



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE GUAYAQUIL
CARRERA DE INGENIERIA ELECTRICA**

**ANÁLISIS DEL NIVEL DE AISLAMIENTO
UTILIZADOS EN SISTEMAS DE
DISTRIBUCIÓN Y SUBTRANSMISIÓN
ÁEREAS MEDIANTE EL SOFTWARE
ATP-DRAW**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
Título de Ingeniera eléctrica

AUTOR: Zaida Yanve Cotto Macul

TUTOR: Ing. Otto W. Astudillo Astudillo. MAE

Guayaquil - Ecuador

2021


**CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN**

Yo, Zaida Yanve Cotto Macul con documento de identificación N° 1207907443 manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Guayaquil, 19 de Octubre del año 2021.

Atentamente,



Zaida Yanve Cotto Macul
1207907443

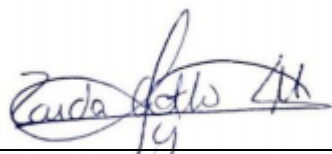
**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Yo, Zaida Yanve Cotto Macul con documento de identificación No. 1207907443, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del proyecto técnico: “ Análisis del nivel de aislamiento utilizados en sistemas de distribución y subtransmisión aéreas mediante el software ATP-DRAW”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniera eléctrica, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 19 de Octubre del año 2021.

Atentamente,



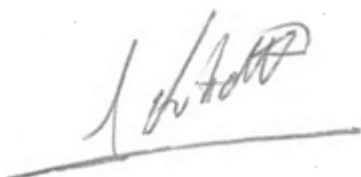
Zaida Yanve Cotto Macul
1207907443.

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Otto Washington Astudillo Astudillo, con documento de identificación N° 0102054871, docente de la Universidad Politécnica Salesiana – Sede Guayaquil, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: “ Análisis del nivel de aislamiento utilizados en sistemas de distribución y subtransmisión aéreas mediante el software ATP-DRAW”, realizado por Zaida Yanve Cotto Macul, con documento de identificación N° 1207907443, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción proyecto técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 19 de Octubre del año 2021

Atentamente,



Ing. Otto W. Astudillo Astudillo. MAE
0102054871

Agradecimientos

Mi total agradecimiento para Dios porque su palabra fue mi escudo para formarme como profesional.

A mis padres, hermanas y sobrinos que con sus actos de amor me demuestran todos los días su apoyo incondicional.

Al Ingeniero Otto Astudillo por su dedicación y compromiso de compartirme en todo momento sus conocimientos.

Dedicatoria

A mi Padre Celestial Dios porque es el capitán de mi vida y lo honro por toda su misericordia y su infinita bondad hacia mi.

Índice general

Índice de Figuras	5
Índice de Tablas	12
Abstract	14
1. Introducción	16
1.1. Antecedentes	16
1.2. Descripción general del problema	16
1.3. Objetivos	18
1.3.1. Objetivo general	18
1.3.2. Objetivos específicos	18
1.4. Contribuciones	18
1.5. Organización del manuscrito	19
2. Aislamiento para estructuras de líneas aéreas de Distribución y Subtransmisión	20
2.1. Introducción	20
2.2. Definiciones	22
2.3. Factores ambientales , aire , lluvia y humedad	26
2.4. Factores de contaminación ambiental	33
2.5. Factor de altitud (Fh)	34
2.6. Aislamiento para una línea aérea de 13,8 KV	35
2.7. Aislamiento para una línea aérea de 69 KV	52
2.8. Niveles de Aislamiento en una subestación de 69 KV / 13,8 KV	66
3. Estructuras para líneas aéreas de Distribución y Subtransmisión	68
3.1. Introducción	68
3.2. Estructuras para Bajo Voltaje	70

3.3. Estructuras monofásicas para distribución	75
3.4. Estructuras trifásicas para distribución	79
3.5. Estructuras trifásicas para Subtransmisión	86
3.6. Impedancias Características de líneas de Distribución y Subtransmisión	103
4. Flameo Directo (flashover) y Flameo Inverso (back flashover)	110
4.1. Introducción	110
4.2. Impacto de un rayo sobre el hilo de guarda	112
4.3. Impacto de un rayo sobre una fase	115
4.4. Impacto sobre el hilo de guarda con flameo inverso (back flashover)	117
4.5. Impacto sobre el conductor de una fase con flameo directo e inverso	119
4.6. Descargadores de sobretensión de línea y de subestación	121
5. Modelado de aisladores y pruebas en ATP Draw	123
5.1. Introducción	123
5.2. Modelado de un aislador	124
5.3. Aislador tipo disco , clase Ansi 52-1	126
5.4. Cadena de dos aisladores tipo disco clase Ansi 52-1	132
5.5. Aislador tipo Pin . Clase Ansi 55 - 5	136
5.6. Aislador tipo Doble Pin . Clase Ansi 56 - 1	140
5.7. Cadena de cinco aisladores tipo disco Clase Ansi 52-3	144
5.8. Aislador tipo Line - Post . Clase Ansi 57-6	148
5.9. Aislador tipo Polímero clase Ansi C29.13 . DS-69	152
5.10. Flameo en una estructura de 13,8 KV	156
5.11. Flameo en una estructura de 69 KV	170
5.12. Descargador de sobretensión (DPS) en una línea de 13,8 KV	184
5.13. Descargador de sobretensión (DPS) en una línea de 69 KV	192

<i>ÍNDICE GENERAL</i>	4
6. Conclusiones y recomendaciones.	197
6.1. Conclusiones	197
6.2. Recomendaciones	200
7. Glosario	202
Glosario	204
Referencias	205

Índice de Figuras

1.1. mapa del nivel isoceraunico- INAMHI	17
2.1. Precipitación máxima, Guayaquil (h = 10 msnm) Referencia :Weather Atlas.[1]	28
2.2. Precipitación máxima, Quito (h = 2500 msnm) Referencia :Weather Atlas. [1]	28
2.3. Humedad relativa por año . Guayaquil Referencia :Weather Atlas. [1]	30
2.4. Humedad relativa por año . Quito Referencia :Weather Atlas.[1]	30
2.5. Conversión de humedad relativa en absoluta Referencia : Transmisión line reference book Adaptación : Autora [2]	31
2.6. Factor de corrección por humedad Referencia : Transmisión line reference book Adaptación : Autora	32
3.1. Estructura en baja tensión para red desnuda - 1 vía Referencia : MEER - Ministerio de Electricidad y Energía Renovable - Ecuador[3] Adaptación : Autora	71
3.2. Estructura en baja tensión para red desnuda - 2 vías Referencia : MEER - Ministerio de Electricidad y Energía Renovable - Ecuador[3] Adaptación : Autora	72
3.3. Estructura en baja tensión para red desnuda - 3 vías Referencia :MEER-Ministerio de Electricidad y Energía Renovable-Ecuador [3] Adaptación :Autora	73
3.4. Estructura en baja tensión para red preensamblada - 3 conductores. Referencia :MEER-Ministerio de Electricidad y Energía Renovable-Ecuador [3] Adaptación : Autora	74

3.5. Estructuras monofásicas centradas de distribución para redes aéreas. Referencia :MEER-Ministerio de Electricidad y Energía Renovable-Ecuador [3] Adaptación :Autora	76
3.6. Estructuras monofásicas de distribución para redes aéreas en volado. Referencia:MEER-Ministerio de Electricidad y Energía Renovable-Ecuador[3] Adaptación : Autora	77
3.7. Estructuras monofásicas de distribución para redes aéreas en volado. Referencia : MEER - Ministerio de Electricidad y Energía Renovable - Ecuador Adaptación : Autora [3]	78
3.8. Estructuras trifásicas para media tensión . Tipo: Pasante Referencia : MEER - Ministerio de Electricidad y Energía Renovable - Ecuador Adaptación : Autora [3]	80
3.9. Estructuras trifásicas para media tensión . Tipo: Angular Referencia : MEER - Ministerio de Electricidad y Energía Renovable - Ecuador [3] Adaptación : Autora	81
3.10. Estructuras trifásicas para media tensión . Tipo: Retención Referencia :MEER- Ministerio de Electricidad y Energía Renovable-Ecuador [3] Adaptación :Autora	82
3.11. Estructuras trifásicas para media tensión . Tipo: Doble Retención Referencia :MEER-Ministerio de Electricidad y Energía Renovable-Ecuador[3] Adaptación : Autora	83
3.12. Estructuras trifásicas para media tensión . Tipo : Bandera Referencia :MEER-Ministerio de Electricidad y Energía Renovable-Ecuador [3] Adaptación : Autora	84
3.13. Estructuras trifásicas para media tensión .Dos postes Referencia :MEER-Ministerio de Electricidad y Energía Renovable-Ecuador [3] Adaptación : Autora	85
3.14. Estructura tipo Suspensión para 69 KV . Poste de 21 m . Referencia : EX - INECEL- Instituto Ecuatoriano de Electrificación [4] Adaptación : Autora	87
3.15. Conductores y aisladores para una estructura - suspensión . 69 KV Referencia : CNEL-EP - Corporación Nacional de Electricidad [4] Adaptación : Autora	88
3.16. Longitud y línea de fuga de la cadena de 5 discos ANSI 52-3 utilizados en una estructura tipo suspensión para 69 KV . Referencia : Catálogo Maclean Power Systems [5] Adaptación . Autora	89

3.17. Sistema de puesta a tierra de una estructura para 69 KV Referencia :CNEL-EP - Corporación Nacional de Electricidad [3] Adaptación : Autora	90
3.18. Protección con un hilo de guarda a una estructura tipo suspensión alternada de circuito simple para 69 KV . Referencia : EX - INECEL - Instituto Ecuatoriano de Electrificación [4] Adaptación : Autora	91
3.19. Distancias constructivas de una estructura tipo suspensión de circuito simple para línea de subtransmisión en 69 KV . Referencia : EX - INECEL - Instituto Ecuatoriano de Electrificación [4] Adaptación : Autora	92
3.20. Estructura tipo retención con cadena de discos ANSI 52-3 para una línea de 69 KV . Poste de 21 m . Referencia : EX - INECEL - Instituto Ecuatoriano de Electrificación [4] Adaptación : Autora	93
3.21. Estructura tipo Line - Post - de circuito simple , para una línea de Subtransmisión en 69 KV . Poste de 21 m . Referencia : EX - INECEL - Instituto Ecuatoriano de Electrificación [4] Adaptación : Autora	94
3.22. Estructura tipo Line - Post - Alternado de circuito simple , para una línea de Subtransmisión en 69 KV . Poste de 21 m . Referencia : EX - INECEL - Instituto Ecuatoriano de Electrificación [4] Adaptación : Autora	95
3.23. Estructura tipo Line - Post - Con inclinación - Alternado de circuito simple , para una línea de 69 KV . Poste de 21 m . Referencia : EX - INECEL - Instituto Ecuatoriano de Electrificación [4] Adaptación : Autora	96
3.24. Estructura tipo Line - Post - de circuito doble , para una línea de Subtransmisión en 69 KV . Poste de 21 m . Referencia : EX - INECEL - Instituto Ecuatoriano de Electrificación [4] Adaptación : Autora	97
3.25. Estructura tipo H de circuito simple . línea de 69 KV . Poste de 21m Referencia : CRE - Cooperativa Rural de Electrificación Ltda [6] Adaptación : Autora	98
3.26. Estructura tipo torre para circuito doble de 69 KV. Altura de 19,5m Referencia : CRE - Cooperativa Rural de Electrificación Ltda [6] Adaptación : Autora	99

3.27. Protección de una estructura tipo torre - circuito doble de 69 KV , con un hilo de guarda . Altura de la torre 19,5m Referencia : CRE - Cooperativa Rural de Electrificación Ltda [6] Adaptación : Autora	100
3.28. Protección de una estructura tipo torre - circuito doble de 69 KV , con doble hilo de guarda . Altura de la torre 19,5m Referencia : CRE - Cooperativa Rural de Electrificación Ltda [6] Adaptación : Autora	101
3.29. Tensores para una estructura de una línea de 69 KV . Referencia : CRE - Cooperativa Rural de Electrificación Ltda [6] Adaptación : Autora	102
3.30. Estructura trifásica para línea de 13,8 KV . Poste de 12 m Refe- rencia : MEER - Ministerio de Electricidad y Energía Renovable - Ecuador Adaptación : Autora	105
3.31. Definición de alturas en una estructura para 13,8 KV con aisla- dores tipo Pin , clase ANSI 55-5 . Poste de 12 m . Referencia : MEER - Ministerio de Electricidad y Energía Renovable - Ecuador [3] Adaptación : Autora	106
3.32. Definición de alturas en una estructura para 13,8 KV con aisla- dores tipo Disco , clase ANSI 52 - 1 . Poste de 12 m . Referencia : MEER - Ministerio de Electricidad y Energía Renovable - Ecuador [3] Adaptación : Autora	107
3.33. Impedancias características del hilo de guarda y fases para una línea de 69 KV. Autora	109
4.1. Partes de una línea de Subtransmisión y Subestación de 69 KV. Autora	113
4.2. Impacto sobre el hilo de guarda. Línea de 69 KV. Autora	114
4.3. Flameo directo (Flashover) . Línea 69 KV . Autora	116
4.4. Impacto en el hilo de guarda con flameo inverso . Autora	118
4.5. Impacto en una fase con flameo directo e inverso . Autora	120
4.6. Descargadores de sobretensión en una línea de 69 KV . Autora . . .	122
5.1. Aislador tipo disco , clase Ansi 52-1 Referencia :Catálogo Hivolt Adaptación :Autora	126
5.2. Curvas de soportabilidad para un aislador ANSI 52-1 Fuente: Autora	127
5.3. Modelado en ATP - DRAW . Fuente: Autora	128
5.4. Modulo de pruebas . Un disco Ansi 52 - 1 . ATP - DRAW . Autora . .	128
5.5. Programación del Model en ATP - DRAW . Autora	129

5.6. Aislador Ansi 52-1 . Prueba de flameo . Condiciones estandar . Autora	130
5.7. Aislador Ansi 52-1 . Prueba de flameo . h = 10 msnm . Autora	130
5.8. Aislador Ansi 52 -1 . Prueba de flameo . h = 2500 msnm . Autora	131
5.9. Corriente tipo rayo : Io = 5 KA - 8/20 us . Autora	131
5.10. Cadena de aisladores ANIS 52-1 Referencia :Catálogo GAMMA - CORONA Adaptación :Autora	132
5.11. Curvas de soportabilidad para una cadena de dos aisladores tipo disco . Clase Ansi 52-1 . Autora	133
5.12. Módulo de pruebas . Cadena de dos discos Ansi 52-1 . Autora	134
5.13. Flameo de una cadena de dos discos Ansi 52-1 . h = 10 msnm . Autora	134
5.14. Flameo de una cadena de dos discos . h = 2500 msnm . Autora	135
5.15. Aislador ANSI 55-5 Referencia :Catálogo GAMMA - CORONA Adaptación :Autora	136
5.16. Curvas de soportabilidad para un aislador Ansi 55-5 . Autora	137
5.17. Módulo de pruebas en ATP - DRAW . Autora	138
5.18. Flameo de un aislador tipo pin . Ansi 55-5 . h = 10 msnm . Autora	138
5.19. Flameo de un aislador tipo Pin . Clase Ansi 55-5 . h = 2500 msnm . Autora	139
5.20. Aislador ANSI 56-1 Referencia :Catálogo GAMMA - CORONA Adaptación :Autora	140
5.21. Curvas de soportabilidad para un Aislador tipo doble pin . Clase Ansi 56-1 . Autora	141
5.22. Módulo de pruebas . Ansi 56 - 1 . ATP DRAW . Autora	142
5.23. Flameo de un aislador Ansi 56-1 . h = 10 msnm . Autora	142
5.24. Flameo de un aislador Ansi 56-1 para h = 2500 msnm . Autora	143
5.25. Cadena de aisladores ANSI 52-3 Referencia :Catálogo GAMMA - CORONA Adaptación :Autora	144
5.26. Curvas de soportabilidad para 5 discos Ansi 52-3 . Autora	145
5.27. Módulo de pruebas . Cinco discos Ansi 52 - 3 . Autora	146
5.28. Flameo de una cadena de cinco discos . Ansi 52-3 . h = 10 msnm . Autora	146
5.29. Flameo de una cadena de cinco discos . Ansi 52-3 . h = 2500 msnm. Autora	147
5.30. Aislador Line Post ANSI 57-6 Referencia :Catálogo GAMMA - CORONA Adaptación :Autora	148
5.31. Curvas de soportabilidad . Aislador Line - post . Ansi 57-6 . Autora	149

5.32. Módulo de pruebas . Aislador Line - Post . Ansi 57 - 6 . Autora . . .	150
5.33. Flameo de aislador Line - Post . Ansi 57-6 . h = 10 msnm . Autora . .	150
5.34. Flameo de aislador Line - Post . Ansi 57-6 . h = 2500 msnm . Autora	151
5.35. Aislador Clase C29.13 tipo DS-69 Referencia :Catálogo GAMMA - CORONA Adaptación :Autora	152
5.36. Curvas de soportabilidad . Aislador polímero . Ansi C29.13 . Autora	153
5.37. Módulo de pruebas . Aislador Polímero Ansi C29.13 . Autora . . .	154
5.38. Flameo de un aislador polímero Ansi C29 .13 . h = 10 msnm . Autora	154
5.39. Flameo de un aislador polímero Ansi C29 .13 . h = 2500 msnm . Autora	155
5.40. Módulo de pruebas para flameo en 13,8 KV . Autora	156
5.41. Flameo del aislador en el poste A . Autora	157
5.42. Flameo del aislador en el poste B . Autora	159
5.43. Voltaje de impacto en una línea de 13,8 KV . Autora	160
5.44. Corriente tipo rayo de 5 KA , 8 / 20 us . Autora	161
5.45. Corriente máxima de descarga . Poste A . Autora	161
5.46. Corriente máxima de descarga . Poste B . Autora	162
5.47. Corriente tipo rayo para t = 8 us . Autora	163
5.48. Corriente de descarga para t = 8 us . Poste A . Autora	163
5.49. Corriente de descarga para t = 8 us . Poste B . Autora	164
5.50. Corriente tipo rayo para t = 20 us . Autora	165
5.51. Corriente de descarga para t= 20 us. Poste A . Autora	165
5.52. Corriente de descarga para t= 20 us. Poste B . Autora	166
5.53. Módulo de pruebas para una estructura de 13,8 KV . h = 2500 msnm . Autora	168
5.54. Voltaje de flameo . h = 2500 msnm . Poste A . Autora	169
5.55. Voltaje de flameo . h = 2500 msnm . Poste B . Autora	169
5.56. Módulo de pruebas para una estructura de 69 KV . Autor	171
5.57. Voltaje de flameo . Poste A . Línea de 69 KV . Autora	172
5.58. Voltaje de flameo . Poste B . Línea de 69 KV. Autora	173
5.59. Voltaje de impacto en una fase . Línea de 69 KV . Autora	174
5.60. Corriente tipo rayo para t = 5,42 us . Autora	175
5.61. Corriente pico máximo . Poste A . 69 KV . Autora	176
5.62. Corriente pico máximo . Poste B . 69 KV . Autora	176
5.63. Corriente tipo rayo . Para t = 8 us . Autora	177
5.64. Corriente de descarga . t = 8 us . Poste A . 69 KV . Autora	178
5.65. Corriente de descarga . t = 8 us . Poste B . 69 KV Autora	178
5.66. Corriente tipo rayo . Para t = 20 us . Autora	179

5.67. Corriente de descarga . $t = 20 \text{ us}$. Poste A . 69 KV . Autora	180
5.68. Corriente de descarga . $t = 20 \text{ us}$. Poste A . 69 KV . Autora	180
5.69. Módulo de pruebas para línea de 69 KV . $h = 2500 \text{ msnm}$. Autora	182
5.70. Voltaje de flameo . Poste A . 69 KV . $h = 2500 \text{ msnm}$. Autora	183
5.71. Voltaje de flameo . Poste B . 69 KV . $h = 2500 \text{ msnm}$ Autora	184
5.72. Voltaje vs Corriente en la resistencia A_0 en ATP . Autora	188
5.73. Módulo de pruebas en 13,8 KV con DPS . Autora	189
5.74. Voltaje residual de un descargador de $U_r = 10 \text{ KV} / 5 \text{ KA}$. Autora	190
5.75. Corriente de descarga en el aislador . Autora	190
5.76. Corriente de descarga a tierra en el DPS . Autora	191
5.77. Módulo de pruebas para un descargador de 60 KV . Autora	194
5.78. Voltaje residual en un descargador de 60 KV . Autora	195
5.79. Corriente de fuga de la cadena de aisladores . Autora	196
5.80. Corriente de descarga a tierra en un DPS de 60 KV . Autora	196

Índice de Tablas

2.1. Factor de corrección por Lluvia (kl) Referencia: Carlos F. Salinas G. - Universidad de Chile Adaptación: Autora[7]	27
2.2. Factores de corrección ambiental.Autora	32
2.3. Factores de Contaminación Ambiental Referencia: IEC 60099-4 [8] Adaptación: Autora	33
2.4. Factor de altitud (Fh) Referencia : Norma USAS C57 - 1200 - 1968 Adaptación : Autora [9]	34
2.5. Distancias de fuga mínimas - aislamiento en 13,8 KV . Fc = Medio Autora	39
2.6. Distancias de fuga mínimas - aislamiento en 13,8 KV . Fc = Alto Autora	39
2.7. Número de discos ANSI 52-1 que forman una cadena de aisladores para una estructura de 13,8 KV Autora	40
2.8. Aisladores de Porcelana tipo disco - Clase ANSI Referencia: Catálogo Dalian Hivolt Power System [10] Adaptación: Autora	41
2.9. Cadena de Aisladores de porcelana tipo disco . clase ANSI 52-1 Referencia: Normativa ANSI C29.1[11] Adaptación: Autora	44
2.10. Valores de Aislamiento estandar al impulso tipo maniobra y tipo rayo para una línea de distribución de 13,8 KV Referencia: Norma IEEE 1313.1 [12] Adaptación: Autora	44
2.11. Voltajes de flameo para cadena de aisladores ANSI 52-3 Referencia: Catálogo: Maclean Power Systems [5] Adaptación: Autora	54
2.12. Nivel básico de aislamiento al impulso tipo maniobras y tipo rayo Referencia: Norma IEEE 1313.1 [13] Adaptación: Autora	55
2.13. Análisis de aisladores para línea aérea de distribución en 13,8 KV. Autora	58
2.14. Análisis de aisladores para línea aérea de distribución en 13,8 KV. Autora	59

2.15. Análisis de aisladores para línea aérea de distribución en 13,8 KV. Autora	60
2.16. Análisis de aisladores para línea aérea de distribución en 13,8 KV. Autora	61
2.17. Análisis de aisladores para línea aérea de distribución en 13,8 KV. Autora	62
2.18. Análisis de aisladores para línea aérea de distribución en 13,8 KV. Autora	63
2.19. Análisis de aisladores para línea aérea de distribución en 69 KV. Autora	64
2.20. Análisis de aisladores para línea aérea de distribución en 69 KV. Autora	65
5.1. Voltajes (pu) en las resistencias variables Ao y A1 en función de la corriente tipo rayo en KA Referencia :Insulación Coordinación for Power Systems . Andrew R. Hileman [14] Adaptación : Autora .	187
5.2. Voltaje en la resistencia variable Ao (VR.ATP) Referencia :Insu- lación Coordinación for Power Systems . Andrew R. Hileman [14] Adaptación : Autora	188
5.3. Voltaje en la resistencia variable Ao (VR.ATP) . Upl = 141 KV Re- ferencia :Insulación Coordinación for Power Systems . Andrew R. Hileman.[14] Adaptación : Autora	193
7.1. Resumen de ecuaciones. Autora	208
7.2. Resumen de ecuaciones. Autora	209
7.3. Resumen de ecuaciones. Autora	210
7.4. Resumen de ecuaciones. Autora	211
7.5. Resumen de ecuaciones. Autora	212
7.6. Resumen de ecuaciones. Autora	213
7.7. Resumen de ecuaciones. Autora	214

Resumen

El trabajo presentado en este documento se enfoca en el análisis de los sistemas de aislamiento utilizados para distribución aérea en media tensión y subtransmisión , utilizando como casos de estudio 13,8 KV para distribución y 69 KV para subtransmisión , en líneas aéreas ubicadas a nivel del mar (10 msnm) como a 2500 msnm .

Se presenta el modelado de cadenas formadas por aisladores de porcelana tipo discos clase Ansi 52-1 y clase Ansi 52-3 , así como también aisladores tipo pin clase Ansi 55-5 , el doble pin 56 -1 , tipo line post Ansi 57-6 , polímero DS - 69 . La herramienta utilizada para el análisis del flameo de cada uno de estos aisladores es ATP Draw , sistema computacional gráfico para estudio de transitorios electromagnéticos .

La simulación de sobretensiones transitorias de tipo atmosféricas por impacto directo de rayos sobre las fases de una línea o de voltajes inducidos por impactos de rayos a distancias cercanas a las líneas se realiza mediante una fuente tipo pulso (Heidler) definida por un tiempo de frente de onda de 8 us y un tiempo de cola de 20 us .

Finalmente se incorpora el modelado de un descargador de sobretensiones para niveles de 13,8 y 69 KV , utilizable para protección ante sobre voltajes de tipo atmosférico en líneas aéreas de distribución , subtransmisión y subestaciones de distribución (69 KV / 13,8 KV) .

Abstract

The work presented in this paper focuses on the analysis of the insulation systems used for medium voltage overhead distribution and sub-transmission, using as case studies 13.8 KV for distribution and 69 KV for sub-transmission, in overhead lines located at sea level (10 meters above sea level) and at 2500 meters above sea level.

The modeling of chains formed by porcelain insulators of the Ansi 52-1 and Ansi 52-3 class, as well as pin type insulators of the Ansi 55-5 class, double pin 56-1, line post Ansi 57-6 type, DS-69 polymer is presented.

The tool used for the analysis of the flashover of each of these insulators is ATP Draw, a graphical computer system for the study of electromagnetic transients. The simulation of atmospheric transient overvoltages due to direct lightning strikes on the phases of a line or voltages induced by lightning strikes at distances close to the lines is performed by means of a pulse type source (Heidler) defined by a wavefront time of 8 us and a tail time of 20 us.

Finally, the modeling of a surge arrester for 13.8 and 69 KV levels, usable for protection against atmospheric overvoltages in overhead distribution lines, sub-transmission and distribution substations (69 KV / 13.8 KV) is incorporated.

Capítulo 1

Introducción

1.1. Antecedentes

La carrera de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana Sede Guayaquil ha incorporado dentro de sus áreas de investigación y desarrollo académico, los claustros, espacios de aporte, colaboración, actualización, renovación, investigación y desarrollo de las distintas áreas que forman parte de la ingeniería eléctrica. El estudio del aislamiento a sobretensiones en elementos y estructuras de tipo aéreas, utilizadas para alimentadores y patios de maniobras de 69 kV, así como también para alimentadores y patios de maniobra de 13.8 kV, busca robustecer el claustro de transmisión y distribución eléctrica.

Además, este trabajo representaría una guía para el análisis de aislamiento en estructuras de 13.8 kV y 69 kV, para ingenieros eléctricos que están trabajando en el área de diseño, construcción, operación, mantenimiento de redes de distribución, subtransmisión y subestaciones de 69/13.8 kV, mediante el uso del software ATP-DRW.

Finalmente, este tema de investigación fortalecerá mi profesión, en un área de la Ingeniería Eléctrica de alta aplicación, como son los sistemas de distribución, subtransmisión y subestaciones en media tensión.

1.2. Descripción general del problema

Estudios realizados en la Universidad de California, Berkely por el científico David Romps, demuestra que el número de rayos (descargas atmosféricas)

aumentan alrededor de un 12% por cada grado que incrementa la temperatura global en el aire, si el aumento de las temperaturas continua al ritmo actual, al final del siglo XXI podríamos experimentar un 50% más de descargas atmosféricas que en la actualidad. Según el INAMHI (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología), el mapa isoceraunicos (Niveles de actividad electro atmosférica) para el Ecuador es el siguiente:

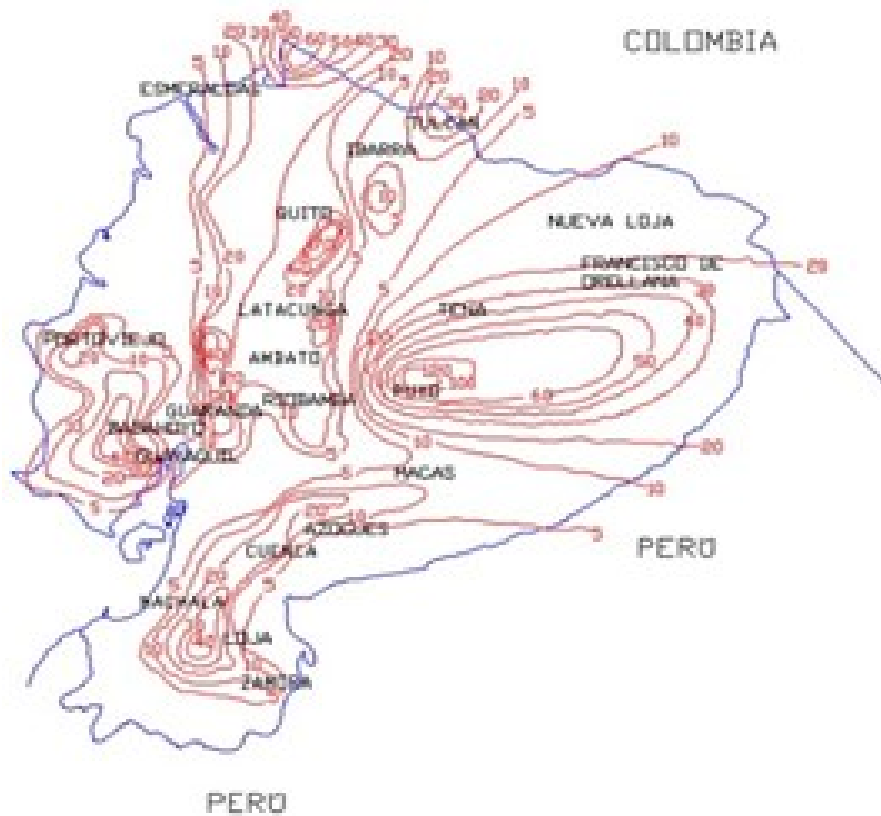


Figura 1.1: mapa del nivel isoceraunicos- INAMHI

Por ejemplo, para la provincia del Guayas, observamos niveles ceraúnicos entre 20,30,40, un promedio de 30, esto significa, 30 días de tormentas con descargas eléctricas al año, de igual manera para otros sectores como Babahoyo, el mapa presenta niveles ceraúnicos entre 10,20,40, también podemos observar que la región del Puyo muestra actividad electro atmosférica entre 50,60,100,120 días de tormentas con descargas eléctricas al año. Una descarga eléctrica tipo

atmosférica (rayos), incide sobre un sistema de electricidad generando sobretensiones en las líneas por el impacto directo del rayo sobre la línea, la estructura el hilo de guarda (hilo de tierra), o en la cercanía de la línea.

Las sobretensiones inducidas por impacto directo o acción indirecta de una descarga atmosférica sobre una estructura ponen el riesgo de la vida útil de las partes, accesorios y equipos, conectados en el sistema. Esto obliga a contemplar en los diseños de ingeniería, el adecuado nivel de aislamiento que debe tener una estructura, para soportar niveles de sobre tensión.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Analizar el nivel de aislamiento que presentan las redes aéreas de distribución, subtransmisión y subestaciones de 69 KV/ 13.8 KV.

1.3.2. Objetivos específicos

1. Analizar el aislamiento de estructuras utilizadas para redes de distribución trifásicas aéreas de 13.8 KV, utilizando ATP- DRAW.
2. Analizar el aislamiento de estructuras utilizadas para redes de subtransmisión trifásicas aéreas de 69 KV, utilizando AT- DRAW.
3. Analizar el aislamiento de estructuras utilizada para subestaciones de 69 KV / 13.8 KV, utilizando ATP-DRAW.
4. Analizar la coordinación de aislamientos entre estructuras utilizadas para 69KV, 13.8KV y equipos descargadores de sobretensión, utilizando ATP-DRAW.

1.4. Contribuciones

Una de las variables que le dan confiabilidad a un sistema de distribución de energía eléctrica es el de control de sobretensiones inducidas en la red, ya

que provienen de un fenómeno natural en el caso de las descargas atmosféricas, que para niveles menores a 300 kV son las de mayor pico. El primer elemento que recibe, opone y a su vez protege a un equipo es su aislamiento, resistencia de oposición o aguante a un determinado nivel de tensión, diseñado y dado por los fabricantes para distintas condiciones de operación, tal es el caso de aisladores tipo cerámica, vidrio, polímero, crucetas de hierro, madera, fibras, plásticos reforzados, de igual manera para apoyos o postes, de hormigón, metálicos, plásticos reforzados, entre otros. El nivel de aislamiento que ofrece un elemento o una estructura está en función de:

- Condiciones ambientales (altitud, húmedo, seco, lluvia, hielo, contaminación, etc).
- El tipo de estructura (Centrada, Semi-Centrada, Pasante, Volado, Retención, Suspensión, etc.).
- La resistencia de puesta a tierra (5,10,20,30,50,100 ohmios)
- Entre los principales factores que definen el nivel de aislamiento de un componente, equipo o sistema.

Una manera de estudiar y asociar todos estos factores para el diseño adecuado del nivel de aislamiento que debe tener un aislador, una estructura, un sistema de puesta a tierra, así como también la protección a descargas atmosféricas (descargador de sobretensión), es mediante la simulación del comportamiento del sistema, para lo cual es necesario una herramienta informática de repuesta lo suficientemente rápida (tiempos de simulación en el orden de microsegundos), tal es el caso del software ATP-DRAW.

1.5. Organización del manuscrito

La organización del contenido de este documento está desarrollado mediante 6 capítulos , los mismos que son :

Capítulo 1 : Introducción.

Capítulo 2 : Aislamiento para estructuras de líneas aéreas 13,8 y 69 KV

Capítulo 3: Estructuras para líneas aéreas de 13,8 Y 69 KV

Capítulo 4 : Flameo Directo (Flashover) y Flameo Inverso (Back Flashover).

Capítulo 5 : Modelado de aisladores y pruebas en ATP - DRAW.

Capitulo 6 : Conclusiones y Recomendaciones.

Capítulo 2

Aislamiento para estructuras de líneas aéreas de Distribución y Subtransmisión

2.1. Introducción

El flameo de una estructura utilizada para líneas de electricidad , significa inestabilidad en el comportamiento del nivel de aislamiento que esta tiene, inestabilidad que ocurre por el cambio repentino de voltaje , cambios que pueden suceder por factores internos o externos de una red , los de naturaleza interna son propios de la operación de la línea , tales como armónicos , fallas a tierra , rechazos de carga , pérdida del neutro , encendido y apagado de capacitores , energización de líneas y transformadores , ferroresonancia , efecto ferranti , etc .[15]

Los factores externos están ligados a las descargas atmosféricas , rayos que impactan directamente sobre una fase o que caen cerca de las líneas , en cualquier caso ya sea por factores internos o externos el resultado es la presencia de una sobretensión en la fase de una línea , voltajes de distintas amplitudes y frecuencias dependiendo de su origen.

El nivel de aislamiento que las estructuras presentan depende de su voltaje nominal y de acuerdo a normativas locales , nacionales o internacionales se establece referentes para su diseño y construcción , tal es el caso de : [15]

- Para líneas de distribución en media tensión (VLL <40 KV) :
NORMA : IEEE 1410 - 2004 [16]:
Recomienda los siguientes niveles de aislamiento :
Aislamiento = 300 KV (De fase a tierra) , para estructuras colocadas sobre suelos con resistividades menores a 1000 Ω
Aislamiento = 420 KV (De fase a tierra) , para estructuras colocadas sobre suelos con resistividades mayores a 1000 Ω

- Para líneas de Subtransmisión (69 KV) :
NORMA : IEEE 1313 - 1 :[13]
BIL = 350 KV (De fase a tierra) = Nivel Básico de Aislamiento al impulso tipo rayo (factores externos)
BSL = 140 KV (De fase a tierra) = Nivel Básico de aislamiento al impulso tipo maniobra (factores internos relacionados con procesos de conmutación)

Para líneas con voltajes nominales hasta 230 KV LL , las sobretensiones de mayor amplitud son las de origen externo (Descargas atmosféricas , las de impacto directo) , de tal manera que las estructuras siempre buscan alcanzar el nivel de aislamiento suficiente para protegerse ante la posible mayor amplitud de sobrevoltaje y esta es la generada por impacto directo de un rayo sobre una fase . Para líneas con voltajes mayores a 230 KV , la sobretensión de mayor amplitud es la generada por las maniobras .

El nivel de aislamiento que presenta una estructura está dado por el tipo de aisladores que utiliza , los mismos que son presentados por los fabricantes mediante una hoja de características entre las cuales está el nivel de aislamiento del aislador , este nivel de aislamiento está estandarizado mediante un voltaje llamado , Tensión Crítica de Flameo , que representa hasta que nivel de voltaje el aislador puede soportar , más arriba de ese valor el aislador flamea .

Por todo lo expuesto entendemos que el nivel de aislamiento de una estructura está dado por el tipo de aisladores que utilice , los mismos que están definidos desde fabrica por su nivel de aguante a una sobretensión de tipo atmosférico o a una sobretensión de baja frecuencia , mediante un voltaje llamado Tensión Crítica de Flameo (TCF) .[15]

2.2. Definiciones

Según lo expuesto podemos presentar las siguientes definiciones :

- **ESTRUCTURA :**
Es un conjunto de elementos y partes tales como postes , crucetas , aisladores , conductores , sistema de puesta a tierra , etc , que garantizan la seguridad mecánica de los elementos y la confiabilidad en la operación eléctrica de una red .
- **AISLADORES :**
Los aisladores son elementos que garantizan hasta cierto nivel de voltaje (Tensión Crítica de Flameo) la no circulación de corriente de una fase hacia tierra o viceversa .
- **FLAMEO DE UN AISLADOR :**
Es el efecto causado por una sobretensión cuando vence la soportabilidad que presenta un aislador , este efecto es un arco eléctrico que puede ocurrir a través del aire , por sobre la superficie del aislador o por el interior del mismo , los mismos que están ligados a la amplitud de la sobretensión y factores ambientales (Nivel de contaminación , densidad relativa del aire , nivel de lluvia y nivel de humedad) .
- **FLAMEO DIRECTO DE UN AISLADOR (FLASHOVER) :**
Se llama flameo directo de un aislador o efecto FLASHOVER , cuando el arco de corriente se produce desde la línea hacia tierra . (Flujo de corriente desde la línea hacia la tierra)
- **FLAMEO INDIRECTO DE UN AISLADOR (BACK FLASHOVER) :**
Se llama flameo indirecto de un aislador (Back Flashover) , cuando el arco de corriente se produce desde la tierra hacia la línea . [17]
- **TENSIÓN CRITICA DE FLAMEO (TCF) DE UN AISLADOR :**
Es el nivel de soportabilidad máxima (aguante) que presenta un aislador ante una sobretensión , definiéndose mediante una referencia probabilística del 50% de que ocurra flameo (arco eléctrico - flujo de corriente a través del aire , sobre la superficie del aislador o por el interior del mismo) , este nivel de soportabilidad que presenta el aislador debe enfrentar cuatro situaciones posibles :

- TCF (En húmedo) , para baja frecuencia
 - TCF (En seco) , para baja frecuencia
 - TCF (Para rayos +)
 - TCF (Para rayos -)
- TENSION CRITICA DE FLAMEO (En húmedo - WET) DE UN AISLADOR:
Es la soportabilidad máxima que presenta un aislador ante sobretensiones de baja frecuencia en condiciones de humedad - lluvia - invierno , está sujeto a correcciones por factores ambientales .
 - TENSION CRITICA DE FLAMEO (En seco - DRY) DE UN AISLADOR :
Es la soportabilidad máxima que presenta un aislador ante sobretensiones de baja frecuencia en condiciones secas - sol - verano , está sujeto a correcciones por factores ambientales .[15]
 - TENSION CRITICA DE FLAMEO (Rayos +) DE UN AISLADOR :
Es la soportabilidad máxima que presenta un aislador ante sobretensiones de alta frecuencia por rayos nube - tierra de polaridad positiva (estadísticamente suceden alrededor del 5 %)
 - TENSION CRITICA DE FLAMEO (Rayos -) DE UN AISLADOR :
Es la soportabilidad máxima que presenta un aislador ante sobretensiones de alta frecuencia por rayos nube - tierra de polaridad negativa (estadísticamente suceden alrededor del 95 %) [2]
 - **BIL** :
Nivel Básico de aislamiento (entre línea y tierra) al impulso tipo rayo , valor estandarizado en función del voltaje nominal de (fase - fase) de una línea .
 - **BSL** :
Nivel Básico de aislamiento (entre línea y tierra) al impulso tipo manobra , valor estandarizado en función del voltaje nominal de (fase - fase) de una línea .
 - **IMPULSO TIPO RAYO** :
Es una onda viajera que se propaga a la velocidad de la luz , $c = 300 \text{ m / us}$, está estandarizado para voltaje y corriente .

- Para corriente :
Impacto directo de un rayo : Onda de 10 / 350 us
Impacto indirecto de un rayo : Onda de 8 / 20 us
- Para voltaje :
Onda de : 1,2 / 50 us
- IMPULSO TIPO MANIOBRA :
Es una onda viajera que se propaga a la velocidad de la luz , $c = 300 \text{ m / us}$, está estandarizado para voltaje y corriente .
 - Para corriente :
Onda de : 30 / 60 us
 - Para voltaje :
Onda de : 1,2 / 50 us
- CONDICIONES ESTÁNDAR DE OPERACIÓN :
Las condiciones estandar de operación son los valores de presión atmosférica , temperatura y humedad sobre los cuales están referidos los valores de la TCF que presenta un catálogo sobre un determinado aislador , estos parámetros son : [2]
Presión atmosférica = 760 mm.Hg
Temperatura ambiente = 25 °C
Humedad absoluta = 15 g / m^3
- CORRECCIÓN DE LA TENSIÓN CRITICA DE FLAMEO :
La TCF se corrige de acuerdo a los factores ambientales relacionados con la densidad relativa del aire , lluvia y humedad .
- FACTORES AMBIENTALES :
Los factores ambientales inciden directamente sobre la TCF de un aislador , se consideran los siguientes [18] :
 - Fa = Factor de corrección por densidad relativa del aire.
 - Fll = Factor de corrección por lluvia.
 - FH = Factor de corrección por humedad.
- FACTOR DE CONTAMINACIÓN AMBIENTAL:
Fc = Factor de contaminación ambiental.

Es la cantidad de **DESD** (mg / cm^2) que existe en el ambiente estos valores presentan su equivalente en mm / KV , parámetro fundamental para el cálculo de la longitud de la línea de fuga de un aislador .

DESD: Densidad equivalente de sal depositada en mg/cm^2

- **VOLTAJE DE OPERACIÓN MÁXIMA DE UNA LÍNEA**
Es el voltaje de fase a fase máximo permitido y aceptado como voltaje de operación normal de una línea , se considera entre un 5 al 10% adicional al voltaje nominal de fase a fase ,esto es debido a la presencia de armónicos en la línea .
- **SOBRETENSION DE FRECUENCIA INDUSTRIAL :**
Es la sobretensión generada en una fase por efectos de factores internos en la operación de una línea , tales como fallas a tierra , rechazo de carga, pérdida del neutro , etc . Son de baja frecuencia y larga duración , se llaman también sobretensiones temporales . [14]
- **SOBRETENSIONES DE MANIOBRA :**
Son sobretensiones que aparecen por la conmutación de estados , son de mayor frecuencia que la industrial (60 Hz) , pueden alcanzar amplitudes hasta 4 veces por unidad , tales como energización de líneas , transformadores , capacitores , reactores , despeje de fallas , etc .
Se llaman también sobretensiones transitorias de frente lento .
- **SOBRETENSIONES POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS :**
Son producidas por descargas atmosféricas ya sea por impacto directo o por voltajes inducidos , se llaman también sobretensiones transitorias de frente rápido , son de alta frecuencia (de 10 KHz a 3 MHz)
- **SOBRETENSIONES DE FRENTE MUY RÁPIDO :**
Son sobretensiones producidas por fallas dentro de sistemas aislados en gas (**SF6** - Hexafluoruro de Azufre) , se llaman también sobretensiones transitorias de frente muy rápido .[14]

2.3. Factores ambientales , aire , lluvia y humedad

Los factores ambientales corrigen la tensión crítica de flameo de un aislador, esto significa que los valores dados por los fabricantes deben ser corregidos al lugar donde opera la línea , los valores de la tensión crítica de flameo que aparecen en los catálogos son valores dados a condiciones estandar . [13]

La ecuación general para determinar la tensión critica de flameo es :

$$TCF.corr = \frac{TCF.st * Fa * Fll}{FH} \quad (2.1)$$

Donde :

TCF.corr = Tensión crítica de Flameo corregida por factores ambientales

TCF.st = Tensión crítica de Flameo estandar

Fa = Factor de corrección por densidad relativa del aire

Fll = Factor de corrección por lluvia

FH = Factor de corrección por humedad

▪ Factor de corrección por densidad relativa del aire :

El factor de corrección por aire es parámetro que indica la incidencia de la altura sobre el nivel mar , con lo cual se incluye la acción sobre la TCF de un aislador de la presión atmosférica y la temperatura ambiente del lugar donde opera la línea .

La ecuación para determinar el factor de corrección por densidad relativa del aire es :

$$Fa = (1,03) * e^{-h/8,65} \quad (2.2)$$

Donde:

e = Número de Euler = 2,71828

h = Altura (km.s.n.m).

Para h = 10 msnm :

h = 10 m.s.n.m . = 0,01 Km.s.n.m.

$$Fa = (1,03) * (2,7128)^{-0,01/8,65} = 1$$

Para h = 2500 msnm :

h = 2500 m.s.n.m . = 2,5 Km.s.n.m.

$$Fa = (1,03) * (2,7128)^{-2,5/8,65} = 0,77$$

■ **Factor de corrección por lluvia :**

Los niveles de precipitación (lluvia) de una zona incide en la Tensión Crítica de Flameo (TCF) de un aislador , se determina mediante la siguiente tabla :

Tabla 2.1: Factor de corrección por Lluvia (kll)
Referencia: Carlos F. Salinas G. - Universidad de Chile
Adaptación: Autora[7]

Intensidad de la lluvia (mm/min)	Factor Fll
0	1,0
1	0,95
1,27	0,83
2,50	0,77
3,80	0,73
5,10	0,71
6,30	0,68

Para h = 10 msnm :

En la figura 2.1 , un mapa del nivel de precipitaciones dado para una región de alrededor de 10 m de altura sobre el nivel del mar , observando que el nivel de lluvias máximo sucede en los meses de Febrero (Temporada invernal) :

Nivel máximo de precipitaciones / hora = 325 mm / hora

Nivel Máximo de precipitaciones / min = $325 / 60 = 5,42$ mm / minuto

De acuerdo a la tabla 2.1 , para un nivel de 5,42 mm / min , corresponde un factor de lluvia de 0,71 .

Resumen : Para h = 10 msnm Kll = 0,71

Para h = 2500 msnm :

En la figura 2.2 , el nivel de precipitación máxima es :

Nivel de máximo de lluvia / hora = 229 mm / hora

Nivel de máximo de lluvia / mm = $229 / 60 = 3,82$ mm / minuto

De acuerdo a la tabla 2.1 tenemos :

Para h = 2500 msnm Kll = 0,73



Figura 2.1: Precipitación máxima, Guayaquil (h = 10 msnm)
Referencia :Weather Atlas.[1]

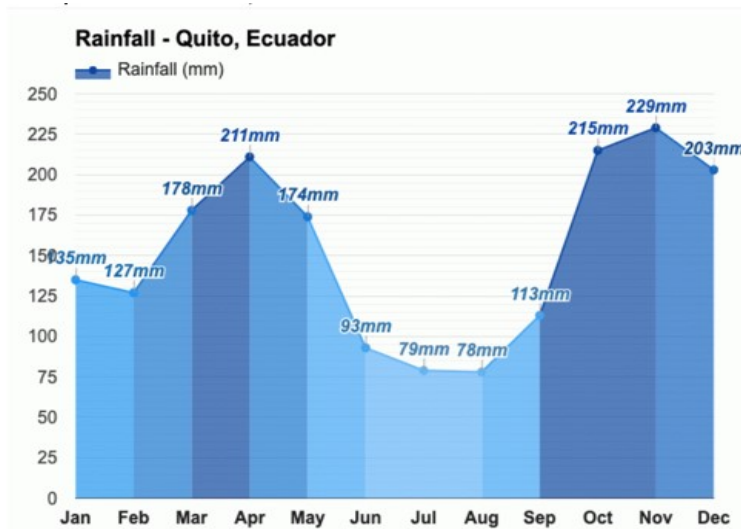


Figura 2.2: Precipitación máxima, Quito (h = 2500 msnm)
Referencia :Weather Atlas. [1]

■ Factor de corrección por humedad :

Para determinar el factor de corrección por humedad (FH) se debe considerar los siguientes parámetros :

- Temperatura ambiente (°C)
- Humedad relativa (Hr)

Para definir las temperaturas ambiente en el Ecuador , las empresas eléctricas responsables de la distribución y subtransmisión utilizan los siguientes valores :

Para $h < 1000$ msnm :

Para $h \leq 1000$ msnm :

T.amb = 25 °C

NIR = 30 Flash / Km^2 / año

Para $1000 < h < 3500$ msnm :

T.amb = 12 °C

NIR = 50 Flash / Km^2 / año

NIR : Nivel Isocerámico de la región

NIR : Es la cantidad de rayos que caen por kilometro cuadrado en una región por año .

En la figura 2.3 , los valores registrados por año de humedad relativa para $h = 10$ msnm (Guayaquil) :

Humedad relativa máxima : 89% (Febrero)

Humedad relativa mínima : 67% (Noviembre)

Por lo tanto :

Humedad relativa promedio : Hr = 78%

En la figura 2.4 , los valores registrados por año de humedad relativa para $h = 2500$ msnm (Quito) :

Humedad relativa máxima : 89% (Marzo)

Humedad relativa mínima : 75% (Agosto)

Por lo tanto :

Humedad relativa promedio : Hr = 82%

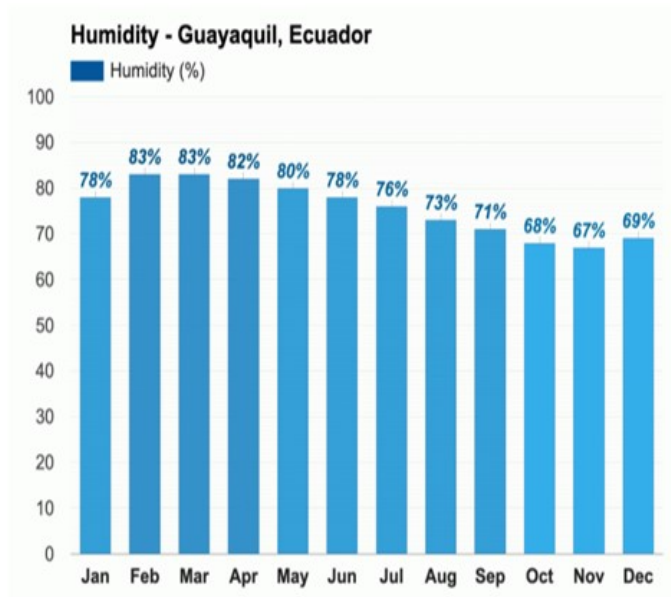


Figura 2.3: Humedad relativa por año . Guayaquil
Referencia :Weather Atlas. [1]

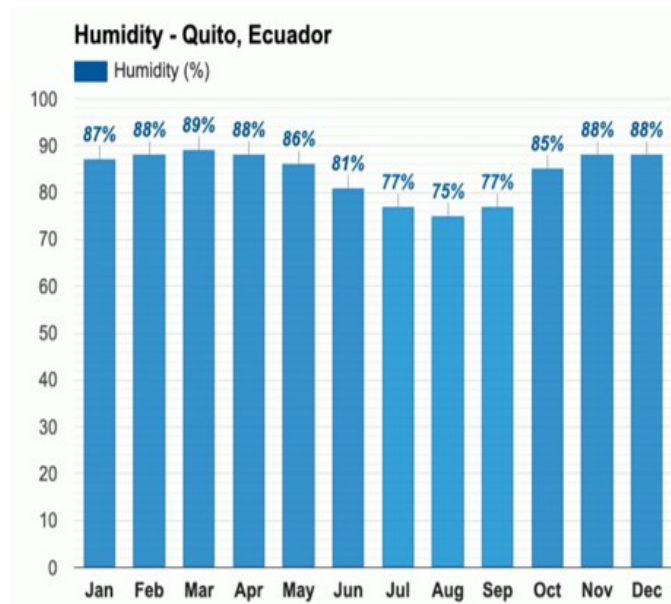


Figura 2.4: Humedad relativa por año . Quito
Referencia :Weather Atlas.[1]

En la figura 2.5 , realizamos la conversión de humedad absoluta en relativa , para Guayaquil (10 msnm) a una temperatura ambiente de 25 °C , para Quito (2500 msnm) una temperatura ambiente de 12°C . [2]

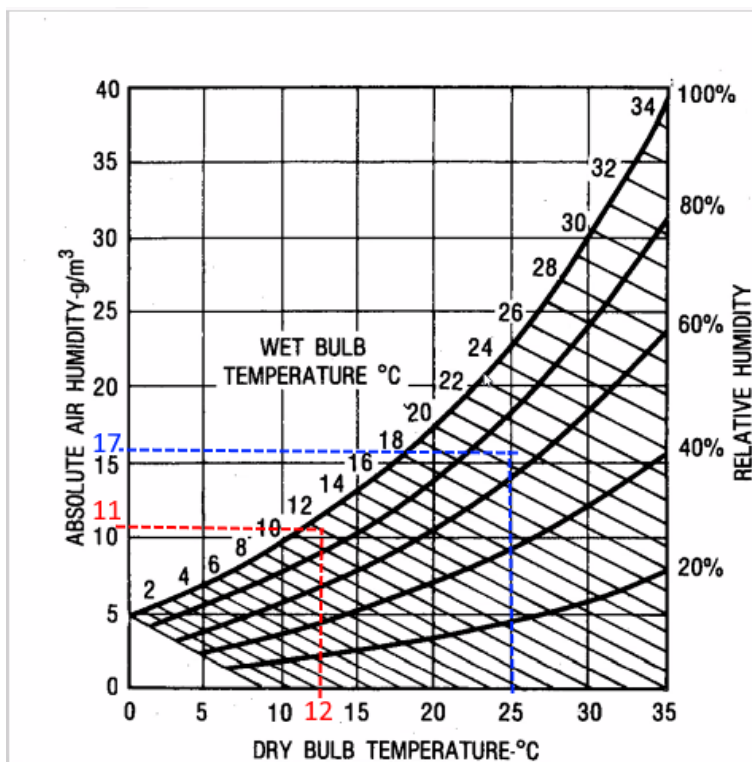


Figura 2.5: Conversión de humedad relativa en absoluta
Referencia : Transmisión line reference book
Adaptación : Autora [2]

De acuerdo a la figura 2.5 :

Para $h = 10$ msnm :

$H_r = 78\%$

$T_{amb.} = 25\text{ °C}$

Humedad absoluta = $H_a = 17\text{ g} / m^3$

Para $h = 2500$ msnm :

$H_r = 82\%$

$T_{amb.} = 12\text{ °C}$

Humedad absoluta = $H_a = 11\text{ g} / m^3$

En la figura 2.6 , se obtiene el factor de corrección por humedad para cada región .

