UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Reducción de las distancias del Aislamiento Eléctrico en el aire en subestaciones eléctricas convencionales en Alto Voltaje AIS en el rango de 115 kV a la altura de la ciudad de Bogotá DC y alrededores.

Eliseo Gómez Moreno

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica
Ciudad, Colombia
2023

Reducción de las distancias del Aislamiento Eléctrico en el aire en subestaciones eléctricas convencionales en Alto Voltaje AIS en el rango de 115 kV a la altura de la ciudad de Bogotá DC y alrededores.

Eliseo Gómez Moreno

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ingeniería Eléctrica

Director (a): PhD. Francisco José Román Campos

Línea de Investigación: Aislamiento Eléctrico

Grupo de Investigación: Grupo de investigación en compatibilidad electromagnética EMC-UN

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica

Ciudad, Colombia

2023

Dedicatoria

A mis padres, fuentes de la sabiduría honor a su entrega total.

A mi esposa y a mis hijas, fuentes de mi inspiración y meta de mis deseos cumplidos. A mis hijas, en particular, ambas ingenieras, seguidoras de los encantos que logré inspirar en ellas por el ejercicio de la ingeniería, gran orgullo para mi persona y premio a mis esfuerzos en este campo de mi desarrollo.

Agradecimientos

A mi profesor director de Tesis quién siempre me oriento acertadamente en mis deseos iniciales de realizar el Doctorado …

… para realizar primero esta Maestría

Ya en el desarrollo con su amable contribución de sus conocimientos, ideas y orientaciones siempre con espíritu abierto al recibir sus enseñanzas y al compartir las diferentes fuentes de consulta

Resumen

Reducción de las distancias del Aislamiento Eléctrico en el aire en subestaciones eléctricas convencionales en Alto Voltaje en el rango de 115 kV a la altura de la ciudad de Bogotá y alrededores

Este trabajo entrega los resultados acerca de experimentos realizados por varios investigadores y a partir de las experiencias prácticas en la operación de sistemas eléctricos de potencia se pretenden sustentar recomendaciones sobre cambios en la aplicación de normas técnicas internacionales.

En particular trata el aspecto de la aplicación de la Ingeniería Eléctrica en el campo específico del Aislamiento Eléctrico que se ocupa entre otros del estudio de la seguridad ante las consecuencias de los acercamientos entre partes energizadas a potenciales eléctricos, de una parte, y de otra, los seres vivos y objetos en general que se encuentren conectados al potencial de tierra.

Este aspecto constituye la base fundamental para establecer parámetros que garantizan la calidad y seguridad tanto en la operación del sistema eléctrico como en la seguridad de los seres vivos, de las instalaciones de los sistemas de potencia eléctrica y de los servicios eléctricos a nivel del Mundo Actual.

Palabras clave: Aislamiento, Normativa, Calidad, Seguridad y Servicios

Abstract

Reduction of the Electrical Insulation distances in air in conventional High Voltage AIS electrical substations in the 115 kV range at the height of city and surroundings

This document presents the results of experiments performed by other researchers, to support and suggest some changes in the electrical insulation Normative used until now.

In addition, several committees existing worldwide and many professional experiences supports a more effective utilization of DPSs, recommend some changes in the application of International Technical Standards.

It concerns with the study of safety and before the consequences of the approaches between energised parts, human beings and objects in general that are connected to the ground potential.

These aspects maintain at the same time the basis to guarantee both the quality in the operation of a system and the supply of electrical services at the level of the present knowledge, as well as the safety of living beings and the electrical power systems.

Keywords: Electrical insulation, standards, quality, safety and service

Contenido

Pág.

