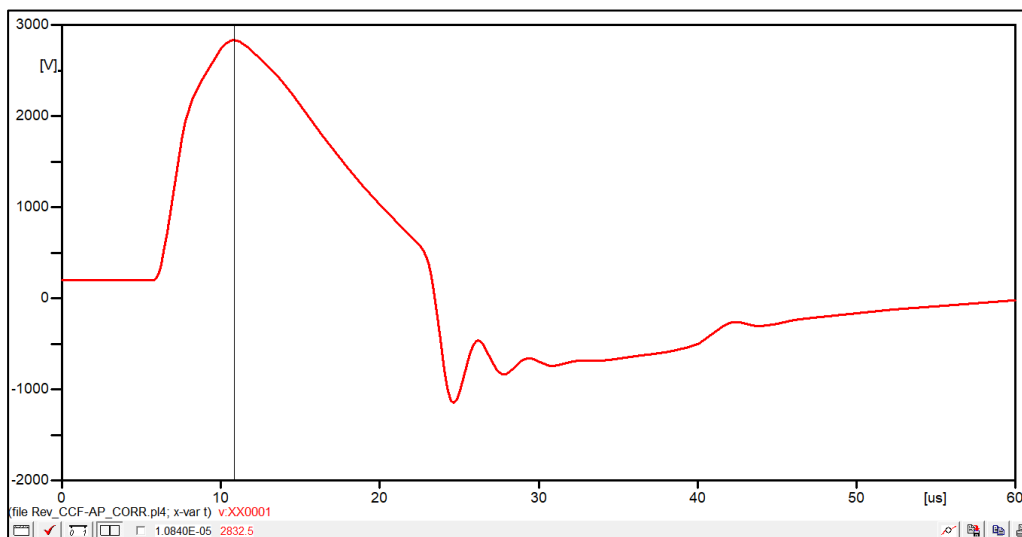


Figura 58. Voltaje pico en el secundario del transformador con resistencia de puesta a tierra de 60 Ohms y una corriente de 5 kA de rayo.



## Análisis del efecto transitorio por descargas atmosféricas en redes de distribución

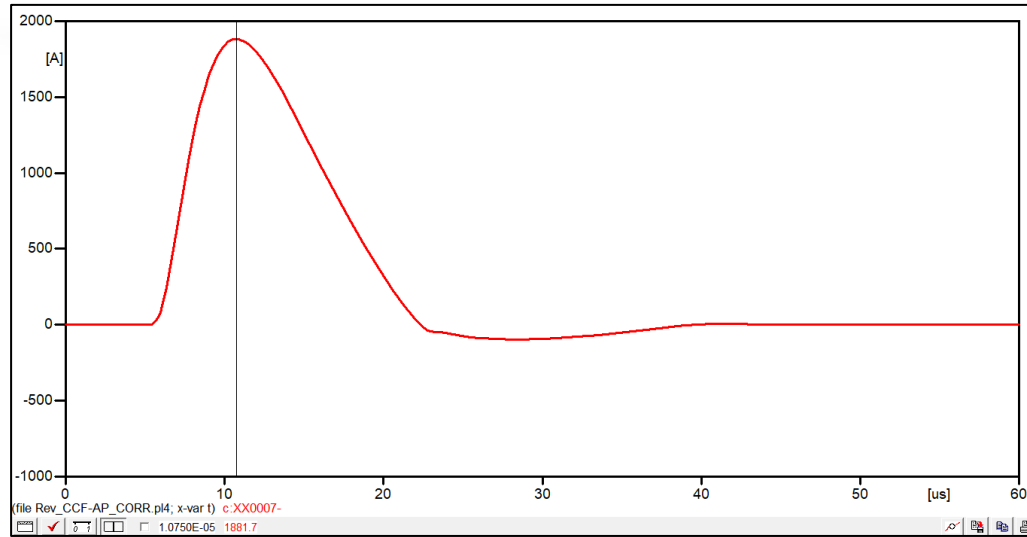


Figura 59. Corriente pico en la puesta a tierra de 60 Ohms, para una corriente del rayo de 5 kA.

De la simulación del escenario 1 se puede observar en las figuras 60 y 61 la tensión inducida en el primario y secundario del transformador por una descarga atmosférica de **7 kA** y en la figura 62 la corriente que es drenada por el electrodo puesto a tierra con una resistencia de puesta a tierra de **10 Ohms**.

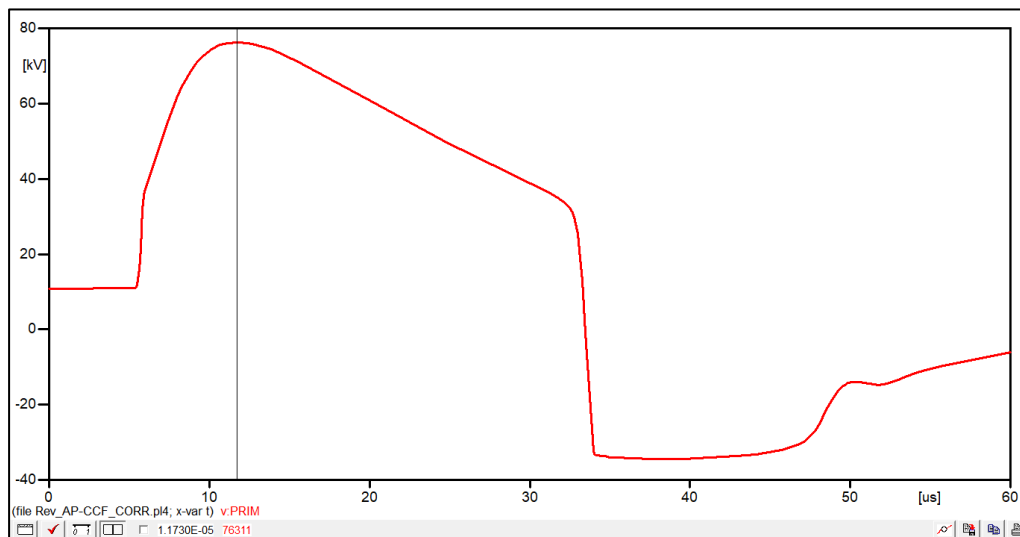


Figura 60. Voltaje pico en el primario del transformador con resistencia de puesta a tierra de 10 Ohms y una corriente de 7 kA de rayo.



## Análisis del efecto transitorio por descargas atmosféricas en redes de distribución

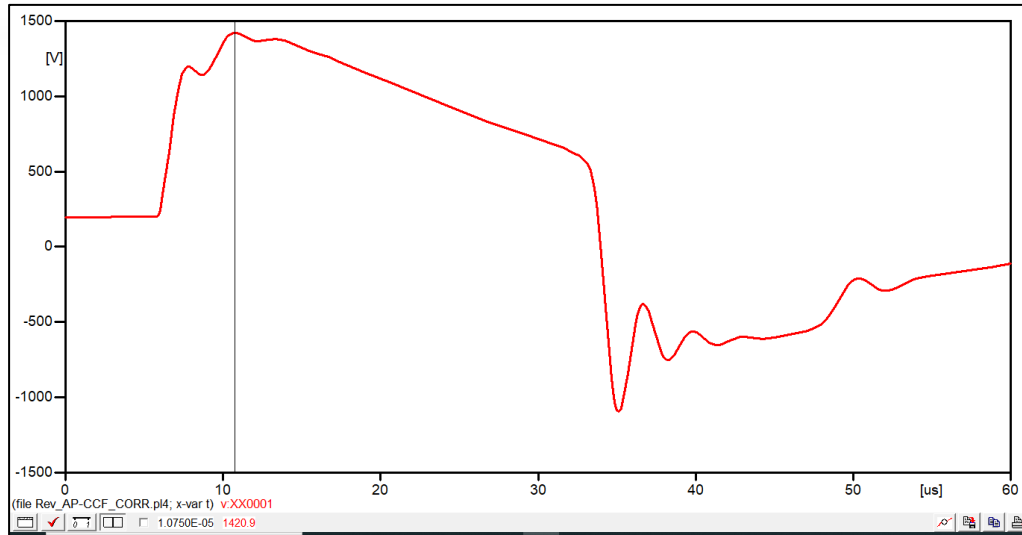


Figura 61. Voltaje pico en el secundario del transformador con resistencia de puesta a tierra de 10 Ohms y una corriente de 7 kA de rayo.

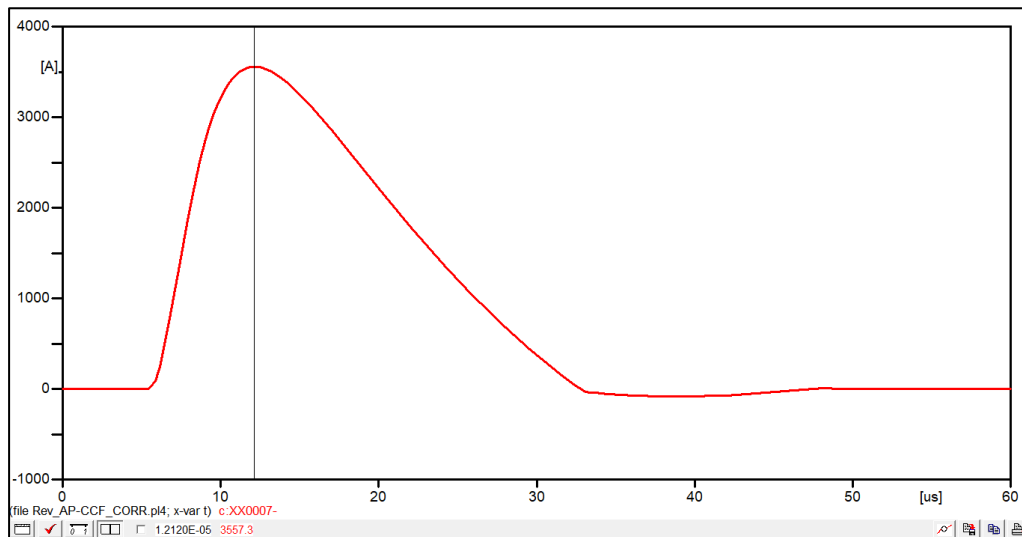


Figura 62. Corriente pico en la puesta a tierra de 10 Ohms, para una corriente del rayo de 7 kA.

Simulación de escenario 2 en ATP DRAW de un transitorio electromagnético provocado por una descarga atmosférica con una magnitud de corriente de **7 kA** y con resistencia de puesta a tierra del apartarrayos de **10 Ohms**, en la figura 63 y 64 se puede observar el voltaje en el primario y secundario del transformador y en la figura 65 la corriente drenada por el electrodo puesto a tierra.

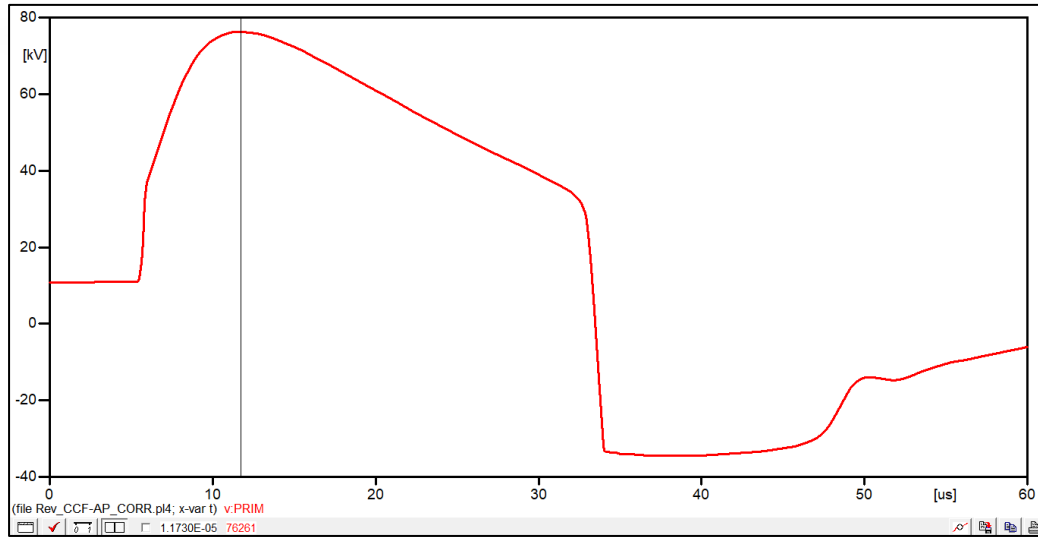


Figura 63. Voltaje pico en el primario del transformador con resistencia de puesta a tierra de 10 Ohms y una corriente de 7 kA de rayo.