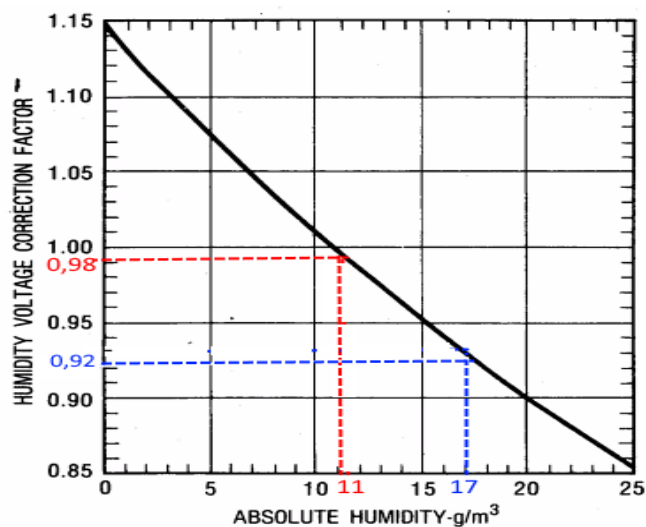


Figura 2.6: Factor de corrección por humedad
Referencia : Transmisión line reference book
Adaptación : Autora

Para $h = 10$ msnm $FH = 0,92$
Para $h = 2500$ msnm ... $FH = 0,980$

■ **Resumen . Factores de corrección ambiental :**

Tabla 2.2: Factores de corrección ambiental.Autora

h (m.s.n.m)	Fa	FII	FH
10	1	0,71	0,92
2500	0,77	0,73	0,980

2.4. Factores de contaminación ambiental

El factor de contaminación ambiental es la cantidad de impurezas presentes en el ambiente donde opera una línea , impurezas que están cuantificadas mediante un indicador llamado densidad equivalente de sal depositada (**DESD**) medido en mg / cm^2 , las normas **IEC** , **IEEE** establecen una relación entre el nivel de **DESD** y la distancia mínima necesaria por KV que debe tener un aislador para evitar que ocurra flameo sobre el aislador , en este caso un flameo superficial .[19]

La norma IEC - 815 , establece cuatro niveles de contaminación , los mismos que son :

- Nivel 1 : Contaminación ligera : Zonas rurales, zonas forestales, zonas limpias.
- Nivel 2 : Contaminación media : Ciudades poco industriales.
- Nivel 3 : Contaminación fuerte : Ciudades industriales, polvo químico, polvo industrial.
- Nivel 4 : Contaminación muy fuerte : Cercanía al mar, centrales de generación térmica, ceniza volcánica, zona petrolera.[18]

En la tabla 2.3 , los factores de contaminación ambiental según las normas **IEC** , **IEEE** , estos valores son equivalentes , esto significa para un nivel de contaminación media , **IEC** recomienda 20 mm / KV , mientras que **IEEE** recomienda 34,6 mm / KV , en el cálculo del número de aisladores de una cadena si utilizamos la ecuación dada por **IEC** se debe utilizar 20 mm / KV , si utilizamos la ecuación dada por **IEEE** , debemos utilizar 34 , 6 mm / KV .[8]

Tabla 2.3: Factores de Contaminación Ambiental

Referencia: IEC 60099-4 [8]

Adaptación: Autora

Nivel de Contaminación	Dist.min/fuga (mm/KV)		Cloruro de sodio - DESD [mg/cm^2]	
	IEC	IEEE	IEC	IEEE
Ligera	16	27,7	0,03 a 0,06	0,03 a 0,06
Media	20	34,6	0,10 a 0,20	0,06 a 0,10
Fuerte	25	43,3	0,30 a 0,40	> a 0,10
Muy Fuerte	31	53,7		

2.5. Factor de altitud (Fh)

El factor de altitud es un factor que se utiliza para corregir el nivel de aislamiento externo de equipos y elementos que se encuentran en una red eléctrica, tal es el caso de bushings de transformadores , brazos aisladores de interruptores , seccionadores , aisladores de estructuras , etc .

Los equipos sumergibles en aceite , gas (SF6) presentan un nivel de aislamiento interno y externo (BIL - interno y BIL - externo) , caso de transformadores , interruptores , el aislamiento interno no cambian con la altitud (msnm) , debido a que no tienen contacto con la atmósfera , considerando este criterio la coordinación de aislamiento en un equipo debe garantizar mayor aislamiento externo (BIL.ext >BIL .interno) .

En la tabla 2.4 , se muestra el factor de corrección por altura :

Tabla 2.4: Factor de altitud (Fh)
Referencia : Norma USAS C57 - 1200 - 1968
Adaptación : Autora [9]

Para corrección del BIL.externo	
h (m.s.n.m)	Fh
≤ 1000	1
1200	0.98
1500	0.95
1800	0.92
2100	0.89
2400	0.86
2700	0.83
3000	0.80
3600	0.75
4200	0.70
4500	0.67

El nivel de aislamiento (BIL y BSL) requerido para una estructura debe ser corregido por los siguientes factores :

Factores ambientales : (aire - Fa , lluvia - Fll , humedad - FH)

Factor de altitud : (Fh) .

Para h = 10 msnm Fh = 1

Para h = 2500 msnm ...Fh = 0,85

2.6. Aislamiento para una línea aérea de 13,8 KV .

El nivel de aislamiento que presenta una estructura utilizada para líneas de distribución (en este caso 13,8 KV) está dado por el tipo de aisladores seleccionados , los mismos que deben ser capaces de garantizar el no paso de corriente desde una fase hacia tierra , que significa deben ser capaces de soportar los siguientes voltajes [20]:

- Voltaje de operación nominal
- Sobrevoltaje de frecuencia industrial en seco
- Sobrevoltaje de frecuencia industrial en húmedo
- Sobrevoltajes por maniobras (en seco y húmedo)
- Sobrevoltajes por descargas atmosféricas

Los fabricantes mediante los correspondientes catálogos indican las características de los aisladores , entre las cuales se consideran necesarias para este análisis las siguientes :

- Tipo y Clase (Normativa)
- Voltaje máximo de operación nominal
- Tipo de material (porcelana - vidrio - polímero)
- Altura del aislador (Spacing)
- Diámetro del aislador
- Longitud de arco
- Distancia de fuga (Creepage)
- TCF en húmedo (WET)
- TCF en seco (DRY)
- TCF (para rayos positivos)
- TCF (para rayos negativos)
- Entre otros.

Para seleccionar los aisladores adecuados que cumplan con el nivel de aislamiento necesario para una línea de 13,8 KV , se debe analizar los siguientes parámetros :

- Distancia de fuga requerida
- La sobretensión a frecuencia industrial
- La sobretensión a alta frecuencia por maniobras
- La sobretensión a alta frecuencia por descargas atmosféricas.

La distancia de fuga requerida para 13,8 KV , es la distancia superficial que debe tener el elemento aislador para evitar flameos por efectos de contaminación ambiental .

La sobretensión a frecuencia industrial (60 Hz) que puede generarse en la línea me permite seleccionar el valor de la TCF (en húmedo) que es el escenario más crítico .[12]

La sobretensión a alta frecuencia (maniobras y descargas atmosféricas) es aceptado aplicar valores estándares recomendados por normativas .

▪ **Distancia de fuga mínima necesaria :**

Para determinar la distancia de fuga mínima necesaria que debe tener el aislamiento de una línea de 13,8 KV , se puede utilizar la ecuación recomendada por las normas IEC o IEEE :

NORMA : IEEE - STD 1313.2 - 1999 [13]

$$Df.Total = \frac{VLL.max * Fc.IEEE}{\sqrt{3} * Fa} \quad (2.3)$$

Donde :

Df.Total = Distancia de fuga total que debe tener el aislamiento (mm)

VLL.max = 1,05 * VLL. nominal = 1,05 * 13,8 KV = 14,5 KV

Fc.IEEE = Factor de contaminación ambiental (equivalente IEEE)

Fa = Factor de densidad relativa del aire .

NORMA : IEC - 60071.2 - 2018 [21]

$$Df.Total = \frac{1,1 * VLL.nom * Fc.IEC}{\sqrt{Fa}} \quad (2.4)$$

Donde :

Df.Total = Distancia de fuga total que debe tener el aislamiento (mm)

VLL = VLL. nominal (KV)

Fc.IEEE = Factor de contaminación ambiental (equivalente IEC)

Fa = Factor de densidad relativa del aire .

Para un nivel de contaminación fuerte (Alto) :

De acuerdo a la tabla 2.3 :

Fc. IEEE = 43,3 mm / KV

Fc . IEC = 25 mm / KV

Para h = 10 msnm :

Fa = 1 . Tabla 2.2

Para h = 2500 msnm :

Fa = 0,77 . Tabla 2.2

Distancia de fuga total . IEEE :

$$Df.Total = \frac{VLL.max * Fc.IEEE}{\sqrt{3} * Fa}$$

Para h = 10 msnm :

$$Df.Total = \frac{14,5KV * 43,3mm/KV}{\sqrt{3} * 1} = 362,5mm$$

Para h = 2500 msnm :

$$Df.Total = \frac{14,5KV * 43,3mm/KV}{\sqrt{3} * 0,77} = 470,8mm$$

Distancia de fuga total . IEC :

$$Df.Total = \frac{1,1 * VLL.nom * Fc.IEC}{\sqrt{Fa}}$$

Para h = 10 msnm :

$$Df.Total = \frac{1,1 * 13,8KV * 25mm/KV}{\sqrt{1}} = 379,5mm$$

Para h = 2500 msnm :

$$Df.Total = \frac{1,1 * 13,8KV * 25mm/KV}{\sqrt{0,77}} = 432,5mm$$

Para un nivel de contaminación medio :

De acuerdo a la tabla 2.3 :

Fc. IEEE = 34,6 mm / KV

Fc.IEC = 20 mm / KV

Para h = 10 msnm :

Fa = 1 . Tabla 2.2

Para h = 2500 msnm :

Fa = 0,77 . Tabla 2.2

Distancia de fuga total . IEEE :

$$Df.Total = \frac{VLL.max * Fc.IEEE}{\sqrt{3} * Fa}$$

Para h = 10 msnm :

$$Df.Total = \frac{14,5KV * 34,6mm/KV}{\sqrt{3} * 1} = 289,7mm$$

Para h = 2500 msnm :

$$Df.Total = \frac{14,5KV * 34,6mm/KV}{\sqrt{3} * 0,77} = 376,2mm$$

Distancia de fuga total . IEC :

$$Df.Total = \frac{1,1 * VLL.nom * Fc.IEC}{\sqrt{Fa}}$$

Para h = 10 msnm :

$$Df.Total = \frac{1,1 * 13,8KV * 20mm/KV}{\sqrt{1}} = 303,6mm$$

Para h = 2500 msnm :

$$Df.Total = \frac{1,1 * 13,8KV * 20mm/KV}{\sqrt{0,77}} = 345,98mm$$

Resumen . Cálculo de la Distancia de fuga total :

En las tablas 2.5 y 2.6 , los valores para la distancia de fuga total que deben tener los aisladores en cada fase de una línea de 13,8 KV . [22]

Tabla 2.5: Distancias de fuga mínimas - aislamiento en 13,8 KV . Fc = Medio
Autora

Para: Fc = Medio		
	IEEE	IEC
Fc	34,6 [mm / kV]	20 [mm / KV]
h [m.s.n.m]	Df.total [mm]	Df.total [mm]
10	289,7	303,6
2500	376,2	345,98

Tabla 2.6: Distancias de fuga mínimas - aislamiento en 13,8 KV . Fc = Alto
Autora

Para: Fc = Alto		
	IEEE	IEC
Fc	43,3 [mm / kV]	25 [mm / KV]
h [m.s.n.m]	Df.total [mm]	Df.total [mm]
10	362,5	379,5
2500	470,8	432,5

De acuerdo a la tabla 2.7 , seleccionamos un aislador tipo disco :

Para h = 10 msnm / Fc = Alto :

Un disco 52-1 :

Distancia de fuga = 178 mm

Por lo tanto :

Norma : **IEEE** : Número de discos = Df.Total . IEEE / Df.disco

Número de discos = 362,5 mm / 178 mm = 2 discos

Norma : **IEC** : Número de discos = Df.Total . IEC / Df.disco

Número de discos = 379,5 mm / 178 mm = 2,1 discos

Conclusión . h = 10 msnm / Fc = Alto :

Al aplicar la normas IEEE - IEC , se determinó :

Número de discos . IEEE = 2

Número de discos . IEC = 2.1

Selección :

Seleccionamos dos aisladores tipo disco clase ANSI 52-1
Formamos una cadena de dos discos ANSI 52 - 1

Para h = 25000 msnm / Fc = Alto :

Norma : IEEE : Número de discos = Df.Total . IEEE / Df.disco

Número de discos = 470,8 mm / 178 mm = 2,6 discos

Norma : IEC : Número de discos = Df.Total . IEC / Df.disco

Número de discos = 432,5 mm / 178 mm = 2,43 discos

Conclusión . h = 2500 msnm / Fc = Alto :

Al aplicar la normas IEEE - IEC , se determinó :

Número de discos . IEEE = 2,6

Número de discos . IEC = 2,43

Selección :

Seleccionamos tres aisladores tipo disco clase ANSI 52-1
Formamos una cadena de tres discos ANSI 52 - 1 .

En la tabla 2.7 , un resumen del número de discos que se deben utilizar para el aislamiento de cada una de las fases en una estructura para 13,8 KV , considerando un nivel de contaminación alto .[10]

Tabla 2.7: Número de discos ANSI 52-1 que forman una cadena de aisladores para una estructura de 13,8 KV

Autora

Para un nivel de contaminación : Alto	
h (m.s.n.m)	Numero de discos ANSI 52-1
10	2
2500	3

Tabla 2.8: Aisladores de Porcelana tipo disco - Clase ANSI
Referencia: Catálogo Dalian Hivolt Power System [10]
Adaptación: Autora

Clase		52-1	52-2	52-2	52-3	52-3	52-3	52-4	52-4	52-5	52-5
Altura (h)		140	146	146	146	146	146	146	146	146	146
Diámetro (d)		160	200	200	255	255	270	255	255	254	255
Distancia de fuga		178	210	210	292	432	432	292	292	320	305
Baja frecuencia	Seco	60	65	65	80	80	80	80	80	80	80
	húmedo	30	35	35	50	50	50	50	50	50	50
Alta frecuencia	Positivo	100	115	115	125	125	125	125	125	125	125
	Negativo	100	115	115	130	130	130	130	130	130	130
Normativa		ANSI C29.2									

■ **Sobretensión de frecuencia industrial :**

El nivel de aislamiento de la estructura debe ser capaz de soportar la máxima sobretensión de baja frecuencia o frecuencia industrial (SVfi a 60 Hz) en las fases de la línea , entre las posibles causas que generan esta sobretensión están las fallas a tierra , rechazos de carga , pérdida del neutro , etc .[22] Normalmente la generada sobre una de las fases sanas por una falla a tierra es la de mayor amplitud , la misma que se determina de la siguiente manera :

$$SVfi = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} * 1,05 * VLL.nom * Ke \quad (2.5)$$

Donde :

SVfi = Sobrevoltaje de frecuencia industrial

Ke = Factor de falla a tierra

Ke = 1.35 , para sistemas con neutro multiterrizado

Multiterrizado = Sólidamente aterrizado

Ke = 1,40 , para sistemas con neutro aterrizado en la fuente

Ke = 1,73 , para sistemas con neutro aterrizado con impedancias

Ke = 1,73 , para sistemas sin neutro

Para un sistema con Ke = 1,73 , tenemos :

$$SVfi = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} * 1,05 * 13,8 * 1,73 = 20,47KV$$

Corrección por número de estructuras :

Kp = Factor probabilístico de corrección por el número de estructuras que tiene la línea y la confiabilidad del aislamiento .

Es aceptado un valor de :

Kp = 0,8

$$SVfi^* = \frac{SVfi}{Kp} = \frac{20,47}{0,8} = 25,6KV$$

$$SVfi^* = TCF.corregida$$

$$SVfi^* = \frac{TCF.st * Ka * Kl}{KH}$$

La tensión crítica de flameo estandar (TCF.st) que debe tener el aislamiento de cada una de las fases es :

$$TCF.st = \frac{SVfi^* * KH}{Ka * Kll} \quad (2.6)$$

Por lo tanto :

Para h = 10 msnm / Ke = 1,73 / 2 discos :

$$TCF.st = \frac{SVfi^* * KH}{Ka * Kll} = \frac{25,6 * 0,92}{1 * 0,71} = 33,2KV$$

Para h = 2500 msnm / Ke = 1,73 / 3 discos :

$$TCF.st = \frac{SVfi^* * KH}{Ka * Kll} = \frac{25,6 * 0,980}{0,77 * 0,73} = 44,6KV$$

De acuerdo a la tabla 2.8 :

Para h = 10 msnm / Ke = 1,73 / 2 discos :

TCF (WET) = 55 KV > TCF st (33,2 KV)

La cadena formada por dos discos ANSI 52-1 si puede soportar una sobretensión de frecuencia industrial (la máxima esperada) en condiciones de humedad , que es el caso más crítico .

Para h = 2500 msnm / Ke = 1,73 / 3 discos :

TCF (WET) = 80 KV > TCF st (44,6 KV)

La cadena formada por tres discos ANSI 52-1 si puede soportar una sobretensión de frecuencia industrial (la máxima esperada) en condiciones de humedad .

Tabla 2.9: Cadena de Aisladores de porcelana tipo disco . clase ANSI 52-1

Referencia: Normativa ANSI C29.1 [11]

Adaptación: Autora

Normativa		ANSI C29.1				
Discos : D = 6 " = 152 mm / h = 140 mm						
Cadena de aisladores		Número de discos Ansi 52-1				
Flameo		1	2	3	4	5
Baja frecuencia	DRY (seco)	60	120	175	225	275
	WET (Húmedo)	30	55	80	105	130
Alta frecuencia	Rayo (+)	100	200	300	335	400
	Rayo (-)	100	190	275	355	435

■ **Sobretensiones por maniobras :**

Las sobretensiones por maniobras se definen como transitorias (de corta duración) de frente lento (onda de corriente de 30 / 60 us - onda de voltaje 1,2 / 50 us) , la norma IEEE define la relación entre el Voltaje de línea - línea nominal y el nivel de básico de aislamiento al impulso tipo maniobra (BSL) , de acuerdo a la tabla 2.9 [12].

Tabla 2.10: Valores de Aislamiento estandar al impulso tipo maniobra y tipo rayo para una línea de distribución de 13,8 KV

Referencia: Norma IEEE 1313.1 [12]

Adaptación: Autora

VLL.nom [KV.rms]	VLL.max [KV.rms]	BSL fase-tierra [KV.rms]	BIL fase-tierra [KV,pico]
13,2	15	34	95
13,8			110

BSL = Nivel básico de aislamiento al impulso tipo maniobra .

BIL = Nivel básico de aislamiento al impulso tipo rayo

Aislamiento por maniobras que requiere una línea :

La tensión crítica de flameo ante sobretensiones por maniobras y el nivel básico de aislamiento al impulso tipo maniobra se definen [12]:

$$TCF.st.maniobras = \frac{BSL.st}{0,922} \quad (2.7)$$

Corrección del BSL por altitud :

$$BSL.corr.altitud = BSL.st * Fh \quad (2.8)$$

Por lo tanto :

$$TCF.man.corr.alt.req. = \frac{BSL.st * Fh}{0,922} \quad (2.9)$$

TCF.man.corr.alt.req.= Tensión crítica por maniobras corregida por altitud requerida por la línea .

Aislamiento ante sobretensiones por maniobras requerido de un aislador :

$$TCF.man.corr.amb.aisl. = \frac{TCF.st * Fa * Fll}{FH} \quad (2.10)$$

Donde :

= Tensión crítica de flameo por maniobras corregida por factores ambientales que se requiere de un aislador .

TCF .requerida . Línea = TCF.requerido . aislador

Por lo tanto :

$$\frac{BSL.st * Fh}{0,922} = \frac{TCF.st * Fa * Fll}{FH} \quad (2.11)$$

De la ecuación 2.11 , encontramos la TCFst del aislador :

$$TCF.st.aislador.maniobras = \frac{BSL.st * Fh * FH}{0,922 * Fa * Fll} \quad (2.12)$$

Con la ecuación 2.12 , encontramos la TCF requerida del aislador , voltaje referido a su valor estandar que se requiere para el correspondiente aislamiento de la línea ante sobretensiones por maniobra .

Para una línea de 13,8 KV :

Utilizando la ecuación 2.12 : **Para h = 10 msnm :**

$$TCF.st.req.ais. = \frac{BSL.st * Fh * FH}{0,922 * Fa * Fll}$$

$$TCF.st.req.ais = \frac{34KV * 1 * 0,92}{0,922 * 1 * 0,71} = 47,8KV$$

De acuerdo al catálogo (Tabla 2.9)

Para una cadena de 2 discos Ansi 52-1 :

TCFst. cat . (-) = 190 KV = TCF . st . ofrece el aislador

Por lo tanto :

TCFst.cat. >TCF . st . req . ais .

190 KV >47,8 KV V

Conclusión : La cadena de dos discos Ansi 52 - 1 : CUMPLE .

La línea requiere un aislador con una TCF . st de 47,8 KV y la cadena le ofrece 190 KV , por lo tanto es suficiente aislamiento para sobretensiones tipo maniobra.

Para h = 2500 msnm :

$$TCF.st.req.ais. = \frac{BSL.st * Fh * FH}{0,922 * Fa * Fll}$$

$$TCF.st.req.ais = \frac{34KV * 0,85 * 0,98}{0,922 * 0,77 * 0,73} = 54,6KV$$

De acuerdo al catálogo (Tabla 2.9)

Para una cadena de 2 discos Ansi 52-1 :

TCFst. cat . (-) = 190 KV = TCF . st . ofrece el aislador

Por lo tanto :

TCFst.cat. >TCF . st . req . ais .

190 KV >54,6 KV

Conclusión : La cadena de dos discos Ansi 52 - 1 : CUMPLE .

La línea requiere un aislador con una TCF . st de 54,6 KV y la cadena le ofrece 190 KV , por lo tanto es suficiente aislamiento para sobretensiones

tipo maniobra.

Sin embargo por distancia de fuga esta cadena de dos discos Ansi 52-1 , NO CUMPLE .

■ **Sobretensiones por descargas atmosféricas :**

Las líneas de distribución (en este caso 13,8 KV) , son afectadas por descargas atmosféricas de manera directa cuando un rayo impacta sobre el conductor de la fase , generándose una sobretensión del orden de Mega Voltios , pero también aparecen sobrevoltajes de menor magnitud que los de impacto directo , por efectos de inducción electromagnética del campo creado por la corriente de un rayo cuando cae cerca (distancias menores a 300 m) de la línea , pudiendo impactar sobre la tierra o sobre construcciones y arboles que se encuentren en el radio de inducción sobre la línea , la amplitud de esta sobretensión por inducción depende de la distancia a la cual impactó el rayo con respecto a la línea y de la amplitud de la corriente del rayo (Se consideran rayos desde 1 KA hasta rayos de 200 KA) . [23]

Ante la gran amplitud de estas sobretensiones no existe aislador que sea capaz de soportar un impacto directo de un rayo , es inevitable el flameo, para enfrentar sobretensiones inducidas hasta ciertos valores el aislador puede ser dimensionado de acuerdo a la recomendación dada por la norma IEEE, la tabla 2.10 muestra los valores de BIL para una línea de 13,8 KV . (BIL = de 95 a 110 KV) . [12]

Aislamiento para sobretensiones atmosféricas que requiere una línea :

La tensión crítica de flameo ante sobretensiones tipo rayo y el nivel básico de aislamiento al impulso tipo rayo se definen [12]:

$$TCF.st.rayo = \frac{BIL.st}{0,961} \quad (2.13)$$

Corrección del BIL por altitud :

$$BIL.corr.altitud = BIL.st * Fh \quad (2.14)$$

Por lo tanto :

$$TCF.rayo.corr.alt.req. = \frac{BIL.st * Fh}{0,961} \quad (2.15)$$

TCF.rayo.corr.alt.req.= Tensión crítica de flameo tipo rayo corregida por altitud , requerida por la línea .

Aislamiento ante sobretensiones atmosféricas que se requiere de un aislador :

$$TCF_{\text{rayo.corr.amb.aisl.}} = \frac{TCF_{\text{st}} * Fa * Fll}{FH} \quad (2.16)$$

Donde : $TCF_{\text{rayo.corr.amb.aisl.}}$ = Tensión crítica de flameo tipo rayo corregida por factores ambientales que se requiere de un aislador .

TCF .requerida . Línea = TCF.requerido . aislador

Por lo tanto :

$$\frac{BIL_{\text{st}} * Fh}{0,961} = \frac{TCF_{\text{st}} * Fa * Fll}{FH} \quad (2.17)$$

De la ecuación 2.17 , encontramos la TCF_{st} del aislador :

$$TCF_{\text{rayo.st.aislador.}} = \frac{BIL_{\text{st}} * Fh * FH}{0,961 * Fa * Fll} \quad (2.18)$$

Con la ecuación 2.18 , encontramos la TCF requerida del aislador , voltaje referido a su valor estandar que se requiere para el correspondiente aislamiento de la línea ante sobretensiones de tipo atmosféricas .

Para una línea de 13,8 KV :

Utilizando la ecuación 2.18 :

Para h = 10 msnm :

$$TCF_{\text{st.req.ais.}} = \frac{BIL_{\text{st}} * Fh * FH}{0,961 * Fa * Fll}$$

$$TCF_{\text{st.req.ais.}} = \frac{110KV * 1 * 0,92}{0,961 * 1 * 0,71} = 148,3KV$$

De acuerdo al catálogo (Tabla 2.9)

Para una cadena de 2 discos Ansi 52-1 :

$TCF_{\text{st. cat.}} (-) = 190 KV = TCF_{\text{st. ofrece el aislador}}$

Por lo tanto :

$TCF_{\text{st.cat.}} > TCF_{\text{st.req.ais.}}$

$190 KV > 148,3 KVV$

Conclusión : La cadena de dos discos Ansi 52 - 1 : CUMPLE .

La línea requiere un aislador con una TCF . st de 148,3 KV y la cadena le ofrece 190 KV , por lo tanto es suficiente aislamiento para sobretensiones atmosféricas .

Para h = 2500 msnm :

$$TCF.st.req.ais. = \frac{BIL.st * Fh * FH}{0,961 * Fa * Fll}$$

$$TCF.st.req.ais = \frac{110KV * 0,85 * 0,98}{0,961 * 0,77 * 0,73} = 169,6KV$$

De acuerdo al catálogo (Tabla 2.9)

Para una cadena de 2 discos Ansi 52-1 :

TCFst. cat . (-) = 190 KV = TCF . st . ofrece el aislador

Por lo tanto :

TCFst.cat. >TCF . st . req . ais .

190 KV >169,6 KV

Conclusión : La cadena de dos discos Ansi 52 - 1 : CUMPLE .

La línea requiere un aislador con una TCF . st de 169,6 KV y la cadena le ofrece 190 KV , por lo tanto es suficiente aislamiento para sobretensiones atmosféricas .

Sin embargo por distancia de fuga esta cadena de dos discos Ansi 52-1 , NO CUMPLE .

Nota :

Se utiliza la TCF (al impulso negativo = rayo negativo) por el registro estadístico que el 95% de los rayos nube - tierra son negativos .

Resumen :

Para una línea de distribución trifásica aérea de 13,8 KV :

Nivel de contaminación = Alto

Fc . IEEE = 43,3 mm / KV

Fc . IEC = 25 mm / KV

Para h = 10 msnm : Cadena de dos discos ANSI 52 - 1

Para h = 2500 msnm : Cadena de tres discos ANSI 52 - 1

Para las dos alturas (10 msnm y 2500 msnm) , las cadenas cumplen con :

- Distancia de fuga mínima requerida.
- Sobretensión de frecuencia industrial.
- Sobretensión por maniobras (Transitoria de frente lento).

- Sobretensión atmosférica (Transitoria de frente rápido).

Aisladores para líneas de 13,8 KV

comúnmente se utilizan :

- Cadenas de discos aisladores clase ANSI 52-1.
- Aisladores tipo Pin , clase ANSI 55 - 5.
- Aisladores tipo doble pin , clase ANSI 56 - 1.
- Aisladores tipo polímero.
- Entre otros.

La metodología desarrollada para el análisis de las características de flameo de una cadena de aisladores es aplicable para todos los tipos de aisladores .

Resumen de ecuaciones :

Las siguientes ecuaciones me permiten determinar la distancia de fuga total y los niveles de aislamiento (a frecuencia industrial , maniobras y atmosféricas) que requiere una línea , por lo tanto son los valores que debe satisfacer el sistema de aislador seleccionado (cadena de discos , tipo pin , polímero , etc) .

Las TCF obtenidas con las ecuaciones indicadas a continuación me permiten calcular los valores estandar para compararlos directamente con los que presentan los catálogos de fabricantes de aisladores .

$$Df.total = \frac{Fr * VLL.nom * Fc}{\sqrt{3} * Fa} \quad (2.19)$$

$$TCF.fi = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} * \frac{Fr * VLL.nom * Ke * FH}{Kp * Fa * Fll} \quad (2.20)$$

$$TCF.man = \frac{BSL * Fh * FH}{0,922 * Fa * Fll} \quad (2.21)$$

$$TCF.rayo = \frac{BIL * Fh * FH}{0,961 * Fa * Fll} \quad (2.22)$$

Donde :

Df.Total = Distancia de fuga total (mm)

Fr = Factor de regulación de voltaje (5%)

TVLL.nom = Voltaje de fase a fase , nominal (KV)

Fc = Factor de contaminación (mm / KV)

Fa = Factor de corrección por densidad relativa del aire

TCF.fi = Tensión crítica de flameo a frecuencia industrial (KV)

Ke= Factor de falla a tierra

FH= Factor de humedad

Kp = Factor probabilístico dado por el número de estructuras y confiabilidad del aislamiento

Fll = Factor de corrección por lluvia

TCF.man = Tensión crítica de flameo por maniobras (KV)

BSL = Nivel básico de aislamiento al impulso tipo maniobra (KV)

Fh = Factor de altitud

0,922 = Relación probabilística entre el BSL y TCF.maniobras

TCF.rayo = Tensión crítica de flameo por rayo (KV)

BIL = Nivel básico de aislamiento al impulso tipo rayo (KV)

0,961 = Relación probabilística entre el BIL y TCF.rayo

2.7. Aislamiento para una línea aérea de 69 KV .

La metodología utilizada para el análisis de cadenas de aisladores en 13,8 KV es también aplicable para niveles de 69 KV .

- **Distancia de fuga mínima necesaria :**

Para h = 10 msnm / Fc = Medio :

NORMA : IEEE - STD 1313.2 - 1999 [12]

Fc.IEEE = 34,6 mm / KV

$$Df.Total = \frac{VLL.max * Fc.IEEE}{\sqrt{3} * Fa} \quad (2.23)$$

$$Df.Total = \frac{1,05 * 69KV * 34,6mm/KV}{\sqrt{3} * 1} = 1447,3mm$$

NORMA : IEC - 60071.2 - 2018 [21]

Fc.IEC = 20 mm / KV

$$Df.Total = \frac{1,1 * VLL.nom * Fc.IEC}{\sqrt{Fa}} \quad (2.24)$$

$$Df.Total = \frac{1,1 * 69KV * 20mm/KV}{\sqrt{1}} = 1518mm$$

De acuerdo a la tabla 2.8 , comúnmente se utiliza una cadena formada por discos clase Ansi 52 - 3 de 10 pulgadas de diámetro y 292 mm de distancia de fuga , por lo tanto el número de discos aisladores es :

Según IEEE :

Número de discos = Df.total / Df.cada disco = 1447,3 / 292 = 4,95 = 5 DISCOS

según IEC :

Número de discos = Df.total / Df.cada disco = 1518 / 292 = 5,18 = 5 DISCOS

Para h = 2500 msnm / Fc = Medio :

NORMA : IEEE - STD 1313.2 - 1999 [12]

Fc.IEEE = 34,6 mm / KV

$$Df.Total = \frac{VLL.max * Fc.IEEE}{\sqrt{3} * Fa} \quad (2.25)$$

$$Df.Total = \frac{1,05 * 69KV * 34,6mm/KV}{\sqrt{3} * 0,77} = 1879,6mm$$

NORMA : IEC - 60071.2 - 2018 [21]

Fc.IEC = 20 mm / KV

$$Df.Total = \frac{1,1 * VLL.nom * Fc.IEC}{\sqrt{Fa}} \quad (2.26)$$

$$Df.Total = \frac{1,1 * 69KV * 20mm/KV}{\sqrt{0,77}} = 1730mm$$

De acuerdo a la tabla 2.8 , con discos Ansi 52 - 3 :

Según IEEE :

Número de discos = Df.total / Df.cada disco = 1879,6 / 292 = 6,4 = 6

Según IEC :

Número de discos = Df.total / Df.cada disco = 1730 / 292 = 5,9 = 6

Conclusión :

Para h = 10 msnm / Fc = medio :

Una cadena de 5 aisladores tipo disco clase Ansi 52-3

Para h = 2500 msnm / Fc = medio :

Una cadena de 6 aisladores tipo disco clase Ansi 52-3

■ **Sobretensión de frecuencia industrial :**

$$SVfi = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} * 1,05 * VLL.nom * Ke \quad (2.27)$$

Para un sistema con Ke = 1,73 , tenemos :

$$SVfi = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} * 1,05 * 69 * 1,73 = 102,34KV$$

Para Kp = 0,8

$$SVfi^* = \frac{SVfi}{Kp} = \frac{102,34}{0,8} = 127,92KV$$

$SVfi^* = TCF.corregida$

$$SVfi^* = \frac{TCF.st * Ka * Kl}{KH}$$

Por lo tanto :

Para h = 10 msnm / Ke = 1,73 / 5 discos :

$$TCF.st = \frac{SVfi^* * KH}{Ka * Kl} = \frac{127,92 * 0,92}{1 * 0,71} = 165,76KV$$

Para h = 2500 msnm / Ke = 1,73 / 6 discos :

$$TCF.st = \frac{SVfi^* * KH}{Ka * Kl} = \frac{127,92 * 0,980}{0,77 * 0,73} = 223KV$$

Tabla 2.11: Voltajes de flameo para cadena de aisladores ANSI 52-3

Referencia: Catálogo: Maclean Power Systems [5]

Adaptación: Autora

Para una cadena de aisladores ANSI 52 - 3				
Número de aisladores	Diámetro: 10 in - 255 mm			
	Altura: 5 3/4 in - 146 mm			
	Flashover- Baja frecuencia		Flashover - Alta frecuencia	
	Seco	Húmedo	Positivo	Negativo
2	145	90	220	225
3	205	130	315	320
4	270	170	410	420
5	325	215	500	510
6	380	255	595	605
7	435	295	670	695
8	485	335	760	780
9	540	375	845	860
10	590	415	930	945

De acuerdo a la tabla 2.11 :

Para h = 10 msnm / Ke = 1,73 / 5 discos :

TCF (WET) = 215 KV > TCF st (165,76 KV)

La cadena formada por CINCO discos ANSI 52-3 . Cumple .

Para h = 2500 msnm / Ke = 1,73 / 6 discos :

TCF (WET) = 255 KV > TCF st (223 KV)

La cadena formada por SEIS discos ANSI 52-3 . Cumple

■ **Sobretensiones por maniobras :**

De acuerdo a la norma IEEE , en la tabla 2.12 , los valores del nivel básico de aislamiento para impulsos tipo maniobras (BSL) y tipo rayo (BIL) para una línea de 69 KV [13].

Tabla 2.12: Nivel básico de aislamiento al impulso tipo maniobras y tipo rayo

Referencia: Norma IEEE 1313.1 [13]

Adaptación: Autora

VLL.nom [KV.rms]	VLL.max [KV.rms]	BSL fase-tierra [KV.rms]	BIL fase-tierra [KV.pico]
69	72,5	95	250
		140	350

Para h = 10 msnm :

Para una línea de 69 KV , tenemos : BSL = 140 KV (Tabla 2.12)

$$TCF.st = \frac{BSL * Kh * FH}{0,922 * Fa * Fl}$$

$$TCF.st = \frac{140 * 1 * 0,92}{0,922 * 1 * 0,71} = 196,76KV$$

Para CINCO discos ANSI 52 - 3 :

TCF . st (Al impulso negativo) = 510 KV ... (Tabla 2.11)

TCF . st (Al impulso negativo) > TCF . requerida

510 KV > 196,76 KV La cadena de CINCO discos ANSI 52 - 3 , CUMPLE .

Para h = 2500 msnm :

Para una línea de 69 KV , tenemos : BSL = 140 KV (Tabla 2.12)

$$TCF.st = \frac{BSL * Kh * FH}{0,922 * Fa * Fl}$$

$$TCF.st = \frac{140 * 0,85 * 0,98}{0,922 * 0,77 * 0,73} = 225KV$$

Para SEIS discos ANSI 52 - 3 :

TCF . st (Al impulso negativo) = 605 KV ... (Tabla 2.11)

TCF . st (Al impulso negativo) >TCF . requerida

605 KV >225 KV La cadena de SEIS discos ANSI 52 -3 , CUMPLE .

■ **Sobretensiones por descargas atmosféricas :**

Las líneas de 69 KV tienen estructuras que alcanzan alturas alrededor de 20 m , por lo cual están más expuestas a impactos directos de rayos nube-tierra , esto lleva a utilizar un hilo de protección o de guarda o llamado también hilo de tierra .[23]

Sin embargo existen rayos que llegan con trayectorias inclinadas y pueden impactar sobre alguno de los conductores de fase , con lo cual se genera un voltaje de muy alta amplitud , si esto sucede el flameo es inevitable , sin embargo el nivel de aislamiento mínimo que debe presentar la estructura ante impulsos tipo rayo (BIL) se indica en la tabla 2.11 , para una línea de 69 KV se recomienda un BIL = 350 KV .

Para h = 10 msnm :

Para una línea de 69 KV , tenemos : BIL = 350 KV (Tabla 2.12)

$$TCF.st = \frac{BIL * Kh * FH}{0,961 * Fa * Fll}$$

$$TCF.st = \frac{350 * 1 * 0,92}{0,961 * 1 * 0,71} = 471,9KV$$

Para CINCO discos ANSI 52 - 3 :

TCF . st (Al impulso negativo) = 510 KV ... (Tabla 2.11)

TCF . st (Al impulso negativo) >TCF . requerida

510 KV >471,9 KV La cadena de CINCO discos ANSI 52 - 3 , CUMPLE .

Para h = 2500 msnm :

Para una línea de 69 KV , tenemos : BIL = 350 KV (Tabla 2.12)

$$TCF.st = \frac{BIL * Kh * FH}{0,961 * Fa * Fll}$$

$$TCF.st = \frac{350 * 1 * 0,98}{0,961 * 0,77 * 0,73} = 634,9KV$$

Para SEIS discos ANSI 52 - 3 :

TCF . st (Al impulso negativo) = 605 KV ... (Tabla 2.11)

TCF . st (Al impulso negativo) < TCF . requerida

605 KV < 634,9 KV La cadena de SEIS discos ANSI 52 - 3 , NO CUMPLE .

Posibles soluciones :

- Aumentar un disco a la cadena (7 discos ANSI - 52-3)
- Utilizar discos de la misma clase pero de mayor línea de fuga , como es el caso del disco clase ANSI 52-3 , con Df = 432 mm (Tabla 2.8) y el nuevo número de discos es :
Número de discos = 1447,3 mm / 432 mm = 3,3 = 4 discos
- Utilizar discos clase ANSI 52 - 5 , Df = 305 mm . (Tabla 2.8)
Número de discos = 1447,3 / 305 = 4,7 = 5 discos .
- Existen varias posibles soluciones incluyendo la original , una cadena de 6 discos ANSI 52-3 , con un margen de vulnerabilidad (fuera de norma) de aproximadamente el 5% .

Aisladores para 69 KV :

- Cadena de aisladores formada por discos
- Aisladores tipo polímeros
- Aisladores tipo Line - Post (Línea - poste)
- Entre otros [23]

Cualquier aislador seleccionado debe cumplir con los criterios desarrollados. En las tablas 2.13 - 2.14 - 2.15 - 2.16 - 2.17 - 2.18 : Análisis de algunos tipos de aisladores para líneas de 13,8 KV .

En las tablas 2.19 - 2.20 - 2.21 - 2.22 : Análisis de algunos tipos de aisladores para líneas de 69 KV .

Tabla 2.13: Análisis de aisladores para línea aérea de distribución en 13,8 KV. Autora

Para h = 10 m.s.n.m / Fa = 1 / Fill = 0,71 / FH = 0,92 / Contaminación: Alta									
VLL.nom [KV]	Fr [%]	Del sistema				BIL [KV]	Contam Fc.IEEE [mm/KV]	Altitud Fh	
		Ke	kp	BSL [KV]	Observación				
13,8	5	1,73	0,8	34	110	43,3	1		
Requiere la línea		2 discos Ansi 52 - 1		3 discos Ansi 52 - 1		PIN Ansi 55 - 5			
Df.total [mm]	362,24	Catálogo	Observación	Catálogo	Observación	Catálogo	Observación		
TCEfi [KV]WET	33,15	356	X	534	✓	305	X		
TCE (-) man [KV]	47,78	55	✓	80	✓	45	✓		
TCE (-) rayo [KV]	148,32	190	✓	275	✓	170	✓		
Requiere la línea		Doble PIN Ansi 56 - 1		Doble PIN Ansi 56 - 2		Polímero DS - 15			
Df.total [mm]	362,24	Catálogo	Observación	Catálogo	Observación	Catálogo	Observación		
TCEfi [KV]WET	33,15	330	X	432	✓	410	✓		
TCE (-) man [KV]	47,78	60	✓	70	✓	85	✓		
TCE (-) rayo [KV]	148,32	190	✓	225	✓	140	✓		
		190	✓	225	✓	140	X		

Tabla 2.14: Análisis de aisladores para línea aérea de distribución en 13,8 KV. Autora

Para h = 10 m.s.n.m / Fa = 1 / Fill = 0,71 / FH = 0,92 / Contaminación: Alta									
VLL.nom [KV]	Fr [%]	Del sistema				Contam		Altitud	
		Ke	kp	BSL [KV]	BIL [KV]	Fc.IEEEE [mm/KV]	Fh		
13,8	5	1,73	0,8	34	110	40	1		
Requiere la línea		2 discos Ansi 52 - 1	3 discos Ansi 52 - 1	3 discos Ansi 52 - 1	3 discos Ansi 52 - 1	PIN Ansi 55 - 5		Catálogo	Observación
Df.total [mm]	334,63	356	✓	534	✓	305	X		
TCEfi [KV]WET	33,15	55	✓	80	✓	45	✓		
TCE (-) man [KV]	47,78	190	✓	275	✓	170	✓		
TCE (-) rayo [KV]	148,32	190	✓	275	✓	170	✓		
Requiere la línea		Doble PIN Ansi 56 - 1	Doble PIN Ansi 56 - 1	Doble PIN Ansi 56 - 2	Doble PIN Ansi 56 - 2	Polímero DS - 15		Catálogo	Observación
Df.total [mm]	334,63	330	X	432	✓	410	✓		
TCEfi [KV]WET	33,15	60	✓	70	✓	85	✓		
TCE (-) man [KV]	47,78	190	✓	225	✓	140	✓		
TCE (-) rayo [KV]	148,32	190	✓	225	✓	140	X		

Tabla 2.15: Análisis de aisladores para línea aérea de distribución en 13,8 KV. Autora

Para $h = 10 \text{ m.s.n.m} / Fa = 1 / Fill = 0,71 / FH = 0,92 / Contaminación: Media$									
VLL.nom [KV]	Fr [%]	Del sistema				Contam		Altitud	
		Ke	kp	BSL [KV]	BIL [KV]	Fc [mm/KV]	Fh		
13,8	5	1,73	0,8	34	110	34,6	1		
Requiere la línea		2 discos Ansi 52 - 1		3 discos Ansi 52 - 1		PIN Ansi 55 - 5			
Df.total [mm]	289,45	Catálogo	Observación	Catálogo	Observación	Catálogo	Observación		
TCEfi [KV]WET	33,15	356	✓	534	✓	305	✓		
TCE (-) man [KV]	47,78	55	✓	80	✓	45	✓		
TCE (-) rayo [KV]	148,32	190	✓	275	✓	170	✓		
Requiere la línea		Doble PIN Ansi 56 - 1		Doble PIN Ansi 56 - 2		Polímero DS - 15			
Df.total [mm]	289,45	Catálogo	Observación	Catálogo	Observación	Catálogo	Observación		
TCEfi [KV]WET	33,15	330	✓	432	✓	410	✓		
TCE (-) man [KV]	47,78	60	✓	70	✓	85	✓		
TCE (-) rayo [KV]	148,32	190	✓	225	✓	140	✓		
		190	✓	225	✓	140	X		

Tabla 2.16: Análisis de aisladores para línea aérea de distribución en 13,8 KV. Autora

Para h = 2500 m.s.n.m / Fa = 0,77 / FII = 0,73 / FH = 0,98 / Contaminación: Alta									
Del sistema									
VLL.nom [KV]	Fr [%]	Ke	kp	BSL [KV]	BIL [KV]	Contam	Altitud		
13,8	5	1,73	0,8	34	110	Fc.IEEE [mm/KV]	Fh		
						43,3	0,85		
Requiere la línea		2 discos Ansi 52 - 1		3 discos Ansi 52 - 1		PIN Ansi 55 - 5			
Df.total [mm]	470,44	Catálogo	Observación	Catálogo	Observación	Catálogo	Observación		
TCE.fi [KV]WET	44,61	356	X	534	✓	305	X		
TCE. (-) man [KV]	54,65	55	✓	80	✓	45	✓		
TCE. (-) rayo [KV]	169,63	190	✓	275	✓	170	✓		
		190	✓	275	✓	170	✓		
Doble PIN Ansi 56 - 1		Doble PIN Ansi 56 - 3		Polímero DS - 15		Polímero DS - 28			
Catálogo	Observación	Catálogo	Observación	Catálogo	Observación	Catálogo	Observación		
330	X	533	✓	410	X	630	✓		
60	✓	80	✓	85	✓	120	✓		
190	✓	265	✓	140	✓	210	✓		
190	✓	265	✓	140	✓	210	✓		

Tabla 2.17: Análisis de aisladores para línea aérea de distribución en 13,8 KV. Autora

Para h = 2500 m.s.n.m / Fa = 0,77 / FII = 0,73 / FH = 0,98 / Contaminación: Alta									
VLL.nom [KV]	Fr [%]	Del sistema				Contam		Altitud	
		Ke	kp	BSL [KV]	BIL [KV]	Fc.IEEE [mm/KV]	Fh		
13,8	5	1,73	0,8	34	110	40	0,85		
Requiere la línea		2 discos Ansi 52 - 1		3 discos Ansi 52 - 1		PIN Ansi 55 - 5			
Df.total [mm]	434,59	356	X	534	✓	305	X		
TCEfi [KV]WET	44,61	55	✓	80	✓	45	✓		
TCE. (-) man [KV]	54,65	190	✓	275	✓	170	✓		
TCE. (-) rayo [KV]	169,63	190	✓	275	✓	170	✓		
Requiere la línea		Doble PIN Ansi 56 - 1		Polímero DS - 15		Polímero DS - 28			
Df.total [mm]	434,59	330	X	410	X	630	✓		
TCEfi [KV]WET	44,61	60	✓	85	✓	120	✓		
TCE. (-) man [KV]	54,65	190	✓	140	✓	210	✓		
TCE. (-) rayo [KV]	169,63	190	✓	140	X	210	✓		

Tabla 2.18: Análisis de aisladores para línea aérea de distribución en 13,8 KV. Autora

Para h = 2500 m.s.n.m / Fa = 0,77 / Fll = 0,73 / FH = 0,98 / Contaminación: Media										
VLL.nom [KV]	Fr [%]	Del sistema				BIL [KV]	Contam	Altitud	Fc.IEEE [mm/KV]	Fh
		Ke	kp	BSL [KV]	Catálogo					
13,8	5	1,73	0,8	34	110	34,6	0,85			
Requiere la línea		2 discos Ansi 52 - 1		3 discos Ansi 52 - 1		PIN Ansi 55 - 5				
Df.total [mm]	375,92	Catálogo	Observación	Catálogo	Observación	Catálogo	Observación			
TCEfi [KV]WET	44,61	356	X	534	✓	305	X			
TCE (-) man [KV]	54,65	55	✓	80	✓	45	✓			
TCE (-) rayo [KV]	169,63	190	✓	275	✓	170	✓			
Requiere la línea		Doble PIN Ansi 56 - 1		Polímero DS - 15		Polímero DS - 28				
Df.total [mm]	375,92	Catálogo	Observación	Catálogo	Observación	Catálogo	Observación			
TCEfi [KV]WET	44,61	330	X	410	✓	630	✓			
TCE (-) man [KV]	54,65	60	✓	85	✓	120	✓			
TCE (-) rayo [KV]	169,63	190	✓	140	✓	210	✓			
		190	✓	140	X	210	✓			

Tabla 2.19: Análisis de aisladores para línea aérea de distribución en 69 KV. Autora

Para h = 10 m.s.n.m / Fa = 1 / Fil = 0,71 / FH = 0,92 / Contaminación : Media									
Del sistema									
VLL.nom [KV]	Fr [%]	Ke	kp	BSL [KV]	BIL [KV]	Contam	Altitud		
69	5	1,73	0,8	140	350	Fc.IEEE [mm/KV]	Fh		
						30	1		
Requiere la línea		5 discos Ansi 52 -3		Line Post Ansi 57 - -6		Polímero DS - 69		Observación	
Df.total [mm]	1254,87	Catálogo	Observación	Catálogo	Observación	Catálogo	Observación		
TCFfi [KV]WET	165,76	1460	✓	1346	✓	1426	✓		
TCF. (-) man [KV]	196,76	215	✓	170	✓	204	✓		
TCF. (-) rayo [KV]	471,93	510	✓	425	✓	360	✓		
		510	✓	425	✓	360	X		

Tabla 2.20: Análisis de aisladores para línea aérea de distribución en 69 KV. Autora

Para h = 10 m.s.n.m / Fa = 0,77 / FI = 0,73 / FH = 0,98 / Contaminación : Media										
Del sistema					Contam					Altitud
VLL.nom [KV]	Fr [%]	Ke	kp	BSL [KV]	BIL [KV]	Fc.IEEE [mm/KV]				Fh
69	5	1,73	0,8	140	350	25				1
Requiere la línea		6 discos Ansi 52 -3		Line Post Ansi 57 - -6			Polímero DS - 69			
Df.total [mm]	1358,09	Catálogo	Observación	Catálogo	Observación	Catálogo	Observación			
TCF.fi [KV]WET	223,03	1752	✓	1346	X	1426	✓			
TCF. (-) man [KV]	225,02	255	✓	170	X	204	✓			
TCF. (-) rayo [KV]	539,73	605	✓	425	✓	360	✓			
		605	✓	425	X	360	X			

2.8. Niveles de Aislamiento en una subestación de 69 KV / 13,8 KV .

Una subestación eléctrica se define por su nivel de voltaje nominal , generándose dos áreas o zonas de operación :

ÁREA 1 : Zona o patio de 69 KV

ÁREA 2 : Zona o patio de 13,8 KV

En cada una de estas zonas encontramos los siguientes equipos :

- Pórticos de entrada.
- Pórticos de salida.
- Pórticos de barras.
- Seccionadores.
- Interruptores.
- Reconectores.
- Transformadores de potencial.
- Transformadores de corriente.
- Descargadores de sobretensión.
- Barras y conductores.
- Relés de control.
- En el límite de las dos áreas el transformador de potencia.
- Entre otros.