Resumen ..... **V**

Lista de figuras ..... **X**

Lista de tablas ..... **XIII**

Introducción **1**

1. Objeto de investigación **3**
1.1 Objetivo general 3
1.2 Objetivos específicos 3

2. Los sobrevoltajes y el aislamiento eléctrico en aire **5**
2.1 El rayo y los sobrevoltajes 6
2.1.1 Generalidades sobre el rayo 6
2.1.2 Nivel Ceráunico 7
2.1.3 El rayo en Bogotá DC 8
2.2 Efectos del Rayo 13
2.2.1 Sobrevoltajes e Impulsos causados por los rayos 13
2.2.2 El Sobrevoltaje y su desplazamiento. 14
2.3 Sobrevoltaje por maniobra 17
2.4 Sobrevoltaje disruptivo Ud 19

3. Generalidades sobre las Distancias de aislamiento d y d2 ..... **19**
3.1 Diferentes distancias 21
3.2 Determinación de la distancia de aislamiento 23
3.3 Las Normas sobre distancias mínimas de aislamiento en el aire 24
3.3.1 Norma europea CENELEC EN 50341-1 24
3.3.2 Norma IEC 60071-1/2 28

4. La ruptura del aire y el aislamiento **32**
4.1 El primer coeficiente efectivo de ionización $\bar{\alpha}$ y el coeficiente de recombinación 32
4.2 El aislamiento en los campos eléctricos uniformes y no uniformes 37
4.2.1 Transición de la descarga no auto sostenida al rompimiento del medio 37
4.2.2 El concepto de la avalancha y rompimiento por Streamer 40
4.2.3 Distancia disruptiva interelectrodica por coeficiente de Attachement 47
4.2.3.1Procedimiento para estimar Xc por Attachement y su relación con d 50
4.2.3.2 Explicación caso específico en Tabla 4-3 52
4.2.3.3Concepto según el autor Cooray [19] 53

4.2.3.4 Relación gráfica de los valores esperados de α y η en f (E/p) 54
4.2.3.5 Conclusiones según la Tabla 4-4 55
4.3 La selección tradicional de la Distancia para distancias grandes entre electrodos 58
4.4 La distancia d según norma IEC 60071-2 59

5. Cálculo de sobrevoltajes causadas por los rayos con el programa ATP y su control 60
5.1 El dispositivo de protección contra sobrevoltajes DPS 60
5.2 El modelo del DPS para el ATP 62
5.3 El modelo del esquema eléctrico para reducción de las sobretensiones. 63
5.4 El Modelo del DPS y funcionamiento en ATP 65
5.4.1 El Modelo del ATP 65
5.4.2 Características del doble juego de descargadores 65
5.5 Aplicación del programa ATP 69
5.5.1 Introducción general 69
5.5.2 Resultados de Voltaje V vs. Tiempo en programa ATP 70
5.5.3 Cuadro resumen de los casos simulados con uno y dos juegos de ATP 77
5.5.4 Análisis a las Figuras 5-8 a 5-13 79
5.5.5 La coordinación del aislamiento 82

6. La práctica de la ingeniería en la reducción de la distancia de aislamiento 85
6.1 Observaciones para la reducción de las distancias de aislamiento 85
6.1.1 Disminución de la distancia de aislamiento fase-tierra en aire. 86
6.1.2 Aplicar los cambios 87
6.1.3 Calidad de los dispositivos DPS 87
6.2 Revisión a la práctica actual en altas tensiones del Rango 1 de IEC 88
6.2.1 En Medias tensiones 88
6.2.2 Proyección para el sistema de 115 kV 89
6.3 Reducción de la distancia de aislamiento 89

7. Riesgo de la descarga por rayo a la distancia d 91
7.1 El voltaje por rayo aplicado es una variable probabilística 91
7.2 La probabilidad de ocurrencia de descarga sobre la línea con falla del aislamiento. 93
7.3 Metodología para estimar el riesgo de disrupción en aire por rayo con nueva d. 95
7.3.1 Estimación del riesgo de toque de rayo sobre la línea de transmisión 95
7.3.2 La seguridad del DPS y el voltaje disruptivo del aire. 96
7.3.3 Margen de operación del DPS y una nueva coordinación del aislamiento 97
7.3.4 Los riesgos al equipo por reducción de la distancia de aislamiento. 98