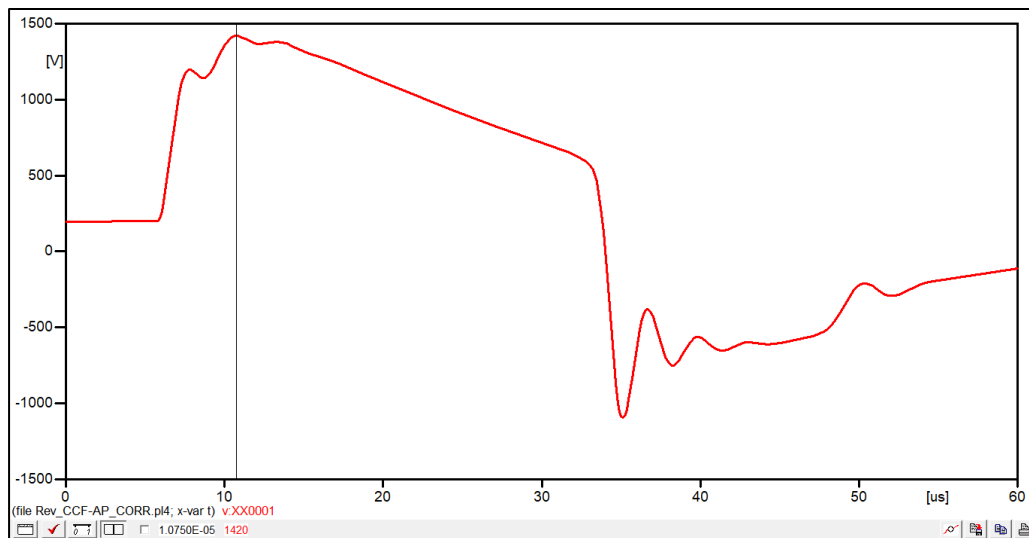


Figura 64. Voltaje pico en el secundario del transformador con resistencia de puesta a tierra de 10 Ohms y una corriente de 7 kA de rayo.



## Análisis del efecto transitorio por descargas atmosféricas en redes de distribución

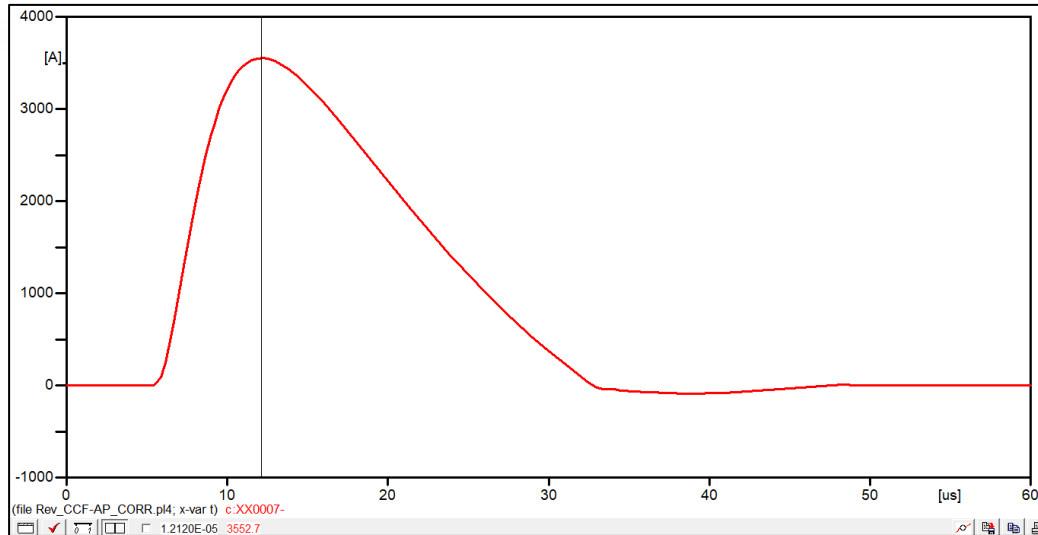


Figura 65. Corriente pico en la puesta a tierra de 10 Ohms, para una corriente del rayo de 7 kA.

De la simulación del escenario 1 se puede observar en las figuras 66 y 67 la tensión inducida en el primario y secundario del transformador por una descarga atmosférica de **7 kA** y en la figura 68 la corriente que es drenada por el electrodo puesto a tierra con una resistencia de puesta a tierra de **60 Ohms**.

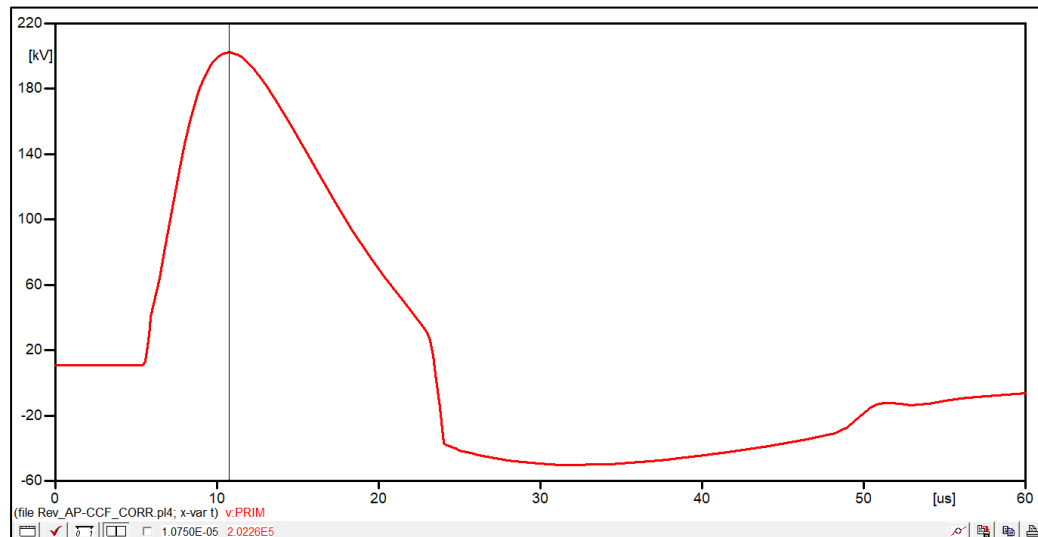


Figura 66. Voltaje pico en el primario del transformador con resistencia de puesta a tierra de 60 Ohms y una corriente de 7 kA de rayo.

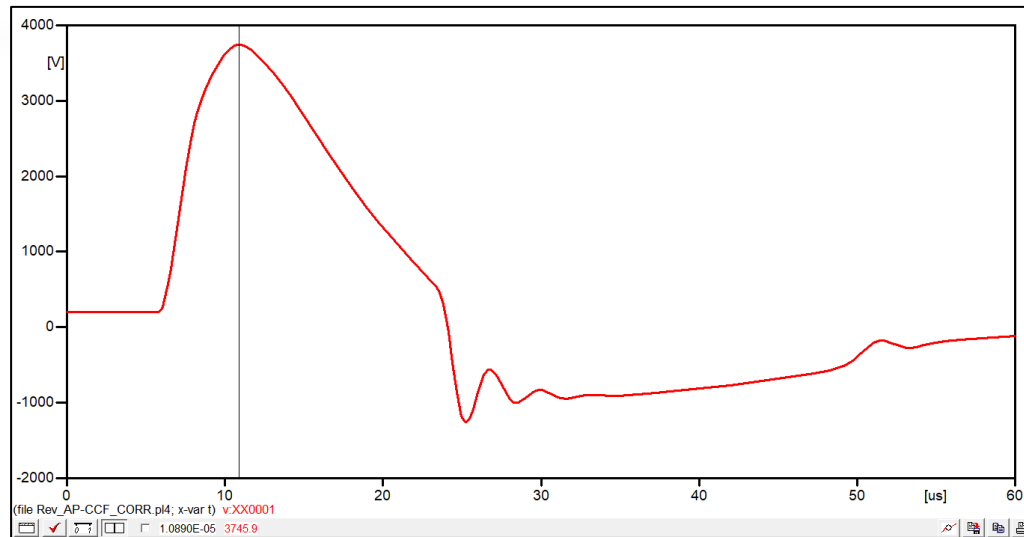


Figura 67. Voltaje pico en el secundario del transformador con resistencia de puesta a tierra de 60 Ohms y una corriente de 7 kA de rayo.

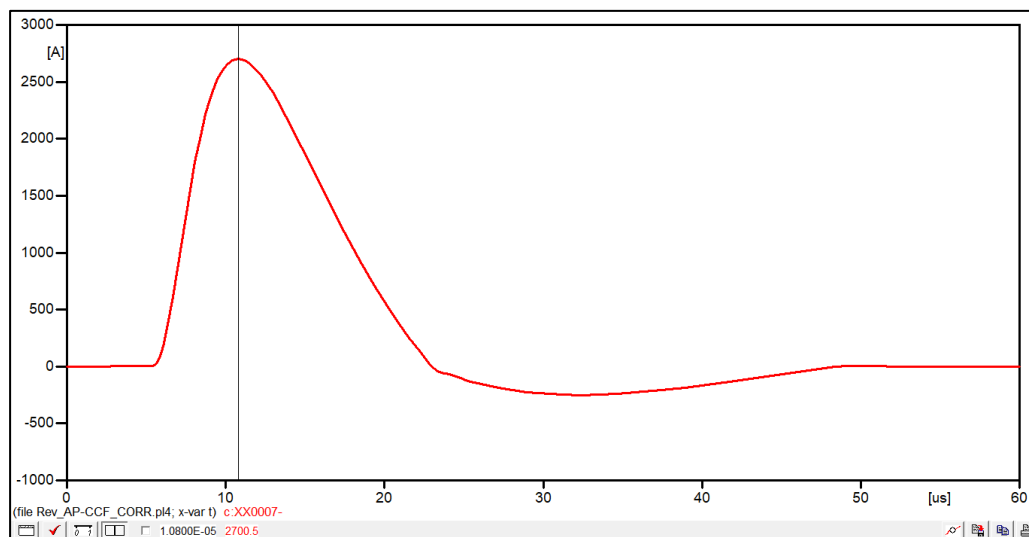


Figura 68. Corriente pico en la puesta a tierra de 60 Ohms, para una corriente del rayo de 7 kA.

Simulación de escenario 2 en ATP DRAW de un transitorio electromagnético provocado por una descarga atmosférica con una magnitud de corriente de **7 kA** y con resistencia de puesta a tierra del apartarrayos de **60 Ohms**, en la figura 69 y 70 se puede observar el voltaje en el primario y secundario del transformador y en la figura 71 la corriente drenada por el electrodo puesto a tierra.