Sobre las estructuras o pórticos se colocan cadenas de aisladores que deben cumplir con los requisitos de aislamiento analizados para niveles de 13,8 KV y 69 KV . [16]

Los equipos ubicados en el patio de 69 KV deben cumplir con un nivel mínimo de 350 KV de aislamiento básico al impulso tipo rayo (BIL) .

Los equipos ubicados en el patio de 13,8 KV deben cumplir con un nivel mínimo de 95 a 110 KV de aislamiento básico al impulso tipo rayo (BIL) .

La coordinación de aislamiento entre todas las partes y equipos existentes en la subestación se divide en tres grupos o niveles :

Nivel de aislamiento 1:

Es el nivel de aislamiento más alto , están todos los equipos que tienen aislamientos no recuperables (Partes sumergibles en aceite , en gas - SF6) como es el caso de transformadores , interruptores , reconectores , se llama también nivel de aislamientos internos y no dependen de los factores ambientales ya que no se encuentran en contacto con el aire .

Nivel de aislamiento 2:

Es el nivel de aislamientos externos , es el nivel medio de seguridad , para todos los terminales , aisladores de estructuras , bushings , barras , conductores y partes vivas de un equipo que se encuentran en contacto con el aire y son afectados por los factores ambientales , su nivel de aislamiento debe ser corregida .

Nivel de aislamiento 3:

Es el nivel de aislamiento más bajo donde se encuentran los descargadores de sobretensión , los voltajes residuales son los niveles de tensión que solamente se encuentran por sobre el voltaje nominal pero siempre por debajo del voltaje máximo que pueden soportar los equipos de nivel 2 y más aún con los equipos de nivel 3 .

En resumen , los equipos de una subestación deben presentar aislamientos capaces de soportar las posibles sobretensiones que pueden llegar , sobretensiones que son cortadas y controladas por los supresores de pico llamados descargadores de sobretensión , con ello se garantiza que los elementos de nivel 2 reciban una sobretensión soportable por el equipo y más aún los equipos de nivel 1 .

Este criterio para organizar los niveles de aislamiento de todas las partes y equipos de la subestación se llama coordinación de aislamiento y nos permite fundamentalmente la selección correcta de los descargadores de sobretensión tanto para el patio de 69 KV como para el patio de 13,8 KV .[15]

Capítulo 3

Estructuras para líneas aéreas de Distribución y Subtransmisión

3.1. Introducción

Las redes de distribución y subtransmisión aéreas para su operación utilizan estructuras formadas por postes , crucetas , aisladores , tensores , bajantes de puesta a tierra , electrodos de puesta a tierra , herrajes , hilo de guarda o hilo de tierra , etc .[\[24\]](#)

- POSTES :
 - Para 13.8 KV : Distribución .
 - Postes de hormigón.
 - Postes de madera.
 - Postes metálicos.
 - Postes de Poliéster reforzado con fibra de vidrio ([PRFV](#)).
 - Para 69 KV : Subtransmisión.
 - Postes de hormigón.
 - Torres metálicas.
- CRUCETAS :
 - Para 13.8 KV : Distribución .
 - Crucetas de madera.
 - Crucetas de hierro galvanizado.
 - Crucetas de Poliéster reforzado con fibra de vidrio ([PRFV](#)).

Para 69 KV : Subtransmisión.
Crucetas de hierro galvanizado.

■ AISLADORES :

Para 13.8 KV : Distribución. Tipo disco clase ANSI 52-1.

Tipo pin clase ANSI 55 -5.

Tipo polímero.

Tipo retenida clase ANSI 54-2.

Tipo fibra de vidrio para tensores.

Entre otros .

Para 69 KV : Subtransmisión.

Cadena de discos clase ANSI 52-3.

Tipo Polímero.

Tipo line - post.

Tipo fibra de vidrio para tensores.

Entre otros.

■ TENSORES :

Para 13.8 KV : Distribución .

Cables de acero.

Contrapeso de hormigón bajo el suelo.

Aislador de retenida (Porcelana o fibra de vidrio).

Para 69 KV : Subtransmisión.

Cables de acero.

Contrapeso de hormigón bajo el suelo.

Aislador de retenida (Porcelana o fibra de vidrio).

■ BAJANTES DE PUESTA A TIERRA :

Para 13.8 KV : Distribución .

Conductor de cobre número AWG 2 .

Para 69 KV : Subtransmisión

Conductor de cobre número AWG 2

■ ELECTRODOS DE PUESTA A TIERRA :

Para 13.8 KV : Distribución .

Electrodo de Copperweld de 5/8 x 2,44 m.

Para 69 KV : Subtransmisión.

Electrodo de Copperweld de 3/4 x 2,54 m[25]

- HERRAJES :
Soportes , terminales , abrazaderas , pernos , etc de acuerdo a las normativas establecidas por las empresas de distribución y subtransmisión , la corporación [CNEL-EP](#) y Empresas Eléctricas .
- HILO DE GUARDA :
Para 13.8 KV : Distribución .
No se utiliza , son estructuras de alrededor de 10 m de altura .
Para 69 KV : Subtransmisión
Conductor [OPGW](#)
24 fibras ópticas
Recubrimiento de acero[25]
- TIPOS DE ESTRUCTURAS :
Las estructuras de acuerdo a su nivel de voltaje se clasifican en :
 - Estructuras monofásicas para bajo voltaje
 - Estructuras monofásicas para distribución (13,8 KV)
 - Estructuras trifásicas para distribución (13,8 KV)
 - Estructuras trifásicas para Subtransmisión (69 KV)

3.2. Estructuras para Bajo Voltaje

Las estructuras utilizadas para bajo voltaje (menor a 600 Voltios) , utilizan los siguientes elementos :

- Bastidores de hierro galvanizado para una , dos o tres vías
- Aisladores tipo carrete para bajo voltaje
- conductores desnudos y preensamblados
- Postes de hormigón , herrajes y accesorios [26]

En las figuras 3.1 , 3.2 , 3.3 , 3.4 , se presenta la nomenclatura , el modelo y la denominación de cada una para aplicaciones en bajo voltaje (menor a 600 voltios) , específicamente para alimentadores monofásicos de 120 / 240 voltios , tanto para conductores desnudos como preensamblados . [3]




Estructura en baja tensión / Red desnuda 240 / 120 V		
ESE - 1EP		Estructura de 1 vía Vertical Pasante o Angular.
ESE - 1ER		Estructura de 1 vía Vertical Retención.
ESE - 1ED		Estructura de 1 vía Vertical Doble Retención

Figura 3.1: Estructura en baja tensión para red desnuda - 1 vía
Referencia : [MEER](#) - Ministerio de Electricidad y Energía Renovable - Ecuador[3]
Adaptación : Autora

<i>ESD-2CD</i>		Estructura de 2 vías Centrada Doble Retención.
ESD - 2CP		Estructura de 2 vías Centradas Pasante.
EST - 2CR		Estructura de 2 vías Centradas Retención.

Figura 3.2: Estructura en baja tensión para red desnuda - 2 vías
Referencia : [MEER](#) - Ministerio de Electricidad y Energía Renovable - Ecuador[3]
Adaptación : Autora

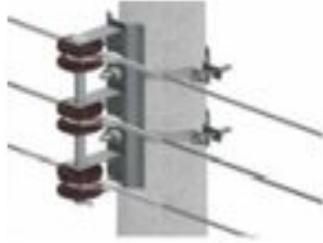


EST - 3EP		Estructura de 3 vías Vertical Pasante.
ESD - 3ER		Estructura de 3 vías Vertical Retención.
ESD - 3ED		Estructura de 3 vías Vertical Doble Retención.

Figura 3.3: Estructura en baja tensión para red desnuda - 3 vías
Referencia :[MEER](#)-Ministerio de Electricidad y Energía Renovable-Ecuador [3]
Adaptación :Autora





Estructuras baja tensión / Red Preensamblada 240 / 120 V		
ESD - 1PP3		Estructura Preensamblado Pasante con 3 conductores.
ESD - 1PA3		Estructura Preensamblado Angular con 3 conductores.
ESD - 1PR3		Estructura Preensamblado Retención con 3 conductores.
ESD - 1PD3		Estructura Preensamblado Doble Retención con 3 conductores.

Figura 3.4: Estructura en baja tensión para red preensamblada - 3 conductores.
Referencia :[MEER](#)-Ministerio de Electricidad y Energía Renovable-Ecuador [3]
Adaptación : Autora

3.3. Estructuras monofásicas para distribución

Son estructuras que utilizan los siguientes elementos :

- Poste de hormigón
- Poste de Madera
- Poste metálico
- Poste de poliéster reforzado con fibra de vidrio (PRFV)
- Aisladores tipo pin
- Aisladores tipo disco
- Aisladores tipo polímero
- Crucetas de hierro galvanizado
- Crucetas madera
- Crucetas de poliéster reforzado con fibra de vidrio (PRFV)
- Accesorios y herrajes

Son estructuras utilizadas para fases aéreas monofásicas de 7,62 KV y 7,97 KV , que parten de alimentadores trifásicos de 13,2 y 13,8 KV respectivamente .

En las figuras 3.5 , 3.6 , 3.7 , se presenta las estructuras utilizadas para redes aéreas monofásicas de 7,62 KV y 7,97 KV , nomenclatura , modelo y denominación .[3]




Estructura monofásica de distribución - Red aerea 13,8 KV GRD / 7,36 KV - 13,2 KV GRD / 7,62 KV.		
EST - 1CP		Estructura monofásica Centrada Pasante
EST - 1CA		Estructura monofásica Centrada Angular
EST - 1CR		Estructura monofásica Centrada Retención

Figura 3.5: Estructuras monofásicas centradas de distribución para redes aéreas.

Referencia :[MEER](#)-Ministerio de Electricidad y Energía Renovable-Ecuador [3]

Adaptación :Autora




EST - 1VP		Estructura monofásica en Volado Pasante
EST - 1VA		Estructura monofásica en Volado Angular
EST - 1VR		Estructura monofásica en Volado Retención

Figura 3.6: Estructuras monofásicas de distribución para redes aéreas en volado.

Referencia: [MEER](#)-Ministerio de Electricidad y Energía Renovable-Ecuador[3]

Adaptación : Autora




EST - 1VR		Estructura monofásica en Volado Retención
EST - 1VD		Estructura monofásica en Volado Doble Retención
EST - 1BA		Estructura monofásica Bandera Angular

Figura 3.7: Estructuras monofásicas de distribución para redes aéreas en volado.

Referencia : [MEER](#) - Ministerio de Electricidad y Energía Renovable - Ecuador
Adaptación : Autora [3]

3.4. Estructuras trifásicas para distribución

Son estructuras que utilizan los siguientes elementos :

- Poste de hormigón.
- Poste de Madera.
- Poste metálico.
- Poste de poliéster reforzado con fibra de vidrio ([PRFV](#)).
- Aisladores tipo pin.
- Aisladores tipo disco.
- Aisladores tipo polímero.
- Crucetas de hierro galvanizado.
- Crucetas madera.
- Crucetas de poliéster reforzado con fibra de vidrio ([PRFV](#)).
- Accesorios y herrajes.

Son estructuras utilizadas para fases aéreas trifásicas de 13,2 KV y 13,8 KV, que parten desde subestaciones de distribución (69 KV / 13,8 KV) como alimentadores principales y luego en el recorrido pueden operar también como alimentadores secundarios .

En las figuras 3.8 , 3.9 , 3.10 , 3.11 , 3.12 , 3.13 , se presenta las estructuras para redes aéreas trifásicas , nomenclatura , modelo y denominación .[3]
Se identifican como estructuras de tipo :

- Estructuras Centradas.
- Estructuras Semi Centradas.
- Estructuras en Volado.
- Estructuras Pasantes o Tangentes.
- Estructuras Angulares.
- Estructuras de Retención o Terminal.
- Estructuras de Doble Retención o Doble Terminal.
- Estructuras tipo Bandera.




Estructuras trifásicas de distribución 13,8 KV GRD / 7,96 KV - 13,2 KV GRD / 7,62 KV		
EST-3CP		Estructura trifásica Centrada Pasante
EST-3SP		Estructura Semi Centrada Pasante
EST-3VP		Estructura trifásica en Volado Pasante

Figura 3.8: Estructuras trifásicas para media tensión . Tipo: Pasante
Referencia : [MEER](#) - Ministerio de Electricidad y Energía Renovable - Ecuador
Adaptación : Autora [3]




EST-3CA		Estructura trifasica Centrada Angular
EST - 3SA		Estructura trifasica Semi centrada Angular
EST - 3VA		Estructura trifasica en Volado Angular

Figura 3.9: Estructuras trifásicas para media tensión . Tipo: Angular
Referencia : [MEER](#) - Ministerio de Electricidad y Energía Renovable - Ecuador

[3]

Adaptación : Autora

EST - 3CR		Estructura trifasica Centrada Retencion
EST - 3SR		Estructura trifasica Semi Centrada Retencion
EST - 3VR		Estructura trifasica en Volado Retencion

Figura 3.10: Estructuras trifásicas para media tensión . Tipo: Retención
Referencia :[MEER](#)- Ministerio de Electricidad y Energía Renovable-Ecuador [3]
Adaptación :Autora




EST-3CD		Estructura trifasica Centrada Doble Retencion
EST - 3SD		Estructura trifasica Semicentrada Doble Retencion
EST - 3VD		Estructura trifasica En Volado Doble Retención

Figura 3.11: Estructuras trifásicas para media tensión . Tipo: Doble Retención
Referencia :[MEER](#)-Ministerio de Electricidad y Energía Renovable-Ecuador[3]
Adaptación : Autora

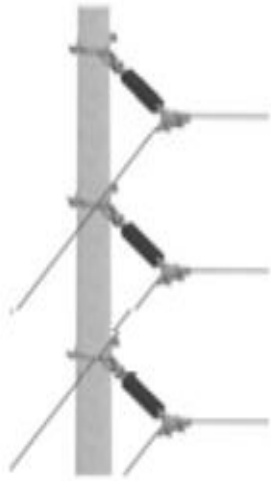
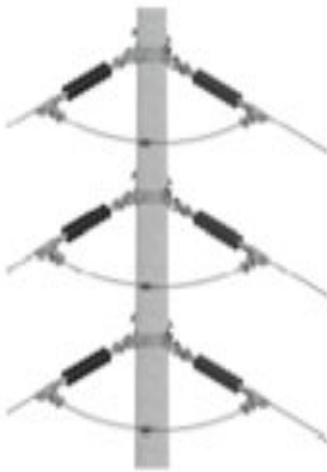
EST - 3BA		Estructura trifásica Bandera Angular
EST - 3BD		Estructura trifásica Bandera Doble Retención

Figura 3.12: Estructuras trifásicas para media tensión . Tipo : Bandera
Referencia : [MEER](#)-Ministerio de Electricidad y Energía Renovable-Ecuador [3]
Adaptación : Autora




EST - 3HR	 A diagram showing a three-phase structure with two poles. A horizontal crossarm is supported by both poles, and three conductors are suspended from it. The structure is supported by guy wires.	Estructura trifásica Dos postes Retención
EST - 3HD	 A diagram showing a three-phase structure with two poles. A double crossarm is supported by both poles, and six conductors are suspended from it. The structure is supported by guy wires.	Estructura trifásica Dos Postes Doble Retención
EST - 3TR	 A diagram showing a three-phase structure with three poles. Three conductors are suspended from the poles. The structure is supported by guy wires.	Estructura trifásica Tres Postes Retención

Figura 3.13: Estructuras trifásicas para media tensión .Dos postes
Referencia :[MEER](#)-Ministerio de Electricidad y Energía Renovable-Ecuador [3]
Adaptación : Autora

3.5. Estructuras trifásicas para Subtransmisión

Las estructuras utilizadas para subtransmisión (69 KV) , utilizan los siguientes elementos :

- Poste de hormigón (19 - 21 - 23 m).
- Torres metálicas (19,5 - 26 - 49 m).
- Crucetas de hierro galvanizado.
- Soportes de crucetas en hierro galvanizado.
- Cadena de aisladores formadas por discos.
- Aisladores tipo polímeros.
- Aisladores tipo línea - poste (línea - post).
- Aisladores de porcelana o fibra de vidrio para tensores.
- Hilo de guarda tipo OPGW. [4].

Son utilizadas para sistemas de circuito simple y doble circuito , se identifican como estructuras de :

- Estructuras de suspensión.
- Estructuras de retención.
- Estructuras de line - post - simple.
- Estructuras de line - post - doble - circuito.
- Estructuras en H.
- Estructuras en torres metálicas - doble circuito.
- Estructuras con un hilo de guarda.
- Estructuras con doble hilo de guarda.
- Entre otras.

En las figuras 3.14 , 3.15 , 3.16 , 3.17 , 3.18 , 3.19 , 3.20 , 3.21 , 3.22 , 3.23 , 3.24 , 3.25 , 3.26 , 3.27 , 3.28 , 3.29 , se presenta algunas de las estructuras mas comunes utilizadas para líneas de subtransmisión a nivel de 69 KV , con un resumen de algunas de sus características principales .

En la figura 3.14 , se presenta la definición de las distancias constructivas para

una estructura tipo suspensión de cadenas alternadas , las distancias de seguridad son simétricas igual a 1,5 m , desde la punta del poste donde debe ir el cable de guarda hacia las crucetas donde se suspenden las cadenas de aisladores , con respecto al eje del poste la cadena debe estar hacia afuera separada 1,70 m , el poste utilizado es de hormigón de 21 m , el empotramiento del poste es función de su altura , para uno de 21 m este debe ir empotrado 2,7 m , de acuerdo a la expresión general utilizada para empotramientos de poste para 69 KV ($e = 0,1 * h + 0,6$) , siendo h la altura del poste . Las crucetas y sus correspondientes apoyos son de hierro galvanizado .[4]

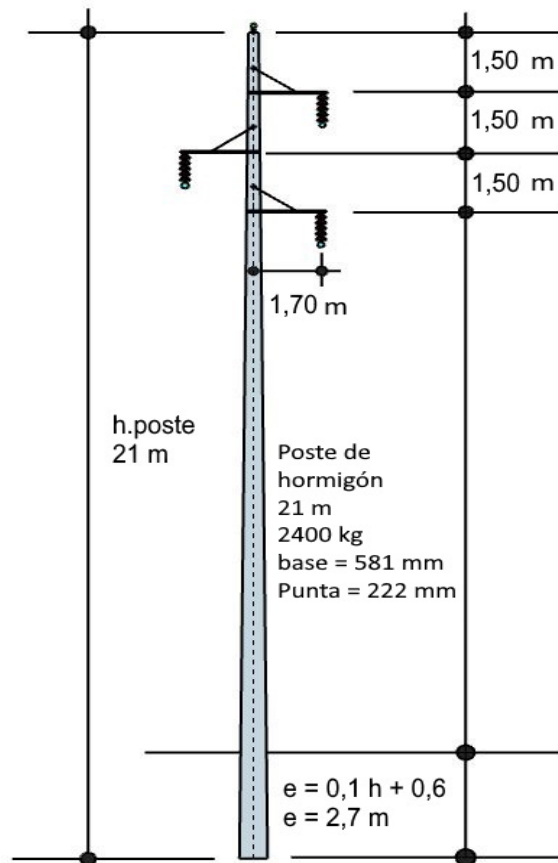


Figura 3.14: Estructura tipo Suspensión para 69 KV . Poste de 21 m .
Referencia : EX - INECEL- Instituto Ecuatoriano de Electrificación [4]
Adaptación : Autora

En la figura 3.15 , una estructura tipo suspensión alternada para una línea de 69 KV , con aisladores tipo cadena formada por 5 discos clase ANSI 52 - 3 , el hilo de guarda es un conductor tipo OPGW , formado por 24 fibras ópticas y un recubrimiento de hilos de acero , las fibras se utilizan para aplicaciones en el campo de las comunicaciones (control , monitoreo y comunicaciones generales) mientras que los hilos de acero son los que propiamente servirán para transportar y propagar corrientes de fallas a tierra a baja frecuencia y corrientes de alta frecuencia efecto de descargas atmosféricas . [4]

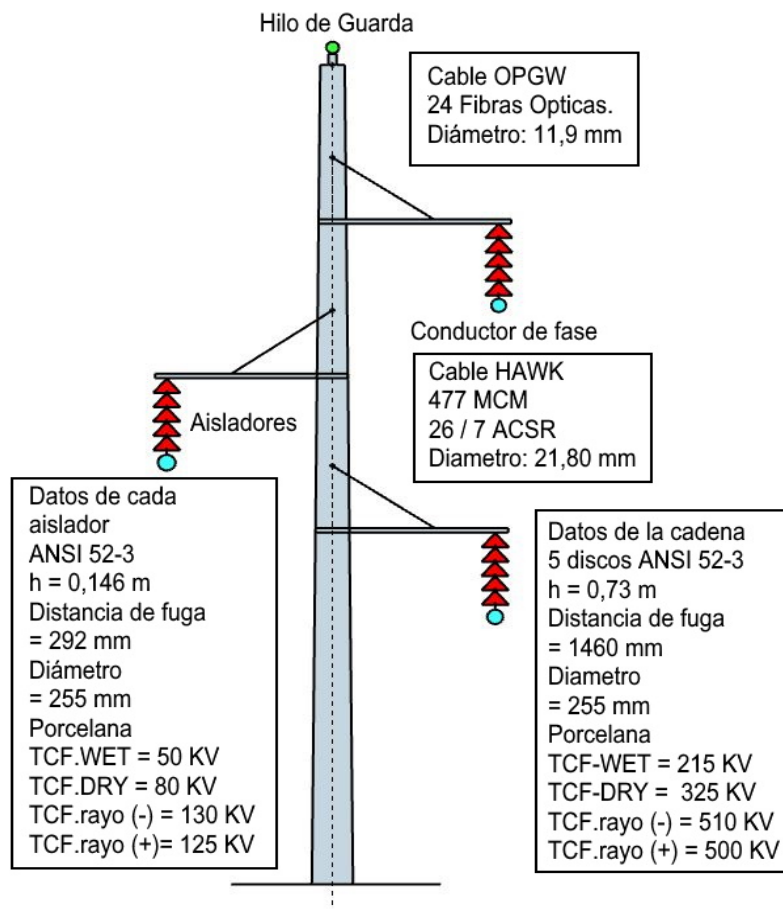


Figura 3.15: Conductores y aisladores para una estructura - suspensión . 69 KV

Referencia : [CNEL-EP](#) - Corporación Nacional de Electricidad [4]

Adaptación : Autora

En la figura 3.16 , se muestra en detalle una de las características fundamentales de una cadena de aisladores , su longitud y su distancia de fuga , la longitud es fundamental para garantizar la distancia de seguridad línea - tierra , mientras que la distancia de fuga se relaciona con el nivel de contaminación en el lugar donde va a operar la línea , para niveles de 69 KV normalmente se utiliza 20 mm / KV de fase - fase para la selección y diseño de una cadena de aisladores, para 69 KV de línea a línea , la distancia de fuga mínima necesaria es : 'citeINECEL

$$\text{Distancia de fuga min.} = Lf.\text{min} = \text{Nivel de contaminación} * V_{LL}$$

$$Lf.\text{min} = 20 \text{ mm / KV} * 69 \text{ KV} = 1380 \text{ mm}$$

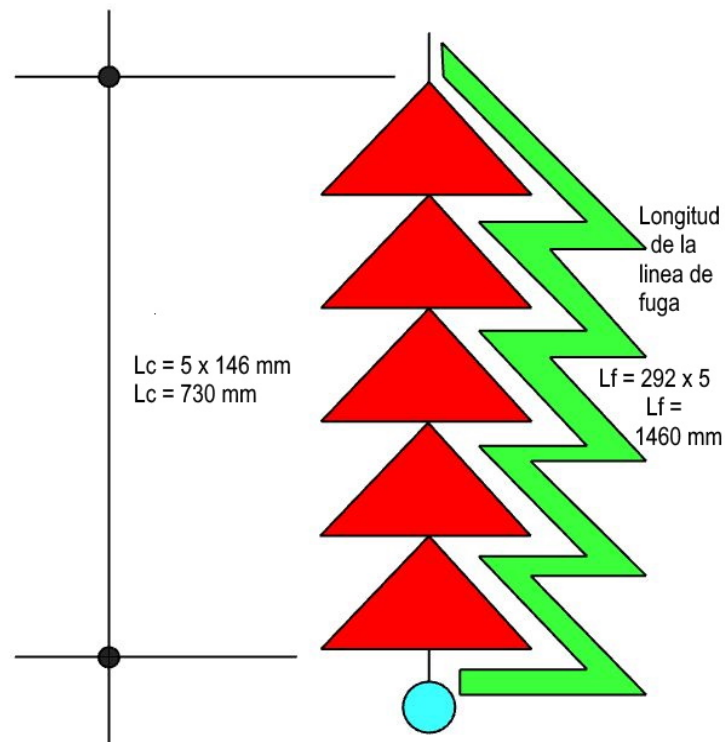


Figura 3.16: Longitud y línea de fuga de la cadena de 5 discos ANSI 52-3 utilizados en una estructura tipo suspensión para 69 KV .

Referencia : Catálogo Maclean Power Systems [5]

Adaptación . Autora

Al formar una cadena con 5 discos ANSI 52-3 , cada uno tiene una $L_f = 292$ mm , por lo tanto la cadena presenta una $L_f = 292 * 5 = 1460$ mm , lo cual es mayor que $L_{f.min.}$ requerida , esto significa que la cadena cumple con el nivel de aislamiento mínimo necesario por contaminación ambiental .

En la figura 3.17 , en un poste de 21m que se utiliza para una estructura en suspensión se indica las características del sistema de puesta a tierra de la estructura , placas de conexión , bajante , conductor de conexión y electrodo.

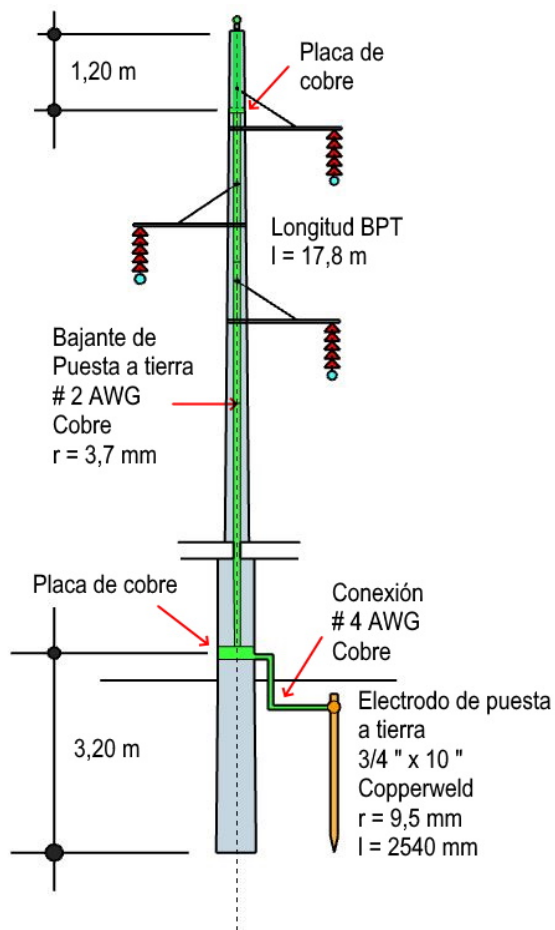


Figura 3.17: Sistema de puesta a tierra de una estructura para 69 KV

Referencia : [CNEL-EP](#) - Corporación Nacional de Electricidad [3]

Adaptación : Autora

En la figura 3.18 , la protección generada por el hilo de guarda a una estructura de suspensión alternada , se debe generar frontalmente un cono de protección y longitudinalmente un volumen dentro del cual queden internamente las fases , el ángulo de apantallamiento más utilizado es de 30° , pero puede subir llegándose hasta 45° en zonas de alta actividad electro atmosférica . La regulación de la altura del hilo de guarda se obtiene geoméricamente de acuerdo a como se indica en la figura 3.18 , una de las aristas del cono debe coincidir con la fase más alta .

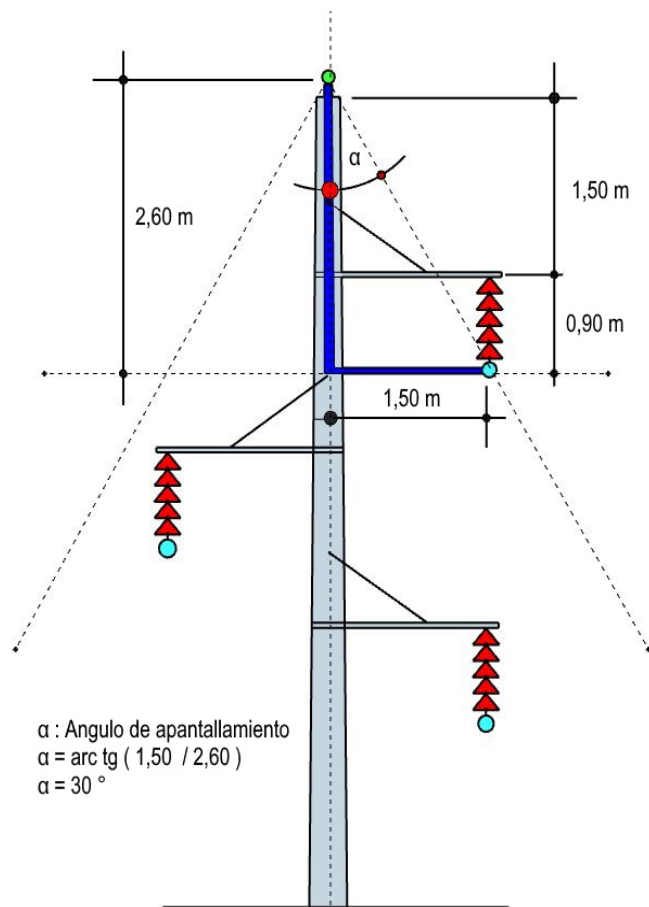


Figura 3.18: Protección con un hilo de guarda a una estructura tipo suspensión alternada de circuito simple para 69 KV .

Referencia : EX - [INECEL](#) - Instituto Ecuatoriano de Electrificación [4]

Adaptación : Autora

En la figura 3.19 , un resumen de las distancias constructivas de una estructura tipo suspensión alternada para 69 KV de circuito simple , se muestra el poste de 21 m , aisladores tipo cadena , crucetas de hierro galvanizado , bajante y conexión de puesta a tierra , empotramiento del poste y electrodo de puesta a tierra .

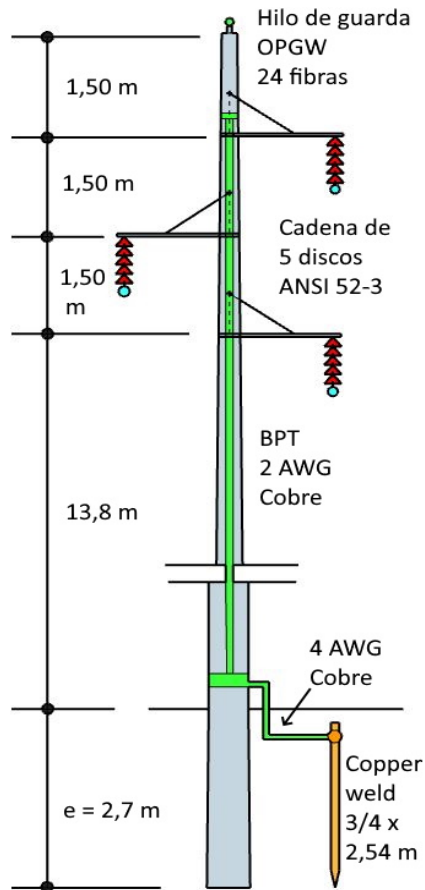


Figura 3.19: Distancias constructivas de una estructura tipo suspensión de circuito simple para línea de subtransmisión en 69 KV .

Referencia : EX - [INECEL](#) - Instituto Ecuatoriano de Electrificación [4]

Adaptación : Autora

En la figura 3.20 , se muestra una estructura de retención con la definición de sus medidas de seguridad para su construcción , el sistema de retención se genera con doble cadena de aisladores ensambladas sobre el poste , las otras características como bajante , conexión y electrodo de puesta a tierra son comunes para todas las estructuras utilizadas en 69 KV . Las distancias de seguridad son simétricas a partir del hilo de guarda y se considera 1,5 m .

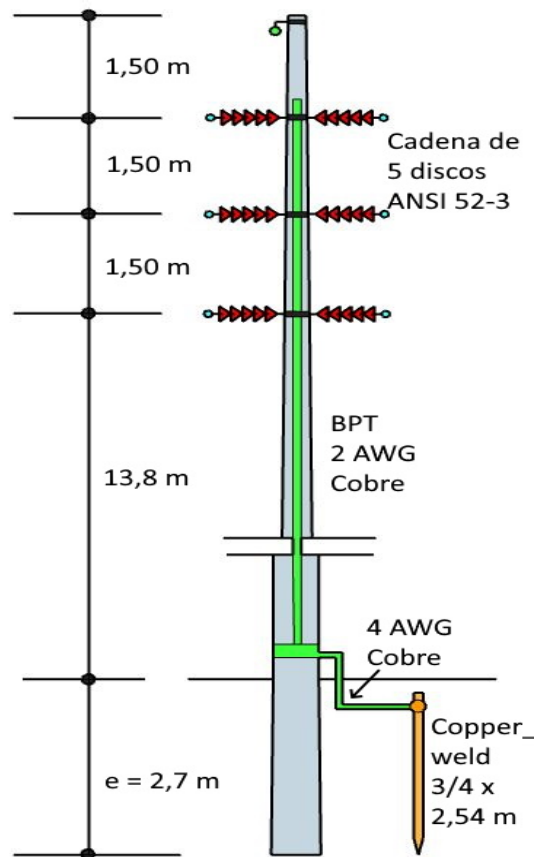


Figura 3.20: Estructura tipo retención con cadena de discos ANSI 52-3 para una línea de 69 KV . Poste de 21 m .

Referencia : EX - [INECEL](#) - Instituto Ecuatoriano de Electrificación [4]

Adaptación : Autora

En la figura 3.21 , una estructura tipo Line - post (Línea - poste) que se denomina de esta manera por el tipo de aislador que utiliza , es de porcelana y uno de los que comúnmente se utiliza se indica en la figura 3.21 , este aislador tiene una distancia de fuga de 1346 mm lo cual indica que puede ser utilizado en zonas de 20 mm / KV de contaminación ambiental .Las distancias de seguridad son simétricas de 1,5 m .

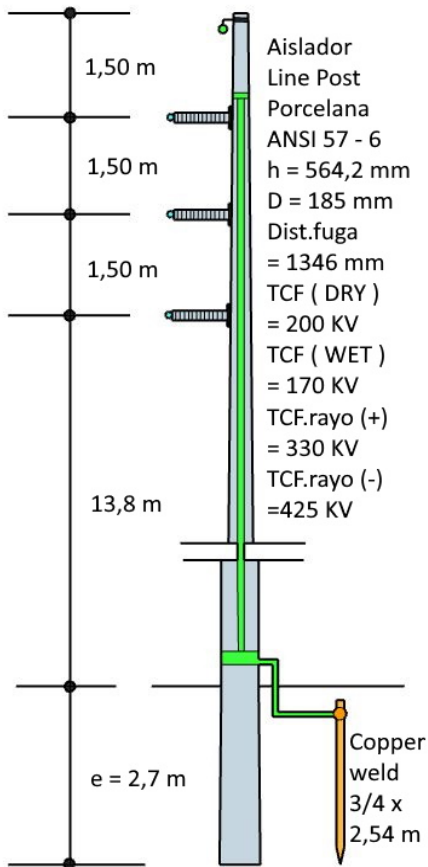


Figura 3.21: Estructura tipo Line - Post - de circuito simple , para una línea de Subtransmisión en 69 KV . Poste de 21 m .

Referencia : EX - [INECEL](#) - Instituto Ecuatoriano de Electrificación [4]

Adaptación : Autora

En la figura 3.22 , una estructura tipo Line - Post alternado , dos fases se colocan en el un costado de la estructura y la otra fase en el otro costado , las distancias de seguridad son simétricas de 1,5 m , el sistema de puesta a tierra similar a las anteriores .

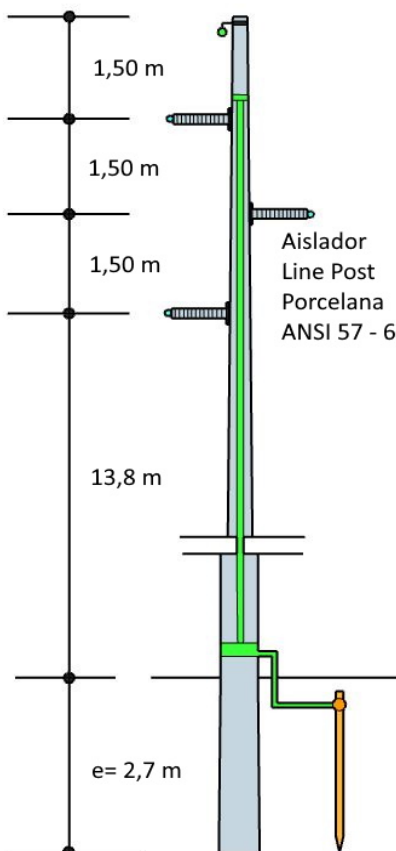


Figura 3.22: Estructura tipo Line - Post - Alternado de circuito simple , para una línea de Subtransmisión en 69 KV . Poste de 21 m .

Referencia : EX -[INECEL](#)- Instituto Ecuatoriano de Electrificación [4]

Adaptación : Autora

En la figura 3.23 , una estructura tipo line - post - alternado con aisladores ores inclinados sobre las crucetas , esta inclinación que presentan los aisladores se utiliza para conductores de mayor peso y tensión , las distancias de seguridad son simétricas de 1,5 m y el sistema de puesta a tierra similar al utilizado en las estructuras anteriores.

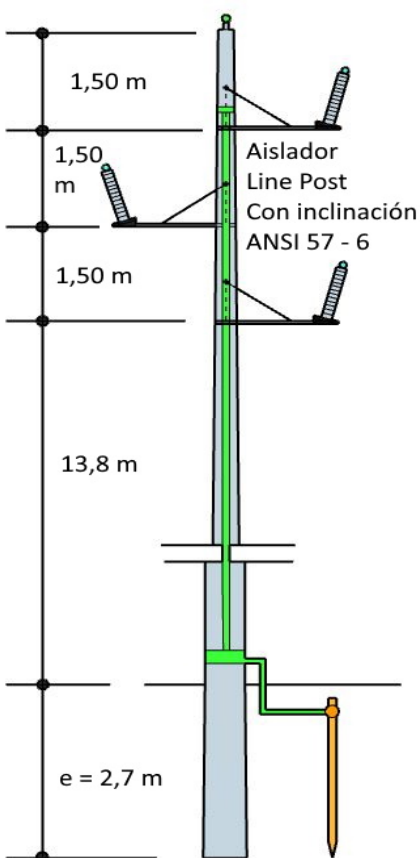


Figura 3.23: Estructura tipo Line - Post - Con inclinación - Alternado de circuito simple , para una línea de 69 KV . Poste de 21 m .

Referencia : EX - [INECEL](#) - Instituto Ecuatoriano de Electrificación [4]

Adaptación : Autora

En la figura 3.24 , una estructura tipo line - post para circuito doble , los aisladores para cada fase es aplicable el tipo ANSI 57 - 6 de porcelana , las distancias de seguridad son simétricas de 1,5 m y el sistema de puesta a tierra de la estructura de iguales características que las anteriores.

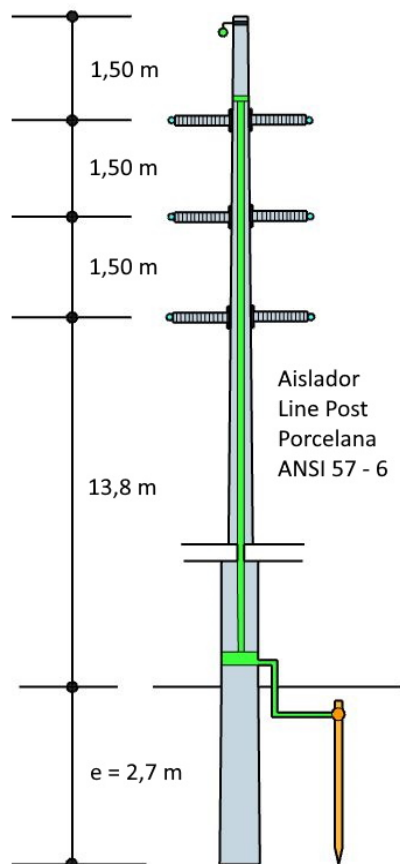


Figura 3.24: Estructura tipo Line - Post - de circuito doble , para una línea de Subtransmisión en 69 KV . Poste de 21 m .

Referencia : EX - [INECEL](#) - Instituto Ecuatoriano de Electrificación [4]

Adaptación : Autora

En la figura 3.25 , una estructura tipo H , utilizada para cruces de lagos , ríos y lugares que ameriten vanos de mayor longitud en donde el peso y la tensión mecánica de los conductores es mayor y requiere estructuras con mayor resistencia mecánica , la separación entre los postes se considera 2,70 m , con postes de 21m , la distancia entre la punta del poste y la cruceta 1,50 m , cada poste contempla un hilo de guarda , la estructura debe contar con un sistema de puesta a tierra en cada poste .

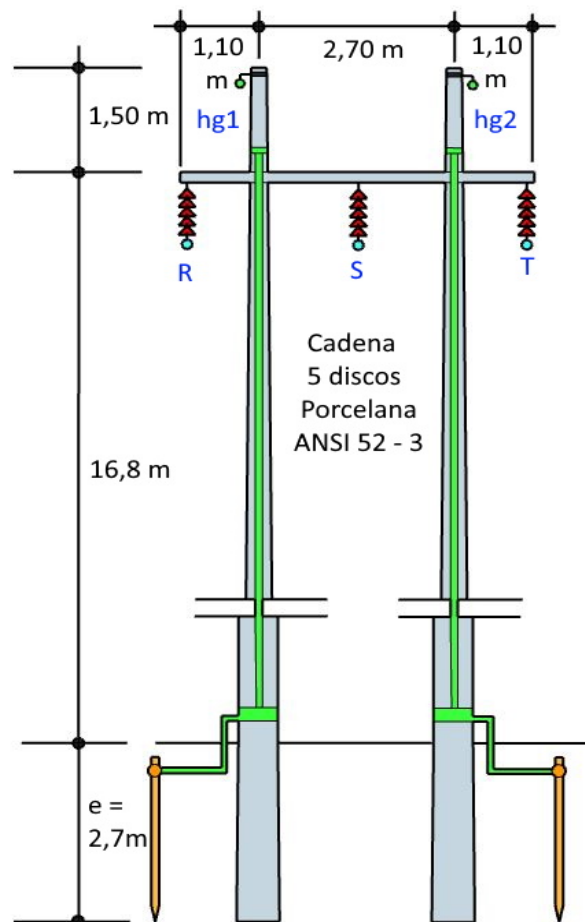


Figura 3.25: Estructura tipo H de circuito simple . línea de 69 KV . Poste de 21m

Referencia : [CRE](#) - Cooperativa Rural de Electrificación Ltda [6]

Adaptación : Autora

En la figura 3.26 , una estructura tipo torre para doble circuito , las distancias de seguridad se indican sobre la figura , se recomiendan torres de 19,5 - 26 y 49 m de alto en función de las distancias de seguridad con respecto al suelo , esto significa que tan congestionado por construcciones o arboles es la zona por donde pasa la línea y cuanto amerita levantarla sobre el nivel del suelo .

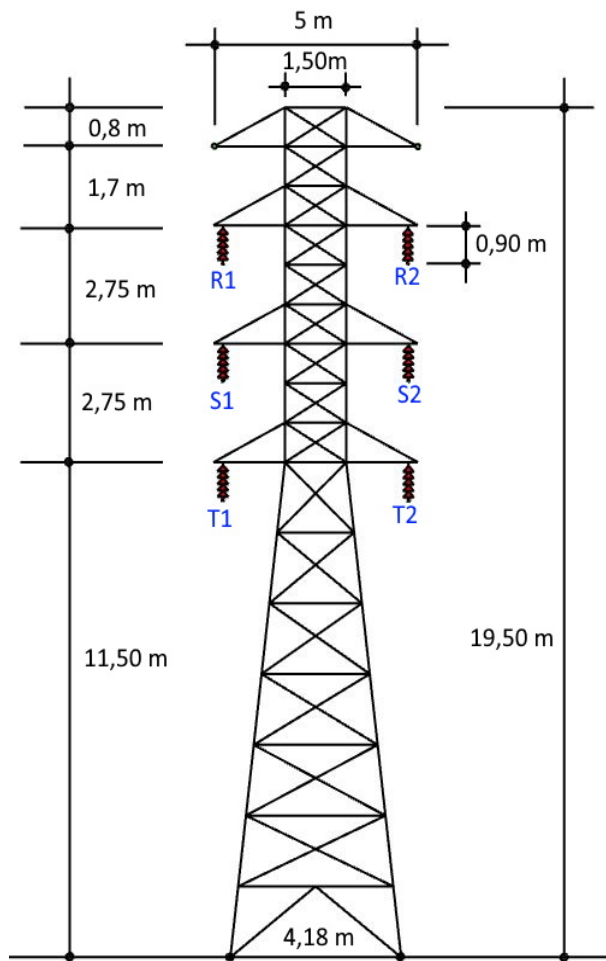


Figura 3.26: Estructura tipo torre para circuito doble de 69 KV. Altura de 19,5m

Referencia : CRE - Cooperativa Rural de Electrificación Ltda [6]

Adaptación : Autora

En la figura 3.27 , una torre utilizada para doble circuito en 69 KV , con un solo hilo de guarda para su protección ante descargas atmosféricas , la altura donde se coloca el hilo de guarda debe generar un cono frontal de protección de tal manera que sus aristas mínimo coincidan con las fases más altas (R1 - R2) , las fases que se encuentran más abajo quedaran protegidas , sin embargo los rayos tienen trayectorias de impactos inclinados y pueden vulnerar el cono y volumen de protección por lo cual se vuelve necesario ampliar el ángulo de apantallamiento hasta 45° o incorporar al diseño de la torre un segundo hilo de guarda.

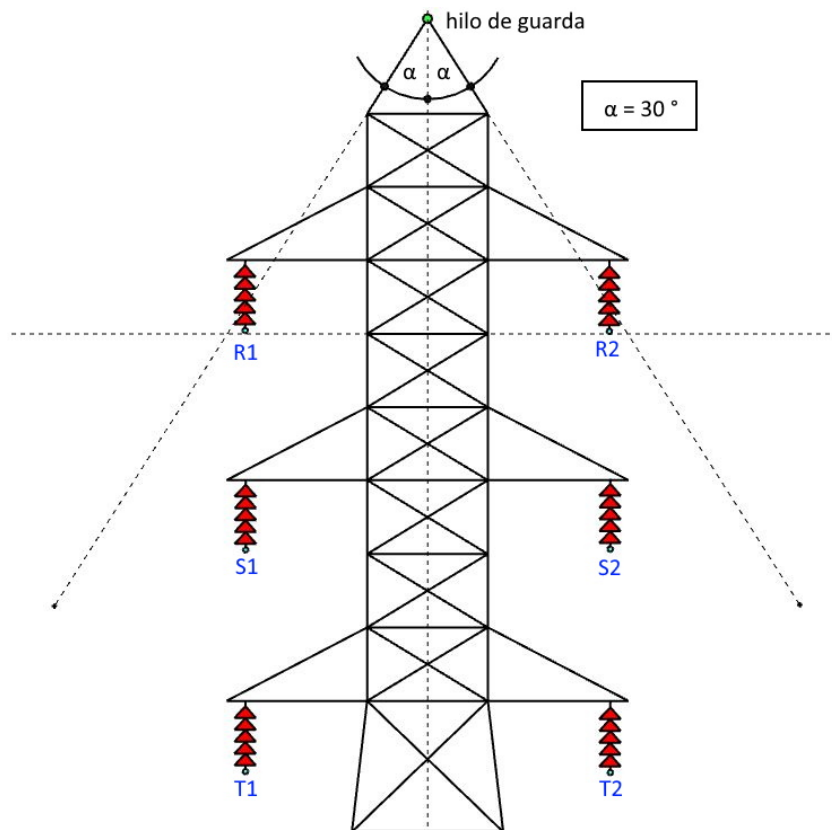


Figura 3.27: Protección de una estructura tipo torre - circuito doble de 69 KV , con un hilo de guarda . Altura de la torre 19,5m

Referencia : CRE - Cooperativa Rural de Electrificación Ltda [6]

Adaptación : Autora

En la figura 3.28 , una torre utilizada para doble circuito en 69 KV , utiliza doble hilo de guarda , generándose dos conos frontales de protección , cono 1 formado por los vértices A-B-C y el cono 2 formado por los vértices E-F-G, geoméricamente las aristas de los conos deben mínimo coincidir con cada una de las fases (vértice G con la fase T1 y vértice C con la fase T2) , el ángulo de apantallamiento aplicado es de 30 grados , una ampliación de este ángulo (mayor a 30 grados) es función del nivel de actividad electro atmosférica del lugar y el diseño propio de la torre .

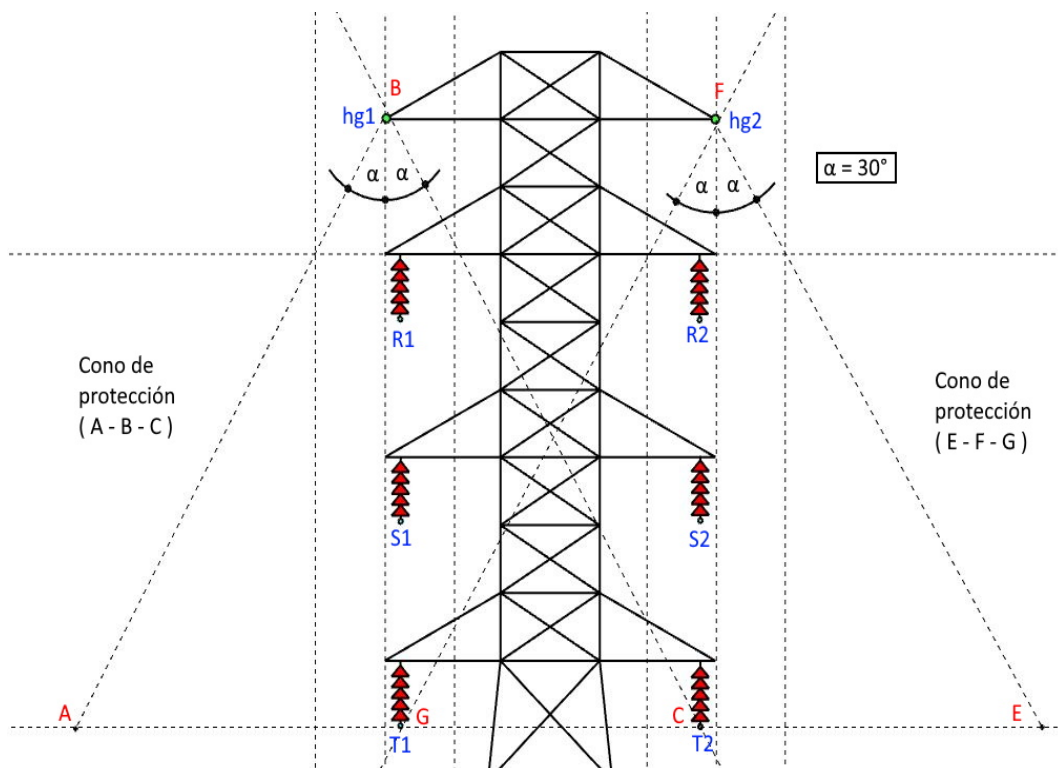


Figura 3.28: Protección de una estructura tipo torre - circuito doble de 69 KV , con doble hilo de guarda . Altura de la torre 19,5m

Referencia : CRE - Cooperativa Rural de Electrificación Ltda [6]

Adaptación : Autora

En la figura 3.29 , el grupo de tensores (cables de acero) que se coloca en las estructuras de 69 KV , por lo general se utilizan tres , los dos más altos van a un mismo contrapeso de hormigón bajo el nivel del suelo , cada cable tensor debe llevar un aislador (de retenida) que tradicionalmente los utilizados los de porcelana pero en la actualidad se está sustituyéndolos por aisladores de retenida de fibra de vidrio , este ultimo aporta mayor nivel de aislamiento a la estructura ante descargas atmosféricas por impacto directo o por voltajes inducidos en las fases de la línea .