8. Historia: la reducción de distancias de aislamiento en Bogotá DC 101
8.1 La historia 101
8.2 Las pruebas realizadas 102

9. Disposición constructiva para subterranización de Subestación 115 kV 104
9.1 Generalidades 104
9.2 Idea aproximada de una subestación a 115 kV subterránea. 104

10. Cumplimiento de Objetivos, Conclusiones y recomendaciones 107
10.1 Cumplimiento de los objetivos planteados 107
10.2 Conclusiones 108
10.2 Recomendaciones 109

A. Anexo: Definiciones 111

B. Anexo: Cálculo de la distancia Xc', otros casos 115

C. Anexo: Caso de aplicación con corriente de rayo de 5 kA, 2,5 kA entran a la subestación 118

D. Anexo: Conversión 57,5 kV a 115 kV 122

E. Anexo: Cálculos selección nuevo juego doble del DPS.....129

F. Anexo: Tabla de cálculos probabilidad de falla apantallamiento por rayo en líneas a 115 kV Bogotá.....132

G. Anexo: Propuesta Subestación 115 kV AIS parcialmente subterránea.....134

H. Anexo: Norma IEC 60071 1 2002 Tabla 2 136
I. ANEXO RESULTADOS PRUEBAS EN LABORATORIO LABE UN 137
a. Bibliografía.....139

Lista de figuras

Pág.

Figura 2-1: Distribución de probabilidad de la magnitud de la corriente de rayo [2]. ... 7
Figura 2-2: Bogotá corrientes de rayo leídas en porcentaje acumulativo año 2022 [16] 9
Figura 2-3: Imagen preparada por la firma Keraunos en Google Earth con muestra de rayos sobre la ciudad de Bogotá. 12
Figura 2-4: Forma normalizada de ondas de impulso y sobrevoltajes por rayo y manobra para pruebas en laboratorio [10] 14
Figura 2-5: Sobrevoltaje sobre la cadena de aisladores, distancia **d**, por Impacto de rayo. 14
Figura 2-6: Sobrevoltaje incidente y sobrevoltaje reflejado 16
Figura 3-1: Vistas de las distancias disruptivas **d**: a) perfil y b) planta de un módulo de subestación 20
Figura 3-2: Determinación de los componentes de la distancia de aislamiento 23
Figura 1-1: Descarga autosostenida, las cabezas y nube de electrones hacia el Ánodo y + al ánodo [8][1]
Figura 1-2: Modelo de aplicación configuración conductor – placa
Figura 4-3: Er campo radial de la cabeza de la avalancha, E campo de transfondo aplicado, Xc longitud de avalancha 42
Figura 1-4: La función de ruptura en medio no uniforme según el coeficiente de Attachement
Figura 4-5: Los coeficientes del proceso de recombinación con α, α^- en aire y comparación con gas SF6 54
Figura 4-6: **I**mpulsos de sobrevoltaje 50% disruptivo y sobrevoltaje a frecuencia industrial vs. distancia electrodos, varios Voltajes: 1: +1,5/40 µs, 2: -1,5/40 µs, 3: +1/5 µs, 4: -1,5/40 µs, 5: 60 Hz a condiciones normales de presión, temperatura y altura h msnm 58
Figura 5-1: Característica campo unitario en función de la densidad de corriente en DPS tipo óxido metálico ZnO contra antiguo en carburo silicio SiC [8] 61
Figura 5-2: El modelo DPS tipo Pincetti para el aplicativo ATP [20] 63
Figura 5-3: Esquema eléctrico de la línea de transmisión con doble juego de DPS.. 64