## Análisis del efecto transitorio por descargas atmosféricas en redes de distribución

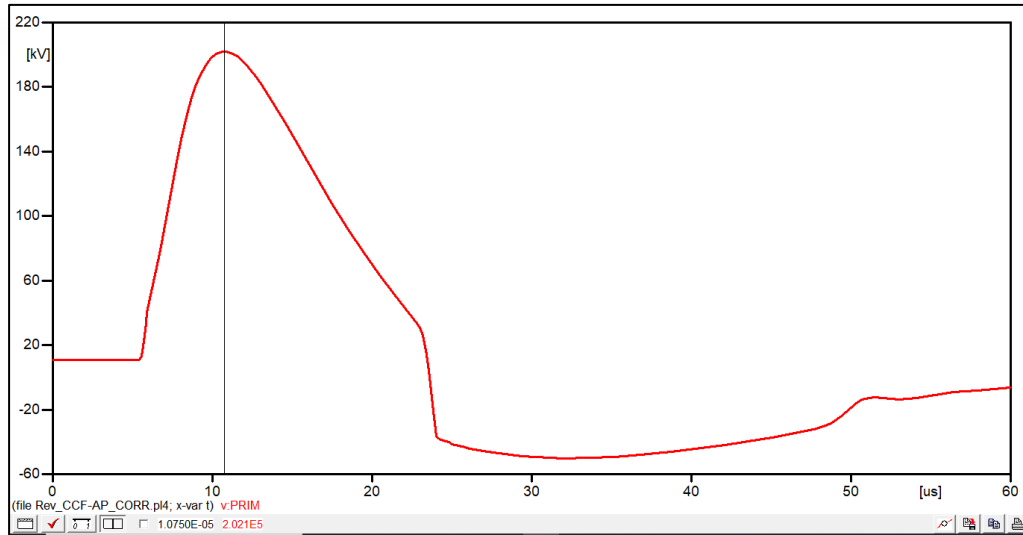


Figura 69. Voltaje pico en el primario del transformador con resistencia de puesta a tierra de 60 Ohms y una corriente de 7 kA de rayo.

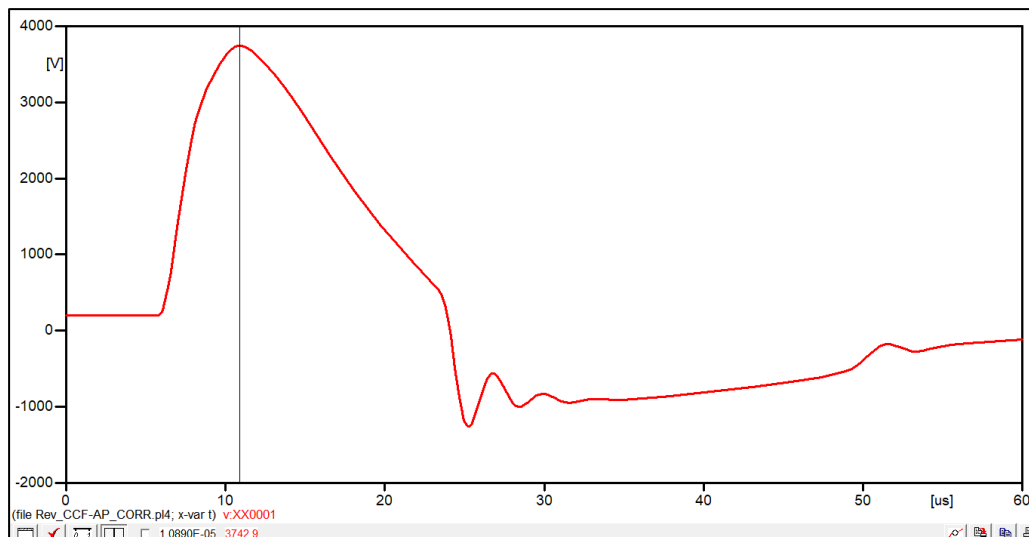


Figura 70. Voltaje pico en el secundario del transformador con resistencia de puesta a tierra de 60 Ohms y una corriente de 7 kA de rayo.



## Análisis del efecto transitorio por descargas atmosféricas en redes de distribución

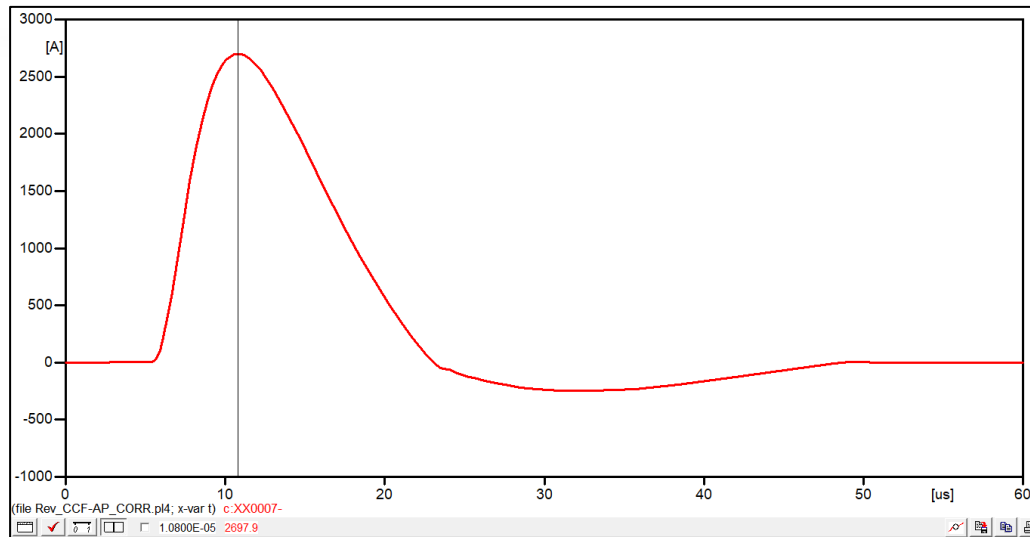


Figura 71. Corriente pico en la puesta a tierra de 60 Ohms, para una corriente del rayo de 7 kA.

De la simulación del escenario 1 se puede observar en las figuras 72 y 73 la tensión inducida en el primario y secundario del transformador por una descarga atmosférica de **10 kA** y en la figura 74 la corriente que es drenada por el electrodo puesto a tierra con una resistencia de puesta a tierra de **10 Ohms**.

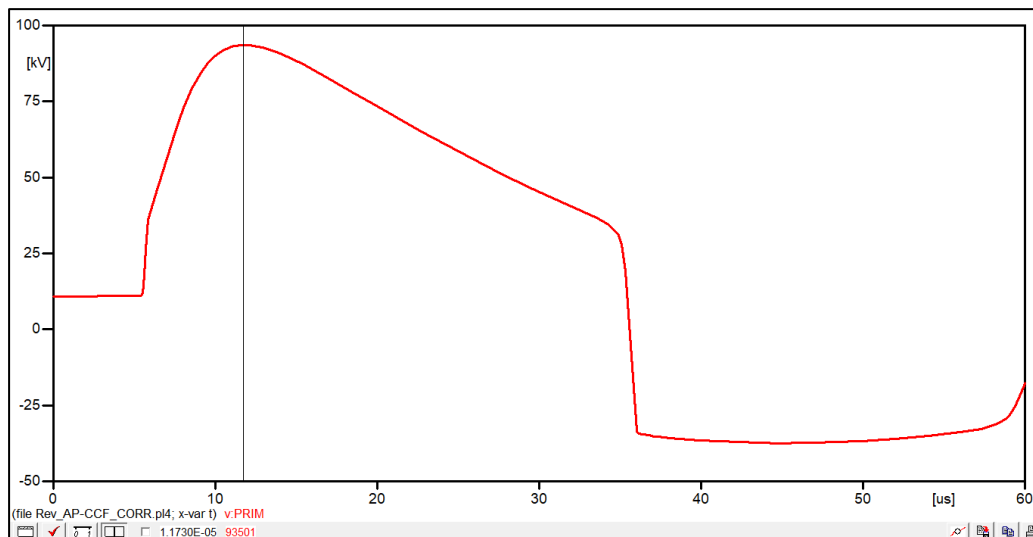


Figura 72. Voltaje pico en el primario del transformador con resistencia de puesta a tierra de 10 Ohms y una corriente de 10 kA de rayo.

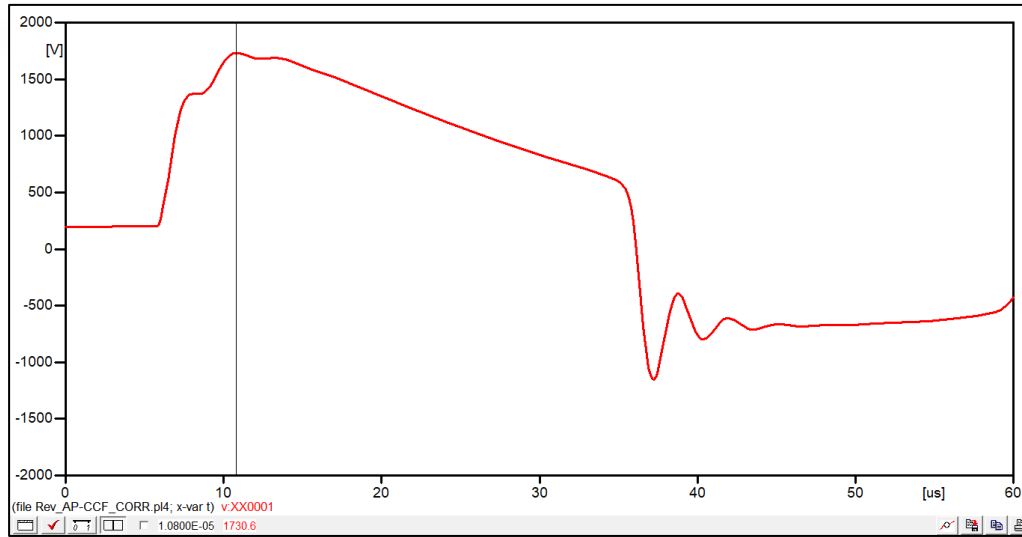


Figura 73. Voltaje pico en el secundario del transformador con resistencia de puesta a tierra de 10 Ohms y una corriente de 10 kA de rayo.

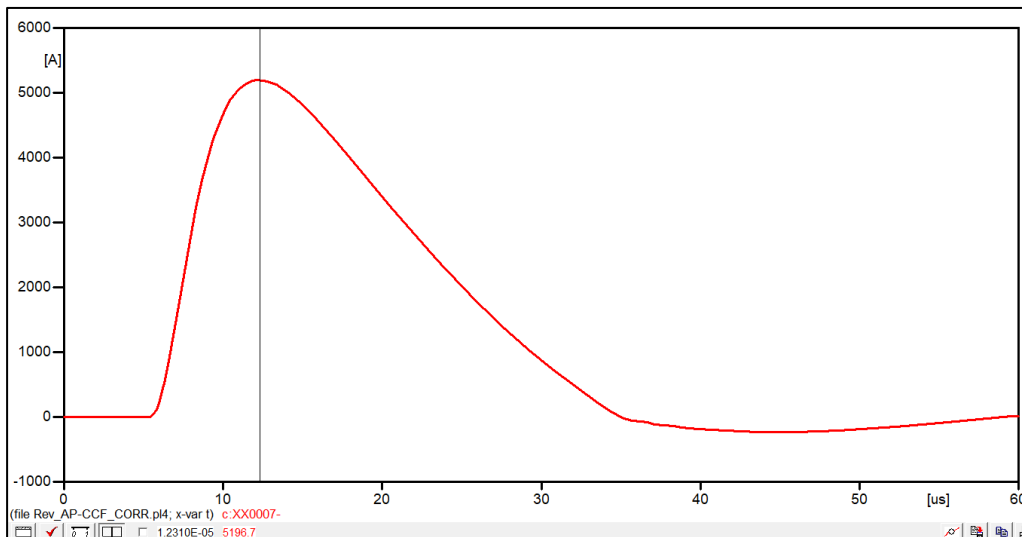


Figura 74. Corriente pico en la puesta a tierra de 10 Ohms, para una corriente del rayo de 10 kA.

Simulación de escenario 2 en ATP DRAW de un transitorio electromagnético provocado por una descarga atmosférica con una magnitud de corriente de **10 kA** y con resistencia de puesta a tierra del apartarrayos de **10 Ohms**, en la figura 75 y 76 se puede observar el voltaje en el primario y secundario del transformador y en la figura 77 la corriente drenada por el electrodo puesto a tierra.