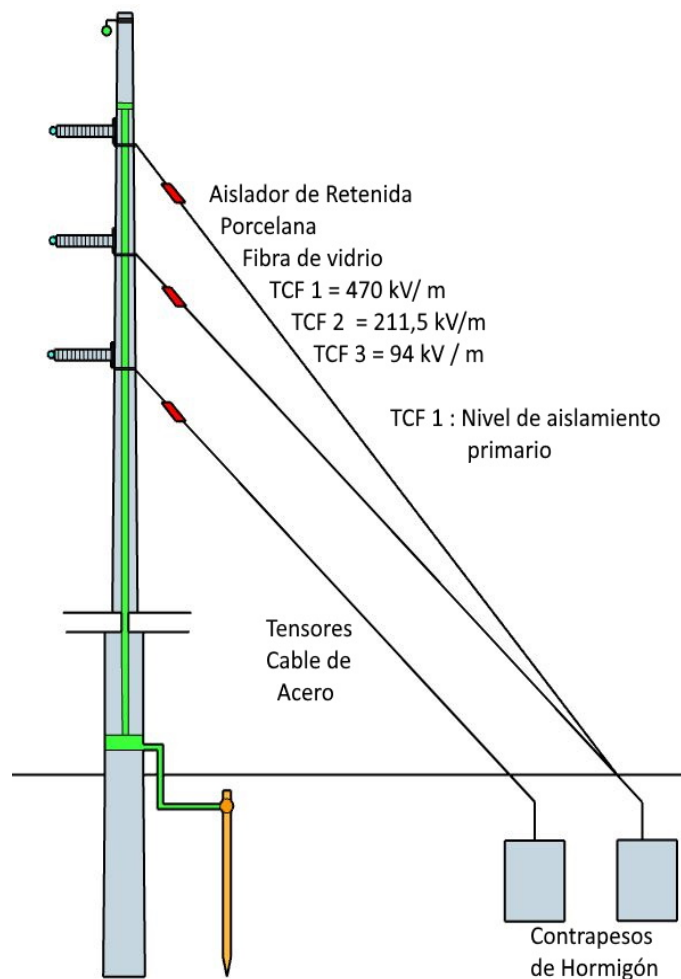


Figura 3.29: Tensores para una estructura de una línea de 69 KV .
Referencia : [CRE](#) - Cooperativa Rural de Electrificación Ltda [6]
Adaptación : Autora

3.6. Impedancias Características de líneas de Distribución y Subtransmisión

Las líneas de electricidad presentan impedancias ante baja frecuencia (60 Hz) y alta frecuencia , para corrientes de operación normal (60 HZ) la impedancia de una línea se divide en componentes simétricas , de secuencia positiva , negativa y homopolar , pero los sistemas de electricidad están expuestos a sobretensiones de origen interno y externo , las mismas que son de frecuencia distinta a la de operación normal o llamada también de frecuencia industrial , estas sobretensiones de acuerdo a su origen tienen distintas frecuencias , mayores a la de operación normal y hacen que los elementos de una red eléctrica cambien su impedancia , la reactancia inductiva o reactancia capacitiva son función directa del valor de la frecuencia . [27]

- SOBRETENSIONES DE ORIGEN INTERNO :
Son generadas por la operación propia del sistema y se clasifican en sobretensiones temporales y sobretensiones de maniobra o llamadas también de conmutación .
 - Sobretensiones Temporales : (48 a 62 Hz).
Fallas a Tierra.
Rechazo de carga.
Pérdida del neutro.
Efecto Ferranti.
Entre otras.
 - Sobretensiones por maniobras : (Hasta 20 KHZ)
Energización de líneas.
Corriente Inrush de un transformador.
Encendido y apagado de Capacitores.
Despeje de fallas.
Entre otras.
- SOBRETENSIONES DE ORIGEN EXTERNO : (10 KHz a 3 MHz)
 - Sobretensiones por inducción , impactos indirectos de rayos.
 - Sobretensiones por impactos directos de rayos.
- SOBRETENSIONES TRANSITORIAS :
Se llaman sobretensiones transitorias porque son el efecto de un cambio

de estado de una red , tienen un tiempo de duración muy corto y son de frecuencia mayor a la industrial [27], son las siguientes :

- Sobretensiones por maniobras (De frente lento).
- Sobretensiones por descargas atmosféricas (De frente rápido).
- Sobretensiones de frente muy rápido (Fallas en subestaciones GIS).

Las líneas de electricidad ante cada uno de estos posibles escenarios que pueden presentarse se comportan con una determinada impedancia , para sobretensiones temporales es aplicable el calculo de las impedancias mediante sus componentes simétricas , pero para sobretensiones transitorias (maniobras y descargas atmosféricas) es necesario determinar una nueva impedancia que es función de la frecuencia y se define como : Impedancia Característica de la Línea (Z_c) [27].

$$Z_c = (60) * \ln \left(\frac{2000 * h(m)}{r(mm)} \right) \quad (3.1)$$

Donde :

h = Altura de la fase más alta con respecto al suelo (m)

r = radio del conductor (mm)

- LINEA DE 13,8 KV . AISLADORES TIPO PIN :
 Conductor de fase : 336.4 - ACSR / r = 9.15 mm
 Conductor de neutro : 4/0 . AWG / r = 7,16 mm
 hL = Altura de la fase = 10,3 m
 hN = Altura del conductor - neutro = 9,1 m [25]

$$Z_{cL} = (60) * \ln \left(\frac{2000 * 10,3}{9,15} \right) = 463,2\Omega$$

$$Z_{cN} = (60) * \ln \left(\frac{2000 * 9,1}{7,16} \right) = 470,4\Omega$$

- LINEA DE 13,8 KV . AISLADORES TIPO DISCO :
 Conductor : 336.4 - ACSR / r = 9.15 mm
 Conductor de neutro : 4/0 . AWG / r = 7,16 mm
 hL = Altura de la fase = 10,1 m
 hN = Altura del conductor - neutro = 9,1 m [25]

$$Z_{cL} = (60) * \ln \left(\frac{2000 * 10,1}{9,15} \right) = 462\Omega$$

$$Z_{cN} = (60) * \ln\left(\frac{2000 * 9,1}{7,16}\right) = 470,4\Omega$$

En las figuras 3.30 , 3.31 , 3.32 , la definición de alturas de los conductores de fase y neutro para estructuras con aisladores tipo Pin clase ANSI 55-5 y estructuras con cadena de aisladores tipo disco clase ANSI 52-1 .

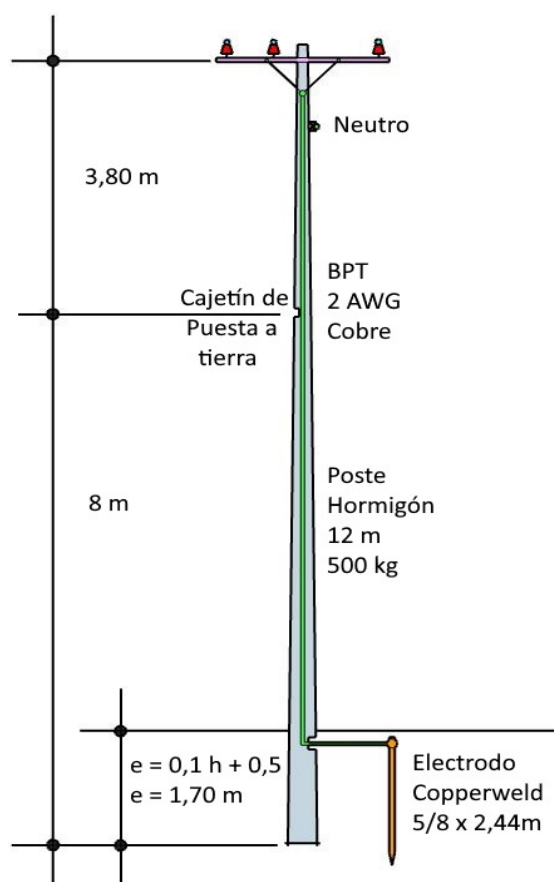


Figura 3.30: Estructura trifásica para línea de 13,8 KV . Poste de 12 m
Referencia : [MEER](#) - Ministerio de Electricidad y Energía Renovable - Ecuador
Adaptación : Autora

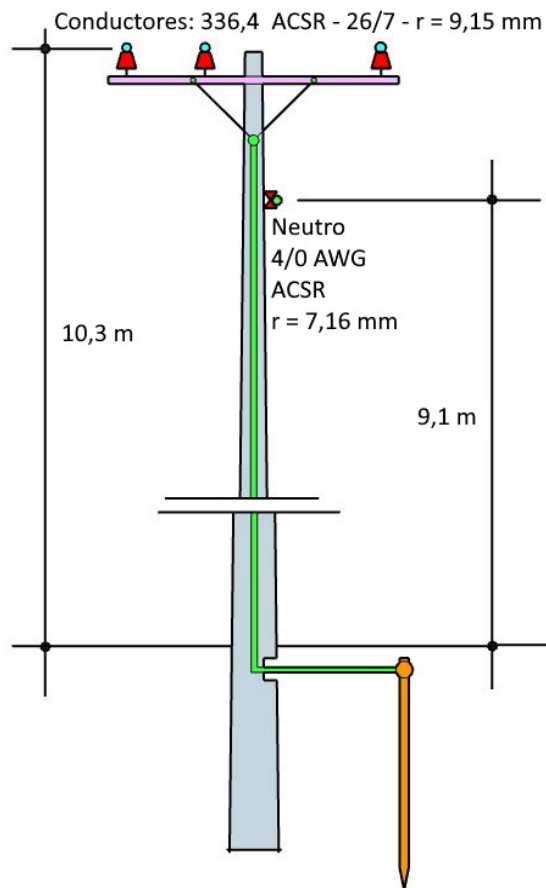


Figura 3.31: Definición de alturas en una estructura para 13,8 KV con aisladores tipo Pin , clase ANSI 55-5 . Poste de 12 m .
Referencia : [MEER](#) - Ministerio de Electricidad y Energía Renovable - Ecuador
[3]
Adaptación : Autora

La estructura utilizada es semi centrada pasante con aisladores tipo Pin clase ANSI 55- 5 , con un poste de hormigón armado de 12 m , 500 Kg de ruptura , cruceta tipo universal de hierro galvanizado , los conductores de fase son 336,4 (Linnet) [ACSR](#) , de 26 hilos de aluminio y 7 hilos de acero , este conductor tiene un radio $r = 9,15$ mm , para el conductor neutro se utiliza el 4/0 AWG tipo [ACSR](#) de radio $r = 7,16$ mm , el electrodo de puesta a tierra es una varilla de [Copperweld](#) de 5/8 x 2,44 m .[25]

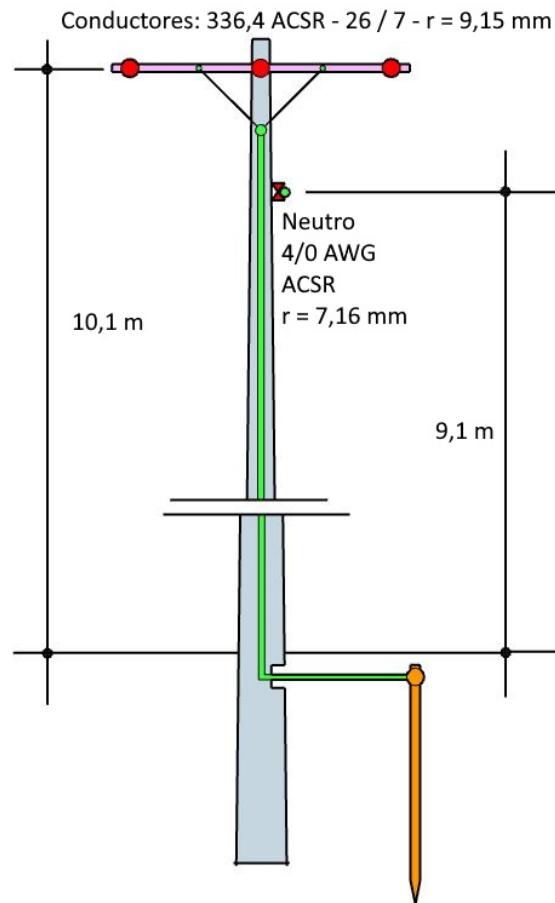


Figura 3.32: Definición de alturas en una estructura para 13,8 KV con aisladores tipo Disco , clase ANSI 52 - 1 . Poste de 12 m .
Referencia : [MEER](#) - Ministerio de Electricidad y Energía Renovable - Ecuador
[3] Adaptación : Autora

La estructura presentada es tipo centrada de retención , con aisladores de disco clase ANSI 52 - 1 , con un poste de hormigón armado de 12 m, 500 Kg de ruptura , cruceta tipo universal de hierro galvanizado , los conductores de fase son 336,4 (Linnet) [ACSR](#), de 26 hilos de aluminio y 7 hilos de acero , este conductor tiene un radio $r = 9,15$ mm, para el conductor neutro se utiliza el 4/0 AWG tipo [ACSR](#) de radio $r = 7,16$ mm, el electrodo de puesta a tierra es una varilla de [Copperweld](#) de 5/8 x 2,44 m. [25]

■ LINEA DE 69 KV CON ESTRUCTURA TIPO RETENCIÓN :

Conductor de fases : 477 - [ACSR](#) / r = 10,9 mm

Hilo de guarda : OPGW / r = 5,95 mm

hR = 16,6 m

hS = 15,1 m

hT = 13,6 m

h. hg = 18,50 m

$$Z_{cR} = (60) * \ln \left(\frac{2000 * 16,6}{10,9} \right) = 481,3\Omega$$

$$Z_{cS} = (60) * \ln \left(\frac{2000 * 15,1}{10,9} \right) = 475,6\Omega$$

$$Z_{cT} = (60) * \ln \left(\frac{2000 * 13,6}{10,9} \right) = 469,3\Omega$$

$$Z_{c.hg} = (60) * \ln \left(\frac{2000 * 18,50}{5,95} \right) = 524,1\Omega$$

En la figura 3.33 , la definición de alturas para cada una de las fases y para el hilo de guarda de una línea de 69 KV , con estructura tipo retención .

Esta estructura utiliza los siguientes elementos :

Poste de hormigón de 21 m

Cadena de 5 discos aisladores tipo disco clase ANSI 52 - 3

Conductores para las fases : 477 AWG - 26 / 7 . [ACSR](#)

Hilo de guarda : OPGW de 24 fibras

Bajante de puesta a tierra : 2 AWG . Cobre

Electrodo de puesta a tierra : Varilla de Copperweld 5/8 x 2,54 m

Las alturas de los conductores y la del hilo de guarda se definen con respecto al nivel del suelo (no se considera el empotramiento del poste e = 2,7 m) , la impedancia característica de acuerdo a la ecuación 3.1 , es directamente proporcional a la altura del conductor e inversamente proporcional al radio del conductor . Esta impedancia (Zc) es la respuesta que presentan los conductores ante sobrevoltajes y sobrecorrientes transitorias (por maniobras y descargas atmosféricas) que se generan en la línea y que son de frecuencias mayores a la de operación normal (frecuencia industrial = 60 Hz) .[25]

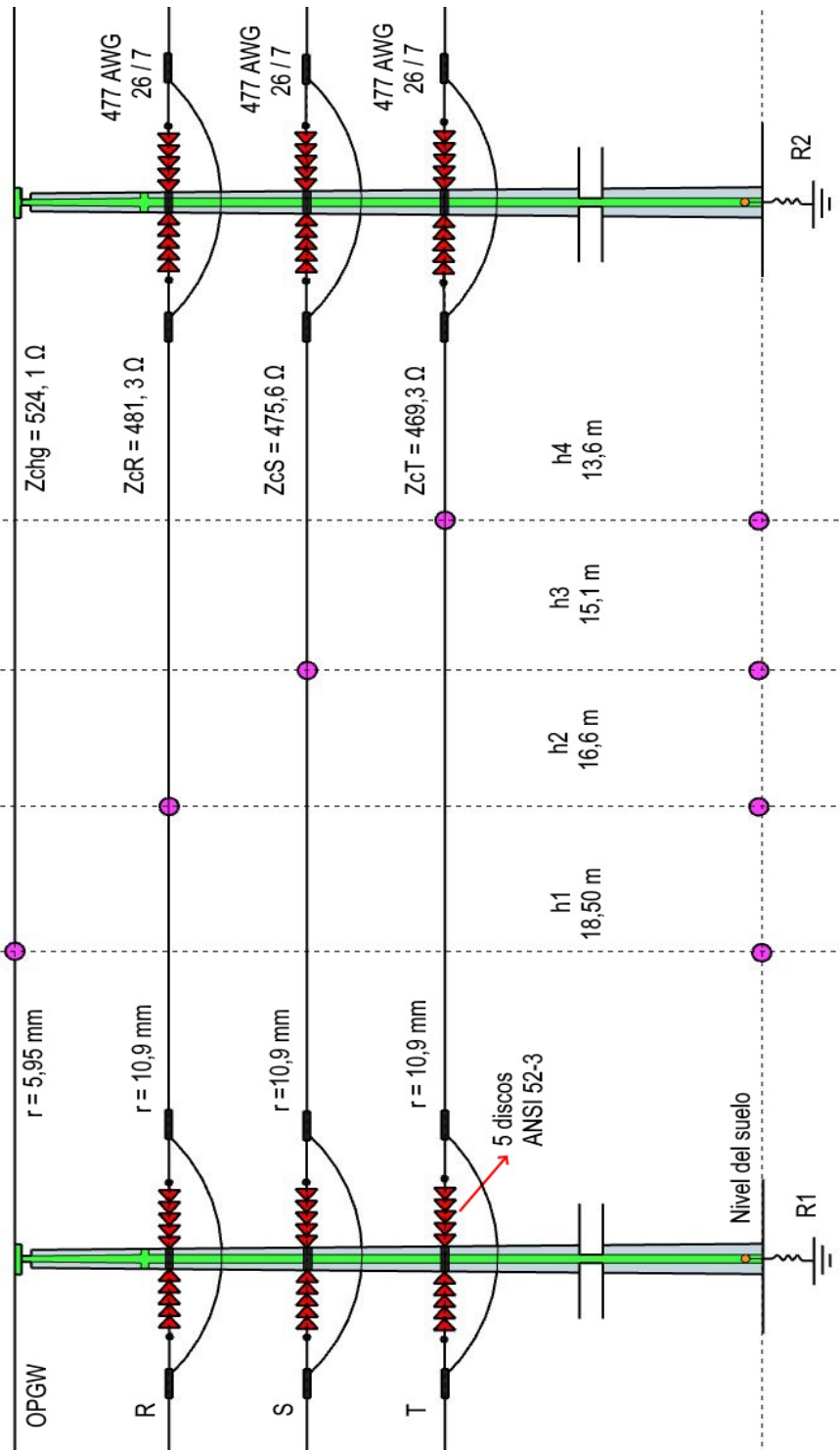


Figura 3.33: Impedancias características del hilo de guarda y fases para una línea de 69 KV. Autora

Capítulo 4

Flameo Directo (flashover) y Flameo Inverso (back flashover)

4.1. Introducción

El flameo en un aislador es la generación de un arco eléctrico entre sus terminales , un arco que se convierte en conductor de corriente , pudiendo ser de tres tipos[28] :

- Flameo por aire
- Flameo superficial
- Flameo interno

Flameo por aire :

Es un arco eléctrico que aparece entre los terminales de un aislador cuando una sobretensión tiene tal magnitud que supera la rigidez dieléctrica (resistencia de aislamiento) del aire , ionizándose y convirtiéndose en conductor , ahora la corriente pasa por el aire estableciéndose contacto con tierra , por lo tanto se produce una falla a tierra (corto circuito entre la fase y tierra) .

Flameo superficial :

Se llama flameo superficial cuando una sobretensión que aparece en el conductor de fase supera la rigidez dieléctrica superficial del aislador y se forma un arco superficial por sobre el aislador , esto significa que existe un flujo de corriente entre la línea y la estructura , estructura que se encuentra aterrizada, entonces se produce una falla a tierra (corto - circuito entre la fase afectada por

la sobretensión y tierra) . La rigidez dieléctrica superficial del aislador está ligada con los niveles de contaminación , a mayor contaminación menor rigidez dieléctrica por lo tanto mayor probabilidad de flujo de corriente , esto lleva a la necesidad de mantener limpio los aisladores .

Flameo interno :

El flameo interno se produce cuando la sobretensión que llega al aislador es de muy alta amplitud que rompe la rigidez dieléctrica del material (porcelana , vidrio , polímero) y mediante un proceso de descargas parciales (arcos eléctricos pequeños) se genera un flujo de corriente por el interior del aislador , cuando esto sucede el aislador por lo general debe ser cambiado por fisuras y quemaduras internas .

Por lo general , en el orden de ocurrencia está dentro de las mismas probabilidades que sucedan flameos por aire o superficiales , dependen de las condiciones ambientales (densidad relativa del aire , lluvia , humedad , contaminación) , mientras que el flameo interno es el ultimo en suceder , solamente cuando la sobretensión es de muy alta amplitud que causó flameo por aire , superficial y finalmente también interior .

Este fenómeno puede ser causado por una sobretensión de baja frecuencia (sobretensiones temporales) o por sobretensiones transitorias (de alta frecuencia por maniobras o por atmosféricas) , los escenarios más críticos aparecen en condiciones de humedad - lluvia y altos niveles de contaminación (sobre todo sal - cloruro de sodio - depositada en la superficie del aislador) .

Cuando suceden estos arcos eléctricos , el flujo de corriente puede ir desde la fase a tierra o desde tierra a la fase , esto dá lugar a la definición de flameos directos e inversos .[28]

Flameo directo (flashover) :

Se llama flameo directo o también efecto flashover , cuando la corriente pasa desde la fase hacia tierra , pudiendo ser por aire , superficial o interno , a baja o alta frecuencia . Esto sucede cuando el conductor de una fase es impactado directamente por un rayo , se genera un voltaje inducido por efecto de un rayo que cae cerca de la línea , por maniobras en la línea o por sobretensiones temporales que ocurren en la línea .

Para que exista flameo directo , la amplitud (valor pico) de la sobretensión debe romper la rigidez dieléctrica del medio , esto cuantificado significa que el valor pico de la sobretensión supera la tensión critica de flameo del aislador , que según los catálogos se indica para baja frecuencia (frecuencia industrial - 60 Hz) y para impulsos tipo rayo . [14]

Flameo Inverso (Back flashover) : Se llama flameo inverso o efecto back flashover , cuando el arco eléctrico ahora conduce corriente desde la tierra hacia la fase , esto sucede cuando existen impactos de rayos sobre las estructuras de una línea (postes , crucetas , torres , etc) o sobre el hilo de guarda , en cualquiera de los dos casos la corriente busca descargarse a tierra , pero si existen sistemas de puesta a tierra muy altos la corriente rebota y regresa por la estructura o por la bajante del sistema de puesta a tierra , generándose un voltaje con respecto a tierra muy alto que supera la tensión crítica de flameo del aislador y la corriente pasa de tierra a la fase . [17]

4.2. Impacto de un rayo sobre el hilo de guarda

El hilo de guarda o llamado también hilo de tierra es un método de protección contra descargas atmosféricas (impactos directos de rayos sobre las fases de una línea) , es un conductor que se conecta en la parte superior de las estructuras y que recorre junto a la línea todo el trayecto hasta llegar a la subestación (o parte desde la subestación junto con la línea) , en la subestación se encuentra en la estructura de llegada o salida llamado pórtico , el mismo que se encuentra aterrizado a la malla de la subestación .

En la figura 4.1 , un esquema básico del patio de 69 KV de una subestación y la línea de llegada de 69 KV (En el caso de una subestación para distribución 69 KV / 13,8 KV) .

En la figura 4.2 , un rayo de 20 KA impacta sobre el hilo de guarda , este presenta una impedancia característica de 524,1 Ω , se considera que la corriente se divide en dos partes iguales , por lo tanto el voltaje de impacto (VA) sobre el hilo de guarda es :

$$VA = I_o * Z_c.hg / 2 = 20KA * 524,1 / 2 = 5,2 MV.$$

Por un lado los pulsos de voltaje y corriente se propagan por el hilo de guarda hasta llegar al poste 2 , aquí se divide la corriente , una parte se descarga a tierra por medio del poste 2 y otra parte de la corriente del rayo llega a la subestación, exactamente al pórtico de llegada y desde ahí se descargan a tierra .

Por el otro lado (hacia la izquierda del punto A) , la corriente del rayo llega al poste 1 , una parte se descarga a tierra y otra sigue por el hilo de guarda hacia la siguiente estructura , hasta descargarse completamente , la cantidad de estructuras que se necesite para descargar toda la corriente del rayo es función del valor de los sistemas de puesta a tierra que tenga la S/E y las estructuras (postes) . (máximo 10 Ω para la malla de la S/E y 20 Ω para las estructuras).[15]

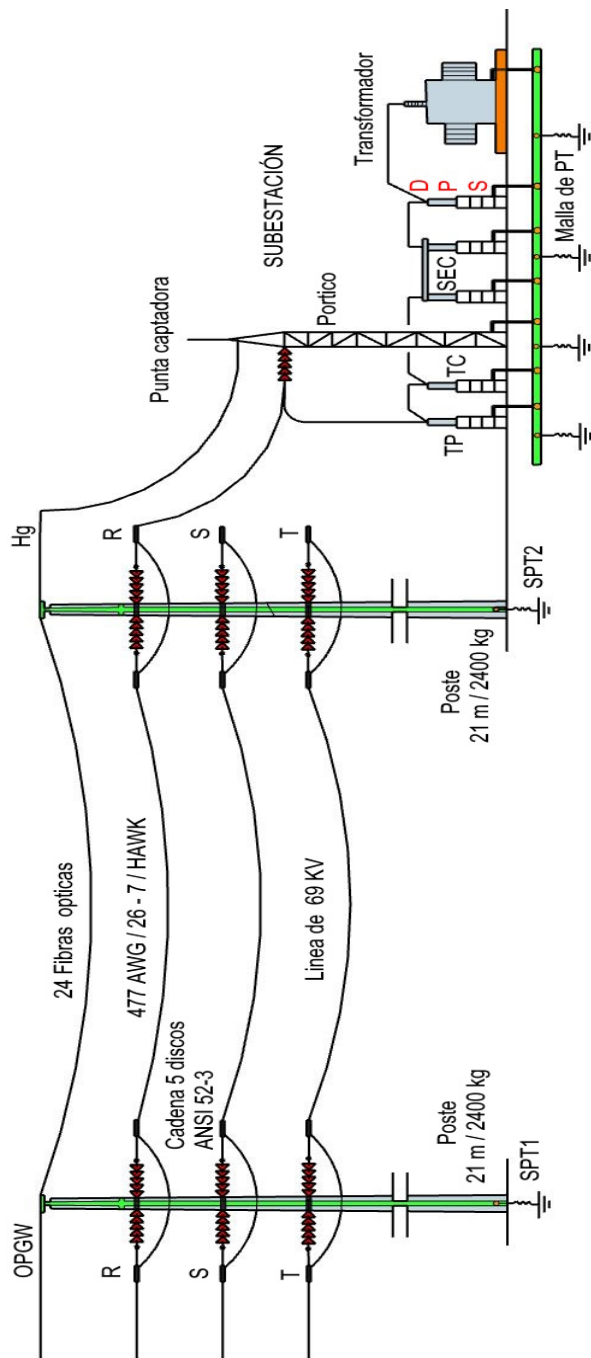


Figura 4.1: Partes de una línea de Subtransmisión y Subestación de 69 KV. Autora

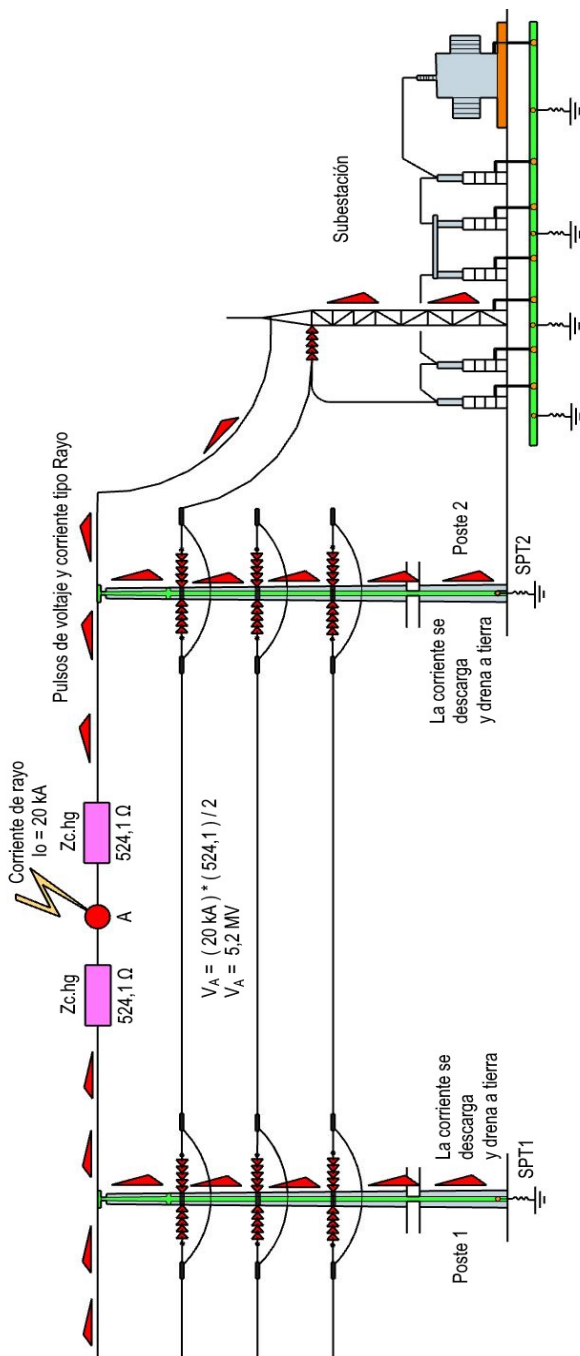


Figura 4.2: Impacto sobre el hilo de guarda. Línea de 69 KV. Autora

4.3. Impacto de un rayo sobre una fase

Cuando un rayo impacta sobre el conductor de una fase de una línea es porque el ángulo de apantallamiento de la línea (aplicado normalmente 30 grados) es muy pequeño y existen rayos que llegan con trayectorias inclinadas e impactan en la fase , las mejoras en la protección de la línea van desde ampliar el ángulo de apantallamiento de la línea (Hasta 45 grados) o incorporar un segundo hilo de guarda .[2]

En la figura 4.3 , se muestra el efecto de un rayo que cae sobre una fase :

I_o = Amplitud de corriente del rayo = 20 KA

$Z_{c.R}$ = Impedancia característica de la línea R

$Z_{c.R}$ = 481,3 Ω

Por lo tanto el voltaje pico (amplitud) en el punto de impacto (VA) es :

$VA = I_o * Z_{c.R} / 2 = 20 \text{ KA} * 481,3 / 2 = 4,81 \text{ MV}$.

Una onda de voltaje tipo pulso de esta amplitud se propaga por la línea y llega a los aisladores de los postes 1 y 2 , los aisladores utilizados son :

Cadena de 5 discos Ansi 52-3 :

TCF (-) = 510 KV .

Por lo tanto la línea presenta un nivel de aislamiento de :

$BIL = TCF * 0,961 = 510 * 0,961 = 490,1 \text{ . KV}$

Si consideramos que la TCF por definición , presenta una probabilidad del 50% que superado este valor de voltaje en el aislador se genere flameo . Podemos llegar al límite máximo de soportabilidad del aislador , buscando definir el valor de voltaje sobre el cual no exista posibilidad de evitar el flameo , entonces esto sucede si agregamos un 50% de voltaje a la TCF estandar definida por el fabricante .

$TCF_{max} = 1,5 * TCF = 1,5 * 510 = 765 \text{ KV}$

Esto significa que la cadena de aisladores pueden soportar hasta 765 KV .

$BIL_{max} = TCF_{max} * 0,961 = 765 * 0,961 = 735,2 \text{ KV}$

Esto significa que la línea presenta un nivel de aislamiento ante impulsos de voltajes tipo rayo de : 735,2 KV :

Si el voltaje generado por el impacto del rayo es 4,81 MV , un pulso que viaja a la velocidad de la luz por el conductor , en ordenes de micro segundos estará en el aislador , no existe ninguna posibilidad de evitar el flameo . (4,81 MV > 735,2 KV) . Los pulsos de voltaje y corriente se propagan por la fase e hilo de guarda , los que van por el hilo de guarda llegan hasta el pórtico de la S/E y se descargan a tierra , los que van por la fase llegan a la S/E y deben ser descargados a tierra mediante un DPS (Descargador de sobretensión) .

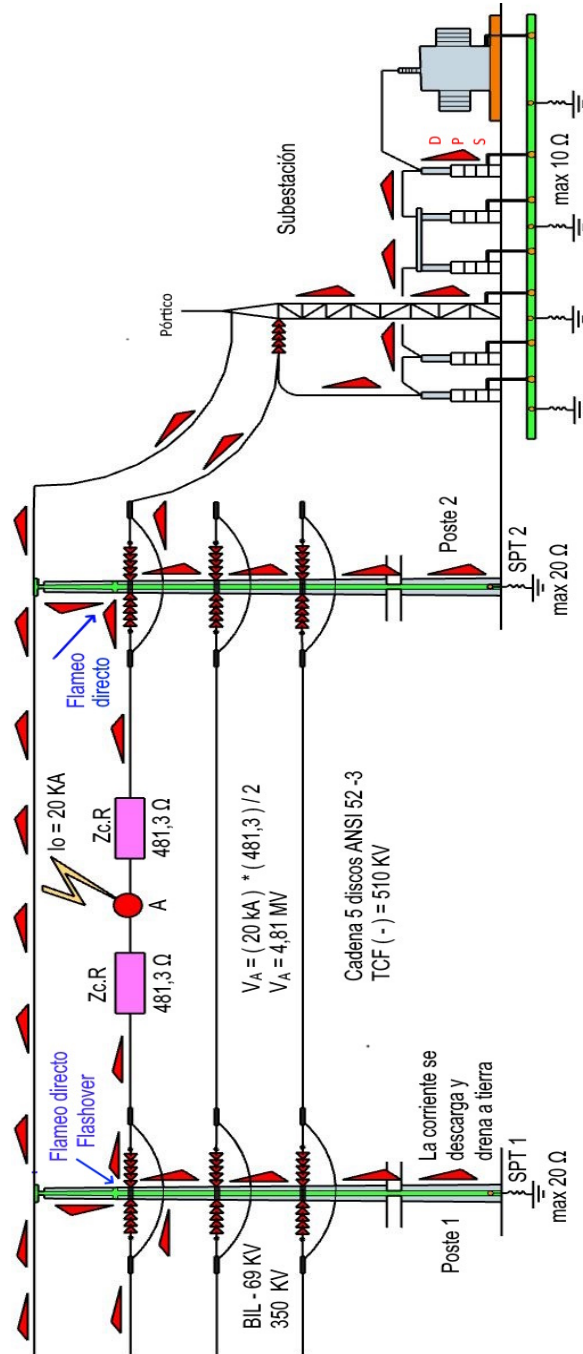


Figura 4.3: Flameo directo (Flashover) . Linea 69 KV . Autora

4.4. Impacto sobre el hilo de guarda con flameo inverso (back flashover)

Cuando las estructuras tienen sistemas de puesta a tierra adecuados (recomendados para estructuras de 69 KV, 20Ω máximo), si existen impactos sobre el hilo de guarda la corriente se descarga y drena en la tierra, pero si el sistema de puesta a tierra es alto (mayor a 20Ω) existe la posibilidad de un rebote de corriente .

Los pulsos de voltaje y corriente son ondas viajeras que al cambiar de impedancias en su trayecto se genera una onda transmitida y otra reflejada, si la impedancia del sistema de puesta a tierra es baja, la onda transmitida hacia tierra es alta y la onda reflejada es pequeña, pero si la impedancia del sistema de puesta a tierra es alta, la onda transmitida es pequeña y la onda reflejada es alta, este es el concepto sobre el cual se define el rebote de corriente .

En la figura 4.4, un rayo impacta sobre el hilo de guarda, parte de la corriente se dirige hacia el poste 1 y otra parte al poste 2 donde se produce una nueva división de corriente, un porcentaje de la misma se descarga hacia tierra por medio del sistema de puesta a tierra (SPT 2) considerando que este tiene un valor adecuado (máximo 20Ω), el otro porcentaje de corriente sigue por el hilo de guarda hasta llegar al pórtico de la subestación (S / E), el mismo que se encuentra aterrizado a la malla de la subestación, por lo tanto la corriente se descarga y drena a tierra .

La parte de corriente que se dirige hacia el poste 1, llega al mismo y se divide nuevamente una parte sigue por el hilo de guarda y otra mediante la estructura (poste) busca descargarse en tierra, pero el sistema de puesta a tierra (SPT 1) no es el adecuado (mayor a 20Ω), la corriente rebota y regresa por la estructura, mientras se genera una diferencia de potencial entre la línea y tierra que alcanza valores con amplitudes que superan la soportabilidad máxima de la cadena de aisladores (765 KV) generándose flameo, arcos eléctricos que llevan corriente desde la estructura (poste . cruceta) hacia el conductor de fase, ocurriendo en este momento el efecto flameo inverso (back flashover) .

La corriente seguirá por la línea hasta la siguiente estructura y muy probablemente genera flameo directo en la siguiente cadena de aisladores (depende del valor del sistema de puesta a tierra que tenga esa estructura) .

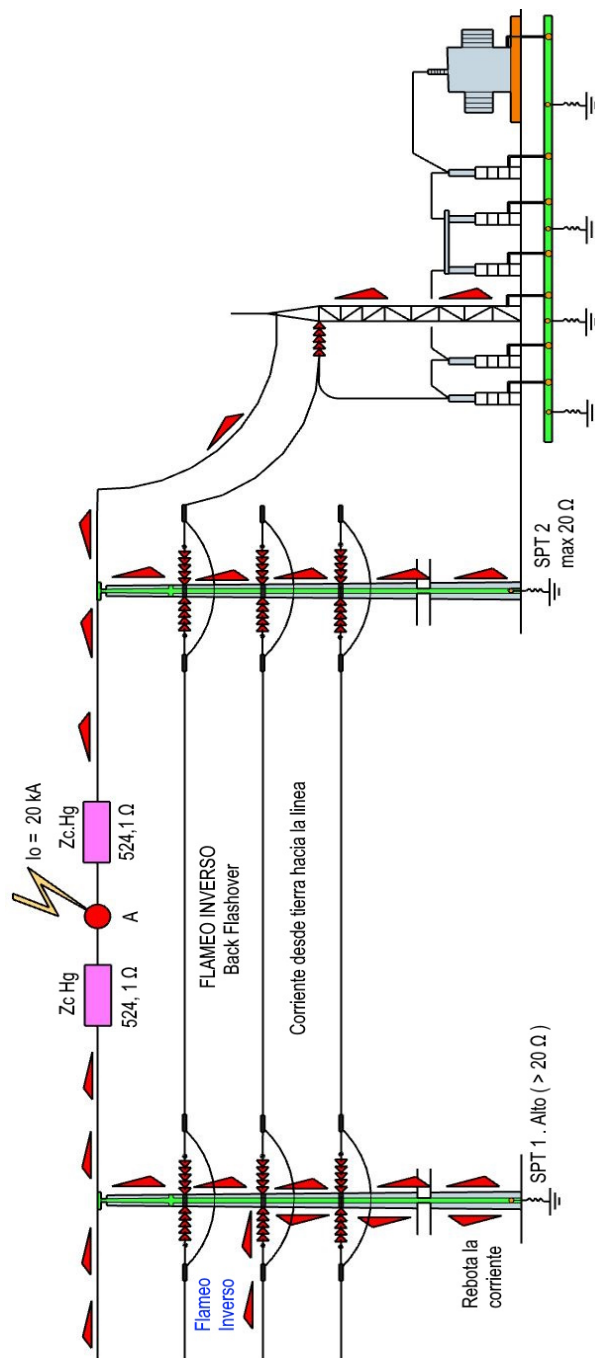


Figura 4.4: Impacto en el hilo de guarda con flameo inverso . Autora

4.5. Impacto sobre el conductor de una fase con flameo directo e inverso

Si existe el impacto de un rayo sobre el conductor de una fase , en las cadenas de aisladores que se encuentran en los extremos del vano es inevitable el flameo directo (postes 1 y 2) , pero si existe una estructura con un sistema de puesta a tierra deficiente (mayor a 20Ω) , existe rebote de corriente y por lo tanto flameo inverso en alguna de las cadenas de aisladores de la estructura , por lo general la más cercana al suelo , es la que primero recibe el retorno de la corriente .

En la figura 4.5 , un rayo de 20 KA impacta sobre la fase R , generando un voltaje de impacto de 4,81 MV , voltaje con el cual es inevitable el flameo de las cadenas de aisladores en los postes 1 y 2 .

La corriente que llega al poste 1 , se divide una parte a tierra , otra hacia el hilo de guarda , otra seguirá por la fase hacia la siguiente estructura , la parte de corriente que sube al hilo de guarda se divide , una hacia la siguiente estructura y otra hacia el poste 2 .

La corriente en el poste 1 que se dirige hacia tierra rebota ($SPT 1 > 20 \Omega$) , por lo tanto regresa por el poste hasta generar flameo inverso en una de las cadenas de aisladores .

La corriente de la fase R que llega al poste 2 se divide , una parte se descarga y drena a tierra ($SPT 1 < 20 \Omega$) , otra parte de corriente sube al hilo de guarda, desde donde una resultante de corriente seguirá hasta el pórtico de la subestación y finalmente se descarga y drena a tierra por medio de la malla de la subestación.

La ultima parte de corriente de la fase R sigue por la fase y llega a la cadena de aisladores ubicada en el pórtico de la subestación , esta corriente avanza por los conductores de la subestación hasta el descargador de sobretensión (DPS), que se encuentra justamente antes del transformador para garantizar su protección , el descargador es quien toma esta corriente y la envía a tierra a través de la malla de la subestación .

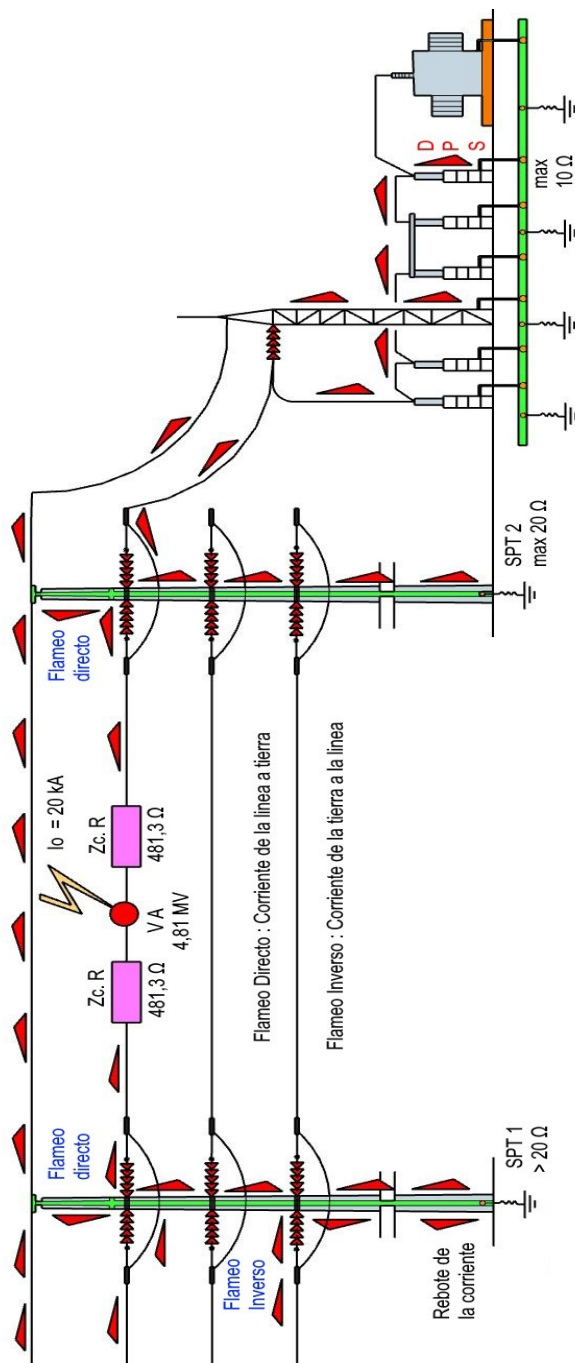


Figura 4.5: Impacto en una fase con flameo directo e inverso . Autora

4.6. Descargadores de sobretensión de línea y de subestación

Los descargadores de sobretensión son equipos que actualmente son contruidos con pequeñas pastillas de Óxido de Zinc , pastillas llamadas varistores, las mismas que se comportan como resistencias variables que ante un voltaje igual a su voltaje nominal de operación , presentan una resistencia de muy alto valor y se comportan como un aislador , pero si recibe una sobretensión (un voltaje mayor a su voltaje de operación normal) los varistores llevan su resistencia a valores muy bajos , generando de esta manera un camino hacia tierra para la corriente . Figura 4.6 .

Cuando las líneas están en zonas de muy alta actividad electro atmosférica (existe una alta cantidad de caída de rayos) y la protección mediante el hilo de guarda no es suficiente , la solución es utilizar descargadores de sobretensión llamados también apartarrayos a veces se utiliza también la palabra pararrayo, pero estrictamente no es muy correcta (un pararrayo es una punta captadora de rayos) .

Los descargadores utilizados en líneas son conectados entre cada fase y tierra, tienen la misión de enviar a tierra cualquier sobretensión de alta frecuencia (maniobras y sobre todo atmosféricas) que se generen en las fases de una línea . Para su correcta operación y evitar rebotes de corriente es necesario que estén conectados a sistemas de puesta a tierra de máximo 10Ω .

La ubicación del descargador de sobretensiones en subestaciones de 69 KV / 13,8 KV , generalmente está ubicado a la llegada de la línea de 69 KV , sin embargo en una S / E el transformador de potencia es uno de los equipos de mayor cuidado , por lo tanto no debe existir una distancia muy larga entre el transformador y el descargador , esto es debido a la caída de tensión que se genera en el conductor lo cual aumenta el voltaje que llega al transformador y el objetivo es cortar o limitar este nivel de sobretensión para garantizar la operación segura del transformador .

Los descargadores de sobretensión (DPS) se encuentran en las líneas de 13,8 KV , 69 KV y en los correspondientes patios de operación de una subestación , tanto en el área de 69 KV , como en el área de 13,8 KV .

El transformador de potencia requiere para su operación segura , protección ante sobretensiones atmosféricas tanto en el lado de 69 KV como en el lado de 13,8 KV .

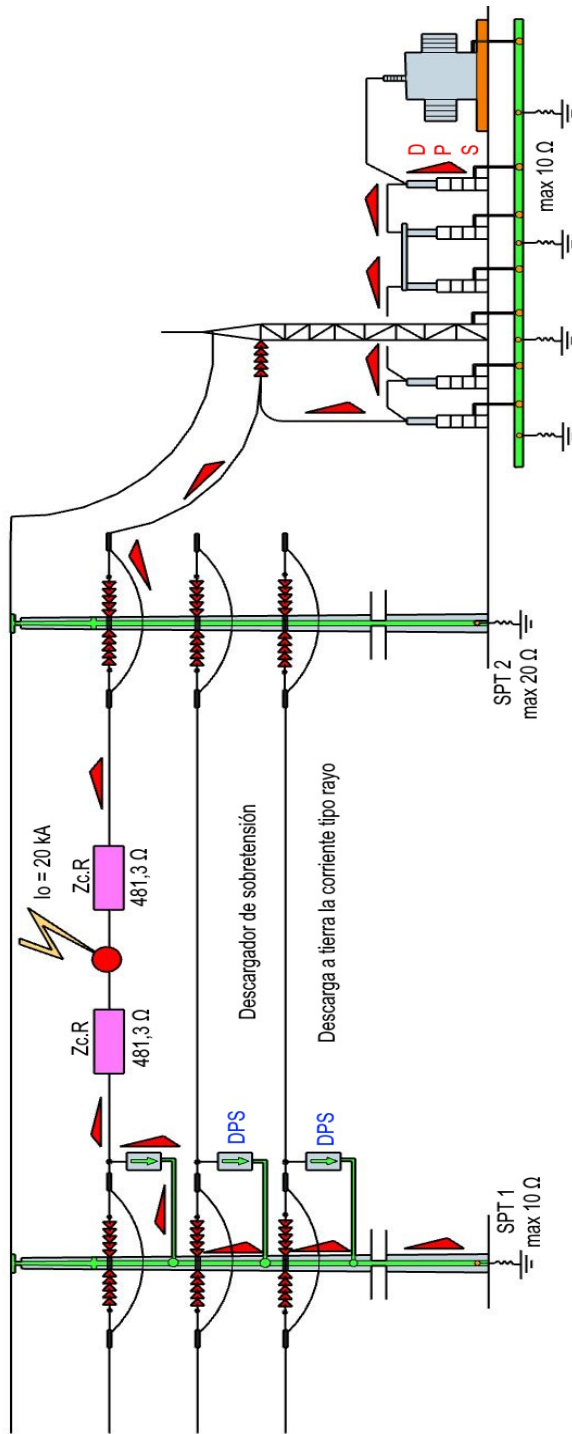


Figura 4.6: Descargadores de sobretensión en una línea de 69 KV . Autora

Capítulo 5

Modelado de aisladores y pruebas en ATP Draw

5.1. Introducción

El modelado de un aislador nos permite observar su comportamiento dinámico ante voltajes de operación nominal , sobretensiones de baja frecuencia, sobretensiones por maniobras o conmutación, sobretensiones atmosféricas por impactos directos o por voltajes inducidos en los conductores de las fases y finalmente los instantes en que flamean , considerando las sobretensiones atmosféricas como las de mayor incidencia en la operación de un aislador y por ende en la operación segura respecto al nivel de aislamiento que presentan las estructuras tanto para niveles de 13,8 KV como para 69 KV .

La herramienta utilizada para ejecutar el modelado de distintos tipos de aisladores es ATP Draw , herramienta especializada en análisis gráficos de transitorios electromagnéticos . [29]

Entre los aisladores seleccionados para su modelado están :

Aisladores para 13,8 KV :

- Cadena de dos discos Ansi 52 - 1
- Aislador tipo Pin Ansi 55 - 5
- Aislador tipo doble pin Ansi 56 - 1

Aisladores para 69 KV :

- Cadena de cinco discos Ansi 52 - 3

- Aislador tipo line - post
- Aislador tipo polímero

5.2. Modelado de un aislador

Todo efecto aislador está representado por una componente resistiva producto de la resistividad eléctrica del material (Capacidad de un material para oponerse al paso de la corriente) y una componente capacitiva efecto de la permitividad del material (capacidad de un material de polarizarse ante la acción de un campo eléctrico) .[30]

Cálculo de Resistencia y Capacitancia :

Estos dos componentes (R , C) al operar eléctricamente como dos elementos en paralelo dan como resultado el efecto aislador . Las ecuaciones para determinar cada uno de estos componentes son las siguientes :

$$R = \left(\frac{\rho}{2 * \pi * Df} \right) * \ln \left(\frac{2 * Df}{r} \right) \quad (5.1)$$

$$C = \left(\frac{\epsilon_r * Df}{2 * \ln(2 * Df/r)} \right) * \left(\frac{1 \times 10^{-9}}{9} \right) \quad (5.2)$$

Donde

ρ = Resistividad eléctrica del material ($\Omega * m$).

Df = Distancia de fuga (m).

r = Radio geométrico del aislador (m).

ϵ_r = Permitividad relativa del material.

Nivel de soportabilidad de un aislador :

Para aplicaciones en alta frecuencia (descargas atmosféricas) es necesario conocer el nivel de soportabilidad de un aislador , el mismo que está definido por la siguiente ecuación [30]:

$$V_{sop_{st}} = \left(400 + \frac{710}{t^{0,75}} \right) * d \quad (5.3)$$

Donde :

V.sop.st = Voltaje de soportabilidad estándar (KV)

V.sop.st = Para altas frecuencias (Descargas atmosféricas) d = Distancia o longitud de la cadena de aisladores (m)

t = Tiempo después del impacto del rayo (us)

Corregido por factores ambientales y tipo de aislador , es :

$$V_{sop_{corr}} = V_{sop_{st}} * \frac{Fa^m * Fll}{FH} \quad (5.4)$$

Donde :

Fa = Factor de corrección por densidad relativa del aire

Fll = Factor de corrección por lluvia

FH = Factor de corrección por humedad

m = Factor de tipo de aislador utilizado

m= 0,5 . Para aisladores tipo estándar

m = 0,8 . Para aisladores tipo FOG (neblineros) [13]

Aplicación en ATP Draw :

Un aislador flamea cuando el voltaje en sus terminales supera los valores de la tensión crítica de flameo (TCF) dado por los fabricantes , sobre este criterio utilizamos la aplicación en ATP Draw .

Para baja frecuencia :

El flameo es simulado directamente con un interruptor normalmente abierto que se cierra cuando el voltaje en los terminales de la impedancia (R , C) en paralelo supera la TCF (sea en húmedo - WET o en seco - DRY) dada por el fabricante.

Para alta frecuencia :

Para alta frecuencia (descargas atmosféricas) , se debe sensar todo el tiempo el voltaje en los terminales de la impedancia (R - C - paralelo) y compararla con la curva de soportabilidad ante descargas atmosféricas del aislador , ecuación 5.3 y corregida por factores ambientales 5.4 .[30]

Fuente de prueba tipo rayo . Norma IEEE :

Tipo : Heidler

Io = 5 KA

Frente de onda = 8 us

Frente de cola = 20 us

Norma IEEE :

Al tiempo de cola (20 us) el pulso está al 50% de su valor pico .