[1] [8] p 329

Figura 5-4: Conexión de doble juego de DPS a la entrada de la subestación 64
Figura 1-4: La función de ruptura en medio no uniforme según el coeficiente de Attachement
Figura 5-5: Características no lineales A0 y A1 del juego adicional de DPS [20] 665
Figura 5-6: Instalación de las líneas de transmisión que llegan a subestación Florida modeladas en ATP 676
Figura 5-7: Instalación en subestación Florida 115 kV DE Figura 5-6, detalle y ampliación del módulo de llegada de línea 68
Figura 5-8: 1 juego de DPS en módulo de línea, Escalas: Voltajes -200-0- +200 kV, tiempo 0 a 0,2 ms. I rayo: 0-10 kA. Rayo de 10 kA en fase C curva roja (c: xx0095), Voltaje módulo Fase C curva azul (v: VDSTC), Voltaje de barras Fase C (v:x0003C) curva verde superpuesta al Voltaje del módulo 71
Figura 5-9: Complemento a la Figura 5-8, 1 juego DPS en módulo de línea. Escalas: Voltajes -200-0- +200 kV, tiempo: 0 a 0,2 ms 72
Figura 5-10: Complemento a Figura 5-8. 1 juego DPS. Escalas: Voltaje: -200-0- +200 kV, tiempo: 0 a 0,2 ms desde el Impacto del Rayo. Voltaje del módulo Fase B, curva verde, Voltaje de Barras Fase B curva roja superpuesta a curva verde..... 73
Figura 5-11: Dos juegos de DPS: en módulo de línea y ultima estructura antes de la llegada a la subestación. Escalas: Voltaje -200 – 0 - +200 kV, tiempo: 0 a 0,2 ms desde impacto Rayo de 10 kA en fase C curva roja. Voltaje de módulo Fase C curva azul. Voltaje de barras Fase C (v:x0003C) curva verde superpuesta al Voltaje del módulo. ... 74
Figura 5-12: Complemento a Figura 5-11. Dos juegos DPS. Escalas: Voltajes escala -200-0-+200 kV, tiempo 0 a 0,2 ms., Voltaje en ultima torre Fase A, curva roja y Fase B curva verde, Voltajes módulo fase B, Voltaje en barras Fase B curva azul (superpuesta a la café). Nótese que el voltaje en la torre es mayor que los correspondientes en módulo y barraje. 74
Figura 5-13: Complemento a Figura 5-11, dos juegos DPS. Escalas: Voltajes -200-0- +200 kV, tiempo 0 a 0,2 ms 76
Figura 5-14: Los parámetros para la coordinación del aislamiento V vs T [22]: dibujo libre del autor. 83
Figura 7-1. Nueva consideración de la Coordinación del aislamiento
Figura C-1: 2,5 kA y un juego DPS.....118
Figura C-2: Viene de Figura C-1.....119
Figura C-3: Viene de Figura C-1.....119
Figura C-4: I rayo 2,5 kA y dos juegos DPS 120
Figura C-5: Viene de Figura C-4.....121
Figura D-1: Conexiones pruebas de aislamiento ante sobrevoltaje de maniobra, 1979 122
Figura D-2: Cuadro de resultados varias pruebas realizadas en 1979.....123
Figura D-3: Cuadro de resultados varias pruebas realizadas en 1979.....124
Figura D-4: Oscilogramas prueba 32 realizados en 1975.....125
Figura D-5: Parte de estudios previos realizados por EEEB realizados en 1975 126
Figura D-6: Parte de estudios previos realizados por EEEB en 1975 127

Figura D-7: Parte de estudios previos realizados por EEEB, 1975 128
Figura E-1: Selección de los DPS datos de fabrica 130
Figura F-1: Convenciones 133
Figura G-1: Subestación 115 /13,2 kV parcialmente subterránea con reducción de distancias de aislamiento y equipos híbridos 134

Lista de tablas

Pág.