## Análisis del efecto transitorio por descargas atmosféricas en redes de distribución

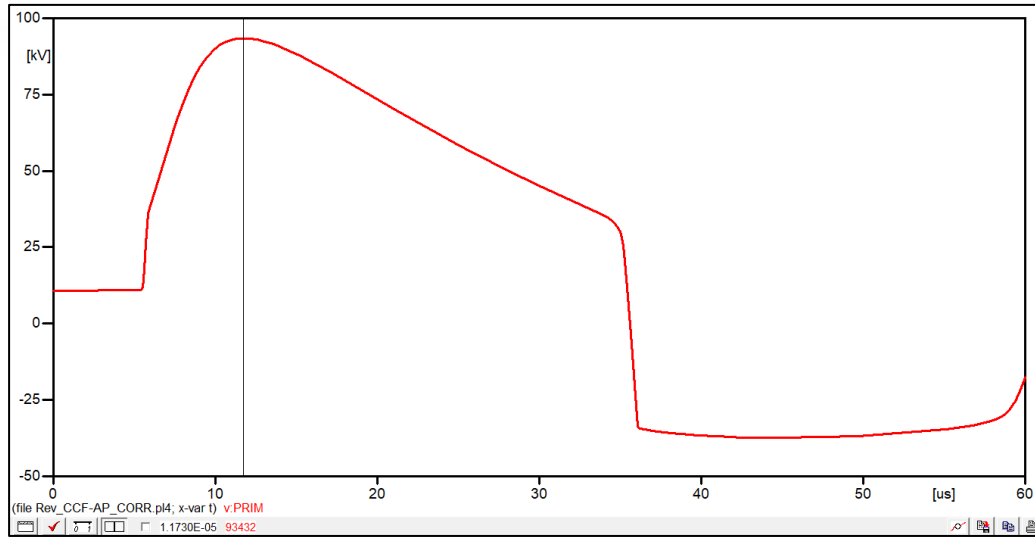


Figura 75. Voltaje pico en el primario del transformador con resistencia de puesta a tierra de 10 Ohms y una corriente de 10 kA de rayo.

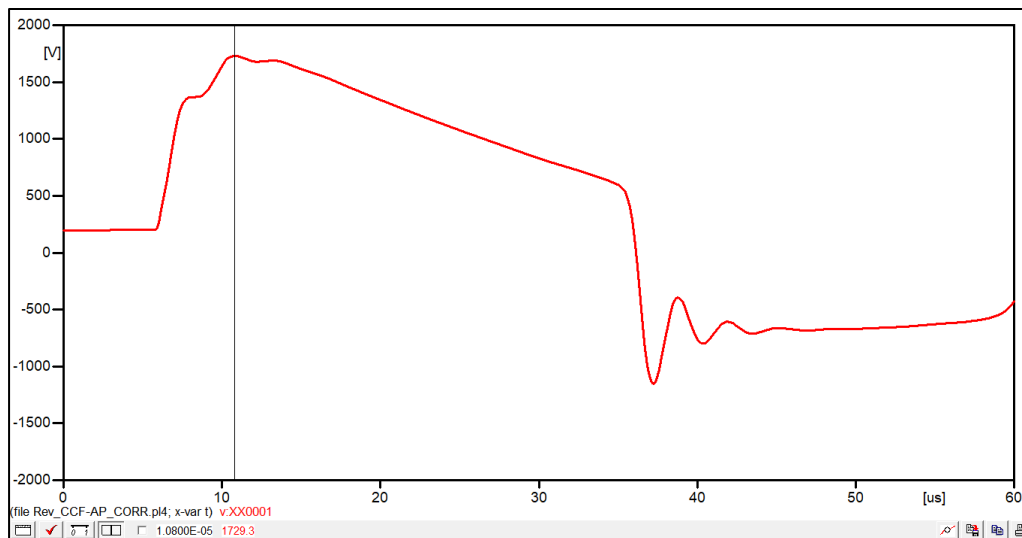


Figura 76. Voltaje pico en el secundario del transformador con resistencia de puesta a tierra de 10 Ohms y una corriente de 10 kA de rayo.



## Análisis del efecto transitorio por descargas atmosféricas en redes de distribución

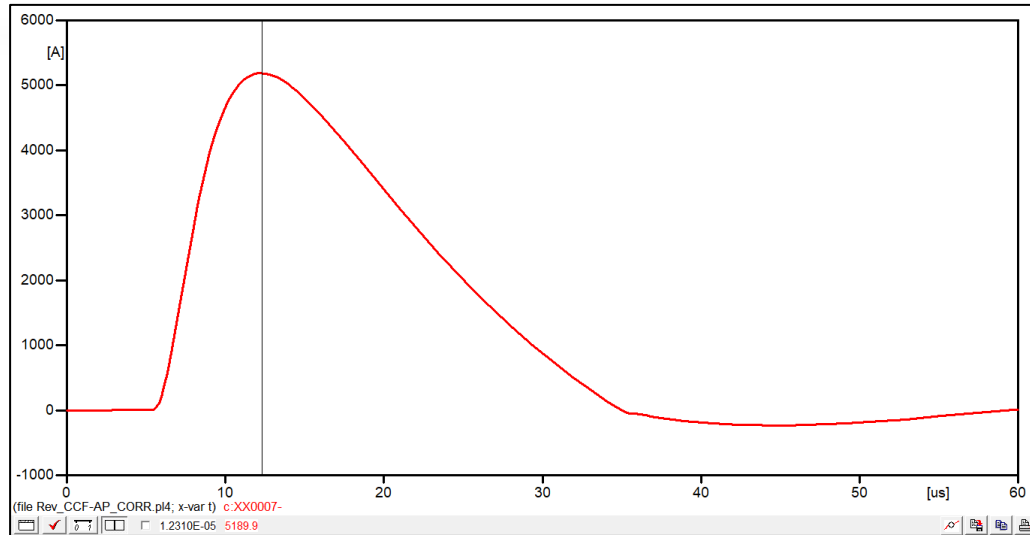


Figura 77. Corriente pico en la puesta a tierra de 10 Ohms, para una corriente del rayo de 10 kA.

De la simulación del escenario 1 se puede observar en las figuras 78 y 79 la tensión inducida en el primario y secundario del transformador por una descarga atmosférica de **10 kA** y en la figura 80 la corriente que es drenada por el electrodo puesto a tierra con una resistencia de puesta a tierra de **25 Ohms**.

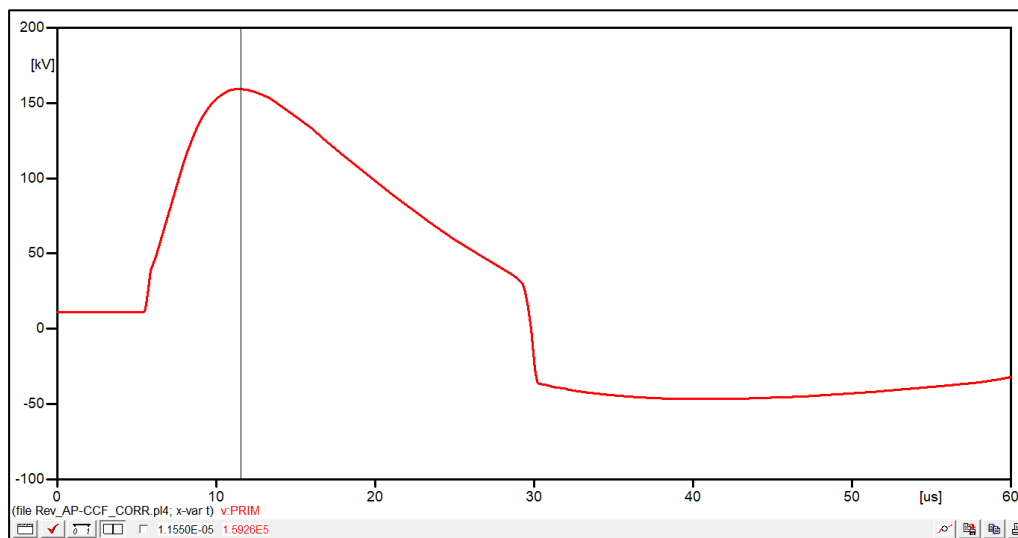


Figura 78. Voltaje pico en el primario del transformador con resistencia de puesta a tierra de 25 Ohms y una corriente de 10 kA de rayo.



## Análisis del efecto transitorio por descargas atmosféricas en redes de distribución

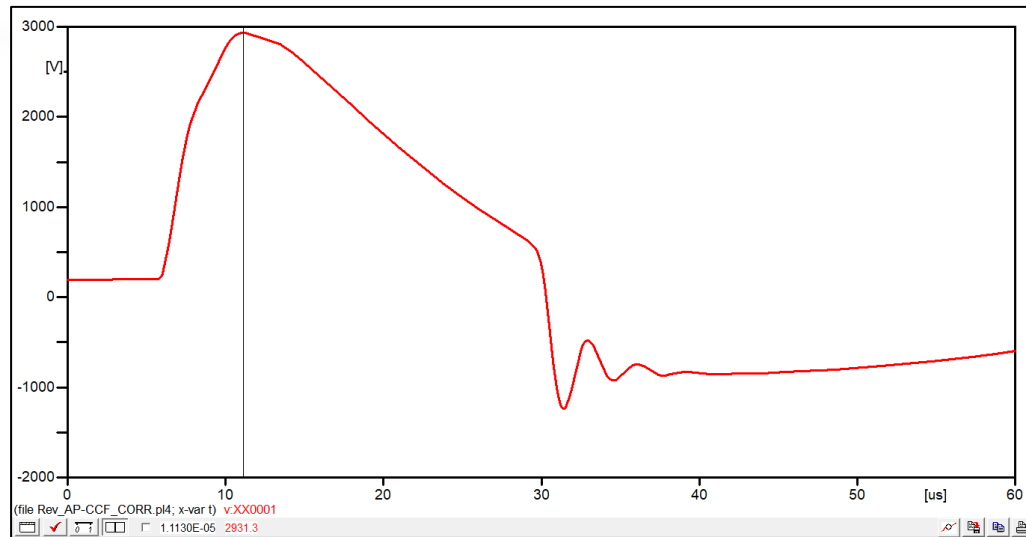


Figura 79. Voltaje pico en el secundario del transformador con resistencia de puesta a tierra de 25 Ohms y una corriente de 10 kA de rayo.

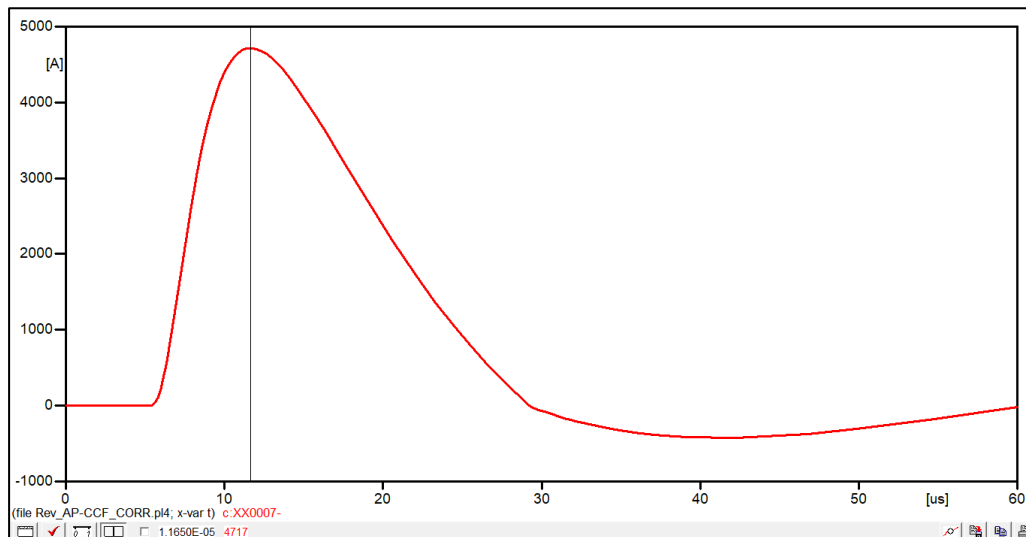


Figura 80. Corriente pico en la puesta a tierra de 25 Ohms, para una corriente del rayo de 10 kA.