5.3. Aislador tipo disco , clase Ansi 52-1

a .- Presentación :

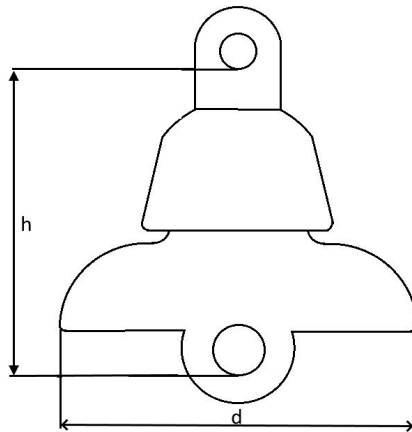


Figura 5.1: Aislador tipo disco , clase Ansi 52-1

Referencia :Catálogo Hivolt

Adaptación :Autora

b .- Características :

Fabricante: Hivolt ANSI C29.2

Distancia de fuga = 178 mm

Diámetro del disco = 160 mm

Radio del disco = 80 mm = 0,080 m

Altura del aislador = 140 mm = 0,140 m

Material: Porcelana

Resistividad = $7e^{12}(\Omega * m)$

Permitividad relativa = 6

TCF(DRY) = 60 KV

TCF(WET) = 30 KV

TCFrayo (+) = 100 KV

TCFrayo (-) = 100 KV

c.- Cálculo de R y C:

$$R = \left(\frac{\rho}{2 * \pi * Df} \right) * \ln \left(\frac{2 * Df}{r} \right)$$

$$R = \left(\frac{7 * 10^{12}}{2 * \pi * 0,178} \right) * \ln \left(\frac{2 * 0,178}{0,080} \right) = 9,34 * 10^{12} (\Omega)$$

$$C = \left(\frac{\epsilon_r * Df}{2 * \ln(2 * DF/r)} \right) * \left(\frac{1 * 10^{-9}}{9} \right)$$

$$C = \left(\frac{6 * 180}{2 * \ln(2 * 0,178/0,08)} \right) * \left(\frac{1 * 10^{-9}}{9} \right) = 3,97 * 10^{-11} (F)$$

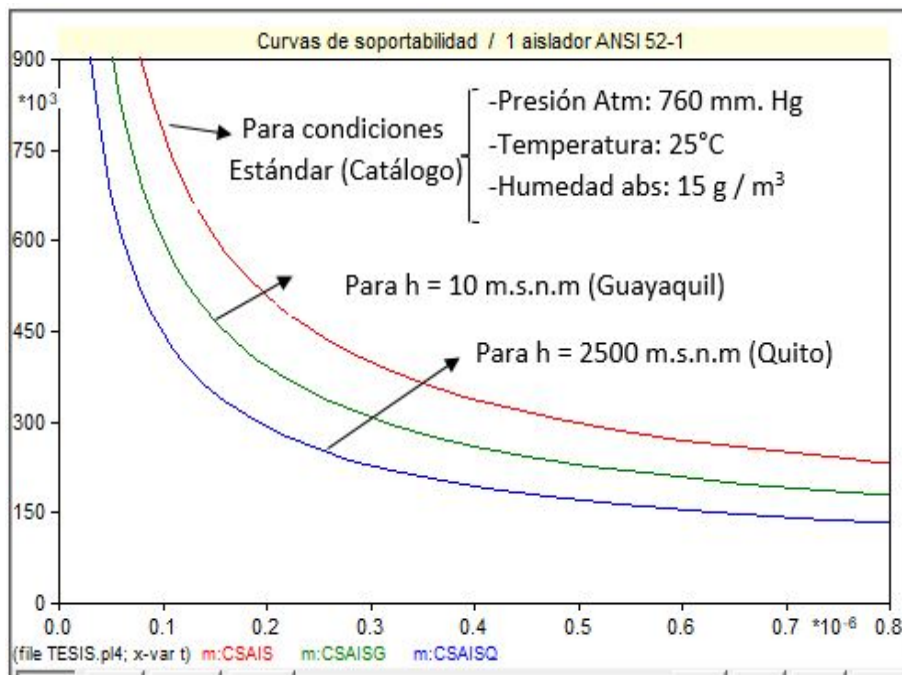
d.- Curva de soportabilidad:

Figura 5.2: Curvas de soportabilidad para un aislador ANSI 52-1 Fuente: Autora

e.- Modelado en ATP Draw :

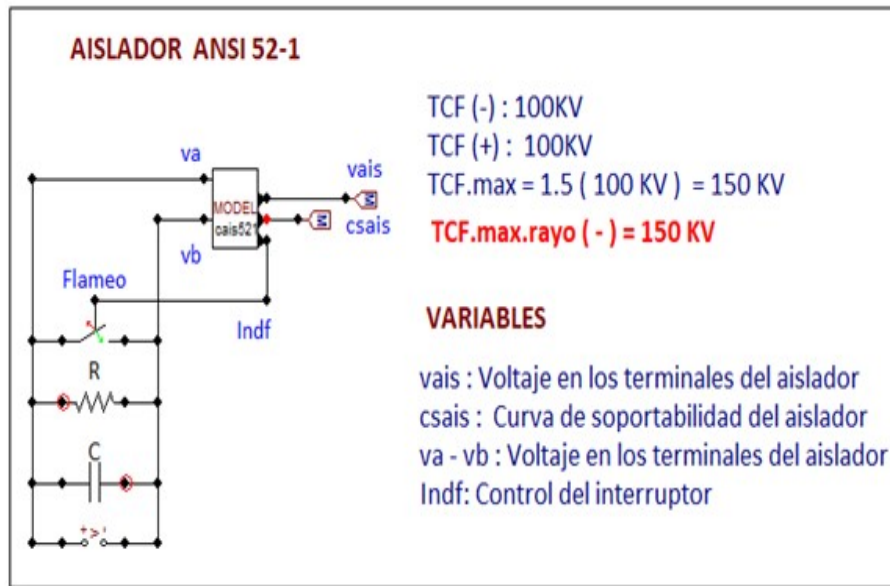


Figura 5.3: Modelado en ATP - DRAW . Fuente: Autora

f.- Módulo de pruebas

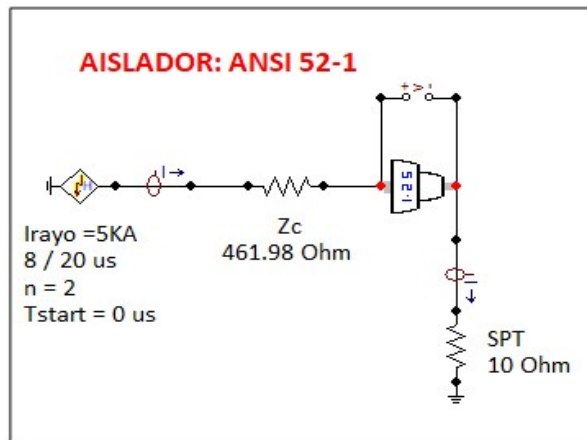
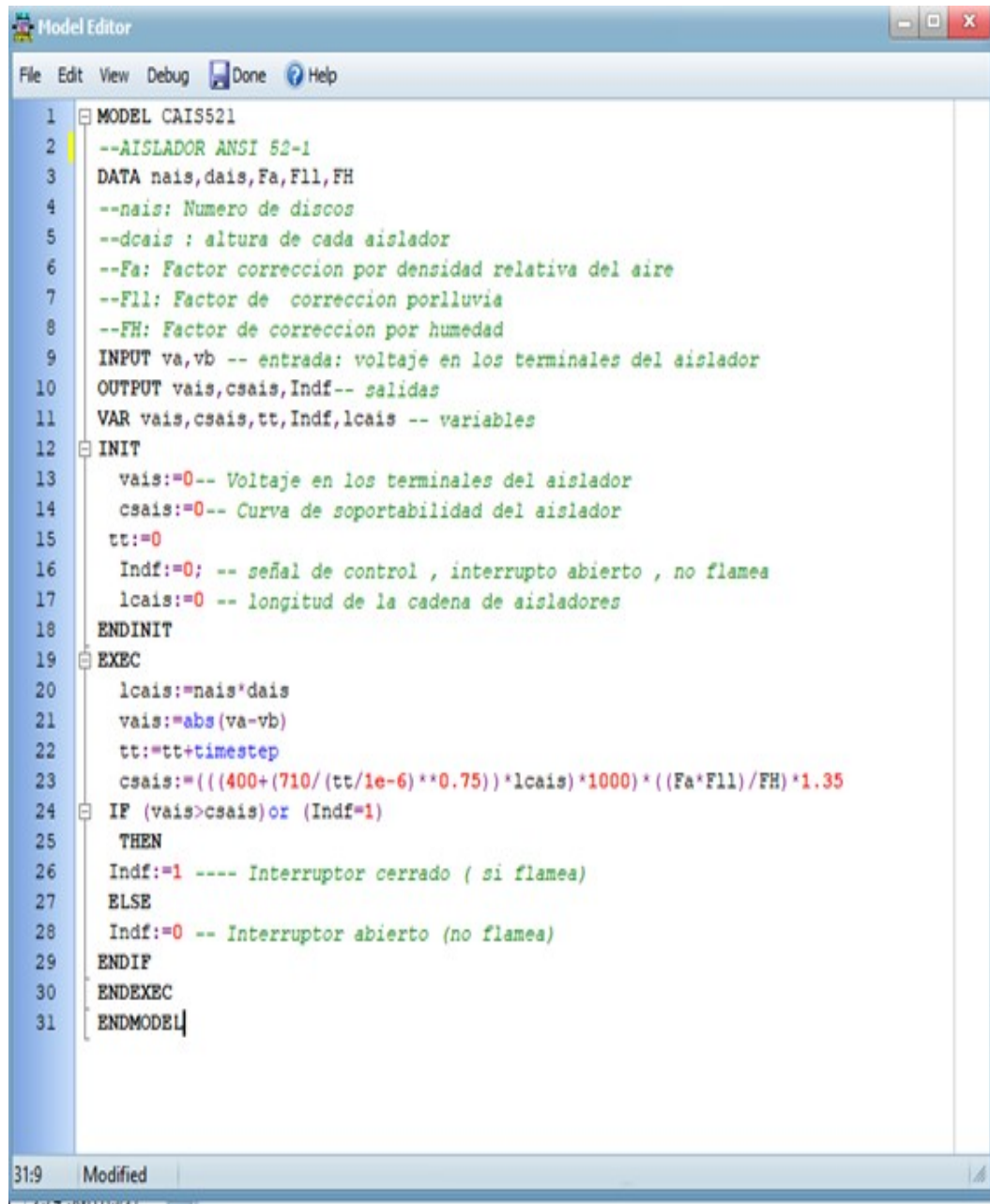


Figura 5.4: Modulo de pruebas . Un disco Ansi 52 - 1 . ATP - DRAW . Autora

g.- Programación del model


```

1  MODEL CAIS521
2  --AISLADOR ANSI 52-1
3  DATA nais,dais,Fa,Fll,FH
4  --nais: Numero de discos
5  --dcais : altura de cada aislador
6  --Fa: Factor correccion por densidad relativa del aire
7  --Fll: Factor de correccion por lluvia
8  --FH: Factor de correccion por humedad
9  INPUT va,vb -- entrada: voltaje en los terminales del aislador
10 OUTPUT vais,csais,Indf-- salidas
11 VAR vais,csais,tt,Indf,lcais -- variables
12 INIT
13   vais:=0-- Voltaje en los terminales del aislador
14   csais:=0-- Curva de soportabilidad del aislador
15   tt:=0
16   Indf:=0; -- señal de control , interrupto abierto , no flanea
17   lcais:=0 -- longitud de la cadena de aisladores
18 ENDINIT
19 EXEC
20   lcais:=nais*dais
21   vais:=abs(va-vb)
22   tt:=tt+timestep
23   csais:=(((400+(710/(tt/1e-6)**0.75))*lcais)*1000)*((Fa*Fll)/FH)*1.35
24 IF (vais>csais)or (Indf=1)
25 THEN
26   Indf:=1 ---- Interruptor cerrado ( si flanea)
27 ELSE
28   Indf:=0 -- Interruptor abierto (no flanea)
29 ENDIF
30 ENDEXEC
31 ENDMODEL

```

Figura 5.5: Programación del Model en ATP - DRAW . Autora

h .- Prueba de flameo . Condiciones estandar

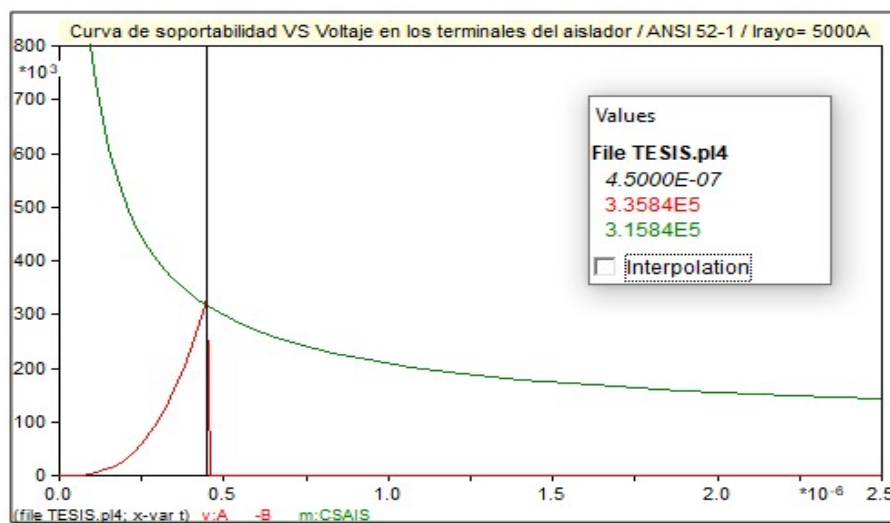


Figura 5.6: Aislador Ansi 52-1 . Prueba de flameo . Condiciones estandar .
 Autora

i .- Prueba de flameo .Para h = 10 msnm

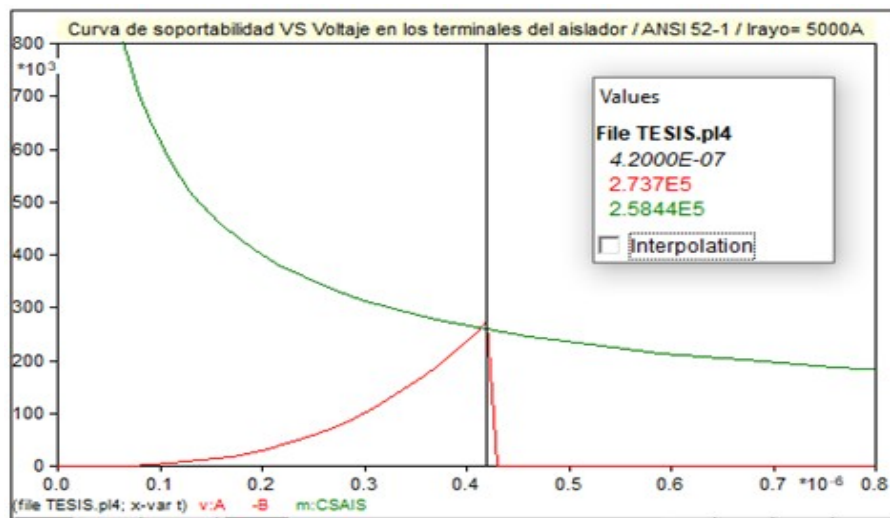


Figura 5.7: Aislador Ansi 52-1 . Prueba de flameo . h = 10 msnm . Autora

j.- Prueba de flameo .Para h = 2500 msnm

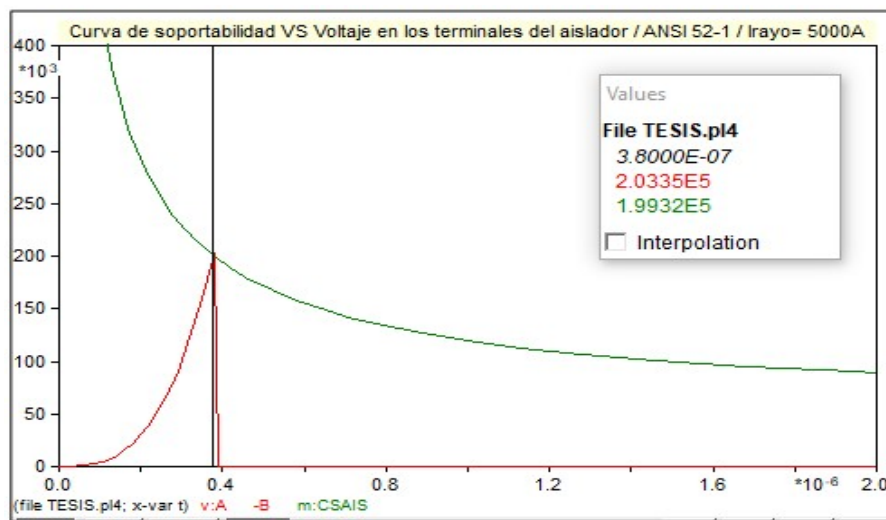


Figura 5.8: Aislador Ansi 52 -1 . Prueba de flameo . h = 2500 msnm . Autora

k.- Corriente tipo rayo de prueba

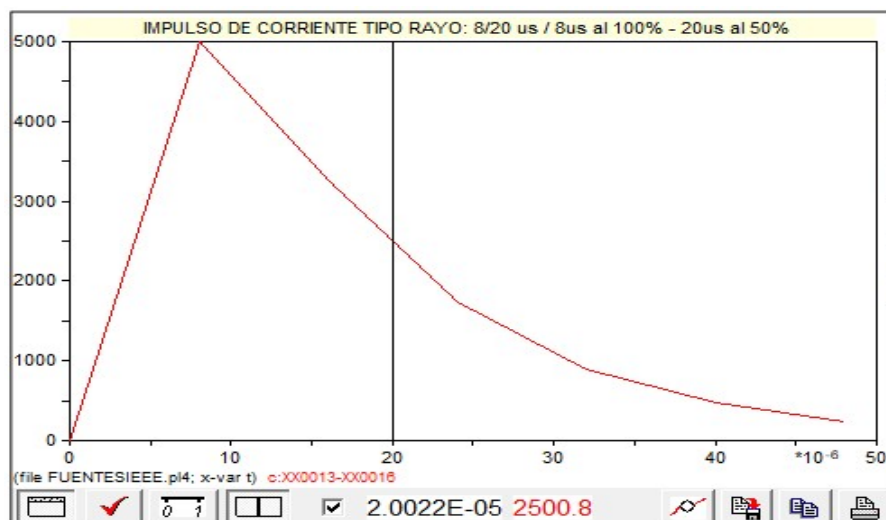


Figura 5.9: Corriente tipo rayo : Io = 5 KA - 8/20 us . Autora

5.4. Cadena de dos aisladores tipo disco clase Ansi 52-1

a.- Presentación :

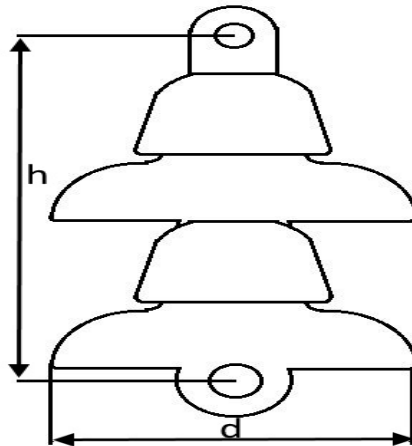


Figura 5.10: Cadena de aisladores ANIS 52-1
Referencia :Catálogo GAMMA - CORONA
Adaptación :Autora

b.- Características :

Fabricante: Gamma clase ANSI (C29.2 - 1992)

Distancia de fuga = 360 mm

Diámetro del disco = 165 mm

Radio del disco = 82,5 mm - 0,0825 m

Altura del aislador = 280 mm - 0,280 m

Material: Porcelana

Resistividad = $7e^{12}(\Omega * m)$

Permitividad relativa = 6

TCF(DRY) = 120 KV

TCF(WET) = 55 KV

TCFrayo (+) = 200 KV

TCFrayo (-) = 190 KV

c.- Cálculo de R y C:

$$R = \left(\frac{\rho}{2 * \pi * Df} \right) * \ln \left(\frac{2 * Df}{r} \right)$$

$$R = \left(\frac{7 * 10^{12}}{2 * \pi * 0,360} \right) * \ln \left(\frac{2 * 0,360}{0,0825} \right) = 6,70 * 10^{12} (\Omega)$$

$$C = \left(\frac{\epsilon_r * Df}{2 * \ln(2 * DF/r)} \right) * \left(\frac{1 * 10^{-9}}{9} \right)$$

$$C = \left(\frac{6 * 180}{2 * \ln(2 * 0,360/0,0825)} \right) * \left(\frac{1 * 10^{-9}}{9} \right) = 5,53 * 10^{-11} (F)$$

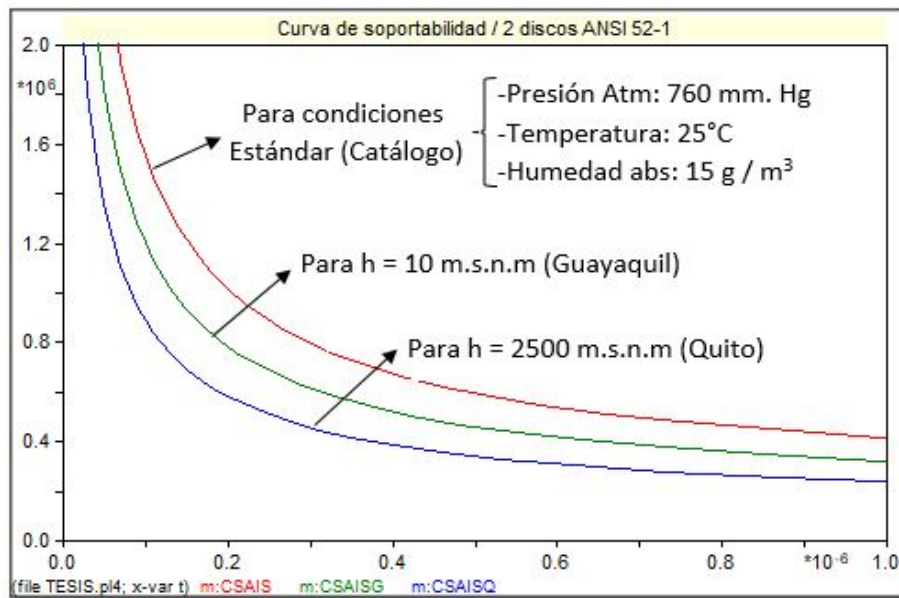
d.- Curva de soportabilidad :

Figura 5.11: Curvas de soportabilidad para una cadena de dos aisladores tipo disco . Clase Ansi 52-1 . Autora

e.- Módulo de pruebas

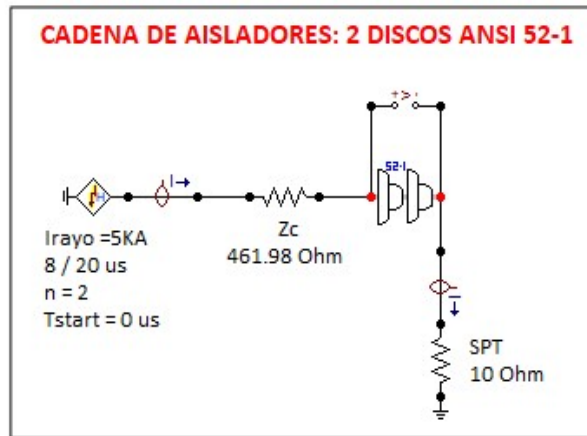


Figura 5.12: Módulo de pruebas . Cadena de dos discos Ansi 52-1 . Autora

f.- Prueba de flameo .Para h = 10 msnm

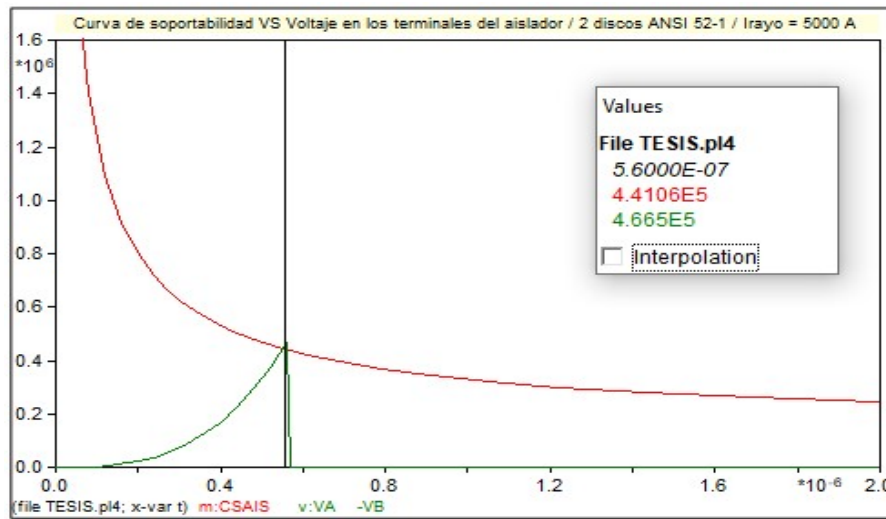


Figura 5.13: Flameo de una cadena de dos discos Ansi 52-1 . h = 10 msnm .

Autora

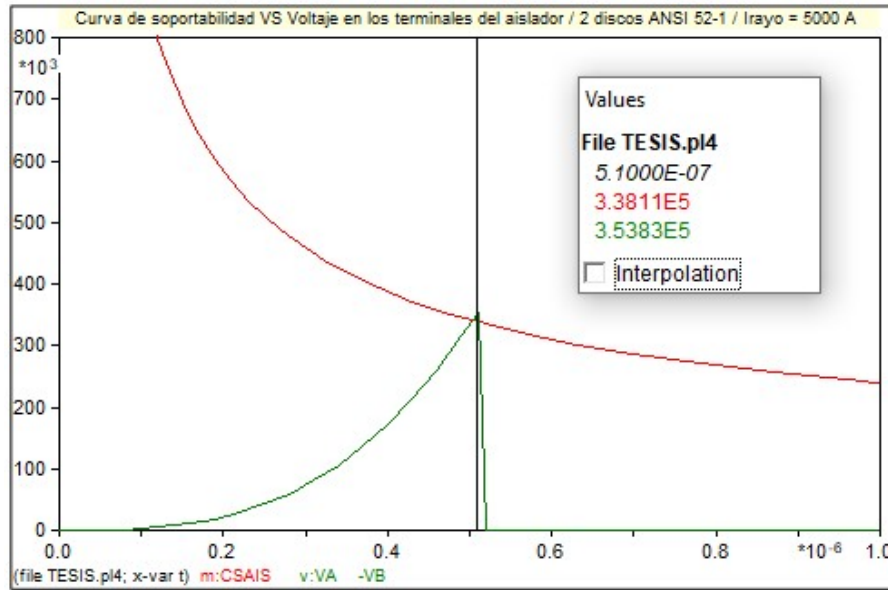
g.- Prueba de flameo .Para h = 2500 msnm

Figura 5.14: Flameo de una cadena de dos discos . h = 2500 msnm . Autora

En la figura 5.14 , se observa : $T_f = 0,51 \text{ us}$ / $V_f = 338,1 \text{ KV}$
 De acuerdo a la ecuaciones 5.3 y 5.4 :

$$V_{sop_{corr}} = V_{sop_{st}} * \frac{Fa^m * Fll}{FH}$$

$$V_{sop_{st}} = V_{sop_{corr}} * \frac{FH}{Fa^m * Fll} = \left(400 + \frac{710}{t^{0,75}} \right) * d$$

Para ($m = 0,5$ - aislador estandar) , $m = 0,8$ - aisl . Fog)

En ATP , ajustamos con $K_{atp} = 1,35$ para generalizar $m = 1$ (Línea 23 . Model)

Por lo tanto :

$$338,1 * \frac{0,98}{0,771 * 0,73} = \left(400 + \frac{710}{t^{0,75}} \right) * 0,28 * 1,35$$

Al resolver : $t = 0,52 \text{ us}$ = Tiempo de flameo

Tiempo de flameo.ATP = $0,51 \text{ us}$.

Error = $0,52 - 0,51 = 0,01 \text{ us}$.

Conclusión : El modelado del aislador es válido .

5.5. Aislador tipo Pin . Clase Ansi 55 - 5

a .- Presentación :

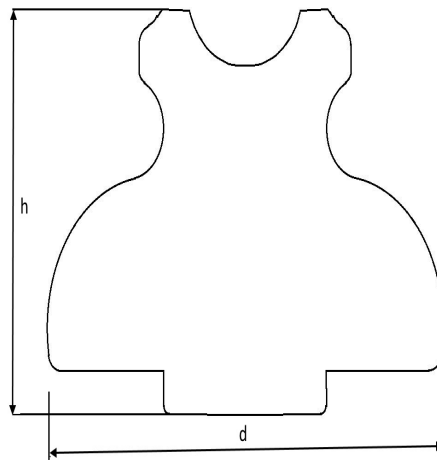


Figura 5.15: Aislador ANSI 55-5
Referencia :Catálogo GAMMA - CORONA
Adaptación :Autora

b .- Características :

Fabricante: Gamma 8214

Distancia de fuga = 305 mm - 0,3 05 m

Diámetro del disco = 178 mm - 0,178 m

Radio del disco = 89 mm - 0,089 m

Altura del aislador = 124 mm - 0,124 m

Material: Porcelana

Resistividad = $7e^{12} (\Omega * m)$

Constante dieléctrica de la porcelana = 6

TCF(DRY) = 85 KV

TCF(WET) = 45 KV

TCFrayo (+) = 140 KV

TCFrayo (-) = 170 KV

c.- Cálculo de R y C:

$$R = \left(\frac{\rho}{2 * \pi * Df} \right) * \ln \left(\frac{2 * Df}{r} \right)$$

$$R = \left(\frac{7 * 10^{12}}{2 * \pi * 0,305} \right) * \ln \left(\frac{2 * 0,305}{0,089} \right) = 7,03 * 10^{12} (\Omega)$$

$$C = \left(\frac{\epsilon_r * Df}{2 * \ln(2 * DF/r)} \right) * \left(\frac{1 * 10^{-9}}{9} \right)$$

$$C = \left(\frac{6 * 0,305}{2 * \ln(2 * 0,305/0,0895)} \right) * \left(\frac{1 * 10^{-9}}{9} \right) = 5,28 * 10^{-11} (F)$$

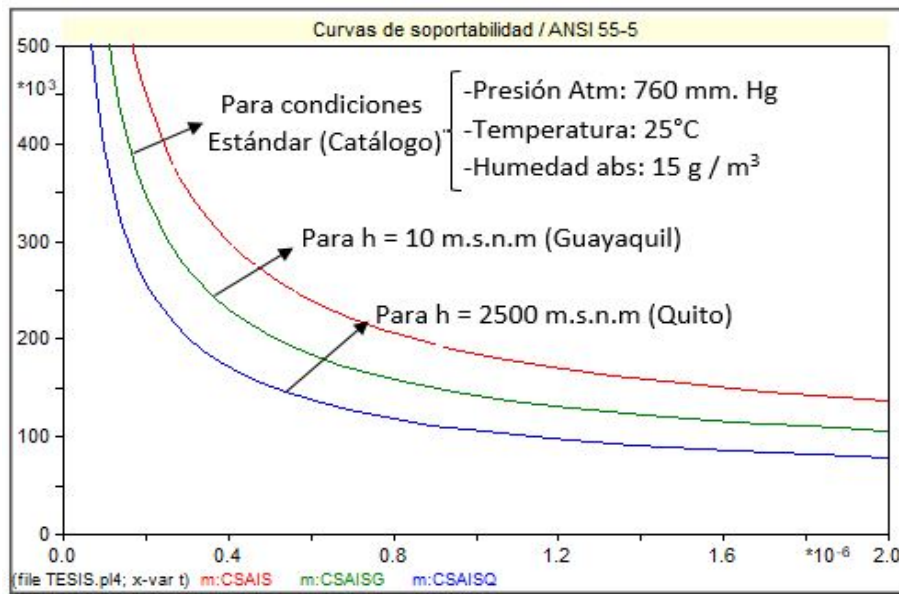
d.- Curva de soportabilidad :

Figura 5.16: Curvas de soportabilidad para un aislador Ansi 55-5 . Autora

e.- Módulo de pruebas

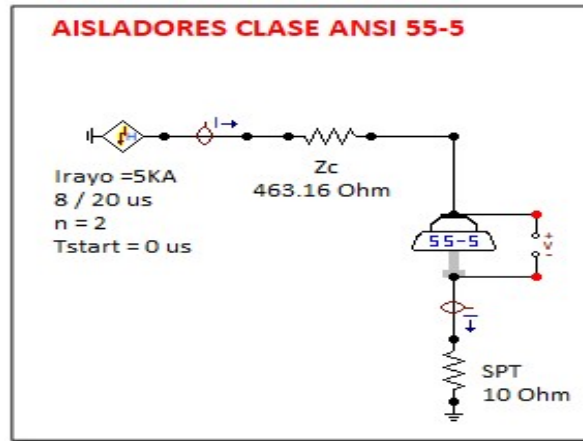


Figura 5.17: Módulo de pruebas en ATP - DRAW . Autora

f.- Prueba de flameo .Para h = 10 msnm

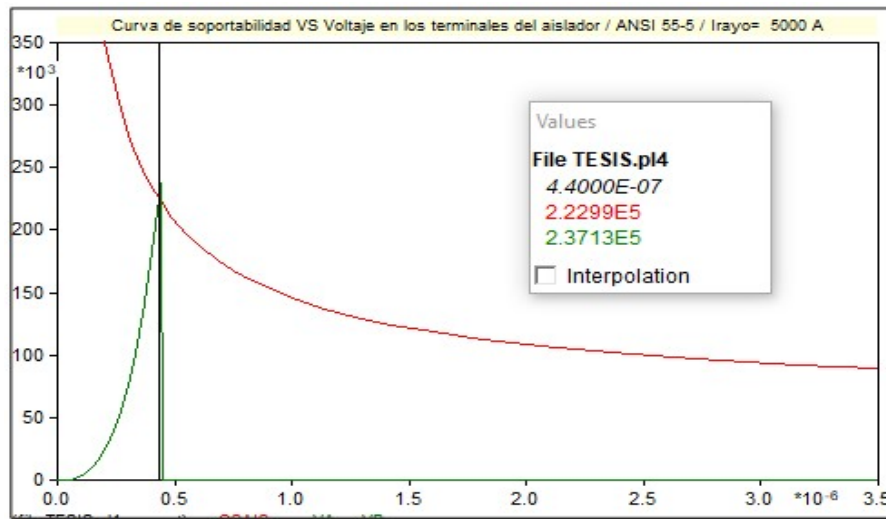


Figura 5.18: Flameo de un aislador tipo pin . Ansi 55-5 . h = 10 msnm . Autora

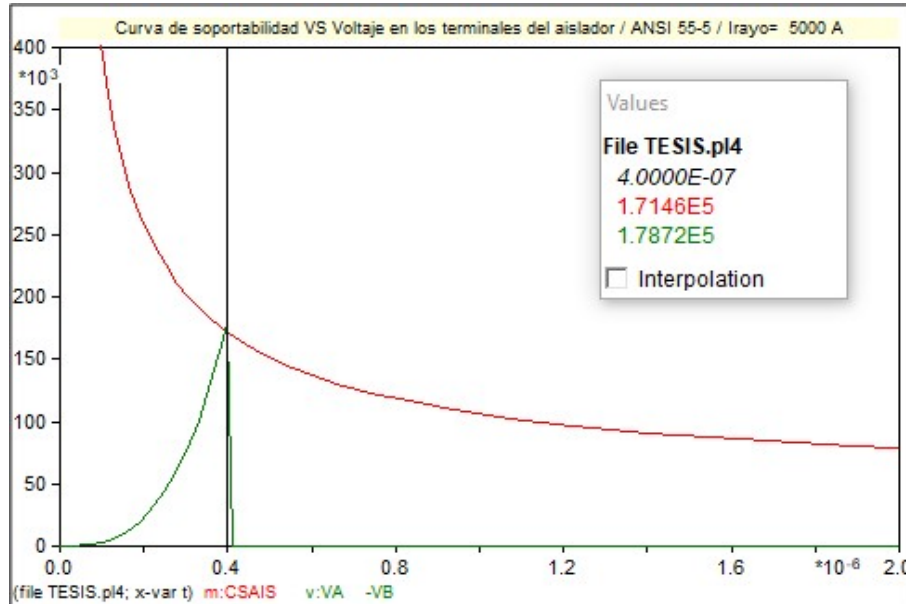
g.- Prueba de flameo .Para h = 2500 msnm

Figura 5.19: Flameo de un aislador tipo Pin . Clase Ansi 55-5 . h = 2500 msnm .
Autora

En la figura 5.19 , se observa : $T_f = 0,40 \text{ us}$ / $V_f = 171,46 \text{ KV}$
De acuerdo a la ecuaciones 5.3 y 5,4 :

$$V_{sop_{st}} = V_{sop_{corr}} * \frac{FH}{Fa^m * Fll} = \left(400 + \frac{710}{t^{0,75}} \right) * d * Katp$$

Para $Katp = 1,35$, $m = 1$

$$171,46 * \frac{0,98}{0,77^1 * 0,73} = \left(400 + \frac{710}{t^{0,75}} \right) * 0,124 * 1,35$$

Al resolver : $t = 0,41 \text{ us}$ = Tiempo de flameo

Tiempo de flameo.ATP = 0,40 us.

Error = 0,41 - 0,40 = 0,01 us .

Conclusión : El modelado del aislador es válido .

5.6. Aislador tipo Doble Pin . Clase Ansi 56 - 1

a .- Presentación :

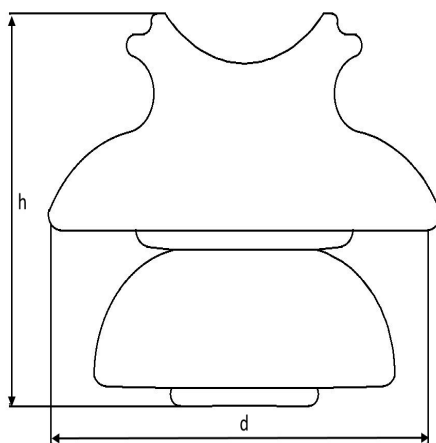


Figura 5.20: Aislador ANSI 56-1
Referencia :Catálogo GAMMA - CORONA
Adaptación :Autora

b .- Características :

Fabricante: Gamma/ 8345 clase ANSI 56-1

Distancia de fuga = 330 mm - 0,330m

Diámetro del disco = 191 mm - 0,191 m

Radio del disco = 95,5 mm - 0,0995 m

Altura del aislador = 146 mm - 0,146 m

Material: Porcelana

Resistividad = $7e^{12}(\Omega * m)$

Permitividad relativa = 6

TCF(DRY) = 95 KV

TCF(WET) = 60 KV

TCFrayo (+) = 150 KV

TCFrayo (-) = 190 KV

c.- Cálculo de R y C:

$$R = \left(\frac{\rho}{2 * \pi * Df} \right) * \ln \left(\frac{2 * Df}{r} \right)$$

$$R = \left(\frac{7 * 10^{12}}{2 * \pi * 0,330} \right) * \ln \left(\frac{2 * 0,330}{0,0995} \right) = 6,53 * 10^{12} (\Omega)$$

$$C = \left(\frac{\epsilon_r * Df}{2 * \ln(2 * DF/r)} \right) * \left(\frac{1 * 10^{-9}}{9} \right)$$

$$C = \left(\frac{6 * 0,330}{2 * \ln(2 * 0,330/0,0995)} \right) * \left(\frac{1 * 10^{-9}}{9} \right) = 5,6903 * 10^{-11} (F)$$

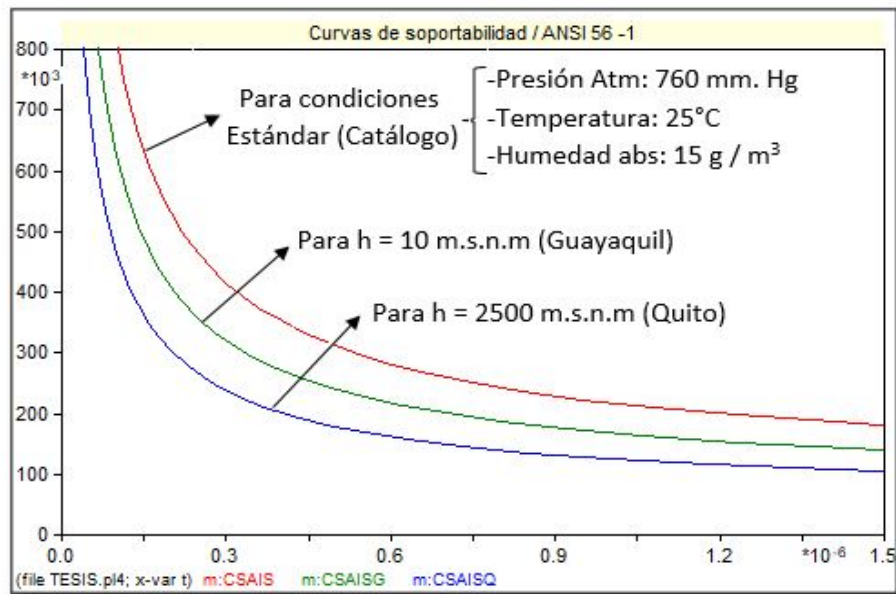
d.- Curva de soportabilidad :

Figura 5.21: Curvas de soportabilidad para un Aislador tipo doble pin .
Clase Ansi 56-1 . Autora

e.- Módulo de pruebas

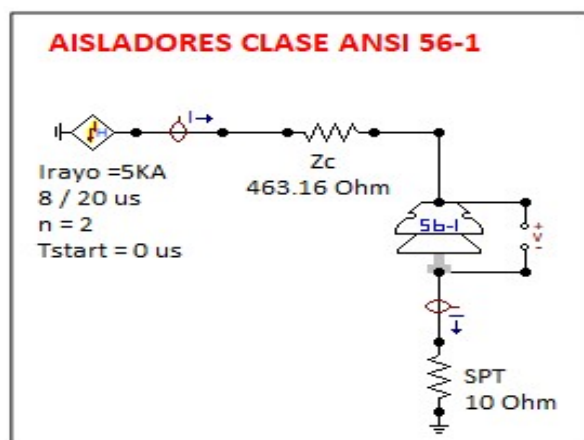


Figura 5.22: Módulo de pruebas . Ansi 56 - 1 . ATP DRAW . Autora

f.- Prueba de flameo .Para h = 10 msnm

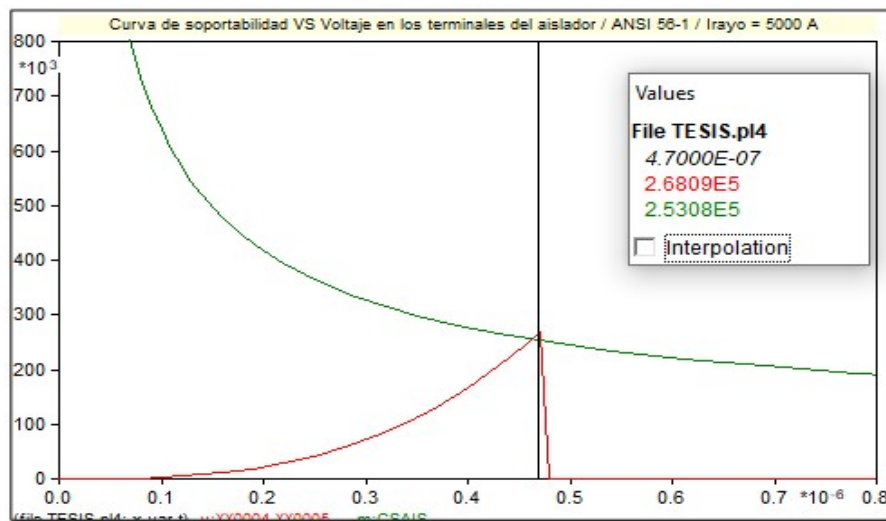


Figura 5.23: Flameo de un aislador Ansi 56-1 . h = 10 msnm . Autora

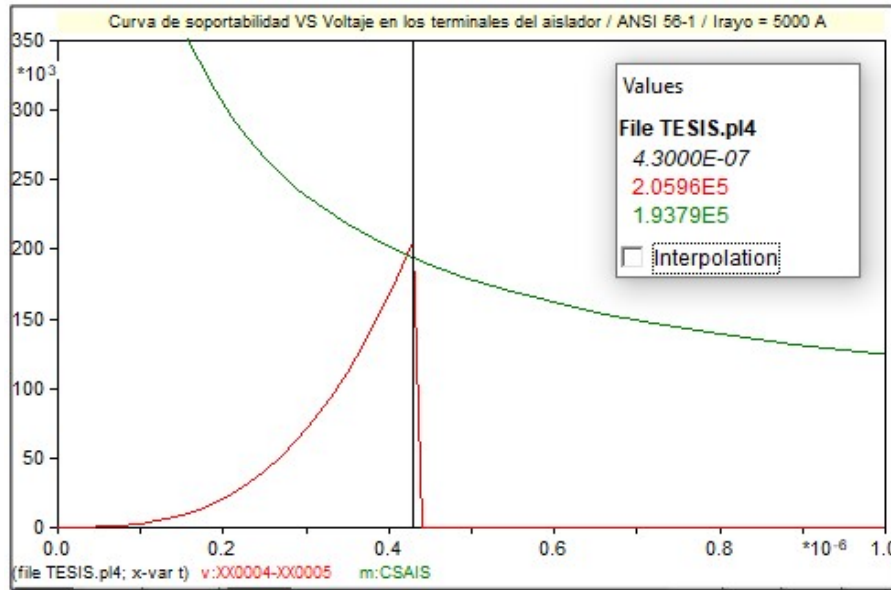
g.- Prueba de flameo .Para h = 2500 msnm

Figura 5.24: Flameo de un aislador Ansi 56-1 para h = 2500 msnm . Autora

En la figura 5.24 , se observa : $T_f = 0,43 \text{ us}$ / $V_f = 193,79 \text{ KV}$

De acuerdo a la ecuaciones 5.3 y 5,4 :

$$V_{sop_{st}} = V_{sop_{corr}} * \frac{FH}{Fa^m * Fll} = \left(400 + \frac{710}{t^{0,75}}\right) * d * Katp$$

Para $Katp = 1,35$, $m = 1$

$$193,79 * \frac{0,98}{0,77^1 * 0,73} = \left(400 + \frac{710}{t^{0,75}}\right) * 0,146 * 1,35$$

Al resolver : $t = 0,44 \text{ us}$ = Tiempo de flameo

Tiempo de flameo.ATP = 0,43 us.

Error = 0,44 - 0,43 = 0,01 us .

Conclusión : El modelado del aislador es válido .

5.7. Cadena de cinco aisladores tipo disco Clase Ansi 52-3

a.- Presentación :

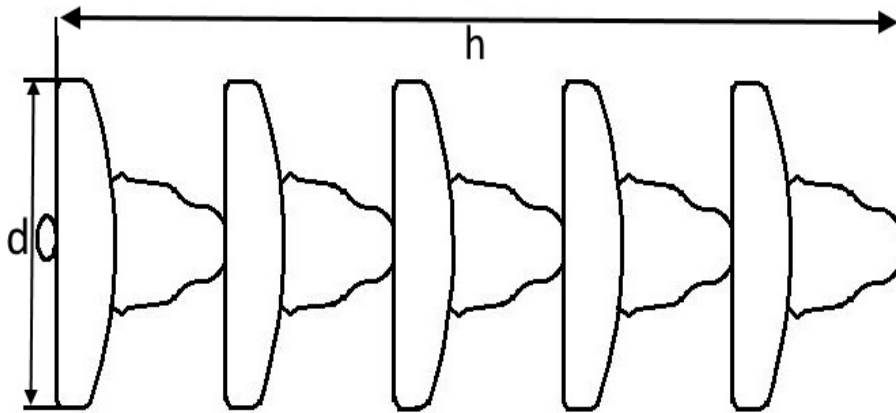


Figura 5.25: Cadena de aisladores ANSI 52-3
Referencia :Catálogo GAMMA - CORONA
Adaptación :Autora

b.- Características :

Fabricante: Gamma

Distancia de fuga = $292 * 5 = 1460$ mm - 1,46 m

Diámetro del disco = 255 mm - 0,255 m

Radio del disco = 127,5 mm - 0,1275 m

Altura del aislador = $146 \text{ mm} * 5 = 730$ mm - 0,730 m

Material: Porcelana

Resistividad = $7e^{12}(\Omega * m)$

Constante dielectrica de la porcelana = 6

TCF(DRY) = 325 KV

TCF(WET) = 215 KV

TCFrayo (+) = 500 KV

TCFrayo (-) = 510 KV

c.- Cálculo de R y C:

$$R = \left(\frac{\rho}{2 * \pi * Df} \right) * \ln \left(\frac{2 * Df}{r} \right)$$

$$R = \left(\frac{7 * 10^{12}}{2 * \pi * 1,46} \right) * \ln \left(\frac{2 * 1,46}{0,1275} \right) = 2,39 * 10^{12} (\Omega)$$

$$C = \left(\frac{\epsilon_r * Df}{2 * \ln(2 * DF/r)} \right) * \left(\frac{1 * 10^{-9}}{9} \right)$$

$$C = \left(\frac{6 * 1,46}{2 * \ln(2 * 1,46/0,1275)} \right) * \left(\frac{1 * 10^{-9}}{9} \right) = 1,55 * 10^{-10} (F)$$

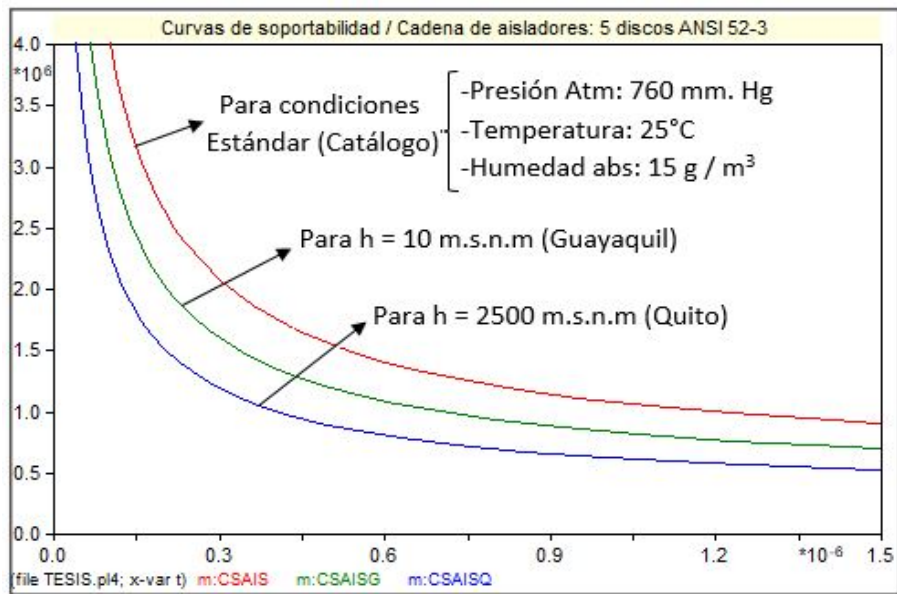
d.- Curva de soportabilidad:

Figura 5.26: Curvas de soportabilidad para 5 discos Ansi 52-3 . Autora

e.- Módulo de pruebas



Figura 5.27: Módulo de pruebas . Cinco discos Ansi 52 - 3 . Autora

f.- Prueba de flameo . Para h = 10 msnm

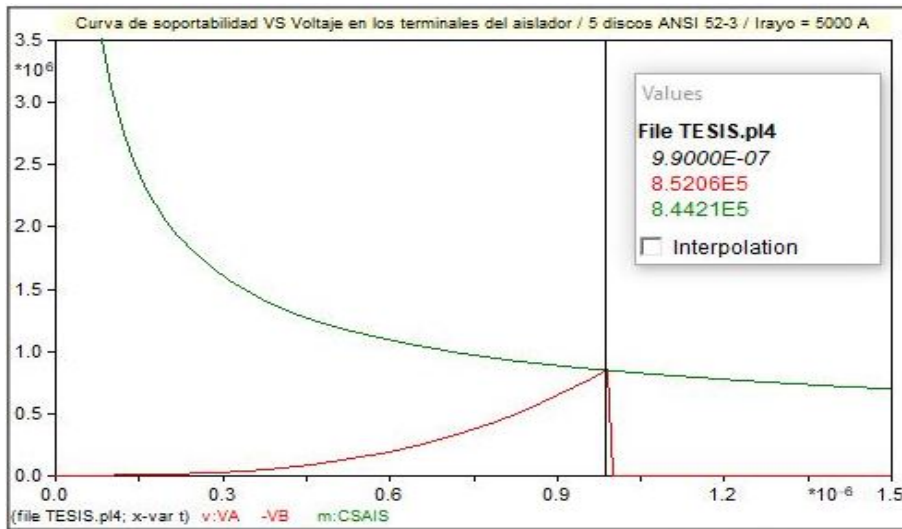


Figura 5.28: Flameo de una cadena de cinco discos . Ansi 52-3 . h = 10 msnm .
Autora

g.- Prueba de flameo .Para h = 2500 msnm

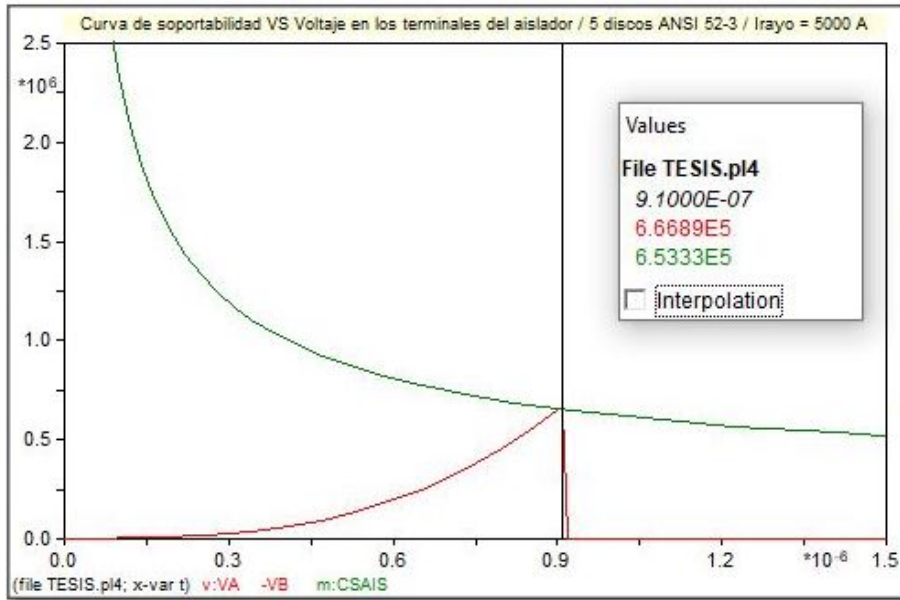


Figura 5.29: Flameo de una cadena de cinco discos . Ansi 52-3 . h = 2500 msnm. Autora

En la figura 5.29 , se observa : $T_f = 0,91 \text{ us}$ / $V_f = 653,3 \text{ KV}$
 De acuerdo a la ecuaciones 5.3 y 5,4 :

$$V_{sop_{st}} = V_{sop_{corr}} * \frac{FH}{Fa^m * Fll} = \left(400 + \frac{710}{t^{0,75}} \right) * d * Katp$$

Para $Katp = 1,35$, $m = 1$

$$653,3 * \frac{0,98}{0,77^1 * 0,73} = \left(400 + \frac{710}{t^{0,75}} \right) * 0,730 * 1,35$$

Al resolver : $t = 0,92 \text{ us}$ = Tiempo de flameo

Tiempo de flameo.ATP = $0,91 \text{ us}$.