Tabla 2-1: Municipios de la sabana 10
Tabla 2-2: Estadística de información de rayos sobre Bogotá en 2022. 10
Tabla 2-3: Distribución de los rayos en la sabana de Bogotá año 2022 [16] 11
Tabla 3-1: Norma EN 50431 Correlación entre sobrevoltajes de impulso normalizados por rayo y los espacios mínimos de aislamiento en aire con Ka a 1000 msnm 26
Tabla 3-2: Parámetro Del para diferentes alturas msnm 27
Tabla 3-3: Parámetro Dpp para diferentes alturas h msnm 27
Tabla 3-4: Distancias mínimas de aislamiento en aire Norma IEC 60071-2 29
Tabla 4-1: Distancias Variaciones de α /p y η/p en función de E/p para el aire y oxígeno de acuerdo con Geballe y Herrison 35
Tabla 4-2: Desarrollos y resultados con Xc >d 56
Tabla 5-1: Características de los dos juegos de DPS, 10 kA, 8/20 66
Tabla 5-2: Relación de figuras con los resultados obtenidos con el programa ATP.... 69
Tabla 5-3: Cuadro resumen de actuación juegos de 1 o 2 DPS, sobrevoltajes máximos Fase-tierra leídos y varios casos I rayo 78
Tabla 6-1: Recomendaciones Revista ABB 2 2002 89
Tabla 7-1 Correlación distancia d y el voltaje disruptivo……95
Tabla B-1: Cálculo de la distancia Xc, otros casos 115
Tabla F-2: Tabla de cálculos probabilidad de falla apantallamiento por rayo en líneas a 115 kV Bogotá.....132
Tabla H-3: Norma IEC 60071 1 2002 Tabla 2 136

Introducción

El desarrollo profesional en el campo de la ingeniería eléctrica permite observar con espíritu crítico la situación de los grandes espacios físicos requeridos por las instalaciones eléctricas particularmente en el ámbito de los altos y extra altos voltajes.

Esta primera inquietud se ha reforzado al observar como las ciudades crecen hacia una mayor densidad poblacional, sigue creciendo la demanda de energía eléctrica y se requieren más sitios para su repartición.

La idea inicial se atiende analizar los principios que la ingeniería maneja para garantizar que los espacios utilizados sean los adecuados ante situaciones de alto riesgo por la cercanía física de los seres vivos a los sitios de la utilización de la energía eléctrica.

Por lo tanto, el objetivo debe ser cómo lograr un equilibrio entre la utilización de espacios reducidos sin riesgos para personas y seres vivos, sin afectar las posibles consecuencias peligrosas por más acercamientos. De otra parte, identificar como se pueden mejorar las actuales aplicaciones que cuidan estos aspectos y si hay otras nuevas, utilizarlas.

Bajo el primer aspecto, fijar menores distancias para acercamientos contando con el aire como aislante. Bajo el segundo aspecto utilizar las ventajas que ofrecen las últimas tecnologías que se utilizan en la fabricación de estos elementos controladores ante los sobrevoltajes, los DPS. Cabe recordar que en la práctica actual y desde el inicio los sobrevoltajes definen los espacios utilizados.

Los agentes que producen los sobrevoltajes son, en primer lugar, los rayos o descargas atmosféricas que son de ocurrencia en cualquier sitio y de cualquier magnitud y en segundo lugar los derivados de la utilización, operación e interacción con el medio que rodea los equipos energizados en extra altos voltajes.

Al fijar claramente el objetivo se logró interpretar que el aire bajo ciertas características de los campos eléctricos soporta mucho mejor los sobrevoltajes actuando entonces como un muy buen aislante. Adicionalmente, las tecnologías avanzadas en el tratamiento de los materiales que componen los DPS garantizan comportamientos cada vez más confiables y seguros en su trabajo de control.