Simulación de escenario 2 en ATP DRAW de un transitorio electromagnético provocado por una descarga atmosférica con una magnitud de corriente de **10 kA** y con resistencia de puesta a tierra del apartarrayos de **25 Ohms**, en la figura 81 y 82 se puede observar el voltaje en el primario y secundario del transformador y en la figura 83 la corriente drenada por el electrodo puesto a tierra.



## Análisis del efecto transitorio por descargas atmosféricas en redes de distribución

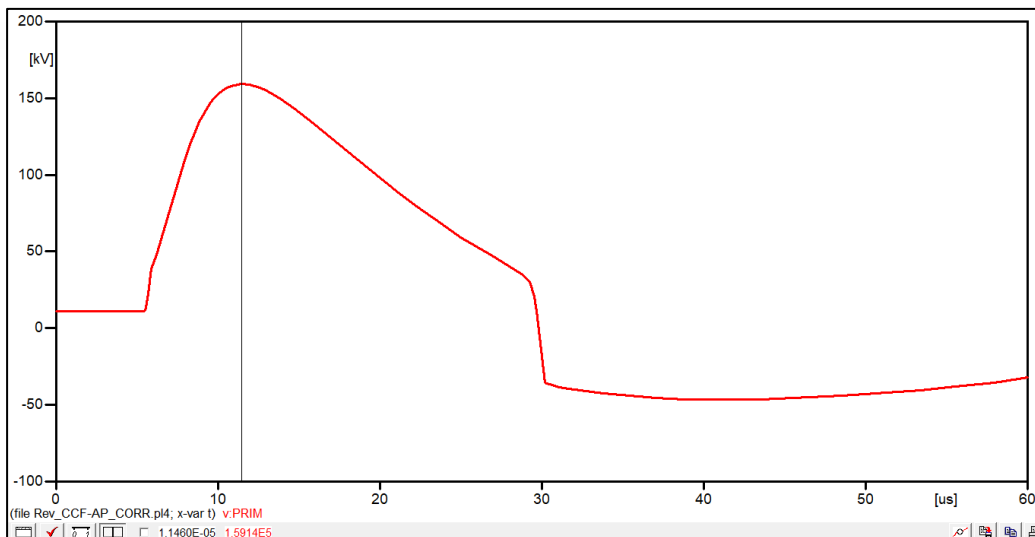


Figura 81. Voltaje pico en el primario del transformador con resistencia de puesta a tierra de 25 Ohms y una corriente de 10 kA de rayo.

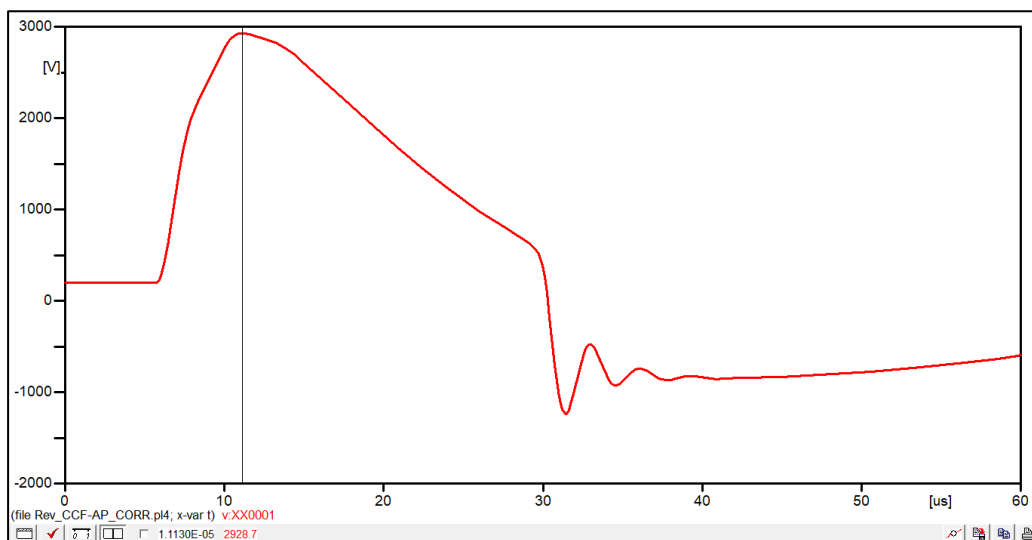


Figura 82. Voltaje pico en el secundario del transformador con resistencia de puesta a tierra de 25 Ohms y una corriente de 10 kA de rayo.



## Análisis del efecto transitorio por descargas atmosféricas en redes de distribución

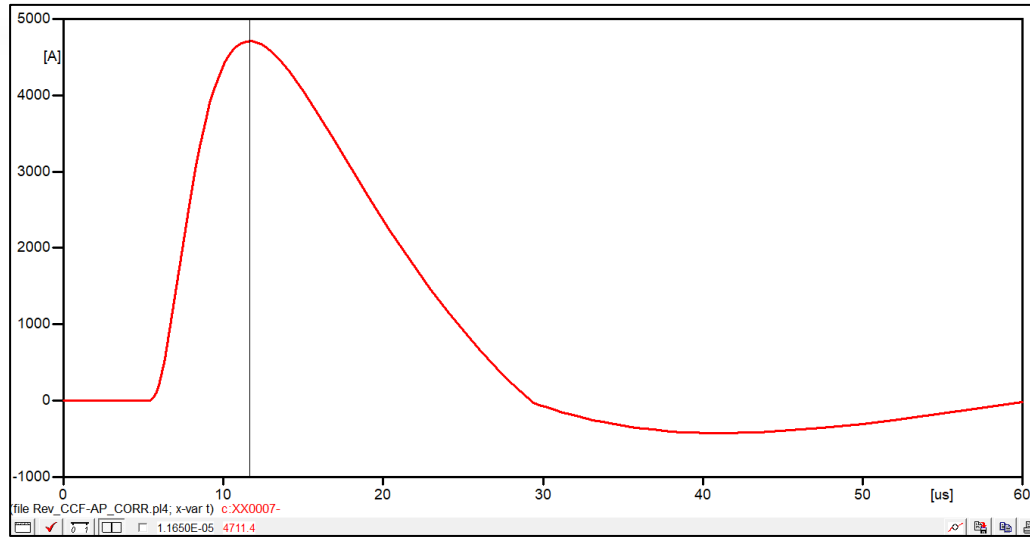


Figura 83. Corriente pico en la puesta a tierra de 25 Ohms, para una corriente del rayo de 10 kA.



## Análisis del efecto transitorio por descargas atmosféricas en redes de distribución

| Corriente de rayo (kA) | Resistencia de puesta a tierra (ohm) | Voltaje pico en primario de transformador (kV) |             | Voltaje pico en secundario de transformador (V) |             |
|------------------------|--------------------------------------|------------------------------------------------|-------------|-------------------------------------------------|-------------|
|                        |                                      | Escenario 1                                    | Escenario 2 | Escenario 1                                     | Escenario 2 |
| 5                      | 3                                    | 47.925                                         | 47.905      | 977.7                                           | 977.58      |
| 5                      | 5                                    | 52.824                                         | 52.804      | 1009.9                                          | 1009.5      |
| 5                      | 10                                   | 64.613                                         | 64.579      | 1217                                            | 1216.4      |
| 5                      | 20                                   | 86.132                                         | 86.073      | 1605.2                                          | 1604.2      |
| 5                      | 25                                   | 95.960                                         | 95.889      | 1786.3                                          | 1785.1      |
| 5                      | 40                                   | 122.490                                        | 122.400     | 2280                                            | 2278        |
| 5                      | 60                                   | 152.350                                        | 152.230     | 2834.6                                          | 2832.5      |
| 7                      | 3                                    | 52.255                                         | 52.236      | 1027.1                                          | 1027        |
| 7                      | 5                                    | 59.305                                         | 59.277      | 1123.6                                          | 1123.1      |
| 7                      | 10                                   | 76.311                                         | 76.261      | 1420.9                                          | 1420        |
| 7                      | 20                                   | 107.250                                        | 107.170     | 1980.1                                          | 1978.6      |
| 7                      | 25                                   | 121.400                                        | 121.300     | 2241.1                                          | 2239.3      |
| 7                      | 40                                   | 159.460                                        | 159.320     | 2950.5                                          | 2948        |
| 7                      | 60                                   | 202.260                                        | 202.100     | 3745.9                                          | 3742.9      |
| 10                     | 3                                    | 58.457                                         | 58.429      | 1118.8                                          | 1118.2      |
| 10                     | 5                                    | 68.683                                         | 68.642      | 1296.4                                          | 1595.7      |
| 10                     | 10                                   | 93.501                                         | 93.432      | 1730.6                                          | 1729.3      |
| 10                     | 20                                   | 138.690                                        | 138.560     | 2549.7                                          | 2547.5      |
| 10                     | 25                                   | 159.260                                        | 159.140     | 2931.3                                          | 2928.7      |
| 10                     | 40                                   | 214.730                                        | 214.540     | 3964.8                                          | 3961.2      |
| 10                     | 60                                   | 276.940                                        | 276.710     | 5118.7                                          | 5114.4      |

Tabla 13. Sobretensiones en primario y secundario de transformador en dos escenarios diferentes variando corriente de rayo y resistencia de puesta a tierra.



## Análisis del efecto transitorio por descargas atmosféricas en redes de distribución

| Corriente de rayo (kA) | Resistencia de puesta a tierra (ohm) | Corriente pico en Varilla de puesta a tierra (A) |             |
|------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------------------|-------------|
|                        |                                      | Escenario 1                                      | Escenario 2 |
| 5                      | 3                                    | 2592.7                                           | 2588.8      |
| 5                      | 5                                    | 2555.5                                           | 2552.1      |
| 5                      | 10                                   | 2468.6                                           | 2464.7      |
| 5                      | 20                                   | 2316.2                                           | 2313.3      |
| 5                      | 25                                   | 2249.4                                           | 2246.8      |
| 5                      | 40                                   | 2073                                             | 2070.8      |
| 5                      | 60                                   | 1883.5                                           | 1881.7      |
| 7                      | 3                                    | 3740.7                                           | 3735.5      |
| 7                      | 5                                    | 3686                                             | 3881        |
| 7                      | 10                                   | 3557.3                                           | 3552.7      |
| 7                      | 20                                   | 3333.3                                           | 3329.3      |
| 7                      | 25                                   | 3236.6                                           | 3229.8      |
| 7                      | 40                                   | 2976.4                                           | 2973.2      |
| 7                      | 60                                   | 2700.5                                           | 2697.9      |
| 10                     | 3                                    | 5471.4                                           | 5463.8      |
| 10                     | 5                                    | 5388                                             | 5380.6      |
| 10                     | 10                                   | 5196.7                                           | 5189.9      |
| 10                     | 20                                   | 4862.5                                           | 4857        |
| 10                     | 25                                   | 4717                                             | 4711.4      |
| 10                     | 40                                   | 4336                                             | 4331.3      |
| 10                     | 60                                   | 3928.9                                           | 3825.1      |

Tabla 14. Corriente drenada por bajante de tierra en dos escenarios diferentes variando corriente de rayo y resistencia de puesta a tierra.



### CONCLUSIONES

Derivado del estudio realizado en este trabajo, análisis del efecto transitorio por descargas atmosféricas en redes de distribución, se puede dar las siguientes conclusiones y recomendaciones:

Con base a las simulaciones realizadas se concluye que, instalar los apartarrayos aguas arriba a los cortacircuitos fusibles de los transformadores no tiene influencia relevante en la salida de los circuitos de distribución en la Zona de Matamoros ante la incidencia de descargas atmosféricas.

Un sobrevoltaje a causa de una descarga atmosférica es un transitorio electromagnético con tiempo de duración en microsegundos y los fusibles instalados en los portafusibles tienen su tiempo de operación a partir de 100 milisegundos, por lo que instalar cortacircuitos aguas arriba a los apartarrayos no sirve de nada ya que por los tiempos del transitorio los cortacircuitos fusibles no logran detectar ese transitorio.