Error = $0,92 - 0,91 = 0,01 \text{ us}$.

Conclusión : El modelado del aislador es válido .

5.8. Aislador tipo Line - Post . Clase Ansi 57-6

a.- Presentación :

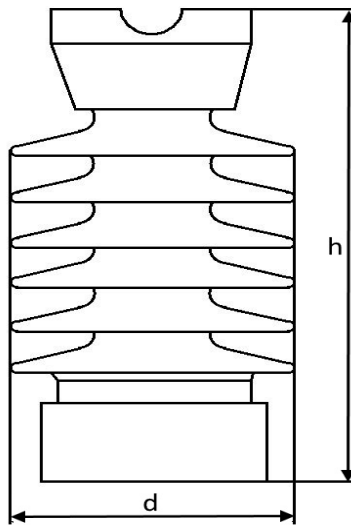


Figura 5.30: Aislador Line Post ANSI 57-6
Referencia :Catálogo GAMMA - CORONA
Adaptación :Autora

b.- Características :

Fabricante: Hivolt

Distancia de fuga = 1346 mm - 1,34 m

Diámetro del disco = 185 mm - 0,185 m

Radio del disco = 92,5 mm - 0,925 m

Altura del aislador = 584,2 mm - 0,5842 m

Material: Porcelana

Resistividad = $7e^{12}(\Omega * m)$

Constante dielectrica de la porcelana = 6

TCF(DRY) = 200 KV

TCF(WET) = 170 KV

TCFrayo (+) = 330 KV

TCFrayo (-) = 425 KV

c.- Cálculo de R y C:

$$R = \left(\frac{\rho}{2 * \pi * Df} \right) * \ln \left(\frac{2 * Df}{r} \right)$$

$$R = \left(\frac{7 * 10^{12}}{2 * \pi * 1,34} \right) * \ln \left(\frac{2 * 1,34}{0,925} \right) = 8,84 * 10^{11} (\Omega)$$

$$C = \left(\frac{\epsilon_r * Df}{2 * \ln(2 * DF/r)} \right) * \left(\frac{1 * 10^{-9}}{9} \right)$$

$$C = \left(\frac{6 * 1,34}{2 * \ln(2 * 1,34/0,925)} \right) * \left(\frac{1 * 10^{-9}}{9} \right) = 4,20 * 10^{-10} (F)$$

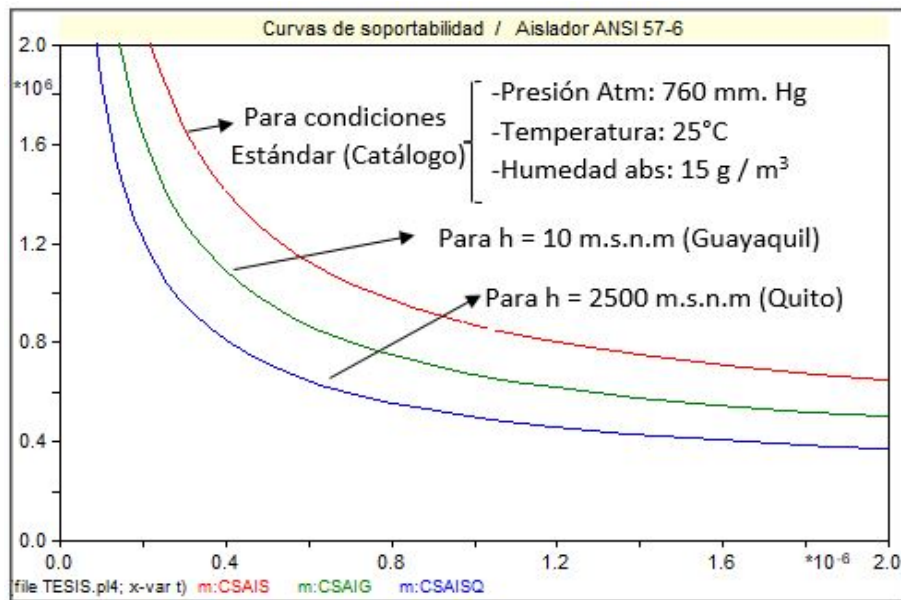
d.- Curva de soportabilidad :

Figura 5.31: Curvas de soportabilidad . Aislador Line - post . Ansi 57-6 . Autora

e.- Módulo de pruebas

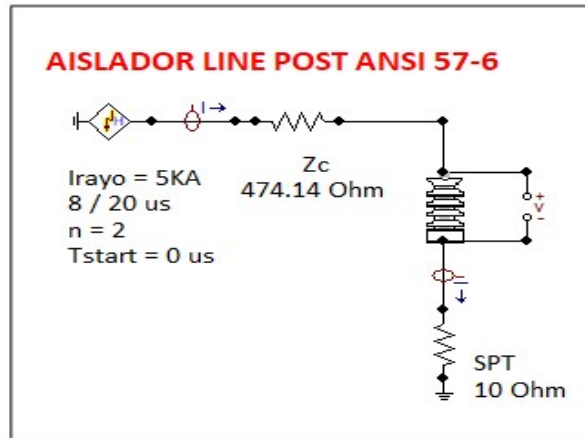


Figura 5.32: Módulo de pruebas . Aislador Line - Post . Ansi 57 - 6 . Autora

f.- Prueba de flameo .Para h = 10 msnm

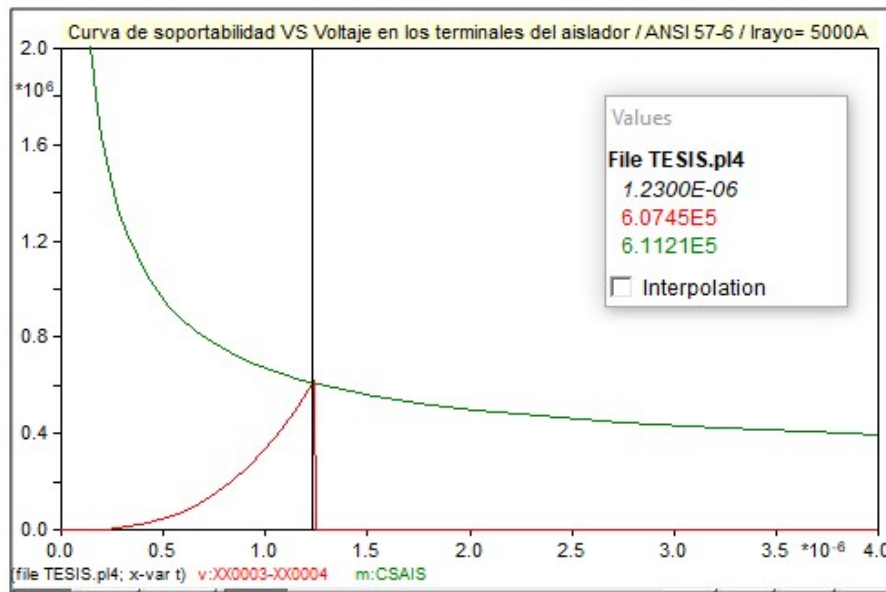


Figura 5.33: Flameo de aislador Line - Post . Ansi 57-6 . h = 10 msnm . Autora

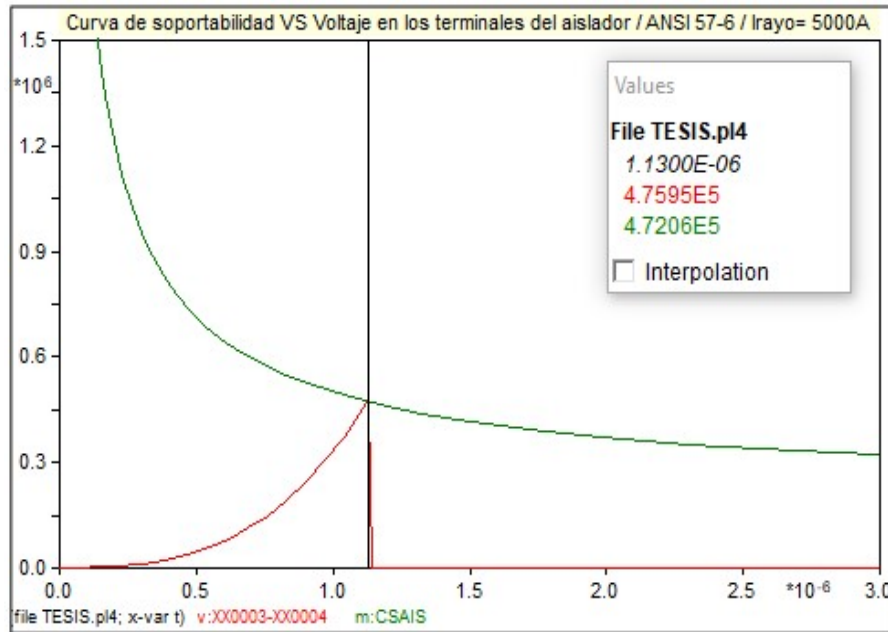
g.- Prueba de flameo .Para h = 2500 msnm

Figura 5.34: Flameo de aislador Line - Post . Ansi 57-6 . h = 2500 msnm . Autora

En la figura 5.34 , se observa : $T_f = 1,13 \text{ us}$ / $V_f = 472 \text{ KV}$
 De acuerdo a la ecuaciones 5.3 y 5,4 :

$$V_{sop_{st}} = V_{sop_{corr}} * \frac{FH}{Fa^m * Fll} = \left(400 + \frac{710}{t^{0,75}} \right) * d * Katp$$

Para $Katp = 1,35$, $m = 1$

$$472 * \frac{0,98}{0,771 * 0,73} = \left(400 + \frac{710}{t^{0,75}} \right) * 0,5842 * 1,35$$

Al resolver : $t = 1,14 \text{ us}$ = Tiempo de flameo

Tiempo de flameo.ATP = 1,13 us.

Error = 1,14 - 1,13 = 0,01 us .

Conclusión : El modelado del aislador es válido .

5.9. Aislador tipo Polímero clase Ansi C29.13 . DS-69

a.- Presentación :

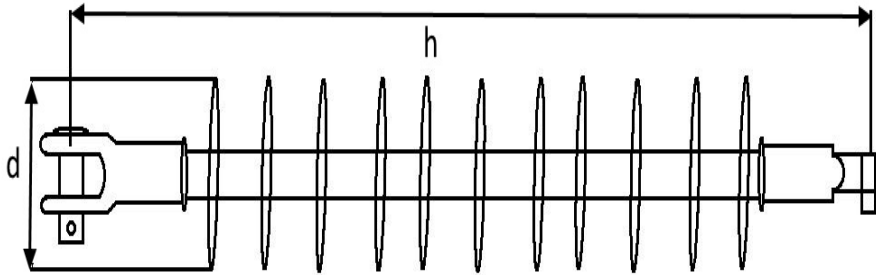


Figura 5.35: Aislador Clase C29.13 tipo DS-69
 Referencia :Catálogo GAMMA - CORONA
 Adaptación :Autora

b.- Características :

Fabricante: Gamma / Catálogo PS0690011

Distancia de fuga = 1426 mm - 1,426 m

Diámetro del disco = 95 mm - 0,095 m

Radio del disco = 47,5 mm - 0,0475 m

Altura del aislador = 781 mm - 0,781 m

Material: Polímero

Resistividad = $1e^{11} (\Omega * m)$

Constante dieléctrica de la porcelana = 3,6

TCF(DRY) = 251 KV

TCF(WET) = 204 KV

TCF.rayo (+) = 360 KV

TCF.rayo (-) = 360 KV

c.- Cálculo de R y C:

$$R = \left(\frac{\rho}{2 * \pi * Df} \right) * \ln \left(\frac{2 * Df}{r} \right)$$

$$R = \left(\frac{1 \times 10^{11}}{2 * \pi * 1,426} \right) * \ln \left(\frac{2 * 1,426}{0,0475} \right) = 4,57 \times 10^{10} (\Omega)$$

$$C = \left(\frac{\epsilon_r * Df}{2 * \ln(2 * DF/r)} \right) * \left(\frac{1 \times 10^{-9}}{9} \right)$$

$$C = \left(\frac{3,6 * 1,426}{2 * \ln(2 * 1,426/0,0475)} \right) * \left(\frac{1 \times 10^{-9}}{9} \right) = 6,9645 \times 10^{-11} (F)$$

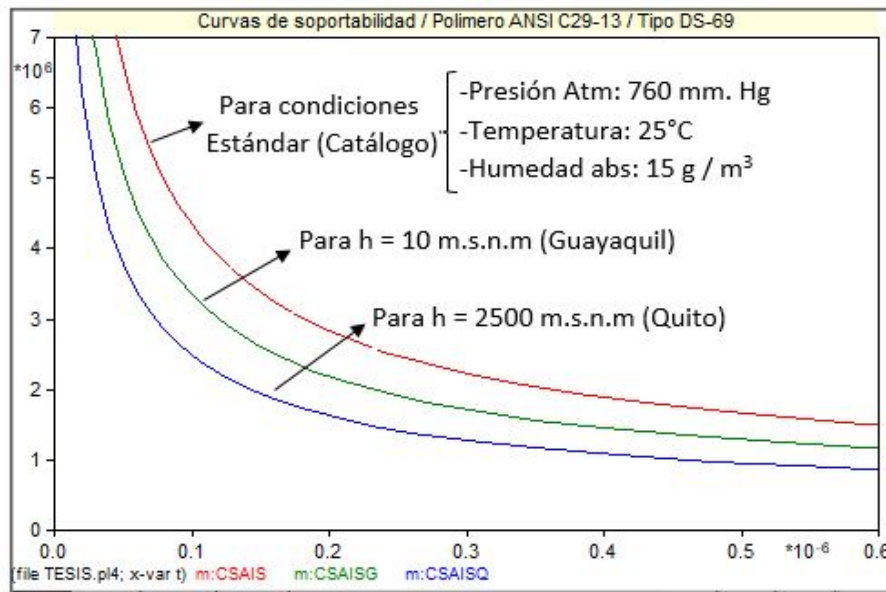
d.- Curva de soportabilidad:

Figura 5.36: Curvas de soportabilidad . Aislador polímero . Ansi C29.13 . Autora

e.- Módulo de pruebas

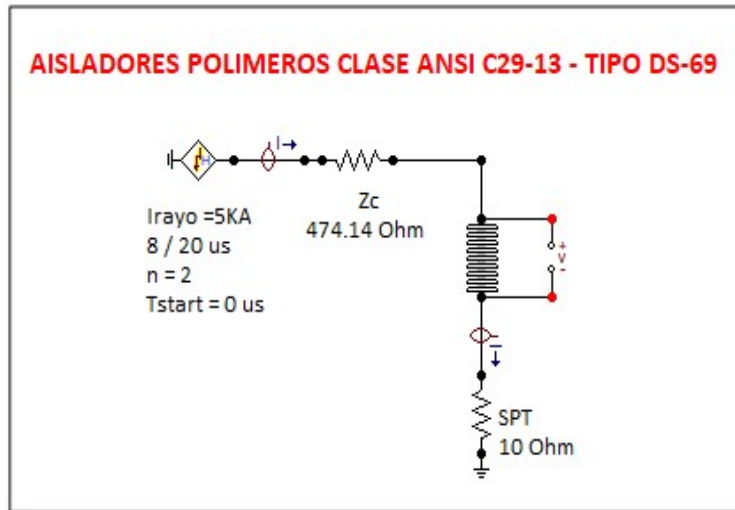


Figura 5.37: Módulo de pruebas . Aislador Polímero Ansi C29.13 . Autora

f.- Prueba de flameo .Para h = 10 msnm

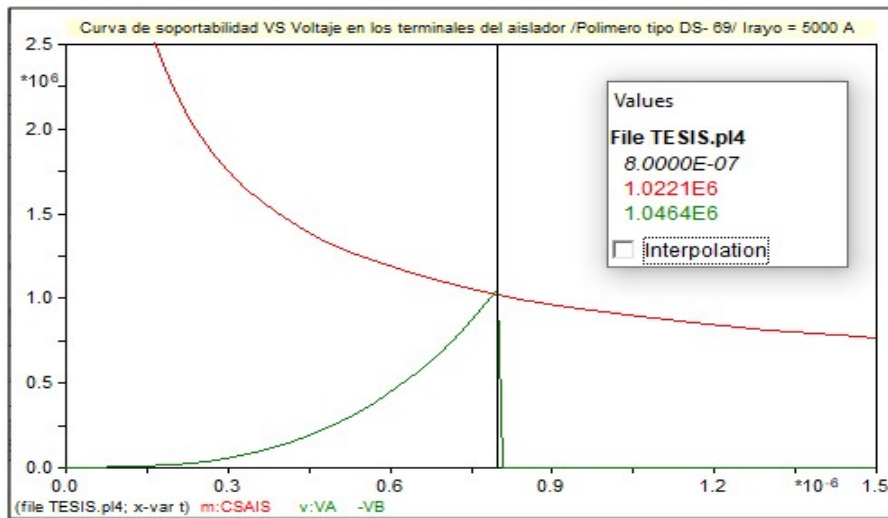


Figura 5.38: Flameo de un aislador polímero Ansi C29 .13 . h = 10 msnm .
 Autora

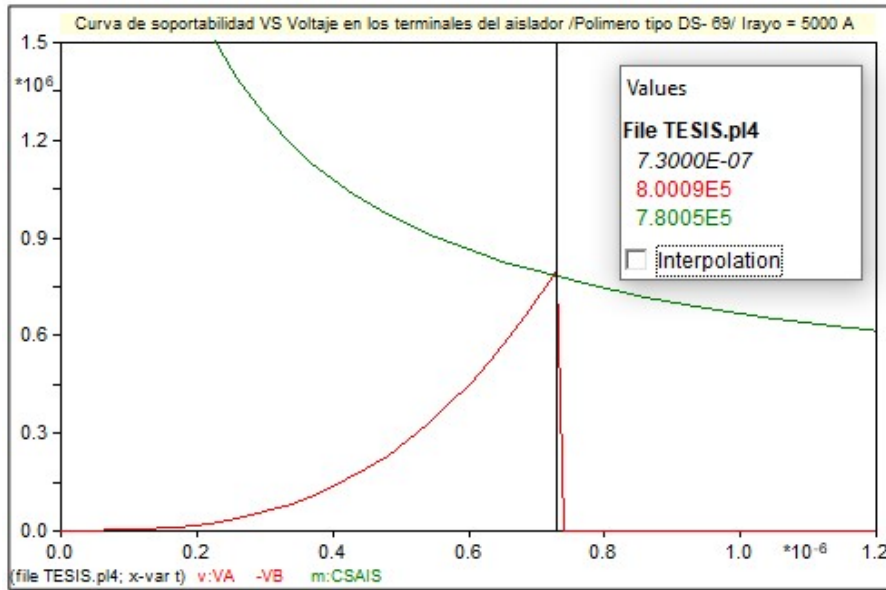
g.- Prueba de flameo .Para h = 2500 msnm

Figura 5.39: Flameo de un aislador polímero Ansi C29 .13 . h = 2500 msnm .
Autora

En la figura 5.39 , se observa : $T_f = 0,73 \text{ us}$ / $V_f = 780 \text{ KV}$
De acuerdo a la ecuaciones 5.3 y 5,4 :

$$V_{sop_{st}} = V_{sop_{corr}} * \frac{FH}{Fa^m * Fll} = \left(400 + \frac{710}{t^{0,75}} \right) * d * Katp$$

Para $Katp = 1,35$, $m = 1$

$$780 * \frac{0,98}{0,771 * 0,73} = \left(400 + \frac{710}{t^{0,75}} \right) * 0,781 * 1,35$$

Al resolver : $t = 0,74 \text{ us} =$ Tiempo de flameo

Tiempo de flameo.ATP = $0,73 \text{ us}$.

Error = $0,74 - 0,73 = 0,01 \text{ us}$.

Conclusión : El modelado del aislador es válido .

5.10. Flameo en una estructura de 13,8 KV

En la figura 5.40 , una estructura para 13,8 KV , utiliza como aisladores 2 cadenas de discos Ansi 52-1 , con sistemas de puesta a tierra de 20Ω cada uno , con una impedancia característica de 462Ω , velocidad de propagación de 300 m / us , distancia desde el punto de impacto del rayo 360 m , se considera una fuente tipo rayo de amplitud 5 KA , $8 / 20 \text{ us}$, para una estructura ubicada a una altura $h = 10 \text{ msnm}$, el nivel de aislamiento básico al impulso tipo rayo requerido por la línea ($\text{BIL} = 110 \text{ KV}$) , con una Tensión crítica de flameo ($\text{TCFL} = 148,32 \text{ KV}$) , para un nivel de contaminación de ($\text{Fc} = 40 \text{ mm / KV}$) la distancia de fuga necesaria es ($\text{Df.L} = 334,63 \text{ mm}$) .

La cadena de aisladores seleccionados (2 discos Ansi 52-1) presentan una distancia de fuga ($\text{Df.cad} = 356 \text{ mm}$) y una Tensión crítica de flameo ($\text{TCF.st} = 190 \text{ KV}$) , valores superiores a los requeridos por la línea , lo cual cumple con la metodología planteada para la correcta selección del aislamiento .

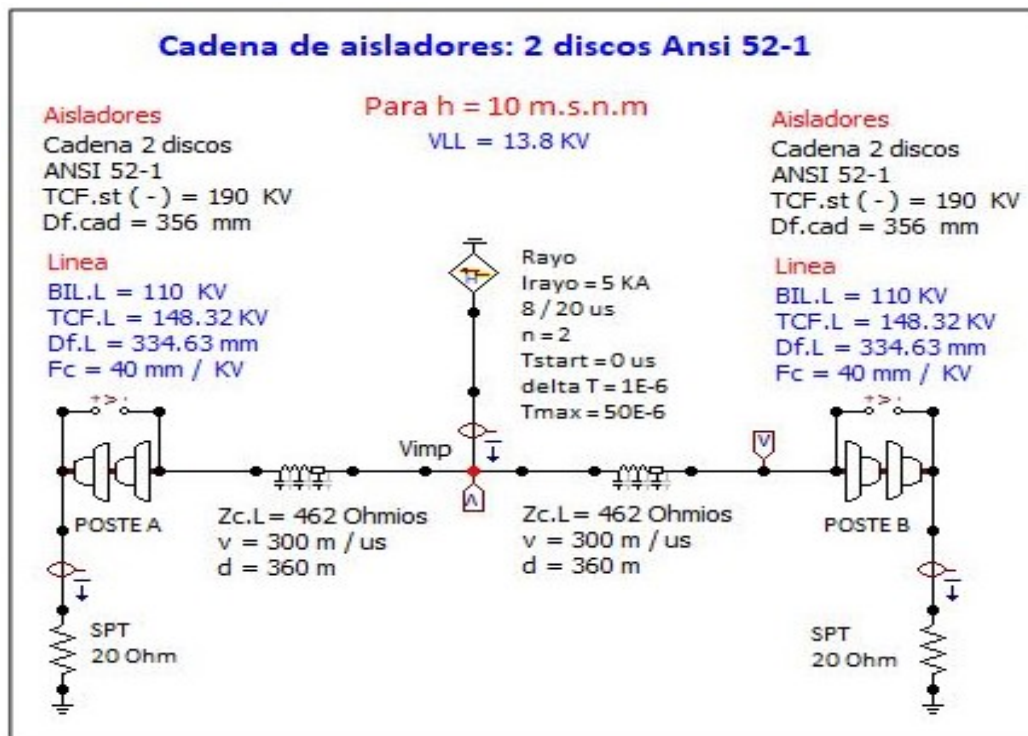


Figura 5.40: Módulo de pruebas para flameo en 13,8 KV . Autora

Voltaje de flameo :

En las figuras 5.41 y 5.42 , las curvas de soportabilidad de las cadenas de aisladores colocadas en los postes A y B , si el impacto del rayo sucede a una distancia de 360 m de cada poste , el tiempo de viaje del voltaje y corriente a través de la línea es :

Tiempo de viaje = $T_v = e / v = 360 \text{ m} / 300 \text{ m} / \mu\text{s} = 1,2 \text{ us}$

En ATP se observa que el voltaje llega al aislador en aproximadamente :

Tiempo de llegada = $T_{ll} = 1,3 \text{ us}$

Comparado con $T_v = 1,2 \text{ us}$. Error = $T_{ll} - T_v = 1,3 - 1,2 = 0,1 \text{ us}$

Conceptualmente debe cumplirse : $T_{ll} = T_v$

Pero un error de 0,1 us demuestra que el análisis es correcto .

Cuando el voltaje llega al aislador en $T_{ll} = 1,3 \text{ us}$, empieza a crecer (empieza a formarse el frente de onda del pulso) y sube hasta el voltaje de flameo (V_f) que es el punto donde corta con la curva de soportabilidad , que por precisión en el registro de este voltaje aparece en ATP los siguientes valores :

V_f (onda viajera) = 229,6 KV

V_f (curva de soportabilidad) = 225,8 KV

Conceptualmente : V_f (onda) = V_f (soportabilidad)

Para referencia de análisis registramos V_f (sopor.) = 225,8 KV .

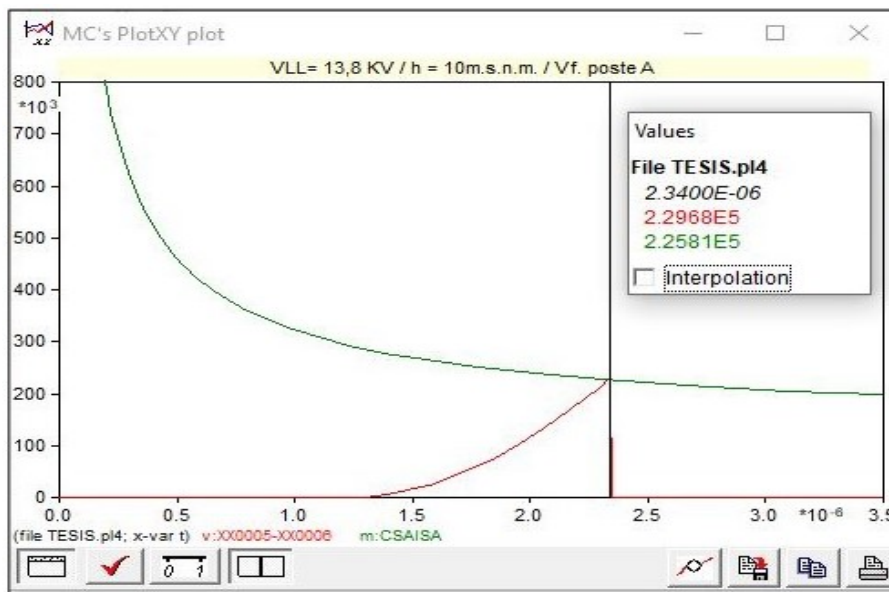


Figura 5.41: Flameo del aislador en el poste A . Autora

Cuando el voltaje (onda viajera) llega , crece y supera el nivel de soportabilidad entonces ocurre el flameo en el aislador , esto significa que el aislador se vuelve un conductor y la diferencia de potencial entre sus terminales cae a cero , como lo indican la figura 5.41 y 5.42 .

En este documento no se analiza que tipo de flameo sucede (por ionización del aire , superficial por contaminación o por descargas parciales internas) , se considera que existe flameo porque la diferencia de potencial (voltaje entre los terminales del aislador) supera el nivel de soportabilidad del mismo .

Frente de onda :

En el registro tomado de ATP (figura 5.41) , se observa :

Tiempo de flameo : $T_f = 2,34 \text{ us}$

$T_f = T_{ll} + T_{\text{crecimiento}}$

$T_{\text{crecimiento}} = \text{Tiempo de crecimiento del voltaje}$

$T_{ll} = \text{Tiempo de llegada} = \text{Tiempo de viaje del pulso}$

Por lo tanto :

$T_{\text{crecimiento}} = T_f - T_{ll} = 2,34 - 1,3 = 1,04 \text{ us}$

Si consideramos que el voltaje que llega al aislador tiene un frente de onda tipo rampa (forma lineal) y tarda 1,04 us hasta llegar a 225,8 KV , la pendiente de esta rampa es :

$\tan(\theta) = V_f / T_{\text{crecimiento}} = 225,8 \text{ KV} / 1,04 \text{ us} = 217,1 \text{ KV} / \text{us}$

Esto significa que el voltaje crece a razón de 217,1 KV por cada micro segundo .

Finalmente a esta razón de cambio se llama FRENTE DE ONDA (S) :

Por lo tanto :

$S = \tan(\theta) = 217,1 \text{ KV} / \text{us} .$

Tiempo de flameo en ATP :

$T_{f.ATP} = \text{Tiempo de flameo} : \text{Tiempo medido desde el impacto del rayo hasta cuando ocurre el flameo en el aislador} .$

$T_{f.ATP} = 2,34 \text{ us} . (\text{Figura 5.41})$

$T_{f.ATP} = T_{v.ATP} + T_{\text{crecimiento.ATP}}$

$T_{v.ATP} = \text{Teórico} = \text{espacio} / \text{velocidad} = 360 \text{ m} / 300 \text{ m} / \text{us} = 1,2 \text{ us}$

$T_{v.ATP} = 1,3 \text{ us}$

$T_{\text{crecimiento.ATP}} = T_{f.ATP} - T_{v.ATP} = 2,34 - 1,3 = 1,04 \text{ us} .$

$T_{v.ATP} = T_{\text{llegada}} (T_{ll})$

En la figura 5.42 , el comportamiento del aislador colocado en el poste B muestra idénticas características a las del aislador en el poste A , esto obedece a las condiciones planteadas para la prueba , descarga atmosférica a mitad de la línea (360 m) y sistemas de puesta a tierra iguales en los dos postes (20Ω) .

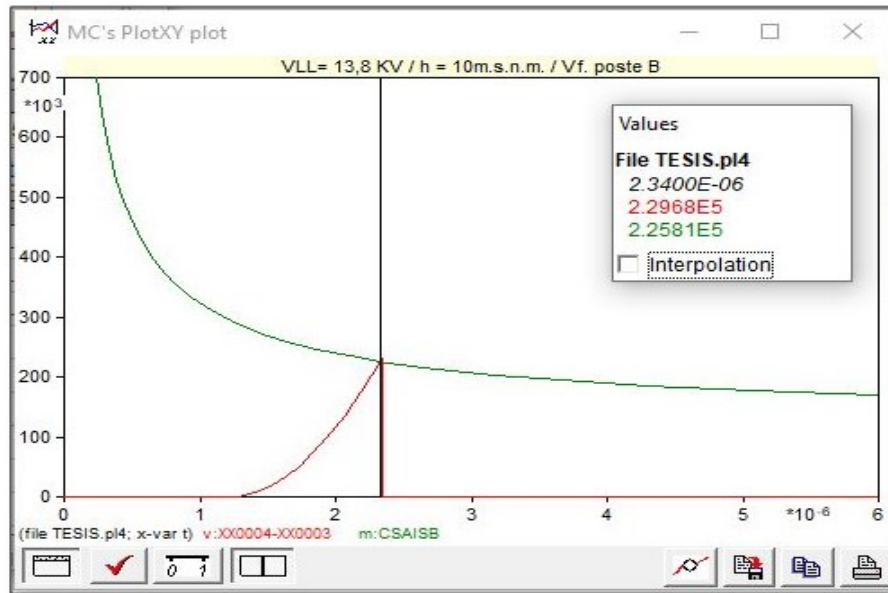


Figura 5.42: Flameo del aislador en el poste B . Autora

Voltaje de impacto :

En la figura 5.43 , se observa :

$$V_{imp.ATP} = 891,99 = 892 \text{ KV}$$

$$V_{imp. Teórico} = I_0 * Z_c / 2 = 5000 \text{ A} * 462 \Omega / 2 = 1,16 \text{ MV} .$$

El voltaje en el punto de impacto no alcanza hasta su valor teórico (1,16 MV) porque el voltaje es una onda viajera que se propaga , llega al aislador , crece , supera la soportabilidad y flamea el aislador (se produce la descarga a tierra) sobre un sistema de puesta a tierra de 20Ω . Por lo tanto :

El voltaje en el punto de impacto alcanza su amplitud máxima en 892 KV y no llega a su amplitud teórica de 1,16 MV por el flameo que ocurre en los aisladores y los sistemas de puesta a tierra .

Considerando que el cálculo teórico del voltaje de impacto considera únicamente la resistencia dada por la impedancia característica (Z_c) que es función de la altura y el radio del conductor .

Una vez generado el pico máximo del voltaje de impacto este empieza a decrecer rápidamente hasta llegar a cero , según lo indica la figura 5.43 .

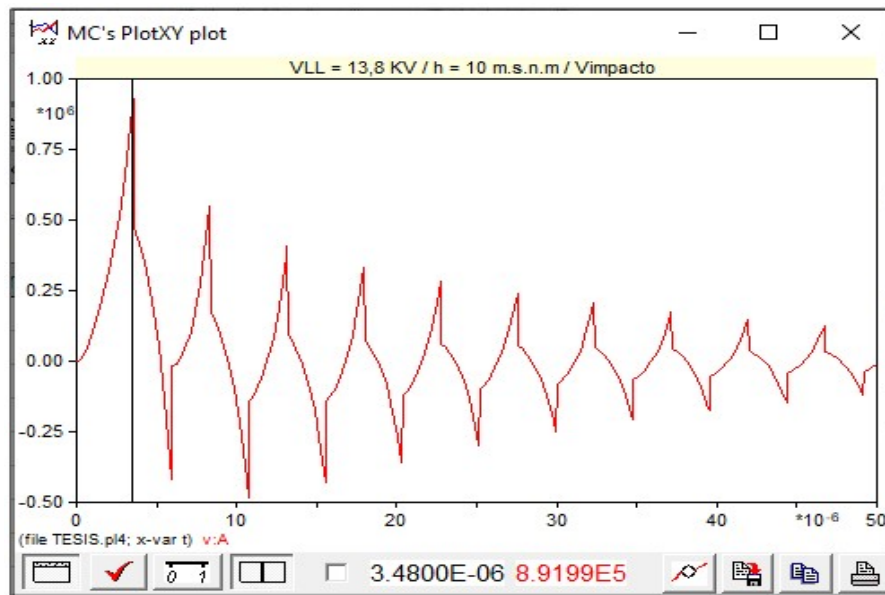


Figura 5.43: Voltaje de impacto en una línea de 13,8 KV . Autora

Corriente pico máximo de descarga a tierra :

En las figuras 5.44 , 5.45 y 5.46 se observa que el pico o amplitud máxima de corriente que se descarga a tierra a través de los postes A y B es :

$I_{pico} . poste A = I_{pico} . poste B = 3,3 \text{ KA}$

Tiempo del valor pico = 4,7 us

Ahora para $t = 4,7 \text{ us}$ la corriente de la fuente es :

$I_o (t = 4,7 \text{ us}) = 4 \text{ KA}$

Para un mismo instante de tiempo debe cumplirse :

$I_o = I . poste A + I . poste B$

Sin embargo para $t = 4,7 \text{ us}$, esto no se cumple :

4 KA NO ES IGUAL A : $3.3 + 3.3$

Esto significa que al momento de producirse el flameo en los aisladores se genera una sobrecorriente en cada uno de ellos :

Sobre corriente = $(3,3 + 3,3 - 4) / 2 = 1,3 \text{ KA}$.

Este sobrecorriente que se produce en cada aislador al momento de producirse el flameo se puede definir como un transitorio de corriente de corta duración causado por el efecto interruptor con el cual está modelado el aislador , cuando el voltaje en los terminales del aislador supera la curva de soportabilidad entonces el flameo que se produce en el aislador está modelado con el cierre

de un interruptor , siempre que un interruptor se abre o se cierra se genera un transitorio de corriente y consecuentemente un transitorio también de voltaje , este comportamiento en la corriente máxima de descarga se produce en todo tipo de aislador y a todo nivel de voltaje .

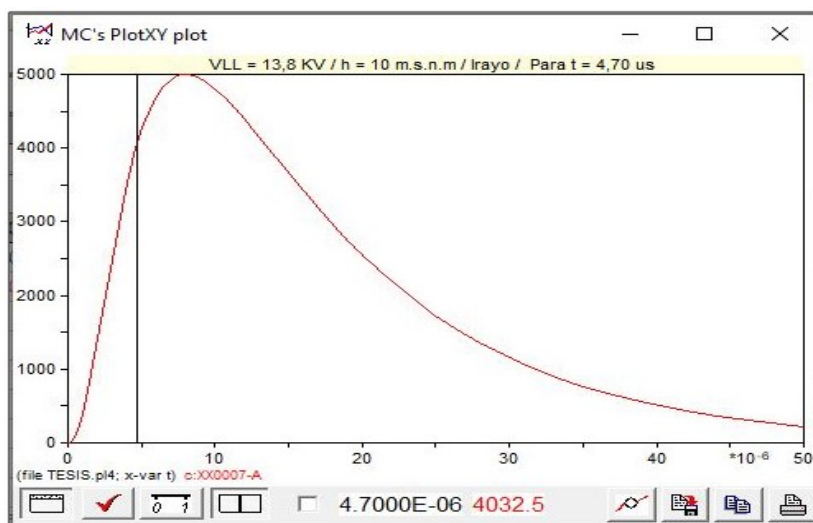


Figura 5.44: Corriente tipo rayo de 5 KA , 8 / 20 us . Autora

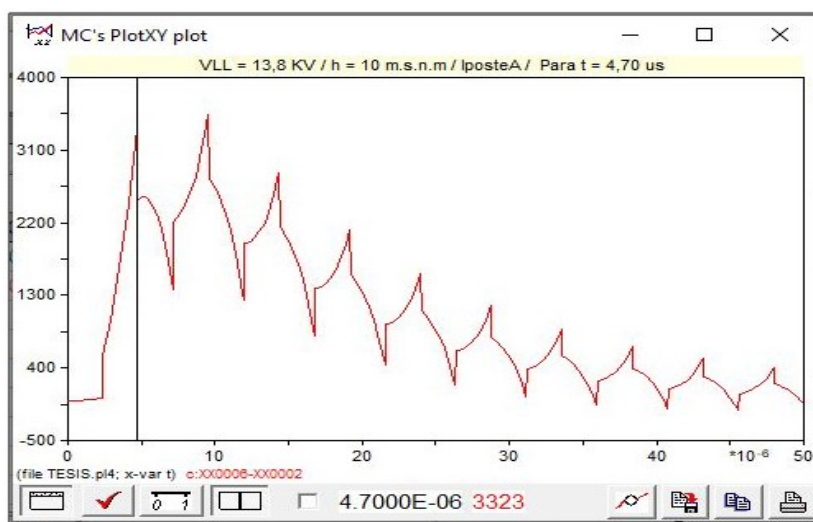


Figura 5.45: Corriente máxima de descarga . Poste A . Autora

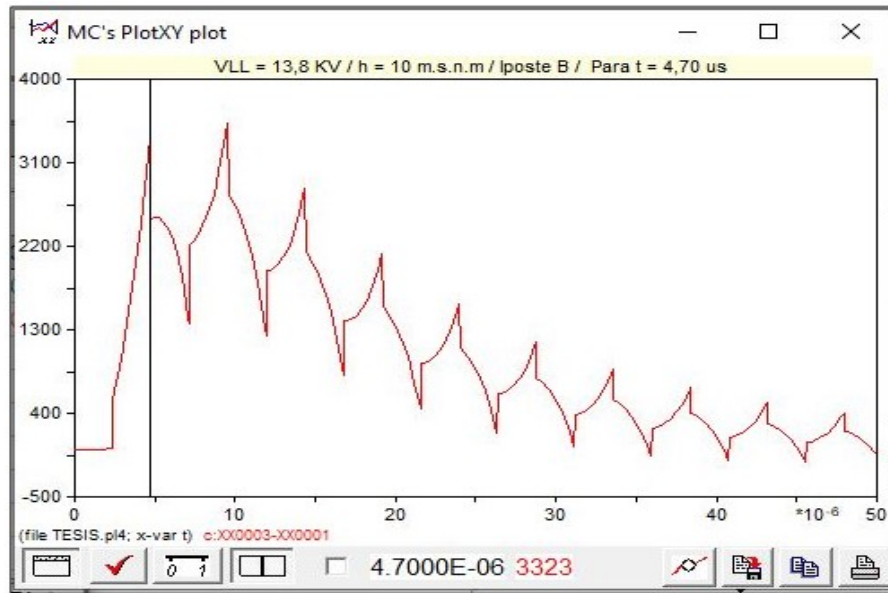


Figura 5.46: Corriente máxima de descarga . Poste B . Autora

Corriente de descarga a tierra para $t = 8 \text{ us}$:

Para un tiempo de $t = 8 \text{ us}$, que es el tiempo de frente de onda de la corriente tipo rayo (fuente) se observa en las figuras 5.47 , 5.48 , 5.49 la relación de corrientes entre la fuente y las descargadas a tierra en los postes A y B :

Para $t = 8 \text{ us}$:

$I_o = I_{\text{rayo}} = 5 \text{ KA}$. Figura 5.47

$I_{\text{poste A}} = 2,47 \text{ KA}$. Figura 5.48

$I_{\text{poste B}} = 2,47 \text{ KA}$. Figura 5.49

Por lo tanto :

$I_o = I_{\text{poste A}} + I_{\text{poste B}}$

$5 \text{ KA} = 2,47 + 2,47 = 4,94 \text{ KA}$.

Error : $5 - 4,94 = 0,06 \text{ KA}$.

Conclusión : Se cumple la relación de corrientes

Por lo tanto , para este instante de tiempo se demuestra que ya no existe ningún transitorio de corriente .

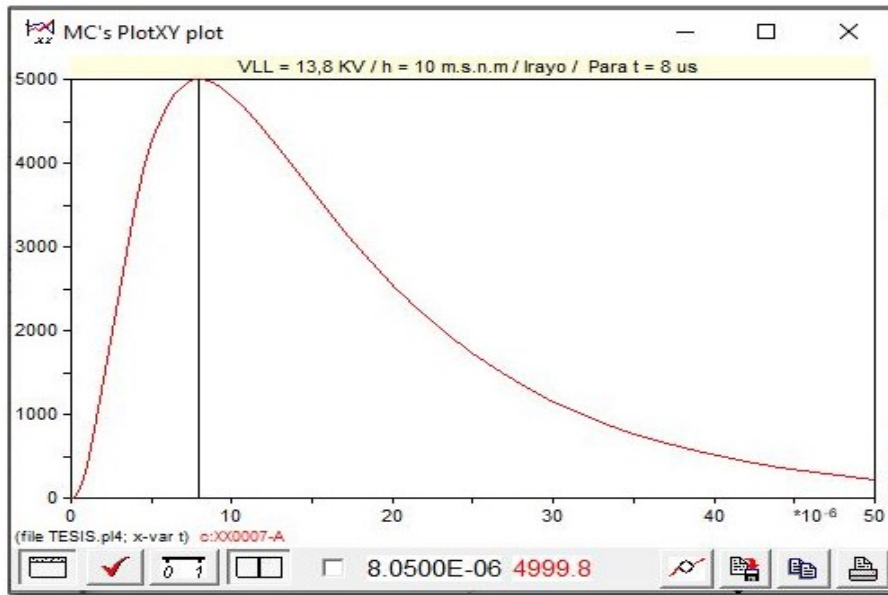


Figura 5.47: Corriente tipo rayo para t = 8 us . Autora

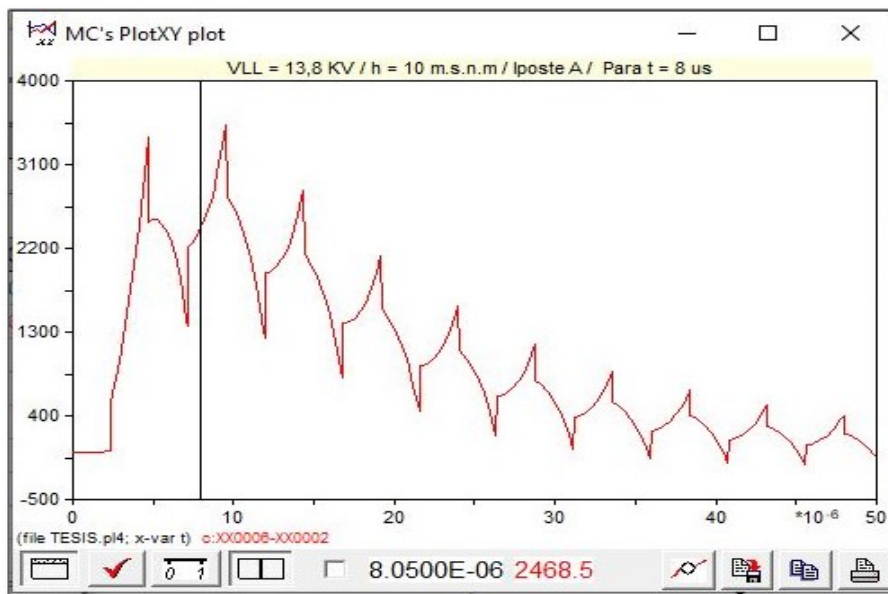


Figura 5.48: Corriente de descarga para t = 8 us . Poste A . Autora

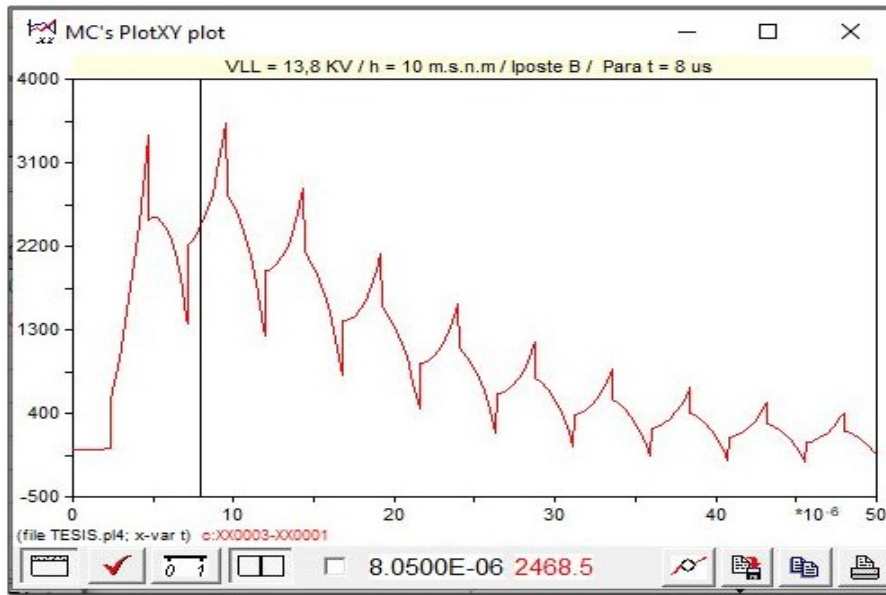


Figura 5.49: Corriente de descarga para $t = 8 \text{ us}$. Poste B . Autora

Corriente de descarga a tierra para $t = 20 \text{ us}$:

Para un tiempo de $t = 20 \text{ us}$, que es el tiempo de cola de la onda de corriente tipo rayo (fuente) se observa en las figuras 5.50 , 5.51 , 5.52 la relación de corrientes entre la fuente y las descargas a tierra en los postes A y B :

Para $t = 20 \text{ us}$:

$I_o = I_{\text{rayo}} = 2,55 \text{ KA}$. Figura 5.50

$I_{\text{poste A}} = 1,33 \text{ KA}$. Figura 5.51

$I_{\text{poste B}} = 1,33 \text{ KA}$. Figura 5.52

Por lo tanto :

$I_o = I_{\text{poste A}} + I_{\text{poste B}}$

$2,55 \text{ KA} = 1,33 + 1,33 = 2,66 \text{ KA}$.

Error : $2,66 - 2,55 = 0,11 \text{ KA}$.

Conclusión : Se cumple la relación de corrientes

Por lo tanto , para este instante de tiempo se demuestra que ya no existe ningún transitorio de corriente .

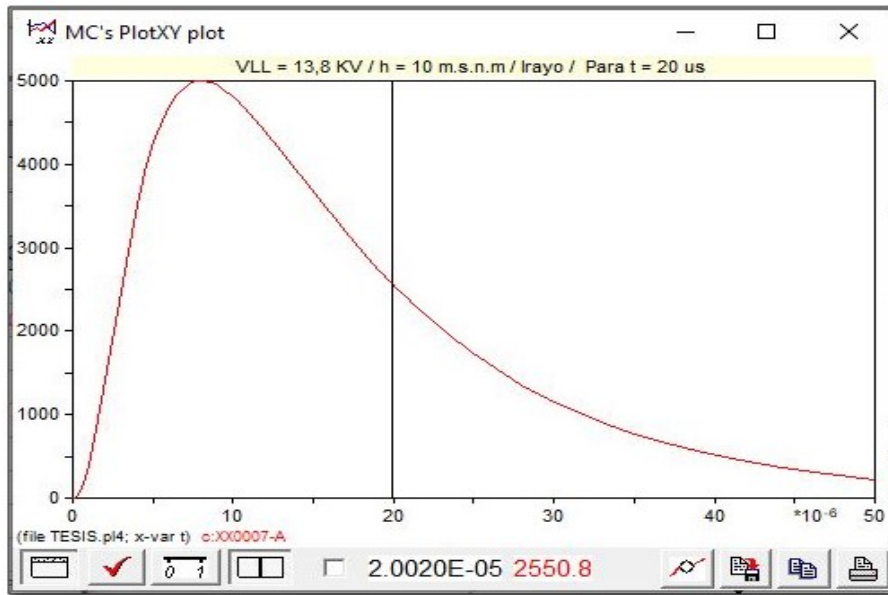


Figura 5.50: Corriente tipo rayo para t = 20 us . Autora

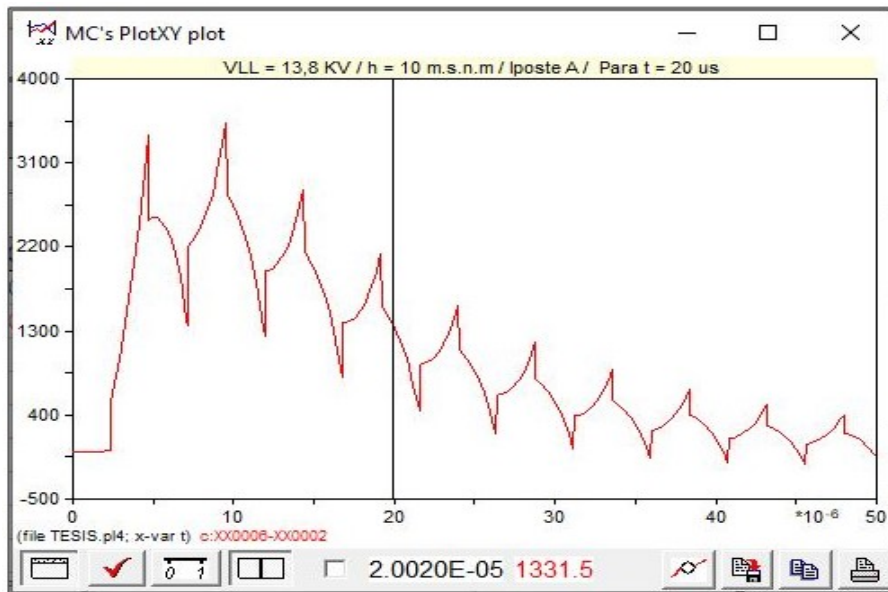


Figura 5.51: Corriente de descarga para t= 20 us. Poste A . Autora

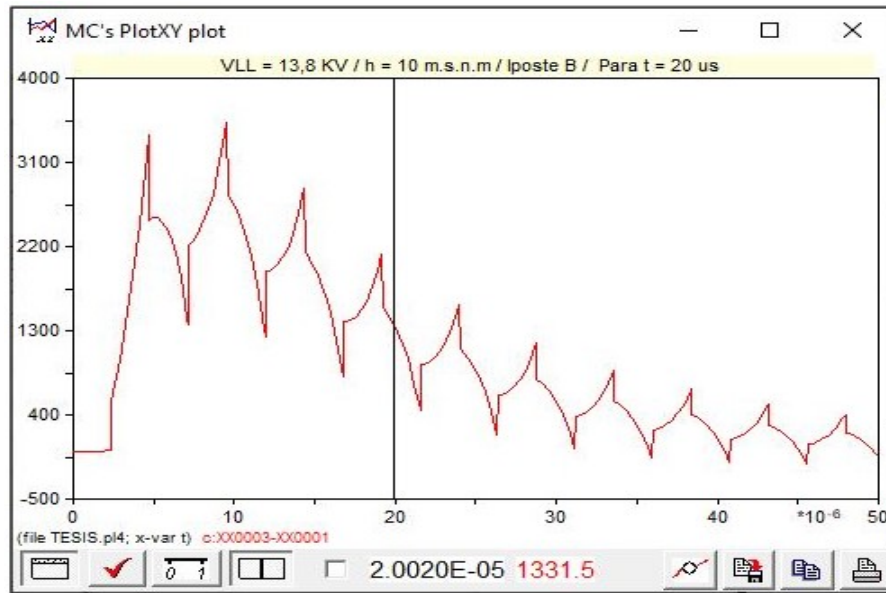


Figura 5.52: Corriente de descarga para $t = 20 \mu\text{s}$. Poste B . Autora

Cadena de tres discos Ansi 52 - 1 :

En la figura 5.53 , una cadena formada por tres discos Ansi 52-1 , utilizada en una estructura de las siguientes características :

Línea :

$h = 2500 \text{ msnm}$

$VLL = 13,8 \text{ KV}$

$BIL.st.Línea = 110 \text{ KV} . (\text{IEEE } 1313-1)$

$BIL.L = BIL.st * Fh = 110 \text{ KV} * 0,85 = 93,5 \text{ KV}$

$TCFL = 169,63 \text{ KV} . (\text{TCFrayo} . \text{referida a valor estandar})$

$Fc = 43,3 \text{ mm} / \text{KV} . (\text{Nivel de contaminación alto} . \text{Referencia IEEE})$

$Df.L = 470,44 \text{ mm}$

$Zc = 462 \Omega$

Para $h.L = 10.1 \text{ m}$ (Altura del conductor)

Radio del conductor = $9,15 \text{ mm}$ (336,4 - ACSR)

$v = 300 \text{ m} / \mu\text{s} . (\text{Velocidad de propagación})$

$d = 360 \text{ m} . (\text{Distancia desde el punto de impacto})$

Aisladores :

La cadena de tres aisladores presenta los siguientes parámetros :

Discos clase Ansi 52-1

Df.cadena = 534 mm

TCF.st = 275 KV . (TCF.st.rayo)

Fuente de prueba :

La fuente de prueba es :

De corriente tipo rayo

Amplitud : $I_0 = 5 \text{ KA}$

Tiempo de frente de onda : 8 us

Tiempo de cola : 20 us

Referencia . IEEE [31]:

Tiempo de frente de onda : 8 us al 100% de la amplitud máxima

Tiempo de cola : 20 us al 50% de la amplitud máxima

Tiempo de integración : $\Delta T = 1\text{E-}8 \text{ s}$.