El resultado recomienda la reducción de las distancias de aislamiento con lo cual se visualizan las mejores posibilidades acerca de la construcción de las subestaciones nuevas en lotes más reducidos o en espacios subterráneos pensando en la reutilización del terreno para otros beneficios y aún en las ampliaciones y remodelaciones.

1. Objeto de investigación

Es posible reducir las distancias recomendadas por la normativa en las subestaciones de potencia AIS con aislamiento convencional a través del aire al nivel de voltaje de 115 kV. El aislamiento corresponde al soportado por el aire entre las partes energizadas y la tierra.

1.1 Objetivo general

Proponer la disminución de las distancias de aislamiento eléctrico establecidas y normalizadas internacionalmente en este tipo de subestaciones de potencia basados en principio por un mejor control a los sobrevoltajes que puedan ingresan a la subestación.

1.2 Objetivos específicos

Demostrar que la incertidumbre ante la posible ocurrencia de los sobrevoltajes externas en los equipos y las instalaciones puede ser efectivamente controlada mediante la adecuada ubicación y operación de los últimos desarrollos alcanzados en los descargadores de sobrevoltaje DPS.

Conocer las estadísticas de los sobrevoltajes tipo rayo que ocurren e inciden sobre el sistema eléctrico de la ciudad de Bogotá con la idea de modernizar algunos conceptos sobre los cuidados que se han utilizado hasta el momento ante estas posibles incidencias.

Demostrar cómo los sobrevoltajes e impulsos esperados por rayo que determinan la selección de las distancias de aislamiento en el aire podrían ser menores a las establecidas por las normas de coordinación de aislamiento.

Generar las recomendaciones que permitan plantear nuevas soluciones para la construcción de nuevas subestaciones de potencia en sitios cada día más densamente poblados o en la remodelación de las existentes, permitiendo disminuir los espacios ocupados con base en dos principios: -1 La disminución de las distancias de aislamiento

entre partes energizadas y tierra, en beneficio de menores áreas de ocupación y -2 El uso de nuevo equipamiento que presenta ahora tamaños más reducidos a los tradicionales.

Establecer las bases teóricas que permitan, en estudios posteriores al presente, aplicar la reducción de las distancias de aislamiento en beneficio del ahorro en las áreas exteriores empleadas hoy en las subestaciones existentes o en las nuevas. Igualmente, al reducir las distancias de aislamiento en los barrajes se elimina la necesidad de utilizar barrajes tipo GIS.

Realizar pruebas de aislamiento al aire en Laboratorio.

2. Los sobrevoltajes y el aislamiento eléctrico en aire

Este trabajo se ocupa del efecto que tienen las descargas eléctricas atmosféricas, en adelante rayos, en el origen de los sobrevoltajes[2] en los sistemas de potencia, particularmente en las subestaciones a 115 kV y en las líneas de transmisión asociadas. Igualmente se pretende establecer cómo es posible reducir las distancias de aislamiento fase-tierra.

Como es bien conocido, estas distancias se especifican para evitar las disrupciones causadas por estos sobrevoltajes entre puntos energizados y tierra. Precisamente la idea es permitirlo únicamente en los sitios diseñados para una disrupción controlada reduciendo notablemente su impacto por medio de los equipos previstos para ello.

Las distancias de aislamiento se han especificado tradicionalmente a través de los años por normativa internacional IEC[3]. En sistemas del rango I (1kV < rango 1<= 245 kV), las normas buscan adoptar la máxima protección posible contra los sobrevoltajes de impulso[4] ocasionados principalmente por los rayos, tanto a los seres vivos como a los equipos y sistemas de potencia conectados.

De otra parte y de acuerdo con esta norma los sobrevoltajes tipo Maniobra causadas por la apertura y cierre de las líneas de transmisión, son significativamente inferiores a las ocasionadas por los rayos, por lo cual no se tienen en cuenta[5]. Sobre esta situación abordaremos el tema en uno de los apartados posteriores.