Instalar apartarrayos aguas arriba a los cortacircuitos fusibles como lo indica la especificación de construcción de instalaciones aéreas de media y baja tensión (DCCIAMBT) es lo más adecuado, ya que los apartarrayos desvían la sobretensión a tierra antes de llegar a los cortacircuitos fusibles protegiendo su aislamiento como se observa en las figuras A1 y A2 y la diferencia del margen de protección de los dos modelos es despreciable.

Para los sistemas de puesta a tierra se recomienda un máximo de  $10 \Omega$  para el poste donde se encuentre el apartarrayos (incluye el electrodo de puesta a tierra, el alambre de cobre calibre 4 AWG que baja de la cruceta hacia el electrodo de puesta a tierra), para poder garantizar que el voltaje máximo de impulso del que le llegue a las boquillas del transformador y no afecte al aislamiento.



### **RECOMENDACIONES**

Se sugiere que cuando se encuentre un aislador o un apartarrayos flameado se mida la resistencia de puesta a tierra, así como llevar un registro para poder realizar un análisis con ATP DRAW y ver el comportamiento del aislador con diferentes magnitudes de corriente de descargas atmosféricas.

Se debe realizar un estudio de los niveles isoceraúnico de la zona donde se requiere construir una línea de distribución, así como llevar un registro de incidencia de descargas atmosféricas en la línea de distribución o cerca de esta, para poder realizar un estudio estadístico de este fenómeno.

### **TRABAJOS FUTUROS**

Con los modelos propuestos en este trabajo se podría analizar el comportamiento de un transitorio electromagnético a causa de una descarga atmosférica de un circuito de distribución con neutro corrido multiaterrizado con valores de puesta a tierra reales (mediciones realizadas en campo), determinando la importancia del neutro corrido y si hay algún beneficio para los usuarios conectados en media y baja tensión.



### BIBLIOGRAFÍA

- [1] Cardenas, J. L., & Tenemaza, N. V. (2016). Estudio para la implementación de pararrayos en sistemas de distribución de media tensión (tesis para obtener grado de Ingeniero eléctrico, Universidad Politécnica Salesiana).
- [2] Ndirangu, J., Kimemia, P., Ndolo, R., Nderu, J., & Irungu, G. (2020, August). Appropriate Surge Arrester Lead Lengths for Improved Distribution Transformer Protection—Kenyan Case Study. In 2020 IEEE PES/IAS PowerAfrica (pp. 1-4). IEEE.
- [3] Astudillo Astudillo, O. W. (2021). Modelo matemático de un descargador eléctrico para mejorar la protección contra descargas atmosféricas en transformadores monofásicos de distribución eléctrica considerando sobretensiones (tesis de maestría, Universidad Politécnica Salesiana).
- [4] Arbelaez, M., & Sanz, J. H. (2006). Protección externa de edificaciones contra descargas atmosféricas. *Scientia et technica*, 12(32), 165-168.
- [5] Juárez Núñez, A. (2021). Mejora de la confiabilidad en la coordinación de aislamiento de la línea PON-73090-SRL (Tesis de maestría, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla).
- [6] Silva Ortega, J. I. (2013). Caracterización espacio temporal de las descargas eléctricas atmosféricas a tierra en la Región Caribe colombiana SRL (Tesis de maestría, Universidad del Norte).
- [7] Hernández Martínez, J. A., & Rodríguez Díaz, D. A. (2016). Análisis del efecto transitorio por descarga atmosférica por medio de un simulador, caso: apartarrayos-transformador (Tesis para obtener grado de Ingeniero Electricista, Instituto Politécnico Nacional).
- [8] Ruiz Tavera, M. D. (2019). Estudio del comportamiento de líneas de distribución en zonas rurales ante descargas atmosféricas (Tesis para obtener grado de Ingeniero Eléctrico, Universidad Distrital Francisco José de Caldas).
- [9] D'Agosto, M. (2022). Coordinación de aislación a las descargas atmosféricas en instalaciones de alta tensión.
- [10] Especificación de coordinación de aislamiento CFE-L0000-06.



- [11] Van Der Mescht, M., Van der Mescht, C., & Van Schalkwyk, W. D. (2022, October). Protection of Medium Voltage Pole-mount Installations Against Lightning. In 2022 36th International Conference on Lightning Protection (ICLP) (pp. 741-744). IEEE.
- [12] Mangano, I. A., di Mauro, G. F., & Suárez, J. A. (2015). Estudio de los Efectos de las Descargas Atmosféricas sobre la Confiabilidad de las Líneas Aéreas de Transporte de Energía. Universidad Nacional de Mar del Plata (UNMDP).
- [13] Zapata Pérez, E. (2008). Protección de líneas de distribución, contra descargas atmosféricas con apartarrayos de óxidos metálicos (ZnO) (Doctoral dissertation).
- [14] IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines, IEEE Std 1410, 2010.
- [15] Cuartas Agudelo, E. A., & Ramírez Goez, S. (2023). Estimación de sobretensiones de maniobras en redes de alta tensión mediante ATP DRAW
- [16] IEC Insulation Coordination Part 2: Application Guide, IEC Standard 60071-1, 1996.
- [17] Turrubiates Guillen, V. (2019). Diagnóstico de la coordinación de aislamiento de líneas de transmisión de alta tensión mediante el modelado en ATP/EMTP (tesis de maestría, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla).
- [18] Oña, J. O., & Ruales, L. E. (2024). Análisis de sobrevoltajes por impulso atmosférico en sistemas de Transmisión con discontinuidades líneas de transmisión aéreas y cables aislados, usando ATP. *Revista Técnica energía*, 20(2), 1-10.
- [19] Quiroz Alba, R. B. (2025). *Localización de fallas por ondas viajeras para redes de transmisión basado en un modelo de árbol dirigido y ajuste lineal* (Bachelor's thesis).
- [20] Carmona Reyes, P. G. (2016). "Propuesta de prácticas de laboratorio para la materia de sistemas de distribución que se imparte en la carrera de Ingeniería Eléctrica Electrónica de la FES Aragón UNAM". (Tesis de Licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México.
- [21] Ramírez Castaño, S. (2009). Redes de distribución de energía. Universidad Nacional de Colombia.
- [22] Xiang-wen, Z. H. A. O., Wu-han, L. I. N., Xue-song, F. E. N. G., Xiao-ling, Q. I. U., Ya-fang, C. H. E. N., & Xu-dong, Q. I. U. (2020, June). Study on The Effect of 10 kV Distribution Line Pole Natural Grounding on The Protection Effect Of Arrester. In 2020



5th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE) (pp. 1573-1578). IEEE.

[23] Cisneros-Villalobos, L. U. I. S., Aquino-Roblero, F. R. A. N. C. I. S. C. O., Tecpoyotl-Torres, M., Chilopa-Linares, J. A. V. I. E. R., & Martínez-Martínez, D. A. N. I. E. L. (2015). Selección y Espaciamiento de Apartarrayos en Líneas de Distribución de 23 kV de la Zona Centro. *Nova scientia*, 7(14), 339-364.

[24] Turrubiates Guillen, V. SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE APARTARRAYOS (Colegio IME Facultad de Ingeniería BUAP).

[25] Peña Castañeda, J. R., Pineda Callejas, W. E., & Vásquez Valle, L. A. (2022). Análisis del comportamiento de líneas de distribución impactadas por descargas atmosféricas (tesis doctoral, Universidad de El Salvador).

[26] NOM-001-SEDE-2012 Norma Oficial Mexicana Instalaciones eléctricas de utilización.

[27] Camacho Vargas, E. J. (2012). Cálculo de sobrevoltajes por descargas atmosféricas en subestación de 500 kV utilizando el ATP (Alternative Transients Program) aplicado a la subestación El Inga (antes Pifo) de 500 kV (Bachelor's thesis, Quito: EPN, 2014.).

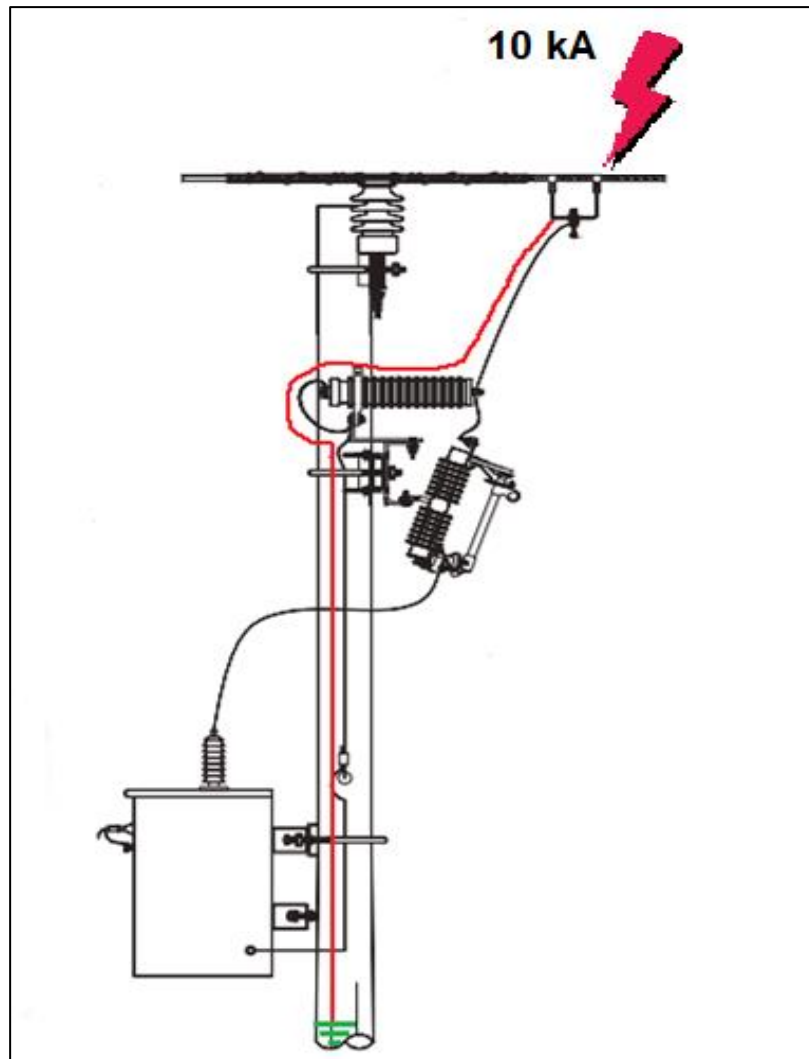
[28] Machaca Cuba, D. (2023) Evaluación de performance de la línea de transmisión 60 kV Azángaro-Derivación Putina ante interrupciones por descargas atmosféricas.

[29] Hernández, J. Á. S. (2017). MODELADO MEDIANTE ATP DEL MÉTODO DE TRANSFORMADORES EN OPOSICIÓN.

[30] Engineer.Ahsin, & Engineer.Ahsin. (2023, 3 marzo). Manual de usuario del probador de tierra digital UNI-T UT522. Manuals+. [https://manuals.plus/es/uni-t/ut522-digital-earth-tester-manual#uni-t\\_ut522\\_digital\\_earth\\_tester](https://manuals.plus/es/uni-t/ut522-digital-earth-tester-manual#uni-t_ut522_digital_earth_tester).