Tiempo de simulación : $T_{\text{max}} = 50\text{E-}6 \text{ s}$.

$n = 2$: Factor de concavidad de la corriente tipo rayo

$T_{\text{start}} = 0$. (Inicio de la generación de la corriente tipo rayo)

Sistema de puesta a tierra :

SPT . Poste A = 20Ω

SPT . Poste B = 20Ω

Mediciones :

Vimp. = Voltaje de impacto del rayo sobre una fase de la línea .

Vimp. = Voltaje línea - tierra

Vf = Voltaje de flameo en cada aislador

Vf = Diferencia de potencial entre los terminales del aislador

Vf = Voltaje entre la línea y la estructura (antes de tierra)

Irayo = Corriente tipo rayo (8 / 20 us)

I.poste A = Corriente de descarga a tierra a través del poste A

I.poste B = Corriente de descarga a tierra a través del poste B

Análisis :

Voltaje de flameo en el poste A .

Voltaje de flameo en el poste B .

Corrientes de descarga máxima en los postes A y B

Corrientes de descarga para $t = 8 \text{ us}$ (Tiempo de frente de onda)

Corrientes de descarga para $t = 20 \text{ us}$ (Tiempo de cola)

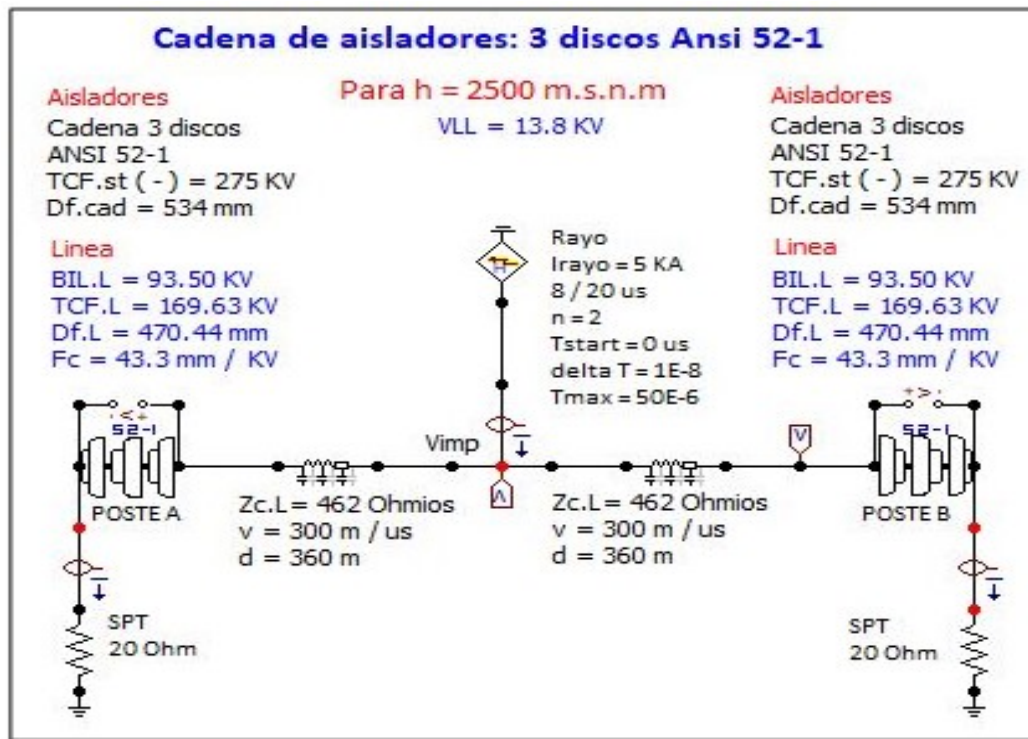


Figura 5.53: Módulo de pruebas para una estructura de 13,8 KV .
h = 2500 msnm . Autora

Voltaje de flameo en el poste A :

En la figura 5.54 , se observa :

$V_f = 249,8 \text{ KV}$ (Poste A)

$T_v = T_{ll} = 1,4 \text{ us}$ (Tiempo de viaje = Tiempo de llegada)

$T_v \text{ teórico} = d / v = 360 \text{ m} / 300 \text{ m / us} = 1,2 \text{ us}$

$T_{f.ATP} = 2,39 \text{ us}$ (Tiempo de flameo . Registro en ATP)

$T_{\text{crecimiento}} = T_{f.ATP} - T_v = 2,39 - 1,4 = 0,99 \text{ us}$

Frente de onda :

$S = \tan(\theta) = V_f / T_{\text{crecimiento}} = 349,8 / 0,99 = 353,41 \text{ KV / us}$

Voltaje de flameo en el poste B :

En la figura 5.55 , se observa un comportamiento idéntico en el poste B al que ocurre en el poste A , esto obedece a la misma distancia recorrida por el pulso ($d = 360 \text{ m}$) hacia cada poste y los mismos sistemas de puesta a tierra (20Ω) .

Corrientes de descarga a tierra :

Las corrientes de descarga a tierra presentan un similar comportamiento al analizado en la estructura de 13,8 KV para $h = 10$ msnm .

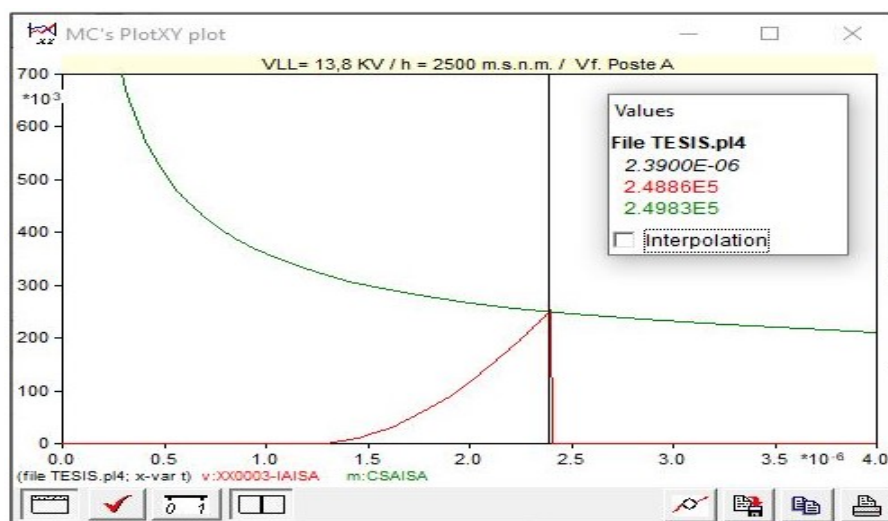


Figura 5.54: Voltaje de flameo . $h = 2500$ msnm . Poste A . Autora

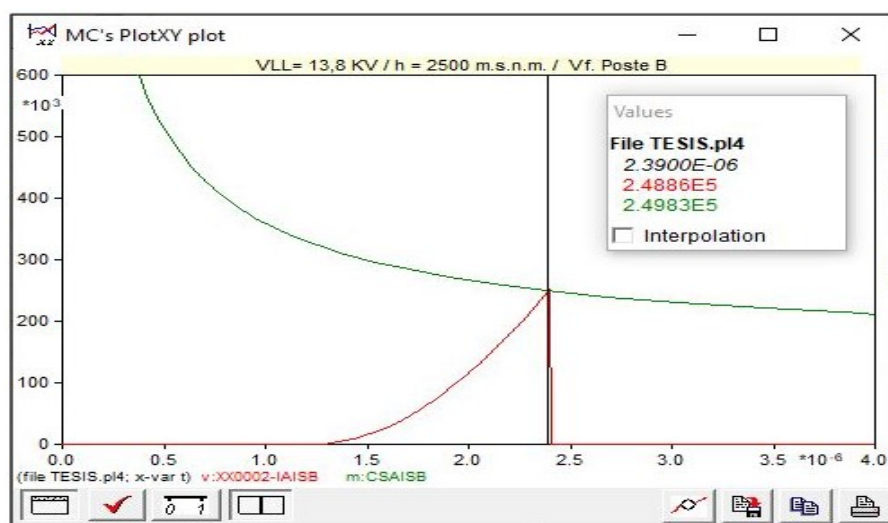


Figura 5.55: Voltaje de flameo . $h = 2500$ msnm . Poste B . Autora

5.11. Flameo en una estructura de 69 KV

En la figura 5.56 , se presenta un módulo de pruebas de una estructura utilizada para 69 KV de las siguientes características :

Línea :

$h = 10 \text{ msnm}$

$VLL = 69 \text{ KV}$

$BIL.st.Línea = 350 \text{ KV} . (\text{IEEE } 1313 - 1)$

$BIL.L = BIL.st * Fh = 350 \text{ KV} * 1 = 350 \text{ KV}$

$TCEL = 401,14 \text{ KV} . (\text{TCErayo} . \text{referida a valor estandar})$

$Fc = 30 \text{ mm} / \text{KV} . (\text{Nivel de contaminación medio} . \text{Referencia IEEE}) [31]$

$Df.L = 1254,87 \text{ mm}$

$Zc = 475,6 \Omega (\text{Línea S} . \text{Figura 3.33})$

Para $h.L = 15,1 \text{ m} (\text{Altura del conductor S})$

Radio del conductor = $10,9 \text{ mm} (477 \text{ AWG} - \text{ACSR})$

$v = 300 \text{ m} / \text{us} . (\text{Velocidad de propagación})$

$d = 360 \text{ m} . (\text{Distancia desde el punto de impacto})$

Aisladores :

Número de discos = 5

Discos clase Ansi 52-3

$Df.cadena = 1460 \text{ mm}$

$TCF.st = 510 \text{ KV} . (\text{TCF.st.rayo})$

Fuente de prueba :

La fuente de prueba es :

De corriente tipo rayo

Amplitud : $I_o = 5 \text{ KA}$

Tiempo de frente de onda : 8 us

Tiempo de cola : 20 us

Referencia . IEEE :

Tiempo de frente de onda : 8 us al 100% de la amplitud máxima

Tiempo de cola : 20 us al 50% de la amplitud máxima

Tiempo de integración : $\Delta T = 1E-8 \text{ s}$.

Tiempo de simulación : $T_{max} = 50E-6 \text{ s}$.

$n = 2$: Factor de concavidad de la corriente tipo rayo

$T_{start} = 0$. (Inicio de la generación de la corriente tipo rayo)

Sistema de puesta a tierra :

SPT . Poste A = 20Ω

SPT . Poste B = 20Ω

Mediciones :

V_{imp} = Voltaje de impacto del rayo sobre una fase de la línea .

V_{imp} = Voltaje línea - tierra

V_f = Voltaje de flameo en cada aislador

V_f = Diferencia de potencial entre los terminales del aislador

V_f = Voltaje entre la línea y la estructura (antes de tierra)

I_{rayo} = Corriente tipo rayo (8 / 20 us)

$I_{poste A}$ = Corriente de descarga a tierra a través del poste A

$I_{poste B}$ = Corriente de descarga a tierra a través del poste B

Análisis :

Voltaje de flameo en el poste A .

Voltaje de flameo en el poste B .

Corrientes de descarga máxima en los postes A y B

Corrientes de descarga para $t = 8 \text{ us}$ (Tiempo de frente de onda)

Corrientes de descarga para $t = 20 \text{ us}$ (Tiempo de cola)

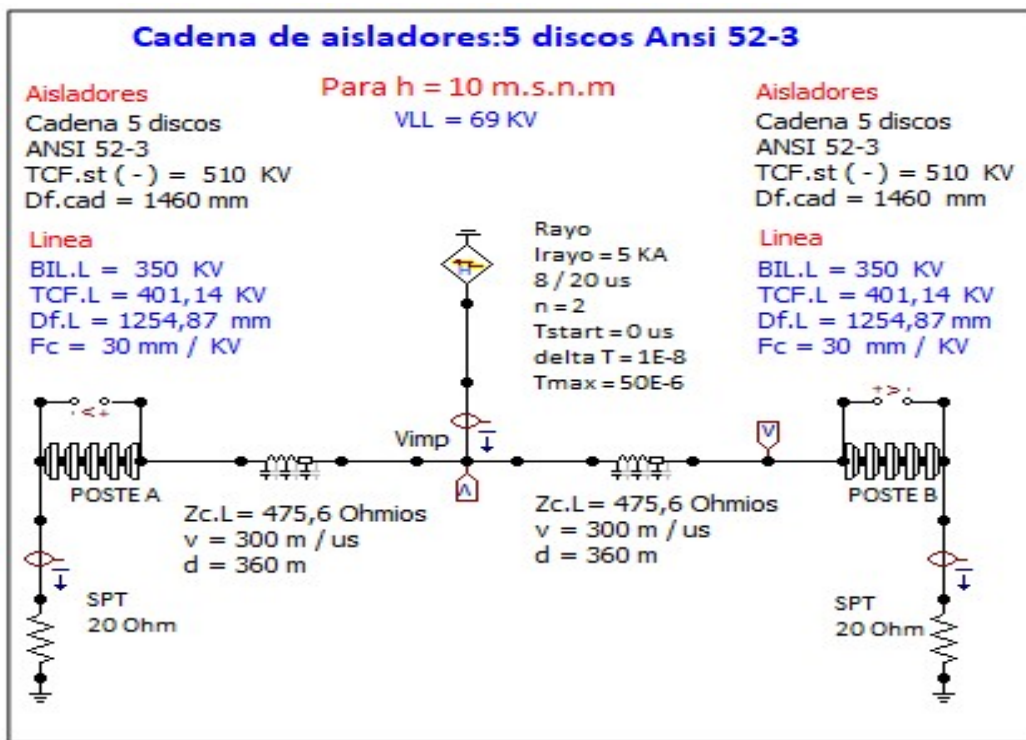


Figura 5.56: Módulo de pruebas para una estructura de 69 KV . Autor

Voltaje de flameo en el poste A :

En la figura 5.57 , se observa :

$V_f = 537 \text{ KV}$ (Poste A)

$T_v = T_{ll} = 1,4 \text{ us}$ (Tiempo de viaje = Tiempo de llegada)

$T_v \text{ te\u00f3rico} = d / v = 360 \text{ m} / 300 \text{ m} / \text{us} = 1,2 \text{ us}$

$T_{f.ATP} = 3,06 \text{ us}$ (Tiempo de flameo . Registro en ATP)

$T_{\text{crecimiento}} = T_{f.ATP} - T_v = 3,06 - 1,4 = 1,66 \text{ us}$

Frente de onda :

$S = \tan (O) = V_f / T_{\text{crecimiento}} = 537 / 1,66 = 323,49 \text{ KV} / \text{us}$

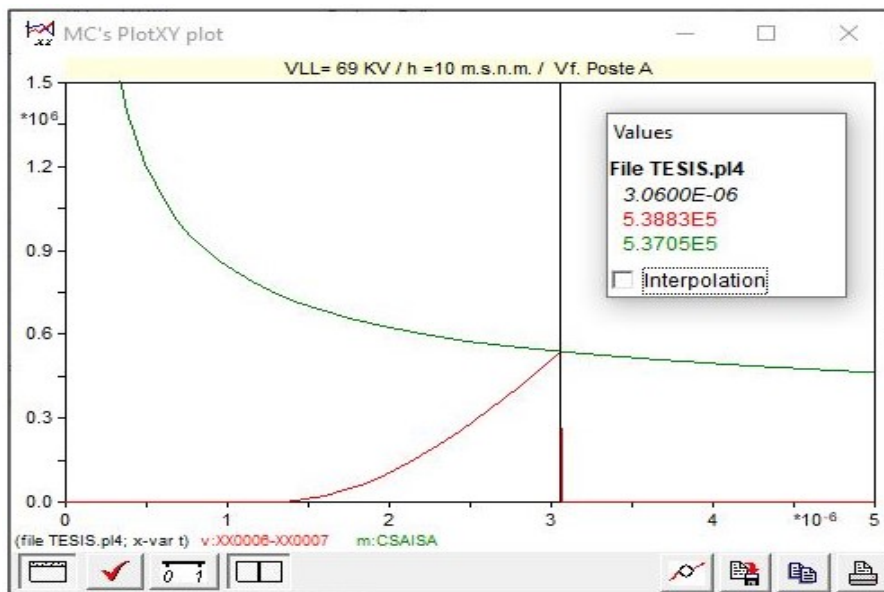


Figura 5.57: Voltaje de flameo . Poste A . L\u00ednea de 69 KV . Autora

Voltaje de flameo en el poste B :

En la figura 5.58 , se observa :

$V_f = 537 \text{ KV}$ (Poste A)

$T_v = T_{ll} = 1,4 \text{ us}$ (Tiempo de viaje = Tiempo de llegada)

$T_v \text{ te\u00f3rico} = d / v = 360 \text{ m} / 300 \text{ m} / \text{us} = 1,2 \text{ us}$

$T_{f.ATP} = 3,06 \text{ us}$ (Tiempo de flameo . Registro en ATP)

$T_{\text{crecimiento}} = T_{f.ATP} - T_v = 3,06 - 1,4 = 1,66 \text{ us}$

Frente de onda :

$S = \tan (O) = V_f / T_{\text{crecimiento}} = 537 / 1,66 = 323,49 \text{ KV} / \text{us}$

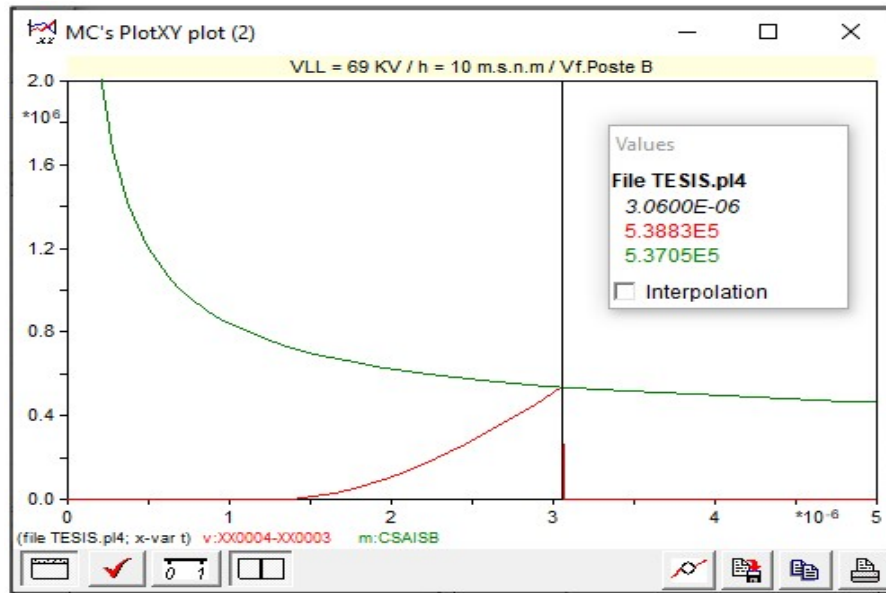


Figura 5.58: Voltaje de flameo . Poste B . Línea de 69 KV. Autora

Voltaje de Impacto :

En la figura 5.59 , se observa :

$V_{imp.ATP} = 1,35 \text{ MV}$.

$V_{imp. Teórico} = I_o * Z_c.L / 2 = 5000 * 475,6 / 2 = 1,19 \text{ MV}$.

Al tener una cadena de 5 discos Ansi 52-1 , la tensión crítica de flameo a descargas tipo rayo (nube - tierra , negativos) es 510 KV , el voltaje en el punto de impacto crece a razón de 323,49 KV / us (frente de onda . Figura 5.58) , el tiempo que tarda en llegar el voltaje de impacto a su pico máximo es :

$T_{pico.Vimp} = 4,22 \text{ us}$ (Figura 5.29)

Por lo tanto :

$V_{pico.imp} = S * T_{pico.Vimp} = 323,49 \text{ KV / us} * 4,22 \text{ us} = 1,36 \text{ MV}$

$V_{pico.imp.ATP} = 1,35 \text{ MV}$

Esto demuestra que la simulación y modelado es válido .

Ahora con respecto al $V_{imp.Teórico} = 1,19 \text{ MV}$ comparado con el $V_{imp.ATP} = 1,35 \text{ MV}$, lo registrado por ATP es mayor que el esperado teóricamente , debido al valor alto de la TCF de la cadena (510 KV) , ocurriendo el flameo en $V_f = 537 \text{ KV}$ en un tiempo de flameo $T_f = 3,06 \text{ us}$ (Figuras 5.58 - 5.59) , por lo tanto si comparamos el tiempo en el que sucede el pico máximo del voltaje de impacto y el tiempo en el que flamean los aisladores , esto es :

$$T_{viaje} = T_v = T_{pico} \cdot V_{imp} - T_f = 4,22 - 3,06 = 1,16 \text{ us}$$

$$T_v = e / v = 360 \text{ m} / 300 \text{ m} / \text{us} = 1,2 \text{ us}$$

Mientras la onda viaja , llega al aislador , crece y flamea el voltaje de impacto crece rápidamente a razón de 323,49 KV / us hasta llegar a su valor pico de 1,35 MV , superando el valor teórico esperado de 1,19 MV .

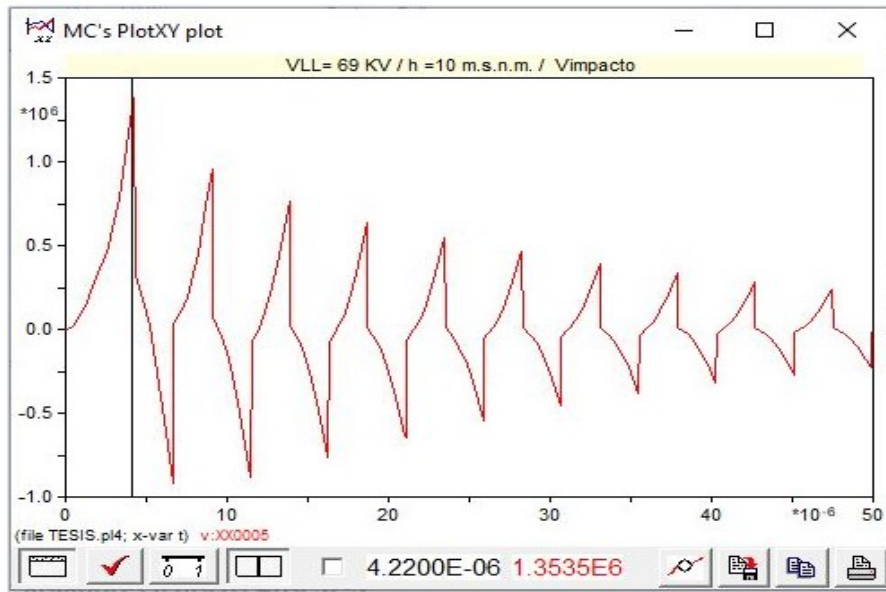


Figura 5.59: Voltaje de impacto en una fase . Línea de 69 KV . Autora

Corriente pico máximo de descarga a tierra :

En las figuras 5.60 , 5.61 y 5.62 se observa que el pico o amplitud máxima de corriente que se descarga a tierra a través de los postes A y B es :

$$I_{pico} \text{ . poste A} = I_{pico} \text{ . poste B} = 4,49 \text{ KA}$$

$$\text{Tiempo del valor pico} = 5,42 \text{ us}$$

Ahora para $t = 5,42 \text{ us}$ la corriente de la fuente es :

$$I_o (t = 5,42 \text{ us}) = 4,46 \text{ KA}$$

Para un mismo instante de tiempo debe cumplirse :

$$I_o = I_{\text{poste A}} + I_{\text{poste B}}$$

Sin embargo para $t = 5,42 \text{ us}$, esto no se cumple :

$$4,46 \text{ KA NO ES IGUAL A : } 4,49 + 4,49$$

Esto significa que al momento de producirse el flameo en los aisladores se genera una sobrecorriente en cada uno de ellos :

Sobre corriente = $(4,49 + 4,49 - 4,46) / 2 = 2,26 \text{ KA}$.

Esta sobrecorriente que se produce en cada aislador al momento de producirse el flameo se puede definir como un transitorio de corriente de corta duración causado por el efecto interruptor con el cual está modelado el aislador , cuando el voltaje en los terminales del aislador supera la curva de soportabilidad entonces el flameo que se produce en el aislador está modelado con el cierre de un interruptor , siempre que un interruptor se abre o se cierra se genera un transitorio de corriente y consecuentemente un transitorio también de voltaje , este comportamiento en la corriente máxima de descarga se produce en todo tipo de aislador y a todo nivel de voltaje .

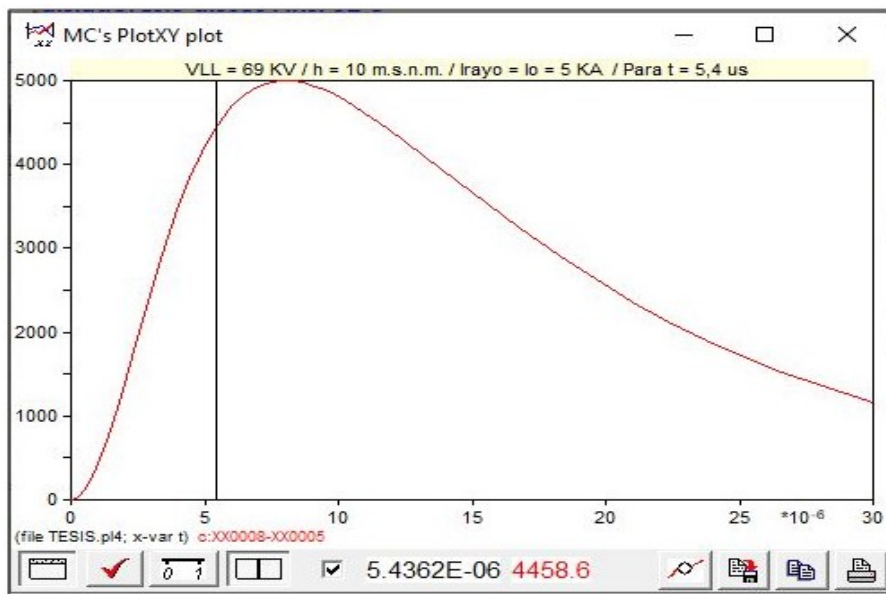


Figura 5.60: Corriente tipo rayo para $t = 5,42 \text{ us}$. Autora

En la figura 5.61 , la corriente de descarga a tierra a través del poste A , el pico máximo de corriente es 4,49 KA y sucede luego de un tiempo $t = 5,42 \text{ us}$, este pico de corriente representa un transitorio de muy corta duración , luego la corriente decrece y alrededor de 50 us se acerca a cero .

En la figura 5.62 , el comportamiento de la corriente de descarga a través del poste B presenta una similitud de características a la corriente de descarga en el poste A .

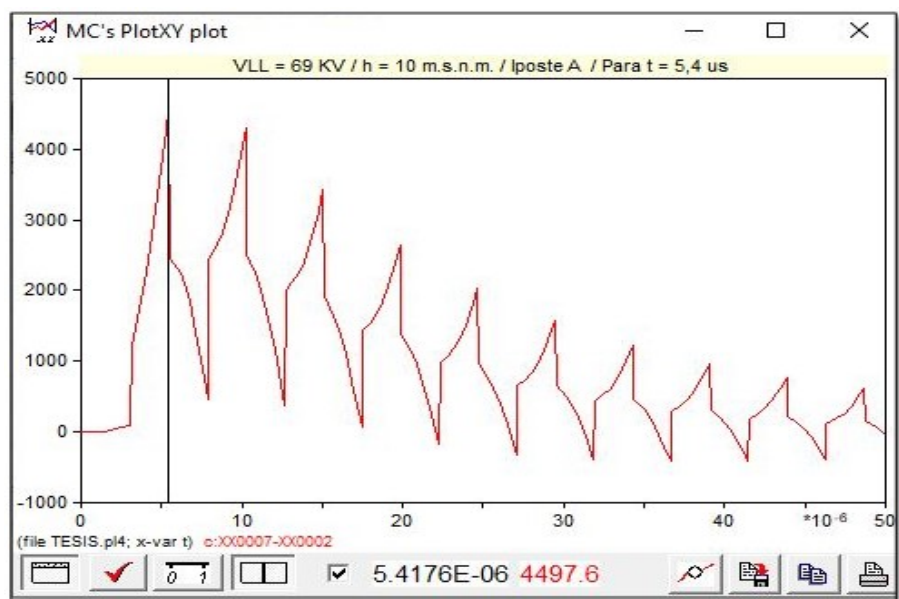


Figura 5.61: Corriente pico máximo . Poste A . 69 KV . Autora

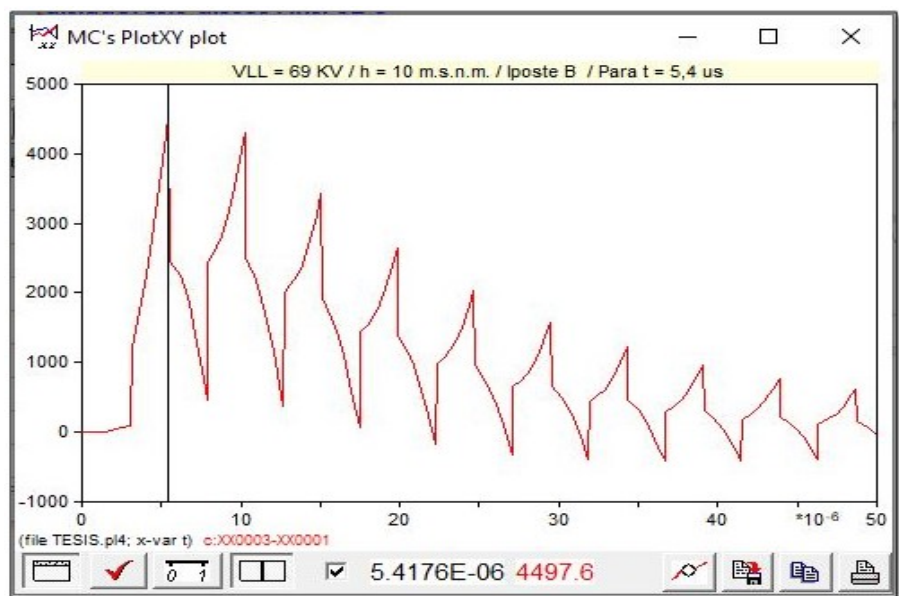


Figura 5.62: Corriente pico máximo . Poste B . 69 KV . Autora

Corriente de descarga a tierra para $t = 8 \text{ us}$:

Para un tiempo de $t = 8 \text{ us}$, que es el tiempo de frente de onda de la corriente tipo rayo (fuente) se observa en las figuras 5.63 , 5.64 , 5.65 , la relación de corrientes entre la fuente y las descargadas a tierra en los postes A y B :

Para $t = 8 \text{ us}$:

$I_o = I_{\text{rayo}} = 5 \text{ KA}$. Figura 5.63

$I_{\text{poste A}} = 2,5 \text{ KA}$. Figura 5.64

$I_{\text{poste B}} = 2,5 \text{ KA}$. Figura 5.65

Por lo tanto :

$I_o = I_{\text{poste A}} + I_{\text{poste B}}$

$5 \text{ KA} = 2,5 + 2,5 = 5 \text{ KA}$.

Error : $5 - 5 = 0 \text{ KA}$.

Conclusión : Se cumple la relación de corrientes

Por lo tanto , para este instante de tiempo se demuestra que ya no existe ningún transitorio de corriente .

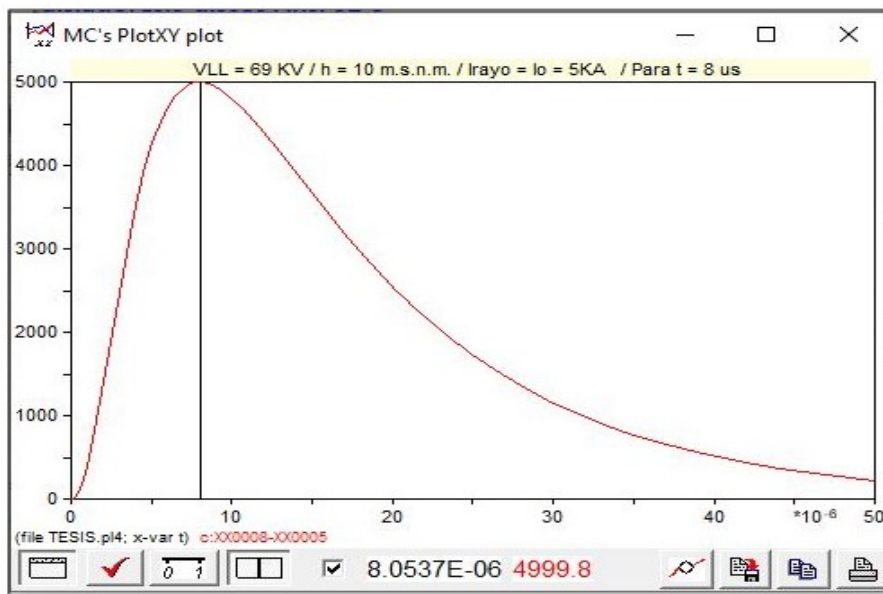


Figura 5.63: Corriente tipo rayo . Para $t = 8 \text{ us}$. Autora

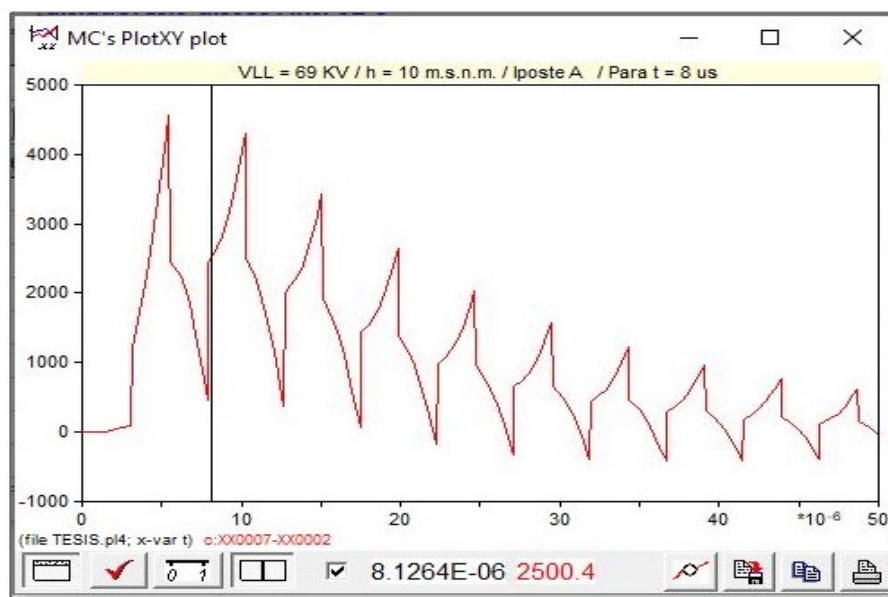


Figura 5.64: Corriente de descarga . t = 8 us . Poste A . 69 KV . Autora

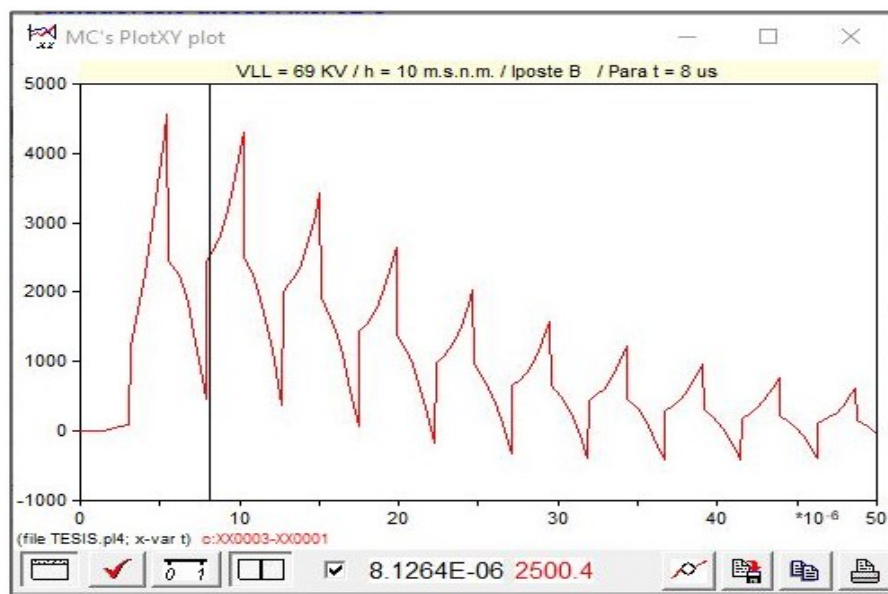


Figura 5.65: Corriente de descarga . t = 8 us . Poste B . 69 KV Autora

Corriente de descarga a tierra para $t = 20 \text{ us}$:

Para un tiempo de $t = 20 \text{ us}$, que es el tiempo de cola de la onda de corriente tipo rayo (fuente) se observa en las figuras 5.66 , 5.67 , 5.68 , la relación de corrientes entre la fuente y las descargas a tierra en los postes A y B :

Para $t = 20 \text{ us}$:

$I_o = I_{\text{rayo}} = 2,55 \text{ KA}$. Figura 5.66

$I_{\text{poste A}} = 1,31 \text{ KA}$. Figura 5.67

$I_{\text{poste B}} = 1,31 \text{ KA}$. Figura 5.68

Por lo tanto :

$I_o = I_{\text{poste A}} + I_{\text{poste B}}$

$2,55 \text{ KA} = 1,31 + 1,31 = 2,62 \text{ KA}$.

Error : $2,66 - 2,55 = 0,11 \text{ KA}$.

Conclusión : Se cumple la relación de corrientes

Por lo tanto , para este instante de tiempo se demuestra que ya no existe ningún transitorio de corriente .

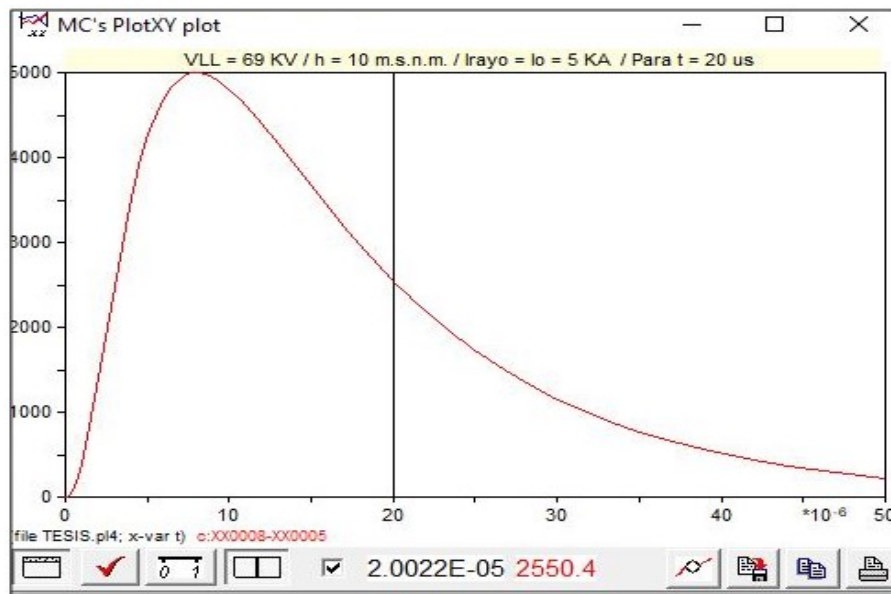


Figura 5.66: Corriente tipo rayo . Para $t = 20 \text{ us}$. Ahora

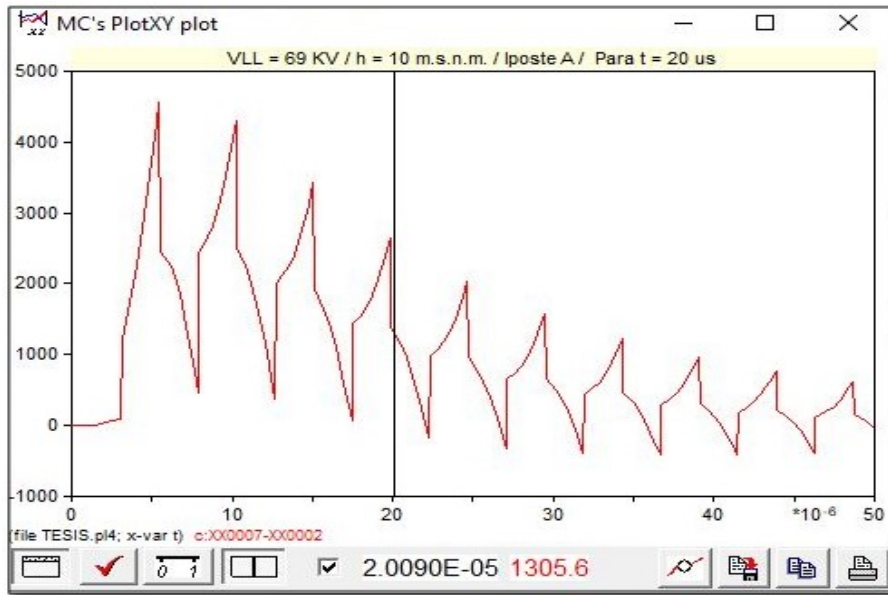


Figura 5.67: Corriente de descarga . t = 20 us . Poste A . 69 KV . Autora

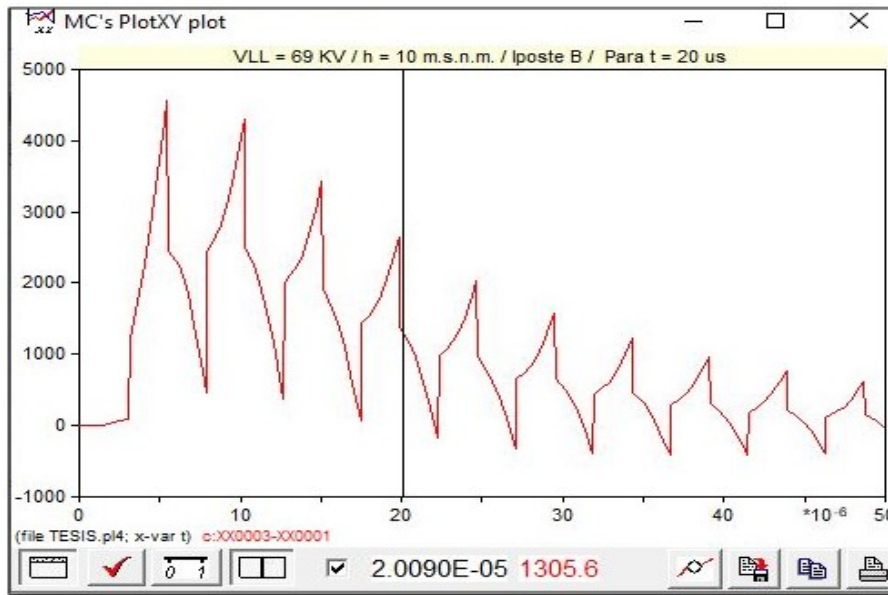


Figura 5.68: Corriente de descarga . t = 20 us . Poste A . 69 KV . Autora

Cadena de SEIS discos Ansi 52 - 3 :

En la figura 5.69 , una cadena formada por SEIS discos Ansi 52-3 , utilizada en una estructura de las siguientes características :

Línea :

$h = 2500$ msnm

VLL = 69 KV

BIL.st.Línea = 350 KV . (IEEE 1313-1)

BIL .L = BIL.st * Fh = 350 KV * 0,85 = 297,5 KV

TCEL = 539,73 KV . (TCFrayo . referida a valor estandar)

Fc = 25 mm / KV . (Nivel de contaminación medio . Referencia IEEE)

Df.L = 1358,09 mm

Zc = 475,6 Ω

Para h.L = 15.1 m (Altura del conductor)

Radio del conductor = 10,9 mm (477 AWG - ACSR)

v = 300 m / us . (Velocidad de propagación)

d = 360 m . (Distancia desde el punto de impacto)

Aisladores :

La cadena seis aisladores presenta los siguientes parámetros :

Discos clase Ansi 52-3

Df.cadena = 1752 mm

TCF.st = 605 KV . (TCF.st.rayo)

Fuente de prueba :

La fuente de prueba es :

De corriente tipo rayo

Amplitud : Io = 5 KA

Tiempo de frente de onda : 8 us

Tiempo de cola : 20 us

Referencia . IEEE :

Tiempo de frente de onda : 8 us al 100% de la amplitud máxima

Tiempo de cola : 20 us al 50% de la amplitud máxima

Tiempo de integración : $\Delta T = 1E-8$ s.

Tiempo de simulación : $T_{max} = 50E-6$ s.

n = 2 : Factor de concavidad de la corriente tipo rayo

$T_{start} = 0$. (Inicio de la generación de la corriente tipo rayo)

Sistema de puesta a tierra :

SPT . Poste A = 20 Ω

SPT . Poste B = 20 Ω

Mediciones :

V_{imp} = Voltaje de impacto del rayo sobre una fase de la línea .

V_{imp} = Voltaje línea - tierra

V_f = Voltaje de flameo en cada aislador

V_f = Diferencia de potencial entre los terminales del aislador

V_f = Voltaje entre la línea y la estructura (antes de tierra)

I_{rayo} = Corriente tipo rayo (8 / 20 us)

$I_{poste A}$ = Corriente de descarga a tierra a través del poste A

$I_{poste B}$ = Corriente de descarga a tierra a través del poste B

Análisis :

Voltaje de flameo en el poste A .

Voltaje de flameo en el poste B .

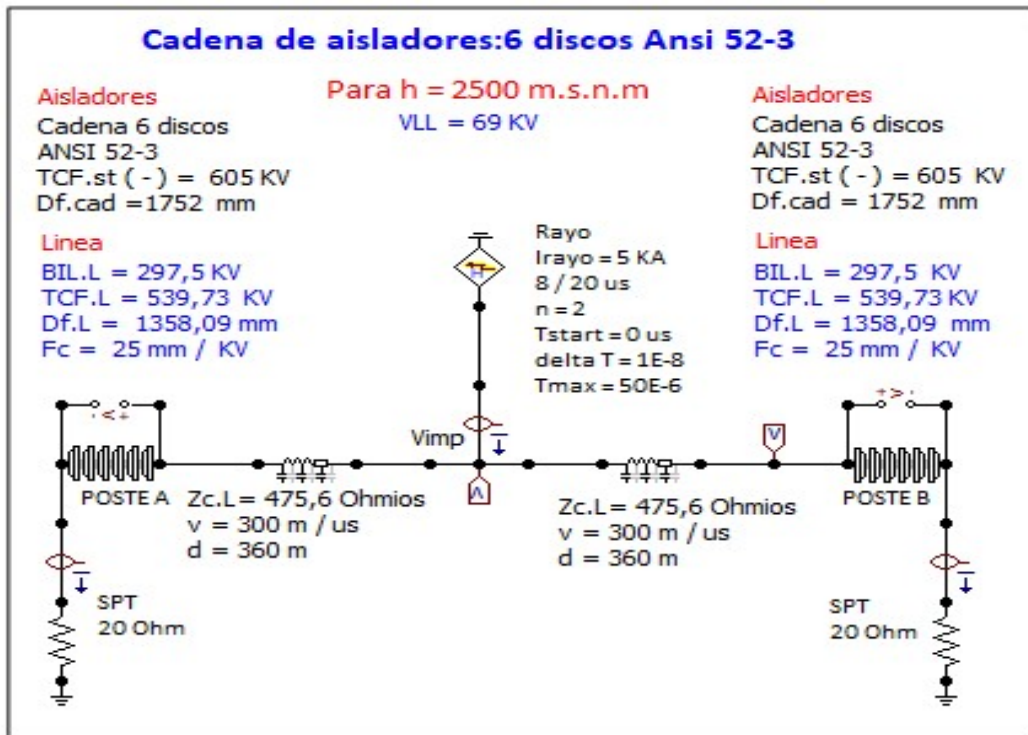


Figura 5.69: Módulo de pruebas para línea de 69 KV . h = 2500 msnm . Autora

Voltaje de flameo . Postes A y B :

En las figuras 5.70 y 5.71 , el voltaje de flameo en cada una de las cadenas de

aisladores , $V_f = 484,2$ KV con un tiempo de flameo $T_f = 2,96$ us , por lo tanto :
Frente de onda : $S = \text{Tan} (O) = V_f / T_f = 484,2 / 2,96 = 163,6$ KV / us .

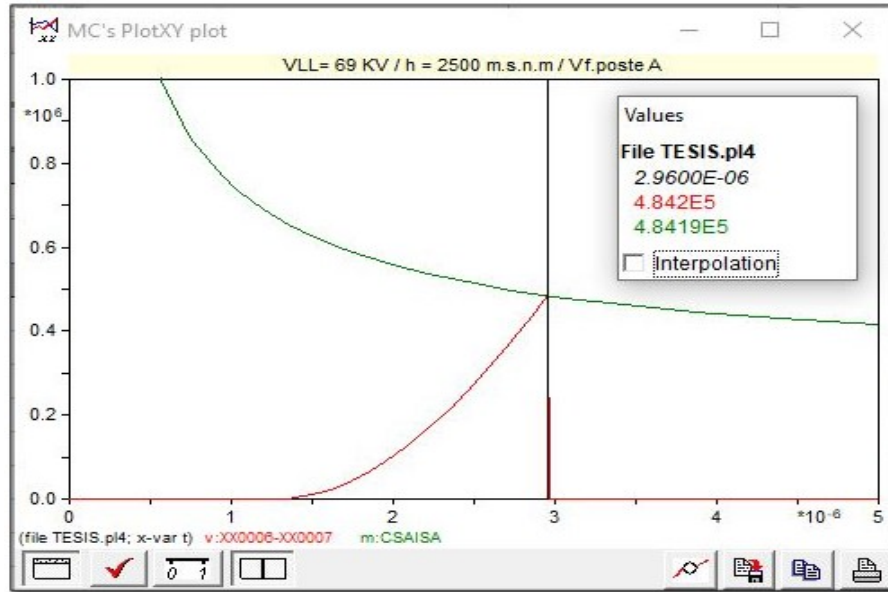


Figura 5.70: Voltaje de flameo . Poste A . 69 KV . h = 2500 msnm . Autora

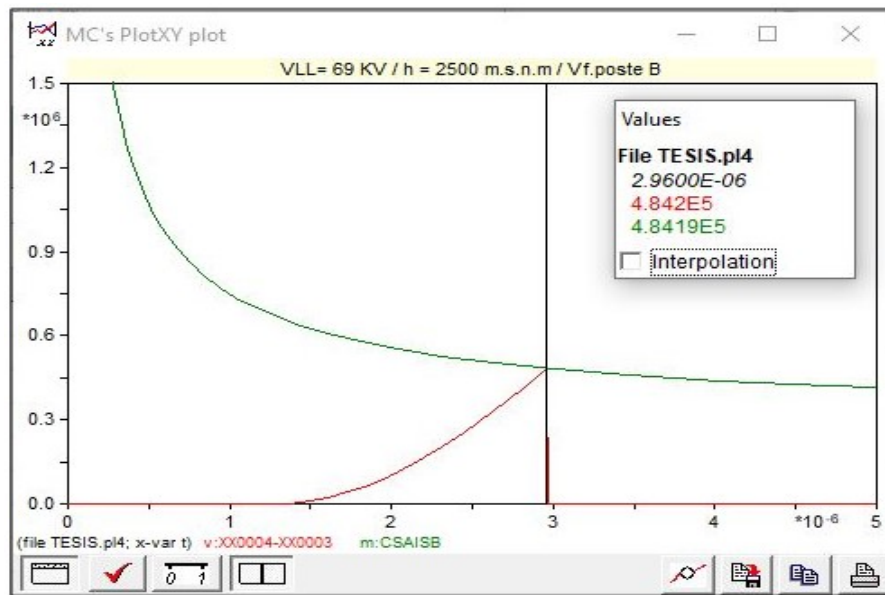


Figura 5.71: Voltaje de flameo . Poste B . 69 KV . h = 2500 msnm Autora

5.12. Descargador de sobretensión (DPS) en una línea de 13,8 KV

Un descargador de sobretensiones es un supresor de picos de voltaje de alta frecuencia (maniobras y descargas atmosféricas) formado por varistores de óxido de Zinc , que se comportan como una resistencia variable ante la amplitud de la sobretensión que reciben en sus terminales , presentan una resistencia de muy alto valor (Mega Ω) cuando el voltaje que llega a sus terminales son del orden de su valor nominal de voltaje (se comporta como un aislador) , pero si el voltaje incidente supera el valor del voltaje nominal del descargador , este lleva sus varistores a una resistencia muy baja cercana a cero , por lo tanto se comporta como un interruptor cerrado a través del cual se descarga a tierra la sobretensión generada en la línea .