---

[2] Definiciones a sobrevoltajes e impulsos de voltaje en Anexo A.
[3] IEC 60071-1 2010 Anexo 2 p.p 23,31,33 [5]
[4] Definiciones Anexo A
[5] Ver en apartado 2.3 y capitulo 8 detalles sobre este sobrevoltaje obtenido en pruebas en la ciudad de Bogotá DC.

Igualmente, los sobrevoltajes esperados sobre las estructuras por efecto de flameo inverso tampoco son significativas en estos niveles de voltaje a menos que se presenten instalaciones con valores de resistencia de puesta a tierra mayores a 1 ohmio en subestaciones de potencia y a 20 ohmios en líneas de transmisión[6] .

Finalmente, los sobrevoltajes producidos por el impacto directo de los rayos sobre la subestación no se consideran por su baja probabilidad. Esto obedece a la presencia del apantallamiento que, en cualquiera de sus aplicaciones, bien por la aplicación de la teoría de la "Esfera Rodante" [7] o ante la utilización adecuada de mástiles y puntas, se garantiza un aislamiento muy seguro.

Para el área de la Sabana de Bogotá y según los datos de la referencia [12] la aplicación a una subestación de potencia típica en Bogotá con área de 100*100 m^2 presenta una probabilidad de falla en su apantallamiento demasiado baja, alrededor de 0,002 por año o una falla cada 500 años.

2.1 El rayo y los sobrevoltajes

2.1.1 Generalidades sobre el rayo

Los datos más usuales encontrados acerca de las características de los rayos indican en general que la corriente de rayo se caracteriza por intensidades de las cuales un 50% son inferiores a 20 kA, y un 5% desde 160 kA hasta 400 kA [8]. Una estadística generalizada en cuanto a probabilidad de ocurrencia vs. magnitud de rayo en kA se presenta en la **Figura 2-1**[9], esta última con un valor medio de 31,5 kA. En cuanto a la duración total de los rayos se puede indicar que una descarga tiene una duración entre 0 y 450 microsegundos,[10] con duración promedio de 150. Lo anterior se sustenta dado que el impacto de rayo presenta

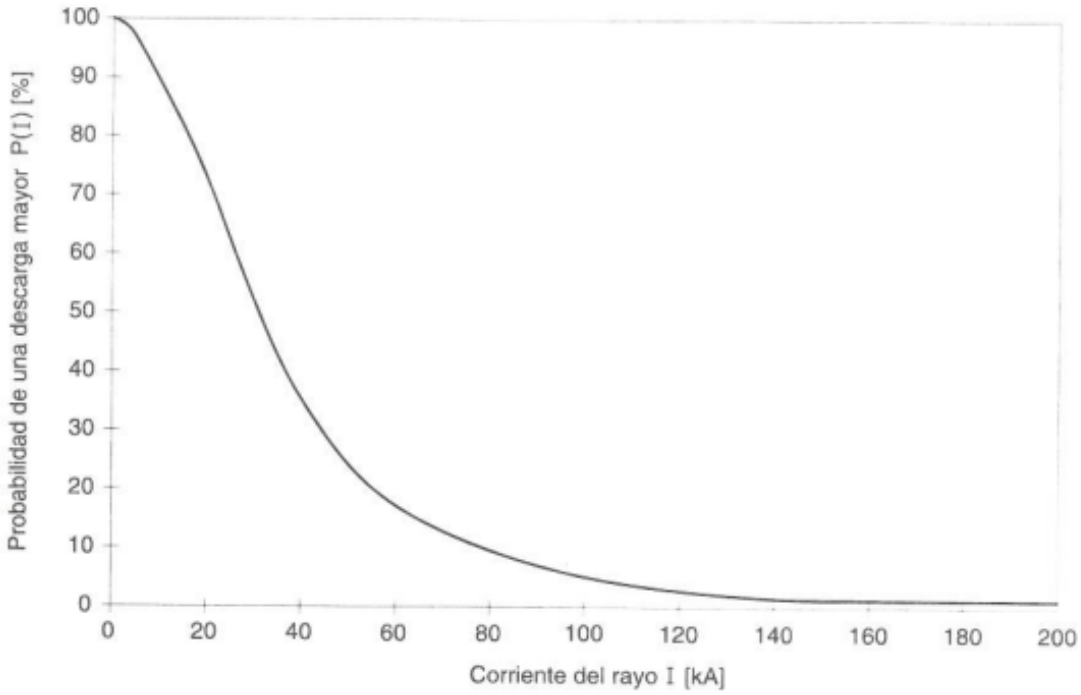
[6] RETIE, Ley de la república, artículo15.4 [21]
[7] HMV Mejía y Villegas, 2003, p 130 [2]
[8] Luis A Siegert [11], p 263
[9] HMV, p 120 [2]
[10] Herbert Rojas [13] p 4