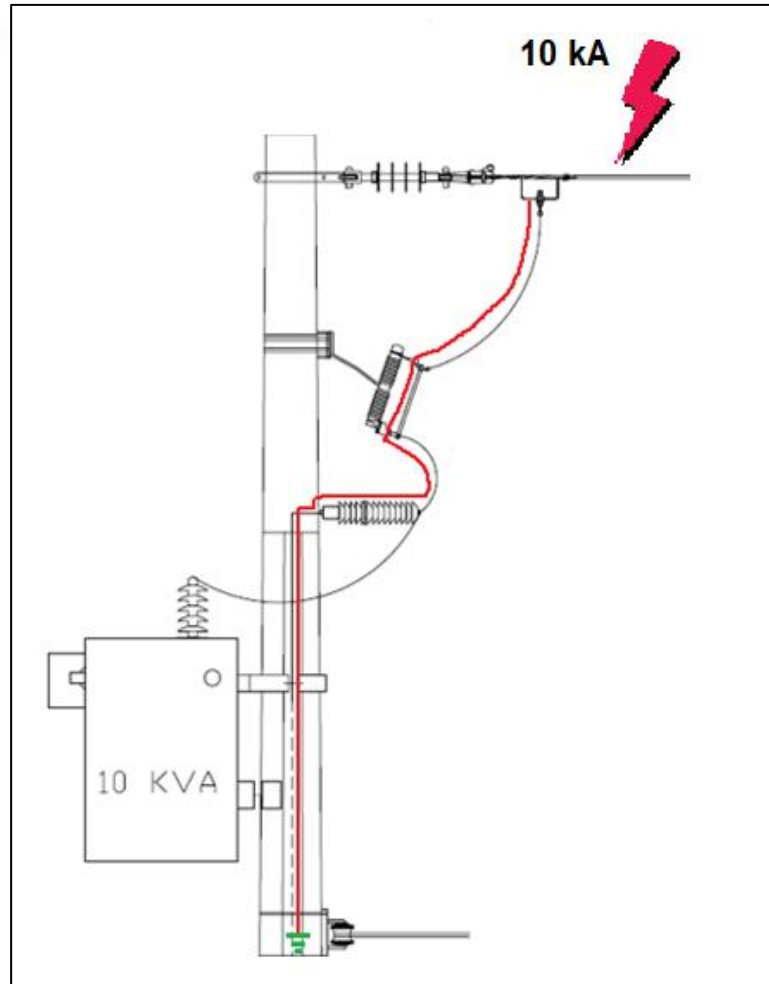
### APÉNDICES

Subestación típica tipo poste con transformador monofásico teniendo como protección apartarrayos aguas arriba a cortacircuitos fusibles como se muestra en la figura A1.



**Figura A1.** Subestación tipo poste con apartarrayos aguas arriba a cortacircuitos fusibles.

Subestación tipo poste con transformador monofásico teniendo como protección apartarrayos aguas abajo a cortacircuitos fusibles.



**Figura A2.** Subestación tipo poste con apartarrayos aguas abajo a cortacircuitos fusibles.

### APARTARRAYOS SINTÉTICOS DE ÓXIDOS METÁLICOS MARCA IUSA

Son limitadores de sobretensiones que consta de varistores de óxidos metálicos, con envoltorio de hule silicón figura A3.

Características: gran flexibilidad de obtener los valores de distancia de fuga a través de los faldones, acortando la longitud del cuerpo del apartarrayo. Su envoltorio de hule silicón cuenta con una gran hidrofobicidad. Resiste los rayos UV y limita las corrientes de fuga. Corriente nominal de descarga a 10 kA.

Aplicación: es utilizado para la protección del sistema de distribución de energía eléctrica en zonas de baja, media y alta contaminación. En la figura A4 se muestra las especificaciones técnicas de apartarrayos tipo polimérico marca IUSA.



**Figura A3.** Apartarrayos polimérico.

| CARACTERÍSTICAS                                |                                                                         | APSIL-10          | APSIL-12          |
|------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-------------------|-------------------|
| Descripción corta CFE                          |                                                                         | ADOM-C-10         | ADOM-C-12         |
| Tensión nominal del sistema (kV)               |                                                                         | 13,8              | 13,8              |
| Tensión nominal y tipo de sistema              |                                                                         | 13,8 kV / 3F - 4H | 13,8 kV / 3F - 3H |
| Tensión nominal del apartarrayo (kV)           |                                                                         | 10                | 12                |
| Tensión de aguante del aislamiento             | Prueba al impulso 1,2/50 $\mu$ s (kV Cresta)                            | 75                | 85                |
|                                                | Prueba de tensión c.a a 60 Hz húmedo 1 min (kV Eficaz)                  | 24                | 27                |
|                                                | Tensión durante la prueba de contaminación (kV Eficaz)                  | 8,4               | 8,4               |
| Tensiones residuales máximas                   | Al impulso de corriente por maniobra 30/60 $\mu$ s (kV Cresta)          | 29                | 35                |
|                                                | Al impulso de corriente por rayo 10 kA cresta 8/20 $\mu$ s (kV Cresta)  | 36                | 44                |
|                                                | Al impulso de corriente escarpado 10 kA cresta 1/20 $\mu$ s (kV Cresta) | 40                | 48                |
| Tensión operación continua (T.O.C) (kV Eficaz) |                                                                         | 8,4               | 10,2              |
| Valor máximo de descargas parciales (pC)       |                                                                         | 10                | 10                |
| Distancia mínima de fuga (mm)                  |                                                                         | 495               | 495               |
| Masa neta aproximada (kg)                      |                                                                         | 2,4               | 2,4               |

**Figura A4.** Especificaciones técnicas de apartarrayos marca IUSA.

### CORTACIRCUITOS

Características de cortacircuitos fusibles marca IUSA.

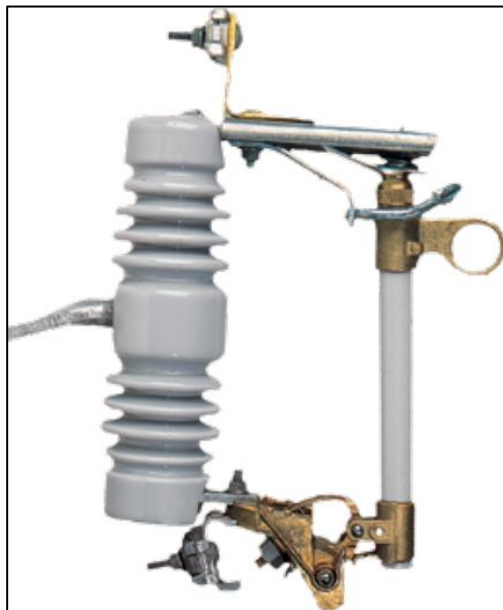
De acuerdo con su diseño puede instalarse en los diferentes niveles de contaminación. Así como en sistemas de distribución de energía eléctrica con tensiones nominales de 13,8 kV; 23 kV y 34,5 kV, figura A5.

Los cortacircuitos de 15 kV y 27 kV a 12 000 amperes (A) asimétricos cubren las corrientes interruptivas inferiores.

Los cortacircuitos de 38 kV a 5 000 amperes (A) asimétricos cubren las corrientes interruptivas inferiores.

#### Aplicaciones

Se utiliza para la protección contra fallas de sobrecorriente de transformadores, bancos de capacitores, equipo de medición y líneas de distribución secundarias para corriente nominal de 100 amperes (A), con diferente Nivel Básico de Aislamiento al Impulso (N.B.A.I) y distintas capacidades interruptivas asimétricas. En la figura A6 se muestra especificaciones técnicas de cortacircuitos fusibles marca IUSA.



**Figura A5.** Cortacircuitos Fusibles.

| CARACTERÍSTICAS                                  |                                     | APD-1512100          | APD-2712100          | APD-3805100         |
|--------------------------------------------------|-------------------------------------|----------------------|----------------------|---------------------|
| Descripción corta CFE                            |                                     | CCF-15-100-110-12000 | CCF-27-100-150-12000 | CCF-38-100-200-5000 |
| Tensión nominal del sistema (kV)                 |                                     | 13,8                 | 23                   | 34,5                |
| Tensión máxima de diseño (kV)                    |                                     | 15                   | 27                   | 38                  |
| Tensión de flameo a 60 Hz de terminal a tierra   | En seco 1 min (kV)                  | 35                   | 70                   | 95                  |
|                                                  | En húmedo 10 seg (kV)               | 30                   | 60                   | 80                  |
| Tensión de flameo a 60 Hz de terminal a terminal | En seco 1 min (kV)                  | 35                   | 70                   | 95                  |
|                                                  | Impulso de onda 1,2/50 $\mu$ s (kV) | 110                  | 150                  | 200                 |
| Tensión máxima de radio interferencia a 1 MHz    | Tensión de prueba a 60 Hz (kV)      | 9,41                 | 15,7                 | 22,0                |
|                                                  | Máximos ( $\mu$ V)                  | 250                  | 250                  | 250                 |
| Corriente nominal (A)                            |                                     | 100                  | 100                  | 100                 |
| Corriente interruptiva                           | Simétrica (A)                       | 8 000                | 8 000                | 2 000               |
|                                                  | Asimétrica (A)                      | 12 000               | 12 000               | 5 000               |
| Distancia de fuga (mm)                           |                                     | 210                  | 432                  | 660                 |

| CARACTERÍSTICAS                                  |                                     | APDC-1512100           | APDC-2712100           | APDC-3805100          |
|--------------------------------------------------|-------------------------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|
| Descripción corta CFE                            |                                     | CCF-C-15-100-110-12000 | CCF-C-27-100-150-12000 | CCF-C-38-100-200-5000 |
| Tensión nominal del sistema (kV)                 |                                     | 13,8                   | 23                     | 34,5                  |
| Tensión máxima de diseño (kV)                    |                                     | 15                     | 27                     | 38                    |
| Tensión de flameo a 60 Hz de terminal a tierra   | En seco 1 min (kV)                  | 35                     | 70                     | 95                    |
|                                                  | En húmedo 10 seg (kV)               | 30                     | 60                     | 80                    |
| Tensión de flameo a 60 Hz de terminal a terminal | En seco 1 min (kV)                  | 35                     | 70                     | 95                    |
|                                                  | Impulso de onda 1,2/50 $\mu$ s (kV) | 110                    | 150                    | 200                   |
| Tensión máxima de radio interferencia a 1 MHz    | Tensión de prueba a 60 Hz (kV)      | 9,41                   | 15,7                   | 22,0                  |
|                                                  | Máximos ( $\mu$ V)                  | 250                    | 250                    | 250                   |
| Corriente nominal (A)                            |                                     | 100                    | 100                    | 100                   |
| Corriente interruptiva                           | Simétrica (A)                       | 8 000                  | 8 000                  | 2 000                 |
|                                                  | Asimétrica (A)                      | 12 000                 | 12 000                 | 5 000                 |
| Distancia de fuga (mm)                           |                                     | 380                    | 708                    | 960                   |

**Figura A6.** Especificaciones técnicas de cortacircuitos fusibles marca IUSA.

## ESLABÓN FUSIBLE TIPO EXPULSIÓN

Características técnicas de eslabón fusible tomadas de catalogo EATON figura A7.

Las clasificaciones de corriente de los eslabones fusible de expulsión deben seleccionarse con base en las corrientes transitorias no perjudiciales esperadas, y no en la corriente a plena carga. Además, elegir una clasificación de corriente más alta, reducirá la probabilidad de interrupción del suministro de energía, en caso de incrementos transitorios de tensión a causa de rayos eléctricos.

Al instalar los eslabones, deben manejarse con cuidado, un manejo inapropiado puede dañar el elemento.

Bajo ciertas condiciones de falla, es normal que sean expulsados desde la unidad fusible, materiales producto de la extinción del arco eléctrico y/o partículas metálicas. Por lo tanto, se recomienda tomar las precauciones necesarias y el equipo de protección personal adecuado para prevenir que personal no autorizado se aproxime a la instalación.



**Sistema de codificación:** 15 K B 30

**Clasificación de voltaje**

- 15
- 25
- 46
- 72

**Características corriente-tiempo**

- T
- K
- XA

**Tipo de extremo del eslabón**

- B
- U
- D
- BR

**Clasificación de corriente**

- 1 20
- 2 25
- 3 30
- 5 40
- 6 50
- 7.5 60
- 8 65
- 10 75
- 12 80
- 15 100

**Opciones**

**Modelo B**  
Eslabón con cabeza redonda fija NEMA.

**Modelo U**  
Eslabón universal, con doble cable y cabeza redonda removible NEMA.

**Modelo D**  
Eslabón con doble cable, sin cabeza redonda NEMA.

**Modelo BR**  
Similar al modelo B, pero la cabeza redonda se fija mediante una rosca UNF de 1/4" que permite el uso de una varilla de extensión.