Para estructuras de 13,8 KV , se conectan descargadores en cada fase hacia tierra , por lo tanto con la ayuda de un catálogo dado por fabricantes se puede seleccionar un descargador , tal es el caso de :

Referencia : Hubbell Power Siystems [31]

Descargador : IEC - 5KA - PDV - 65

$V_{residual.tipo\ rayo} = 30,2\ KV$

$U_c = \text{Voltaje de operación continuo} = 8,4\ KV$

$U_r = \text{Voltaje nominal} = 10\ KV$

$I_{nom} = \text{Corriente nominal} = 5\ KA$

El voltaje residual del descargador es el voltaje que aparece en los terminales del DPS cuando se descarga a tierra una corriente igual a la nominal , por lo tanto significa que en ese instante los varistores presentan una resistencia de :

$$R = V_{res.} / I_{nom} = 30,2\ KV / 5\ KA = 6,04\ \Omega$$

A partir del voltaje nominal (U_r) del descargador este empieza a bajar la resistencia de sus varistores .

Si el voltaje en la fase de una línea es menor o máximo igual al voltaje nominal del descargador , este presenta una resistencia muy alta , se comporta como un aislador .

El estudio para la selección de un descargador de sobretensión requiere considerar los siguientes aspectos :

El tipo de puesta a tierra del sistema :

(Para determinar las sobretensiones temporales - Sobrevoltajes de menor amplitud pero larga duración de frecuencia industrial) , ante las cuales el descargador no debe actuar pero si debe soportarlas .

El Voltaje de operación normal de la línea :

Para determinar el voltaje de operación continua del descargador , se debe considerar el voltaje nominal de la línea incluido su nivel de armónicos , normalmente un 5 % adicional .[31]

Potencia de corto circuito de la red :

En el punto de la línea donde se conecta el descargador se debe conocer la potencia de corto circuito de la red , considerando que en el instante que sucede una descarga a tierra , el DPS es un interruptor cerrado por lo tanto , el voltaje nominal de la fase que es una tensión a 60 HZ entra automáticamente en corto circuito a tierra y la corriente de corto circuito a 60 Hz de la red , depende de la potencia de corto circuito existente en ese punto del sistema .

El nivel Isoceraúnico de la región :

El nivel Isoceraúnico de la zona es la cantidad de rayos por kilómetro cuadrado registrados durante un año , es un indicador de la magnitud de la actividad electro atmosférica , para líneas de distribución , subtransmisión , subestaciones de distribución comúnmente se utilizan descargadores de corriente nominal de 10 KA . Sin embargo los fabricantes presentan DPS desde (1.5 - 3 - 5 - 10 - 20 - 40 KA) .

Modelo Electrogeométrico de la línea :

Mediante este modelo se puede estimar la magnitud de corrientes de rayo que pueden impactar sobre una línea de determinado voltaje y altura de la estructura .

Modelado de un descargador en ATP Draw :

Para modelar un descargador en ATP Draw , se pueden utilizar varios circuitos equivalentes dependientes de la frecuencia , entre los más utilizados el modelo presentado por la IEEE - 1991 , o directamente un elemento propio de ATP Draw , una resistencia variable con la corriente , la selección del tipo de modelo a utilizar depende del grado de precisión y tipo de análisis que se requiera , para este estudio seleccionamos un elemento propio de ATP Draw (componente : MOVN) , el mismo que es suficiente para demostrar la importancia y principio de operación de un descargador de sobretensiones .[31]

En la tabla 5.1 , se presenta los valores de voltaje por unidad que debe existir en las resistencias variables (A_0 y A_1) , cuando se utilice un modelo de dos resistencias variables (caso del modelo IEEE) en función de la corriente (K_A) .

Para nuestro caso de estudio , utilizaremos un modelo dado por una sola resistencia variable (A_0 - componente MOVN) .

Tabla 5.1: Voltajes (pu) en las resistencias variables Ao y A1 en función de la corriente tipo rayo en KA

Referencia :Insulación Coordinación for Power Systems . Andrew R. Hileman
[14]

Adaptación : Autora

Corriente (KA)	V.A0 (pu)	V.A1 (pu)
0,01	0,875	-
0,1	0,963	0,769
1	1,050	0,850
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	1,250	0,994
18	1,281	1,000
20	1,313	1,006

Para modelar el componente MOVN en ATP Draw :

Utilizamos solo una resistencia variable (Ao)

Seleccionamos un descargador de :

Uc = 8,4 KV / Ur = 10 KV / Inom = 5 KA / Tipo : PDV - 65

Vres = 30,2 KV (Para corrientes tipo rayo - 8 / 20 us)

Referencia : Hubbell Power Systems [31]

El voltaje en los terminales de la resistencia variable (Ao) en función de la corriente tipo rayo para modelar en ATP , es :

$$VR.ATP = VAo . pu * Vres.DPS$$

Para Io = 0,01 KA :

$$VR.ATP = 0,875 * 30,2 KV = 26,43 KV$$

Para Io = 0,1 KA :

$$VR.ATP = 0,963 * 30,2 KV = 29,08 KV$$

En la tabla 5.2 , se muestra el cálculo completo del VR.ATP

En la figura 5.72 , el comportamiento de Ao (VR.ATP vs Irayo) en ATP Draw.

Tabla 5.2: Voltaje en la resistencia variable Ao (VR.ATP)
Referencia :Insulación Coordinación for Power Systems . Andrew R. Hileman
[14] Adaptación : Autora

Corriente (KA)	V.A0 (pu)	Vres.DPS [KV]	VR.ATP [KV]
0,01	0,875	30,2	26,43
0,1	0,963	30,2	29,08
1	1,050	30,2	31,71
2	1,088	30,2	32,86
4	1,125	30,2	33,98
6	1,138	30,2	34,37
8	1,169	30,2	35,30
10	1,188	30,2	35,88
12	1,206	30,2	36,42
14	1,231	30,2	37,18
16	1,250	30,2	37,75
18	1,281	30,2	38,69
20	1,313	30,2	39,65

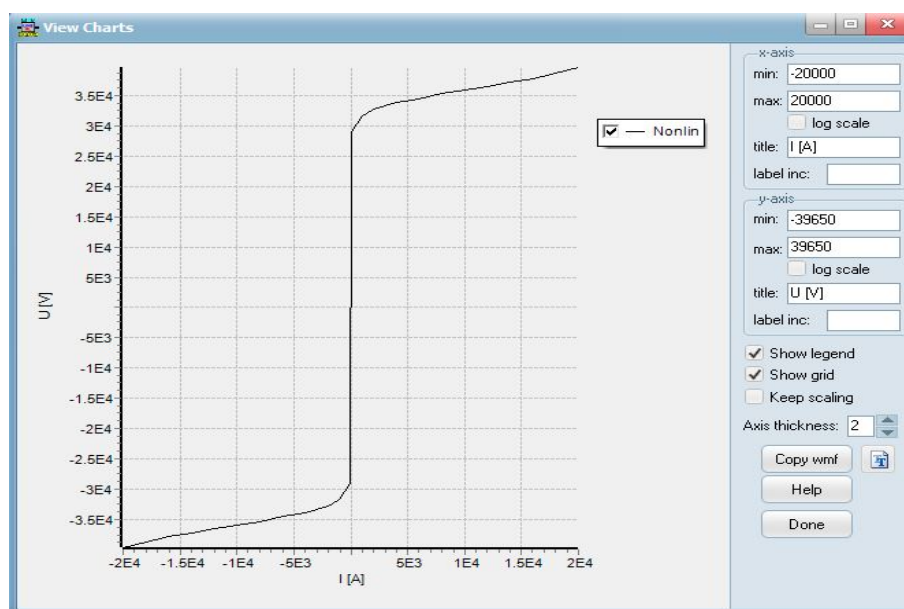


Figura 5.72: Voltaje vs Corriente en la resistencia Ao en ATP . Autora

Prueba del descargador en 13,8 KV :

En la figura 5.73 , un módulo de pruebas para 13,8 KV en la que se incluye un descargador de sobretensión junto al poste B .

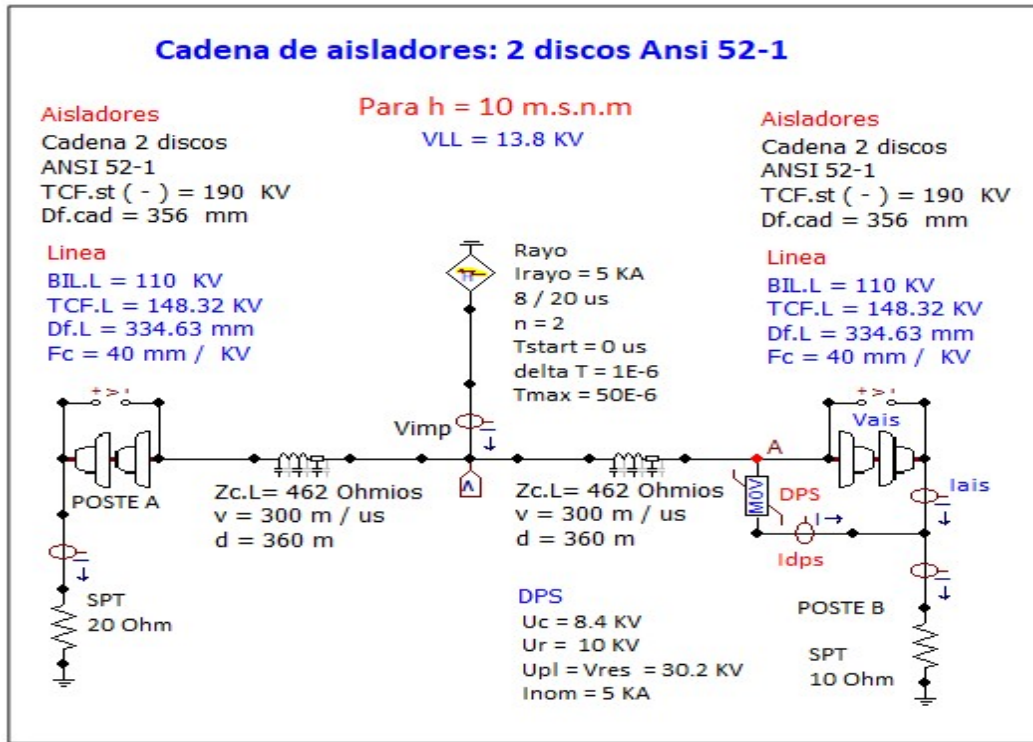


Figura 5.73: Módulo de pruebas en 13,8 KV con DPS . Autora

En la figura 5.74 , para una descarga de 5 KA (8 / 20 us) el voltaje en los terminales del aislador es :

V.aislador = 32,8 KV

V.aislador = Vresidual del DPS

Conclusión :

El descargador corta la sobretensión en 32,8 KV y evita el flameo en el aislador .

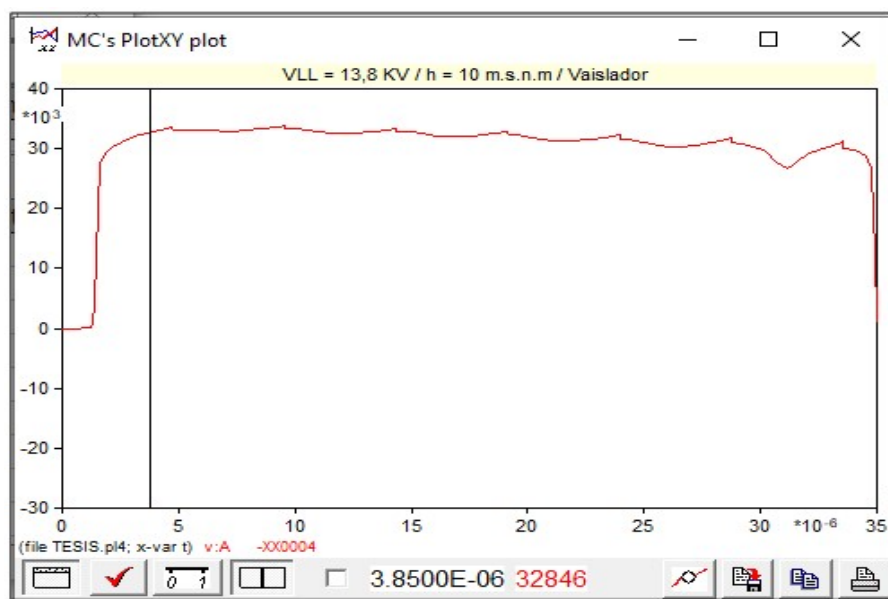


Figura 5.74: Voltaje residual de un descargador de $U_r = 10 \text{ KV} / 5 \text{ KA}$. Autora

En la figura 5.75 , se observa un transitorio de corriente de descarga a través del aislador con picos de alrededor de 6 A , lo cual demuestra que el aislador no flamea .

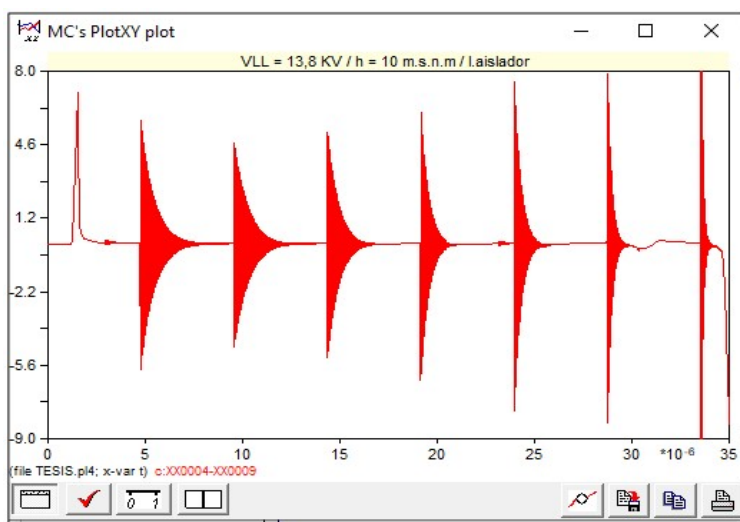


Figura 5.75: Corriente de descarga en el aislador . Autora

En la figura 5.76 , se observa la corriente tipo rayo que se descarga a tierra a través del DPS :

$I_{dps} = 3,27 \text{ KA}$

$I_{nom.dps} = 5 \text{ KA}$

La corriente de impacto $I_o = 5 \text{ KA}$, se divide ahora ya no en partes iguales debido a que el sistema de puesta a tierra (SPT - poste B) , donde está conectado el descargador por normativas es recomendado máximo 10Ω debido a los siguientes aspectos :

- Garantizar la descarga de la corriente a tierra (evitar el rebote de la corriente - es una onda viajera que al pasar de la bajante de puesta a tierra al sistema de puesta a tierra debe presentar un mínimo coeficiente de reflexión) .
- Garantizar voltajes de paso seguros ($V = R * I$)
- Garantizar voltajes de toque seguros ($V = R * I$)

La corriente tipo rayo que se dirige al poste B ahora ya no se descarga a través del aislador (porque el aislador ahora no flamea) y se descarga por medio del DPS .

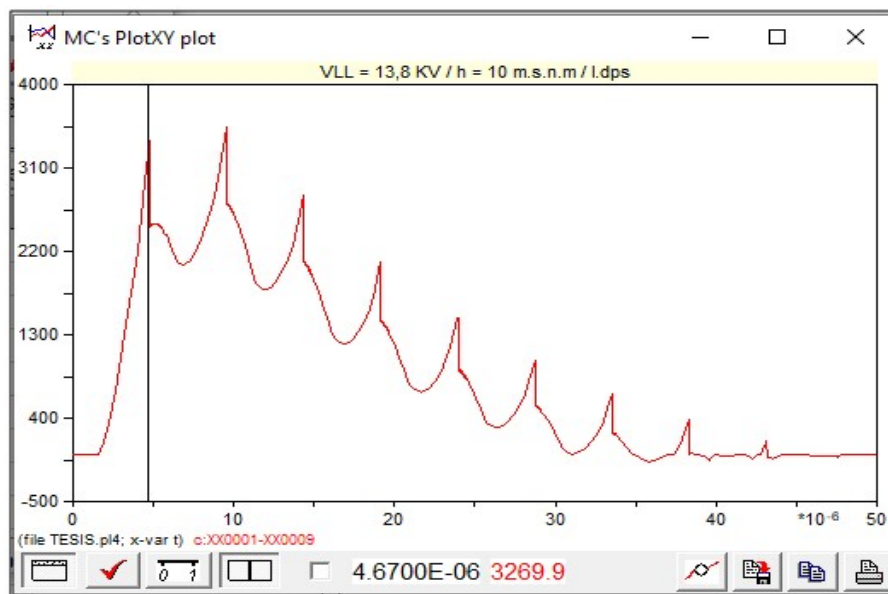


Figura 5.76: Corriente de descarga a tierra en el DPS . Autora

5.13. Descargador de sobretensión (DPS) en una línea de 69 KV

Los descargadores de sobretensión utilizados para niveles de 69 KV ,conectados entre una fase y tierra normalmente son de las siguientes características :

U_c = Tensión operación continua = 60 KV

U_r = Tensión nominal = 72 KV

U_{pl} = V_{res} = Voltaje residual = 141 KV

I_{nom} = Corriente nominal = 10 KA

La selección más específica del descargador está en función de :

- Las sobretensiones temporales que debe soportar (Depende fundamentalmente del sistema de aterramiento del neutro - Neutro sólidamente aterrizado , multi aterrizado - neutro con impedancia , sistemas en estrella o triángulo sin neutro , aspectos que inciden directamente sobre la amplitud de las fallas a tierra)
- La potencia de corto circuito de la red en el punto donde se conecta el descargador
- La amplitud de las sobretensiones de maniobras
- El nivel isoceráunico de la zona o región (NIR)
- La amplitud de las sobretensiones tipo atmosféricas
- Entre otras

Modelado de un descargador para 69 KV :

En la tabla 5.3 se muestra los valores de la resistencia variable (VR.ATP) utilizados para la simulación en ATP Draw de un descargador de voltaje residual ($V_{res} = U_{pl} = 141$ KV) , utilizando el elemento MOVN .

En la figura 5.77 , el módulo de pruebas para una línea de 69 KV de fase a fase con un descargador conectado entre fase y tierra junto al poste B .

La prueba se realiza con una fuente de corriente tipo rayo :

$I_o = 5$ KA

Onda : 8 / 20 us

Tabla 5.3: Voltaje en la resistencia variable Ao (VR.ATP) . Upl = 141 KV
Referencia :Insulation Coordination for Power Systems . Andrew R.
Hileman.[14] Adaptación : Autora

Corriente (KA)	V.A0 (pu)	Vres.DPS [KV]	VR.ATP [KV]
0,01	0,875	141	123,38
0,1	0,963	141	135,78
1	1,050	141	148,05
2	1,088	141	153,41
4	1,125	141	158,63
6	1,138	141	160,46
8	1,169	141	164,83
10	1,188	141	167,51
12	1,206	141	170,05
14	1,231	141	173,57
16	1,250	141	176,25
18	1,281	141	180,62
20	1,313	141	185,13

Donde :

$$VR (ATP) = VAo * Upl = VAo * Vres.DPS$$

Módulo de pruebas para un descargador fase - tierra en 69 KV :

En la figura 5.77 , se presenta un módulo para pruebas de una estructura de 69 KV , formado por dos cadenas de aisladores tipo disco Ansi 52-3 , con una línea de impedancia característica de 475,6 Ω , para una estructura operando a 10 msnm . En el correspondiente módulo se indica las características de la cadena de aisladores , el nivel de aislamiento de la línea , la fuente tipo rayo para las pruebas , los sistema de puesta a tierra de cada uno de los postes , la distancia al punto de impacto de un rayo , la velocidad de propagación de la onda de voltaje y corriente y finalmente las características del descargador de sobretensiones que conectado en una fase junto a uno de los postes sirve para demostrar la descarga a tierra de la sobretensión generada por la acción de una descarga atmosférica sobre una fase de una línea aérea , para lo cual se utiliza un medidor de voltaje en los terminales de la cadena de aisladores , un amperímetro para observar la corriente de descarga a tierra a través del aislador como también la corriente de descarga a tierra del DPS mediante el amperímetro (Idps) .

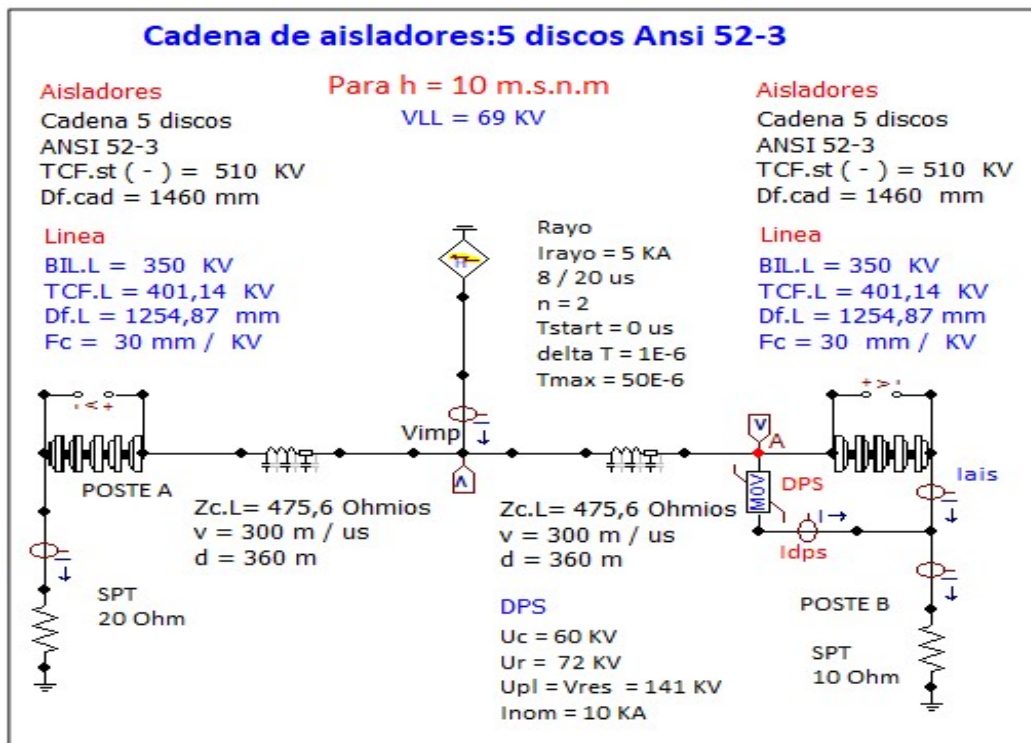


Figura 5.77: Módulo de pruebas para un descargador de 60 KV . Autora

Voltaje residual en el descargador (Upl) :

El voltaje residual en los terminales del descargador , es el voltaje que aparece cuando el DPS envía a tierra la corriente tipo rayo que se ha propagado por la línea por efecto del impacto de un rayo sobre una fase de la línea o por voltajes inducidos sobre esta .

En la figura 5.78 , se observa el voltaje en los terminales del aislador , de acuerdo a la conexión en paralelo con el descargador , este voltaje es :

$$V_{res.DPS} = U_{pl} = V_{aislador} = 33,9 \text{ KV} .$$

De acuerdo a la curva de soportabilidad de la cadena de aisladores , para un tiempo de 5 us , 33,9 KV está muy por debajo del límite de aislamiento por lo tanto ahora la cadena no flamea , demostrándose de esta manera la función de un descargador (Cortar y descargar a tierra picos altos de voltaje) .

Una manera de comprobar el no flameo de la cadena de aisladores es observar la corriente de descarga del aislador , figura 5.79 , se registra un valor pico de 10 A , que puede ser considerado como un transitorio de corriente de fuga , mien-

tras sucede la descarga de la mayor cantidad de corriente por medio del DPS . Finalmente , en la figura 5.80 , se observa la corriente de descarga a tierra a través del DPS :

$I_{dps} = 3,88 \text{ KA}$

Alcanza su amplitud máxima en $t = 5 \text{ us}$. Las recomendaciones para los sistemas de puesta a tierra donde existan conectados descargadores de sobretensión es :

SPT. para DPS = máximo 10Ω .

Con este sistema de puesta a tierra se garantiza :

Evitar rebotes de corriente que pueden causar flameo inverso .

Evitar niveles de voltajes de paso y toque peligrosos para personas y animales.

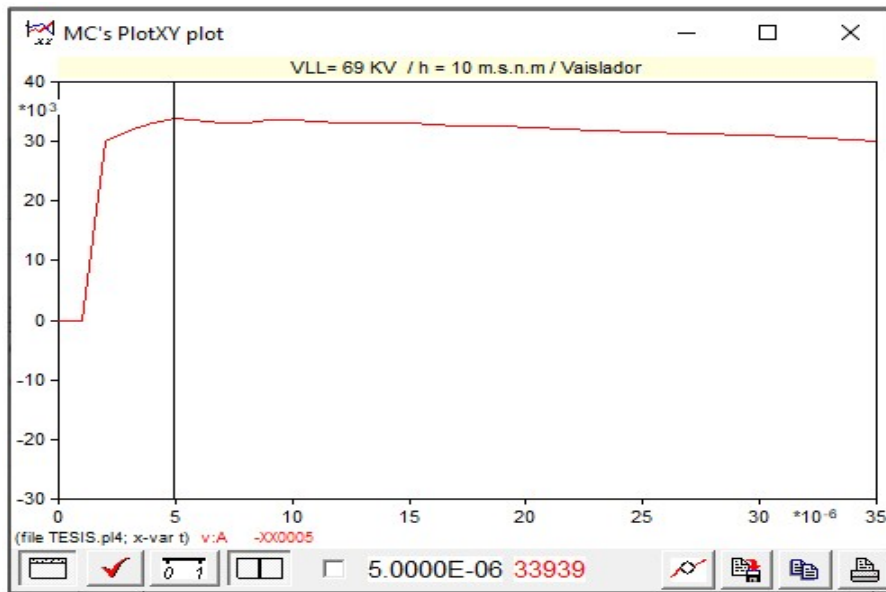


Figura 5.78: Voltaje residual en un descargador de 60 KV . Autora

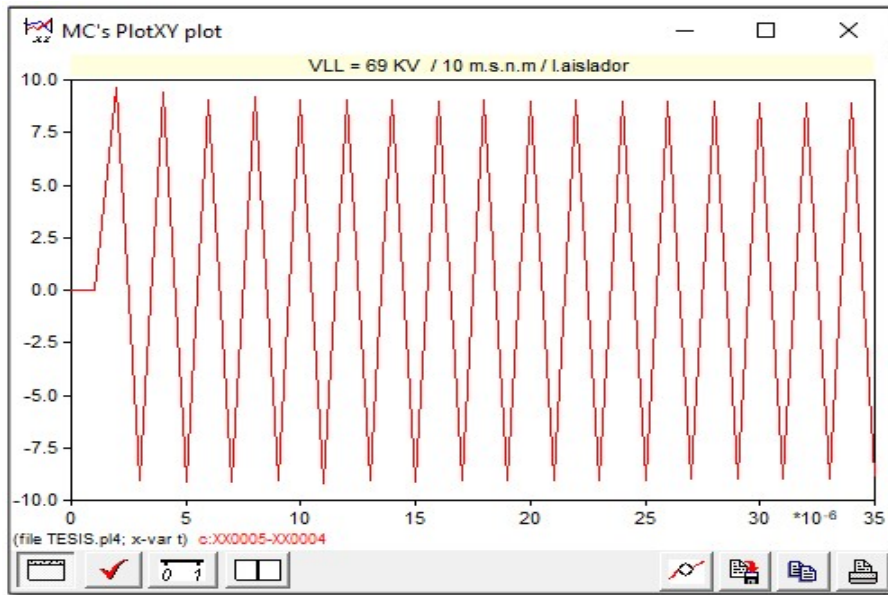


Figura 5.79: Corriente de fuga de la cadena de aisladores . Autora

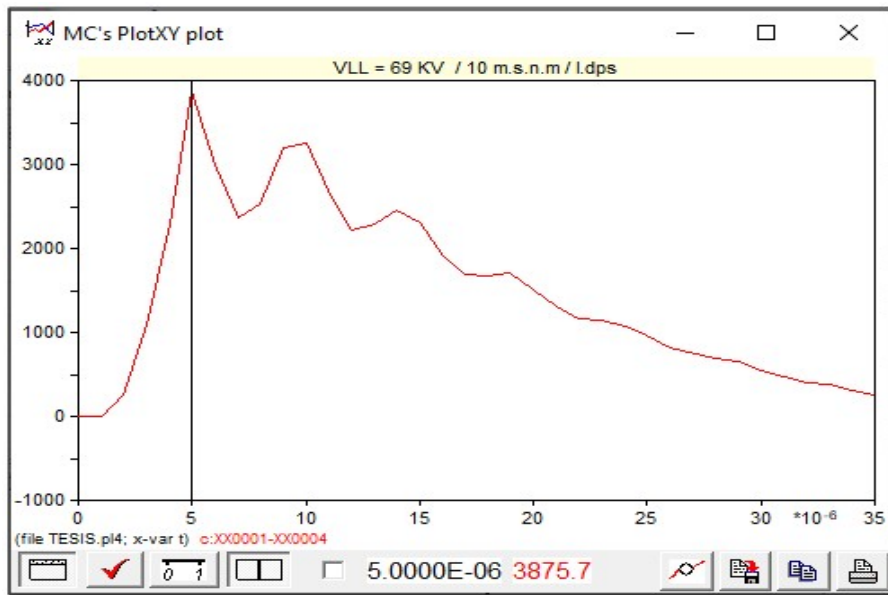


Figura 5.80: Corriente de descarga a tierra en un DPS de 60 KV . Autora

Capítulo 6

Conclusiones y recomendaciones.

6.1. Conclusiones

Después del análisis teórico , modelado matemático y pruebas de simulación mediante ATP Draw , sobre los niveles de aislamiento aplicados a estructuras de distribución (13,8 KV) y subtransmisión (69 KV) se puede anotar las siguientes conclusiones :

- El flameo en un aislador es la descarga a tierra de corriente a través de la estructura (cruceta - poste) , consecuencia de una sobretensión causado por efectos internos propios de la operación de una red (fallas a tierra , rechazo de carga , corriente Inrush , energización de líneas , energización de capacitores , reactores , etc) asi como también por efectos externos a la red (descargas atmosféricas) .
- El flameo de un aislador es la consecuencia de sobretensiones temporales de frecuencia industrial (60 Hz) y larga duración tales como , fallas a tierra , rechazo o perdida de carga , etc . Sobretensiones transitorias de corta duración causadas por maniobras o conmutación en las redes , tales como energización de líneas , capacitores , reactores , transformadores , etc . Sobretensiones transitorias de alta frecuencia (10 Khz a 3 MHZ) causadas por descargas atmosféricas ya sea por impactos directos sobre las fases o por voltajes inducidos .
- Los posibles tipos de flameo que pueden ocurrir en un aislador son a través del aire (El aire se ioniza y se vuelve conductor) , por la superficie del aislador (flameo superficial) depende directamente de la cantidad

de contaminación sobre la superficie del aislador y mediante descargas parciales por el interior del aislador .

- Si la corriente producto de una sobretensión se dirige desde la fase a tierra se llama flameo directo (efecto flashover) , pero si la corriente se dirige desde la estructura a la fase se llama flameo inverso (efecto back flashover) .
- El nivel de aislamiento de una línea está dado por los niveles críticos de voltaje de flameo , valores establecidos por los fabricantes para baja frecuencia (60 Hz) en condiciones de humedad y en seco , así como también para alta frecuencia ante rayos nube - tierra de polaridad negativa y positiva .
- Los niveles de aislamiento de una estructura depende de los factores ambientales tales como , densidad relativa del aire (altura sobre el nivel del mar , presión atmosférica y temperatura) , humedad , lluvia , contaminación y niveles isoceraúnicos de la región (Cantidad de rayos que caen en la zona) .
- El aislamiento de una estructura debe ser capaz de soportar sobretensiones de frecuencia industrial , sobretensiones por maniobras y sobretensiones por descargas atmosféricas , sin embargo existen situaciones sobre todo a nivel de descargas atmosféricas donde el flameo en un aislador es inevitable (Impactos directos de rayos sobre las fases de una línea).
- El nivel básico de aislamiento ante impulsos tipo rayo (BIL) para estructuras , líneas y equipos a nivel de 13,8 KV es de 110 KV y para niveles de 69 KV es de 350 KV , según recomendaciones de la norma IEEE st 1313-1 .
- Para estructuras utilizadas en distribución aérea (13,8 KV) la norma IEEE st 1410 - 2004 , recomienda un aislamiento de 300 KV para regiones con resistividades del suelo menores a $1000 \Omega \cdot m$ y 420 KV para suelos con resistividades mayores a $1000 \Omega \cdot m$.
- Para la región costa en las estructuras utilizadas para 13,8 KV se puede aplicar cadenas de aisladores de dos discos Ansi 52 - 1 , mientras que para la región sierra (alturas mayores A 1000 msnm) se debe incorporar un tercer disco .

- Para la región costa en las estructuras utilizadas para 69 KV se puede aplicar cadenas de aisladores de cinco discos Ansi 52 - 3 , mientras que para la región sierra (alturas mayores A 1000 msnm) se debe incorporar un sexto disco .
- La longitud de la cadena de aisladores está dada por la línea de fuga mínima necesaria de acuerdo al nivel de contaminación de la zona , concepto aplicable para todo tipo de aislador .
- Para la región costa es aplicable aisladores tipo pin Ansi 55-5 , pero para regiones tipo sierra se debe utilizar un aislador tipo doble pin Ansi 56-1, sin embargo la selección exacta del aislador está en función sobre todo del nivel de contaminación de la zona , sea a nivel costa , sierra , oriente , etc .
- Para estructuras de 13,8 KV y 69 KV también se cuenta con aisladores tipo polímeros que presentan mayores tensiones críticas de flameo (por lo tanto mayor nivel de aislamiento) sobre todo a sobretensiones de frecuencia industrial , comparados con aisladores de porcelana tipo pin , doble pin o de disco .
- Para 69 KV , está disponible aisladores tipo line - post , de características similares a los aisladores de porcelana .
- Para estructuras de distribución existe en la actualidad nuevos materiales para crucetas y postes , tal es el caso del poliéster reforzado con fibra de vidrio (PRFV) , al formar estructuras con este material se consigue que el nivel de aislamiento sea mayor , disminuyendo la cantidad de flameos en los aisladores .
- Siempre que exista flameo en un aislador se considera una falla a tierra y la probabilidad de la pérdida del servicio si el reconector de la subestación no realiza adecuadamente el correspondiente recierre . El objetivo de mejorar el nivel de aislamiento de una estructura es mejorar la protección ante sobretensiones sobre todo de tipo atmosféricas , ante impactos directos muy poco se puede hacer es inevitable el flameo , pero ante voltajes inducidos si es recomendable mejorar los niveles de aislamiento .
- Para líneas de 13,8 KV , que son de poca altura (10 m) , no se utiliza hilo de guarda , mientras que para 69 KV (altura de 19 m) es común la

protección de la línea mediante un conductor llamado hilo de tierra o de guarda .

- Tanto para 13,8 KV como para 69 KV , para la protección de líneas , estructuras y equipos ante sobretensiones de tipo atmosféricas , se utilizan descargadores de sobretensión (resistencias variables con el nivel de voltaje , construidas con pastillas de oxido de zinc llamadas varistores) , equipo muy confiable para mantener seguro un nivel de protección ante sobrevoltajes de alta frecuencia .
- En subestaciones de distribución (69 KV / 13,8 KV) , la protección del transformador de potencia es indispensable tanto en el lado de 69 KV como en 13,8 KV mediante descargadores (DPS) de sobretensión , el sistema se complementa con puntas captadoras de rayos (bayonetas) llamadas puntas Franklin o pararrayos colocadas en las cúpulas de los pórticos de entrada y salida .
- Un descargador de sobretensión es un supresor de picos de altas tensiones de altas frecuencias y un pararrayo es una punta captadora de rayos.
- Finalmente considero que se ha cumplido con los objetivos planteados y aprobados para el desarrollo de este documento .

6.2. Recomendaciones

Por lo expuesto en este documento considero pertinente las siguientes recomendaciones :

- Mejorar la modelación matemática del comportamiento de un aislador para obtener mayor precisión en los resultados de las simulaciones .
- Profundizar estudios sobre el flameo por aire , por la superficie e interiormente a través de un aislador .
- Construir modelos matemáticos para el comportamiento del arco eléctrico en el proceso de flameo de un aislador .
- Profundizar nuevos estudios sobre crucetas y postes de Poliéster reforzados con fibra de vidrio en su aporte al nivel de aislamiento de una estructura de distribución .

- Tomar los resultados expuestos en este documento y someterlos a pruebas de campo en un laboratorio , para correcciones , mejoras y ampliaciones .
- La universidad debe motivar y generar mayores estudios sobre el campo de protecciones de redes de electricidad ante sobretensiones atmosféricas , ya que es un campo de actualidad , según estudios recientes el cambio climático es una variable que afecta directamente en el incremento de la actividad electro atmosférica del planeta .

Capítulo 7

Glosario

ACSR Conductor de aluminio con acero reforzado.

BIL Nivel Básico de Aislamiento al impulso tipo rayo (factores externos).

BSL Nivel Básico de aislamiento al impulso tipo maniobra (factores internos relacionados con procesos de conmutación).

CNEL-EP Empresa Eléctrica Pública Estratégica Corporación Nacional de Electricidad.

Copperweld Compuesto bimetalico con un nucleo de acero y una pelicula externa de 254 micas de cobre metalurgicamente utilizados para sistemas de puesta a tierra.

CRE Cooperativa Rural de Electrificación Ltda.

delta T Tiempo de integración en el software ATP - DRAW.

DESD Densidad equivalente de sal depositada en mg/cm^2 .

Df.Total Distancia de fuga total que debe tener el aislamiento (mm).

Fa Factor de corrección por densidad relativa del aire.

Fc Factor de contaminación ambiental.

Fc.IEC Factor de contaminación ambiental (equivalente IEC).

- Fc.IEEE** Factor de contaminación ambiental (equivalente IEEE).
- FH** Factor de corrección por humedad.
- Fh** Factor de altitud.
- Fll** Factor de corrección por lluvia.
- Fr** Factor de regulación de voltaje (5%).
- GIS** Subestacion con aislamiento de gas,(Hexafluoruro de Azufre [SF6]).
- I.poste A** Corriente de descarga a tierra a través del poste A.
- I.poste B** Corriente de descarga a tierra a través del poste B.
- IEC** Comision electrotécnica y electrónica.
- IEEE** Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos.
- INECEL** Instituto Ecuatoriano de Electrificación.
- Irayo** Corriente tipo rayo (8 / 20 us).
- Ke** Factor de falla a tierra.
- Kp** Factor probabilístico de corrección por el número de estructuras que tiene la línea y la confiabilidad del aislamiento ..
- MEER** Ministerio de Electricidad y Energía Renovable del Ecuador.
- n** Factor de concavidad de la corriente tipo rayo en el software ATP - DRAW.
- NIR** Nivel Isocerámico de la región.
- OPGW** Cable optico a tierra utilizados en sistemas de trnasmision.
- PRFV** Poliéster reforzado con fibra de vidrio.
- SF6** Compuesto químico: Hexafluoruro de Azufre.
- SVfi** Sobrevoltaje de frecuencia industrial).

- TCF** Tensión Crítica de Flameo de un aislador.
- TCF.corr** Tensión crítica de Flameo corregida por factores ambientales.
- TCF.fi** Tensión crítica de flameo a frecuencia industrial (KV).
- TCF.man** Tensión crítica de flameo por maniobras (KV).
- TCF.rayo** Tensión crítica de flameo por rayo (KV).
- TCF.rayo.corr.alt.req.** Tensión crítica de flameo tipo rayo corregida por altitud , requerida por la línea..
- TCF.st** Tensión crítica de Flameo estandar.
- Tmax** Tiempo de simulación en el software ATP - DRAW.
- Tstart** Inicio de la generación de la corriente tipo rayo en el software ATP - DRAW.
- Uc** Tension de operación continua del pararrayo.
- Upl** Tension residual tipo rayo en el pararrayo.
- Ur** Tension nominal del pararrayo.
- Vf** Diferencia de potencial entre los terminales del aislador.
- Vimp.** Voltaje de impacto del rayo sobre una fase de la línea.
- VLL.nom** Voltaje de fase a fase , nominal (KV).

Bibliografía

- [1] W. Atlas, “Previsión metereologica y clima mensual.” <https://www.weather-atlas.com/es/ecuador/guayaquil-clima>, 2021.
- [2] J. LaForest, *Transmission-line reference book. 345 kV and above*, 2nd ed., 1981.
- [3] “Especificaciones técnicas - anexo 1 - estructuras,” *Coporación Nacional de Electricidad CNEL*, pp. 1–97.
- [4] Inecel, *Inecel Estructuras tipo para lineas de subtransmision a 69 KV*, 1985.
- [5] Maclean, *Catálogo: Maclean Power Systems*.
- [6] CRE, *Catálogo:Manual de estructuras de Redes de Subtransmision de energia electrica AT 69 KV*, 2010.
- [7] C. F. S. Gatica, “Determinación de la resistencia de puesta a tierra en torres de at en función del arco inverso,” B.S. thesis, Universidad de Chile, Abril 2021.
- [8] “Une-en 60099-4:2016 - pararrayos. parte 4: Pararrayos de óxido metálico sin explosores para sistemas de corriente alterna.” *AENOR*, pp. 1–150, Nov 2016.
- [9] “American national standard general requirements for liquid-immersed distribution, power, and regulating transformers,” *ANSI/IEEE C57.12.00-1980*, pp. 1–36, Nov 1980.
- [10] Hivolt, *Catálogo Dalian Hivolt Power System*.

- [11] “Ansi/nema c29.1-2018 - american national standard for test methods for electrical power insulators,” *National Electrical Manufacturers Association*, pp. 1–26, May 2018.
- [12] IEEE, “Ieee guide for the application of insulation coordination,” *IEEE 1313.2 -1999*, p. 50, Aug 1999 - 06 -26.
- [13] “Ieee draft standard for insulation coordination - definitions, principles, and rules,” *IEEE PC62.82.1/D5, July 2010*, pp. 1–20, Aug 2010.
- [14] A. R. Hileman, *Insulation Coordination for Power Systems*, 1st ed. Taylor Francis Group, 1999, vol. 1.
- [15] J. A. Martinez-Velasco, *Power system transients: parameter determination*, 1st ed. Boca Raton: CRC Press Taylor&Francis Group, 2010.
- [16] “Ieee draft guide for improving the lightning performance of electric power overhead distribution lines,” *IEEE P1410/D7, June 2010*, pp. 1–70, July 2010.
- [17] S. Talaei Mobarakei, T. Sami, and B. Porkar, “Back flashover phenomenon analysis in power transmission substation for insulation coordination,” in *2012 11th International Conference on Environment and Electrical Engineering*, May 2012, pp. 170–174.
- [18] IEC, “Selección y dimensionamiento de aisladores de alta tensión destinados para su utilización en condiciones de contaminación.” *IEC 60815-1*, p. 36, Aug 2014.
- [19] “Selection and dimensioning of high- voltage insulators intended for use in polluted conditions- part 1: Definitions, information and general principles,” *IEC 60815 (2008)*, no. 1, p. 47, July October,2008.
- [20] J. A. Mohom and M. E. E-Hawary, *Electric power system Dynamics and Stability*, 1st ed. B: Mmalik, 2010.
- [21] UNE-EN-IEC-60071-2, “Coordinación de aislamiento, parte 2. guia de aplicación,” *IEC*, p. 190, Aug 2018,Agosto.
- [22] Insulator, “High-voltage insulators mechanical load limits—part ii: Standards and recommendations,” *IEEE 1313.2 -1999*, p. 50, Aug 1999 - 06 -26.

- [23] R. Zoro and H. Laksmiwati, "Improvement of lightning protection system for transmission and distribution lines in high lightning density area," in *2017 6th International Conference on Electrical Engineering and Informatics (ICEEI)*, Nov 2017, pp. 1–5.
- [24] F. D. Viteri Mogrovejo, "Análisis y propuesta de estandarización de precios unitarios para la construcción de redes de distribución eléctrica aérea hasta 13.8 kv." B.S. thesis, Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, 2016.
- [25] CENTELSA, *Catalogo de conductores para LT CENTELSA ACSR*.
- [26] J. Mahseredjian, V. Dinavahi, and J. A. Martinez, "Simulation tools for electromagnetic transients in power systems: Overview and challenges," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 24, no. 3, pp. 1657–1669, 2009.
- [27] Y. B. T. O. Akihiro Ametani, Naoto Nagaoka, *Power System Transients Theory and Applications*, 1st ed. Boca Raton: CRC Press Taylor&Francis Group, 2013.
- [28] I. E. Commission, "Iec 60071-1: Coordinación de aislamiento- parte 2," *AENOR STD*, vol. Séptima Edición, pp. 1–25, Nov 1993.
- [29] G. Lee and C. Goldsworthy, "Introduction to the alternative transients program (atp)," in *IEEE SPDC Spring Meeting in Bonneville Power Administration (BPA)*, 2011, pp. 1–110.
- [30] I. E. Commission, "Iec 60071-1: Coordinación de aislamiento," *AENOR I*, vol. Séptima Edición, pp. 1–25, Nov 1993.
- [31] I. Hubbell Power Systems, *DESCARGADORES DE SOBRETENSIÓN*.

Tabla 7.1: Resumen de ecuaciones. Autora

Resumen de ecuaciones		
Índice	Ecuación	Datos
2.1	$TCF.corr = \frac{TCF.st * Fa * Fll}{FH}$	<ul style="list-style-type: none"> ▪ TCF.corr = Tensión crítica de Flameo corregida por factores ambientales. ▪ TCF.st = Tensión crítica de Flameo estandar ▪ Fa = Factor de corrección por densidad relativa del aire. ▪ Fll = Factor de corrección por lluvia. ▪ FH = Factor de corrección por humedad
2.2	$Fa = (1,03) * e^{-h/8,65}$	<ul style="list-style-type: none"> ▪ e = Número de Euler = 2,71828 ▪ h = Altura (km.s.n.m).
2.3	$Df.Total = \frac{VLL.max * Fc.IEEE}{\sqrt{3} * Fa}$	<ul style="list-style-type: none"> ▪ NORMA : IEEE - STD 1313.2 - 1999 ▪ Df.Total = Distancia de fuga total que debe tener el aislamiento (mm) ▪ VLL.max = 1,05 * VLL. nominal = 1,05 * 13,8 KV = 14,5 KV. ▪ Fc.IEEE = Factor de contaminación ambiental (equivalente IEEE). ▪ Fa = Factor de densidad relativa del aire .

Tabla 7.2: Resumen de ecuaciones. Autora

Resumen de ecuaciones		
Índice	Ecuación	Datos
2.4	$Df.Total = \frac{1,1 * VLL.nom * Fc.IEC}{\sqrt{Fa}}$	<ul style="list-style-type: none"> ▪ NORMA : IEC - 60071.2 - 2018 ▪ Df.Total = Distancia de fuga total que debe tener el aislamiento (mm) ▪ VLL = VLL. nominal (KV) ▪ Fc.IEEE = Factor de contaminación ambiental (equivalente IEC) ▪ Fa = Factor de densidad relativa del aire
2.5	$SVfi = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} * 1,05 * VLL.nom * Ke$	<ul style="list-style-type: none"> ▪ SVfi = Sobrevoltaje de frecuencia industrial. ▪ Ke = Factor de falla a tierra. ▪ Ke = 1.35 , para sistemas con neutro multiterrizado. ▪ Ke = 1,40 , para sistemas con neutro aterrizado en la fuente ▪ Ke = 1,73 , para sistemas con neutro aterrizado con impedancias.
2.7	$TCF.st.maniobras = \frac{BSL.st}{0,922}$	Tensión crítica de flameo ante sobretensiones de maniobras

Tabla 7.3: Resumen de ecuaciones. Autora

Resumen de ecuaciones		
Índice	Ecuación	Datos
2.8	$BSL.corr.altitud = BSL.st * Fh$	<ul style="list-style-type: none"> ■ Corrección del BSL por altitud ■ Fh = Factor de altitud.
2.13	$TCF.st.rayo = \frac{BIL.st}{0,961}$	Corrección del BIL por altitud
2.14	$BIL.corr.altitud = BIL.st * Fh$	<ul style="list-style-type: none"> ■ Fh = Factor de altitud.
2.19	$Df.total = \frac{Fr * VLL.nom * Fc}{\sqrt{3} * Fa}$	<ul style="list-style-type: none"> ■ Df.total = Distancia de fuga total (mm). ■ Fr = Factor de regulación de voltaje (5%) ■ VLL.nom = Voltaje de fase a fase , nominal (KV) ■ Fc = Factor de contaminación (mm / KV) ■ Fa = Factor de corrección por densidad relativa del aire.

Tabla 7.4: Resumen de ecuaciones. Autora

Resumen de ecuaciones		
Numero	Ecuación	Datos
2.20	$TCE.fi = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} * \frac{Fr * VLL.nom * Ke * FH}{Kp * Fa * Fll}$	<ul style="list-style-type: none"> ■ TCE.fi = Tensión crítica de flameo a frecuencia industrial (KV) ■ Fr = Factor de regulación de voltaje (5%) ■ VLL.nom = Voltaje de fase a fase , nominal (KV) ■ Ke = Factor de falla a tierra. ■ FH = Factor de humedad. ■ Kp = Factor probabilístico dado por el número de estructuras y confiabilidad del aislamiento. ■ Fa = Factor de corrección por densidad relativa del aire. ■ Fll = Factor de corrección por lluvia.

Tabla 7.5: Resumen de ecuaciones. Autora

Resumen de ecuaciones		
Índice	Ecuación	Datos
2.21	$TCF.man = \frac{BSL * Fh * FH}{0,922 * Fa * Fll}$	<ul style="list-style-type: none"> ■ TCF.man = Tensión crítica de flameo por maniobras (KV) ■ BSL = Nivel básico de aislamiento al impulso tipo maniobra (KV) ■ Fh = Factor de altitud. ■ FH = Factor de humedad. ■ Fa = Factor de corrección por densidad relativa del aire. ■ Fll = Factor de corrección por lluvia.
2.22	$TCF.rayo = \frac{BIL * Fh * FH}{0,961 * Fa * Fll}$	<ul style="list-style-type: none"> ■ TCF.rayo = Tensión crítica de flameo por rayo (KV) ■ BIL = Nivel básico de aislamiento al impulso tipo rayo (KV). ■ Fh = Factor de altitud. ■ FH = Factor de humedad. ■ Fa = Factor de corrección por densidad relativa del aire. ■ Fll = Factor de corrección por lluvia.

Tabla 7.6: Resumen de ecuaciones. Autora

Resumen de ecuaciones		
Índice	Ecuación	Datos
3.1	$Zc = (60) * \ln\left(\frac{2000 * h(m)}{r(mm)}\right)$	<ul style="list-style-type: none"> ▪ h = Altura de la fase más alta con respecto al suelo (m) ▪ r = radio del conductor (mm)
5.1	$R = \left(\frac{\rho}{2 * \pi * Df}\right) * \ln\left(\frac{2 * Df}{r}\right)$	<ul style="list-style-type: none"> ▪ ρ = Resistividad eléctrica del material ($\Omega * m$). ▪ Df = Distancia de fuga (m). ▪ r = Radio geométrico del aislador (m).
5.2	$C = \left(\frac{\epsilon_r * Df}{2 * \ln(2 * Df/r)}\right) * \left(\frac{1 \times 10^{-9}}{9}\right)$	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Df = Distancia de fuga (m). ▪ r = Radio geométrico del aislador (m). ▪ ϵ_r = Permitividad relativa del material.
5.3	$Vsop_{st} = \left(400 + \frac{710}{t^{0,75}}\right) * d$	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Vsop.st = Voltaje de soportabilidad estándar (KV) ▪ d = Distancia o longitud de la cadena de aisladores (m) ▪ t = Tiempo después del impacto del rayo (us)

Tabla 7.7: Resumen de ecuaciones. Autora

Resumen de ecuaciones		
Indice	Ecuación	Datos
5.4	$V_{sop_{corr}} = V_{sop_{st}} * \frac{Fa^m * Fll}{FH}$	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fa = Factor de corrección por densidad relativa del aire. ▪ Fll = Factor de corrección por lluvia. ▪ FH = Factor de corrección por humedad. ▪ m = Factor de tipo de aislador utilizado
	$k = \left(\frac{710 * d * Katp}{\left(\frac{V_{sop_{st}} * FH}{Fa^m * Fll} - (400 * d * Katp) \right)} \right)$	<ul style="list-style-type: none"> ▪ V.sop.st = Voltaje de soportabilidad estándar (KV) ▪ Katp = Constante en ATP DRAW ▪ FH = Factor de corrección por humedad. ▪ m = Factor de tipo de aislador utilizado ▪ Fll = Factor de corrección por lluvia. ▪ Fa = Factor de corrección por densidad relativa del aire. ▪ d = Distancia o longitud de la cadena de aisladores (m)
	$t = k^{1,33}$	t = tiempo después del impacto del rayo (us)