**Características de corriente - tiempo**

**Tipo T**  
Cumple con los requisitos ANSI C37-42 para características T de fusión lenta.

**Tipo K**  
Cumple con los requisitos ANSI para características K de fusión rápida.

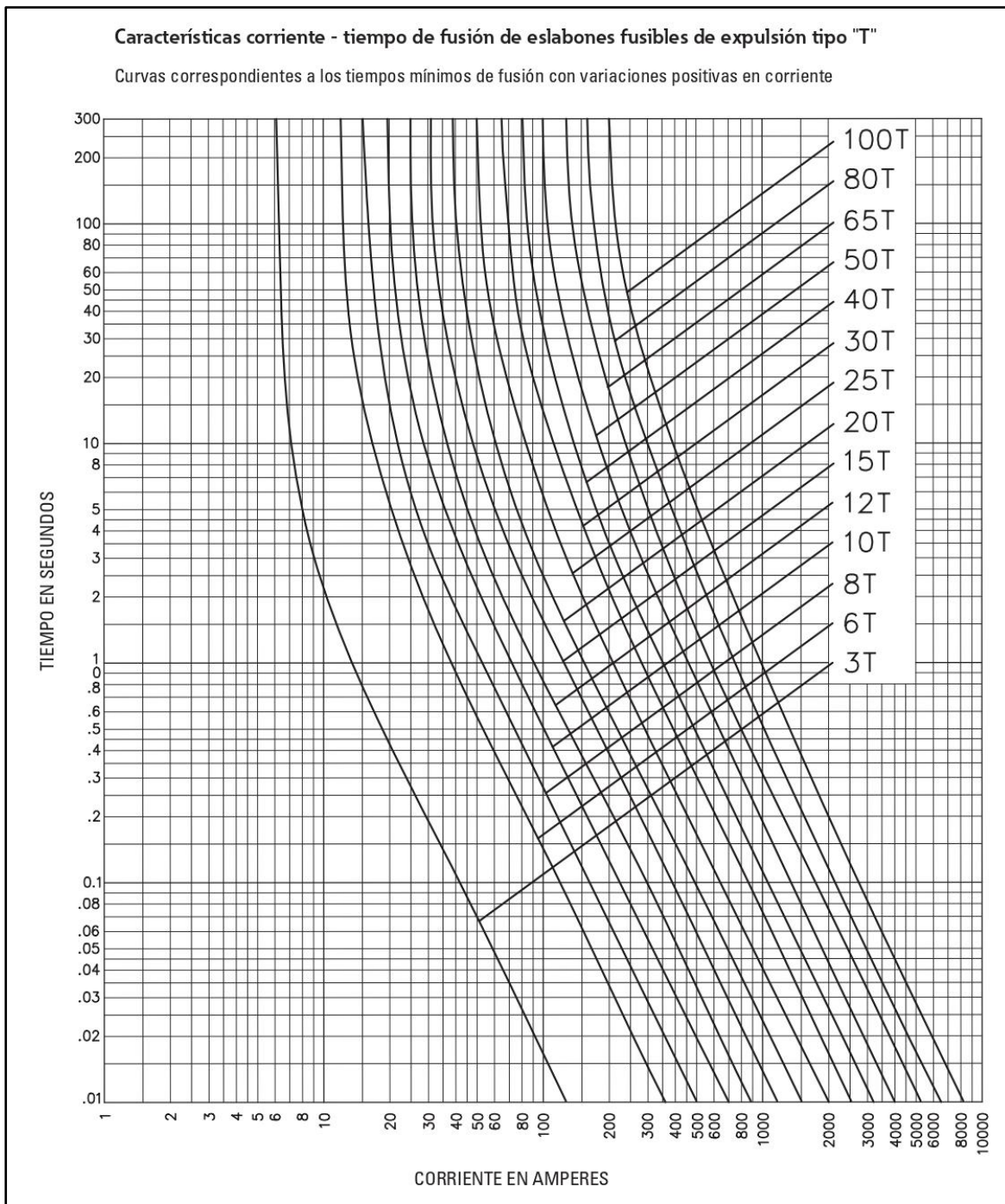
**Tipo XA**  
Este tipo de eslabón de expulsión es de alta velocidad. Es adecuado en aplicaciones donde se requiere un alto grado de protección del sistema a expensas de la diferenciación.

*Nota: El ensamble del eslabón fusible para un rango determinado es estándar para todos los voltajes de ese rango. La diferencia estriba en que la longitud del cable cambia para ajustarse a las dimensiones de los fusibles de expulsión de diferentes clasificaciones.*

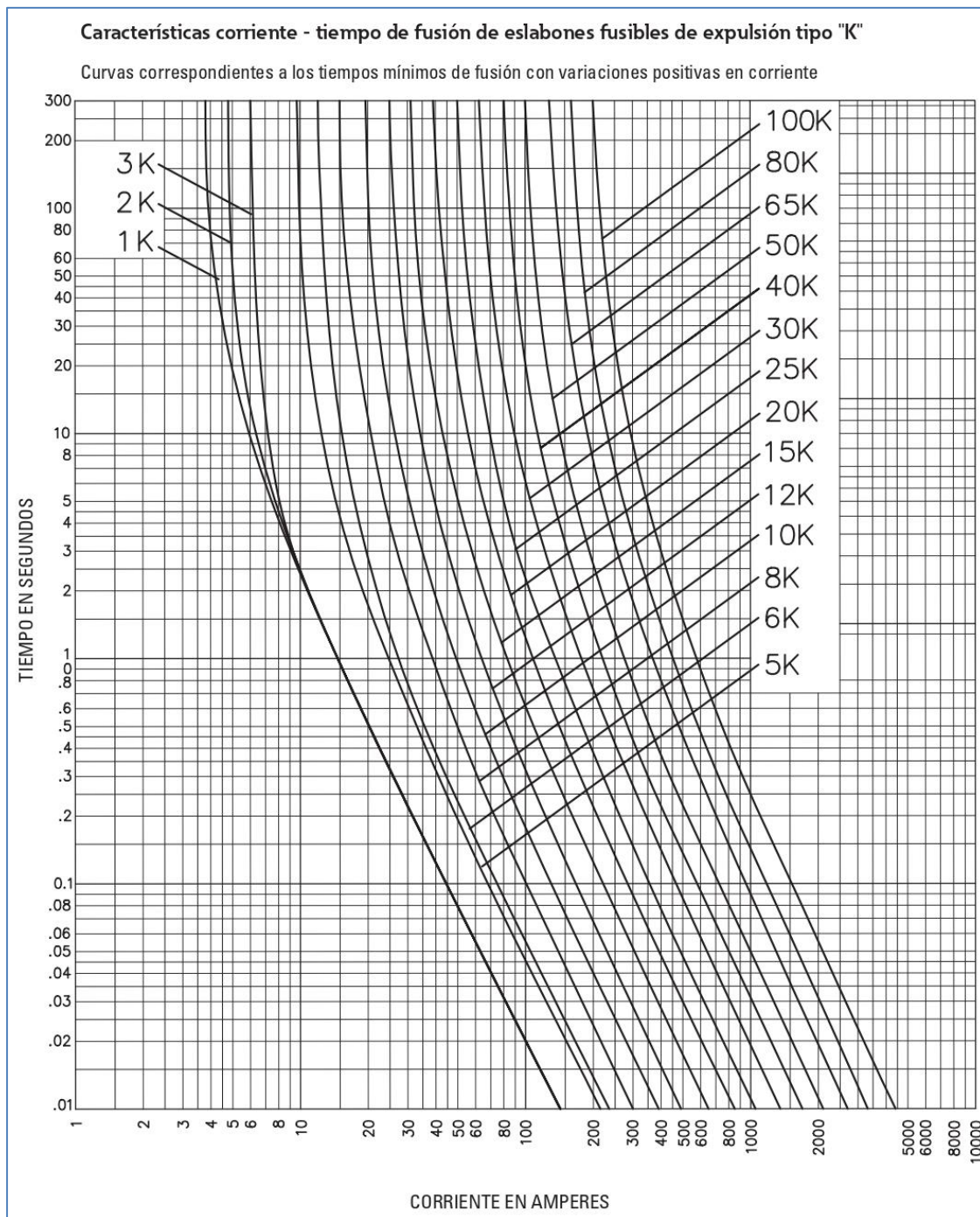
**Referencia cruzada de los eslabones fusibles de expulsión**

| Eaton Bussmann series (UL Tipo K) | Eaton Bussmann series (IEE-NEMA Tipo K) | S&C       | Protalec-MT  | ELEMSA | ELECTRAMEX |
|-----------------------------------|-----------------------------------------|-----------|--------------|--------|------------|
| 25KBR3                            | FL3K3                                   | —         | 15/27EFU-3   | 2066A3 | EF 27K-3   |
| 25KBR5                            | FL3K5                                   | —         | 15/27EFU-5   | 2066A4 | EF 27K-5   |
| 25KBR6                            | FL3K6                                   | 265006R1  | 15/27EFU-6   | 000258 | EF 27K-6   |
| 25KBR7.5                          | —                                       | —         | —            | —      | —          |
| 25KBR8                            | FL3K8                                   | 265008R1  | 15/27EFU-8   | 2066A5 | EF 27K-8   |
| 25KBR10                           | FL3K10                                  | 265010R1  | 15/27EFU-10  | 2066A6 | EF 27K-10  |
| 25KBR12                           | FL3K12                                  | 265012R1  | 15/27EFU-12  | 2066A7 | EF 27K-12  |
| 25KBR15                           | FL3K15                                  | 265015R1  | 15/27EFU-15  | 2066A8 | EF 27K-15  |
| 25KBR20                           | FL3K20                                  | 265020R1  | 15/27EFU-20  | 000269 | EF 27K-20  |
| 25KBR25                           | FL3K25                                  | 265025R1  | 15/27EFU-25  | 2066A9 | EF 27K-25  |
| 25KBR30                           | FL3K30                                  | 265030R1  | 15/27EFU-30  | 000273 | EF 27K-30  |
| 25KBR40                           | FL3K40                                  | 265040R1  | 15/27EFU-40  | 2066AA | EF 27K-40  |
| 25KBR50                           | FL3K50                                  | 265050R1  | 15/27EFU-50  | 000277 | EF 27K-50  |
| 25KBR60                           | —                                       | —         | —            | —      | —          |
| 25KBR65                           | FL3K65                                  | 265065R1  | 15/27EFU-65  | 2066A1 | EF 27K-65  |
| 25KBR75                           | —                                       | —         | —            | —      | —          |
| 25KBR80                           | FL3K80                                  | 265080R1  | 15/27EFU-80  | 000282 | EF 27K-80  |
| 25KBR100                          | FL3K100                                 | 2650100R1 | 15/27EFU-100 | 000285 | EF 27K-100 |

**Figura A7.** Especificaciones técnicas de eslabón fusible marca EATON.



**Figura A8.** Curvas tiempo-corriente de eslabón fusible tipo T marca EATON.



**Figura A9.** Curvas tiempo-corriente de eslabón fusible tipo k marca EATON.

## AISLADOR DE PORCELANA TIPO POSTE 13PD

En la figura A9 se muestra las especificaciones técnicas de aislador de media tensión



### Tipo poste 13PD

#### Especificaciones

**Características**

- Descripción corta 13PD
- Tensión nominal del sistema en KV
- Pruebas eléctricas 13.8
- Flameo en seco en KV 70
- Flameo húmedo en KV 40
- Tensión crítica de flameo al impulso por rayo en KV 120
- Distancia mínima de fuga en mm 300
- Pruebas mecánicas
- Resistencia mínima a la flexión en kN 12,5

| Valmact | IUSA    | Clase |
|---------|---------|-------|
| 57-1    | 57-1-IU | A     |

**Productos avalados por:**




TECNOLOGÍA CERTIFICADA CFE-LAFEM

**Figura A10.** Aislador de porcelana tipo poste 13PD.