una descarga principal seguida de varias descargas subsecuentes de las cuales un 50% presenta una adicional y un 10% hasta siete descargas subsecuentes.[11]

Los rayos con mayor frecuencia de ocurrencia son los rayos nube - tierra de polaridad negativa. Así, en estudios realizados durante 6 meses en la sabana de Bogotá, año 2016[12] sobre un total de 329 rayos efectivos el 93% correspondieron a polaridad negativa negativos y un 7% a polaridad positiva.

Figura 2-1:

Distribución de probabilidad de la magnitud de la corriente de rayo [2].



2.1.2 Nivel Ceráunico

Se ha logrado también leer la magnitud y cantidad de las descargas ocurridas a través de muchos años en diferentes regiones del mundo y los sitios aproximados de su ocurrencia, con lo cual se ha logrado establecer las zonas geográficas con la incidencia muy aproximada de numero de rayos en conteos anuales.

---

[11] Luis A Siegert [11], p 263
[12] Herbert Rojas [13] p 4…

El nivel Ceráunico se expresa para una región como el número promedio de días al año en los que se presentan tormentas eléctricas. Esta información es una de las bases para realizar los diseños de las protecciones contra rayos. En el caso de la sabana de Bogotá se puede apreciar un nivel ceraúnico regional de 80 en la versión del mapa isoceraúnico de Colombia [2] [13].

2.1.3 El rayo en Bogotá DC

En recientes estudios adelantados por varios investigadores colombianos [13] [14] [15] se destaca la falta de mayor investigación y análisis acerca de la actividad de los rayos en las regiones de clima tropical, subtropical y templada del mundo, por lo cual se hace necesario estudiar un poco más en la geografía en países de Suramérica como Colombia, en los cuales hay mucha actividad de rayos y al contrario hay pocos recursos para su estudio. [14]

Sin embargo, en estas regiones y en especial las de mayor altitud, se han realizado varios estudios con base en mediciones de los campos electromagnéticos y/o comparaciones con los estudios adelantados en regiones de USA y Europa durante los últimos cuarenta años. Las únicas regiones que poseen investigación en climas subtropicales corresponden a USA, China, Japón y Brasil.

Con los cálculos realizados en este estudio, se determina entre otros la magnitud del campo eléctrico que ocasiona la descarga de rayo al nivel de la altura sobre el nivel del mar de la ciudad en Bogotá, como se presentará más adelante en el capítulo 4.
Es así como para este estudio, compañías de ingenieros especializadas en la lectura y análisis de rayos [15] han permitido conocer estadísticas recientes de los dos últimos años sobre la intensidad y la ubicación de las descargas eléctricas atmosféricas. En efecto, en la Figura 2-2 se presentan los porcentajes acumulados de las intensidades de corrientes

[13] [2] pp 121
[14] Rojas Herber, Rojas Harvey, Cortés Camilo, Journal of atmospheric, 2022 [13]
[15] Keraunos, Estadísticas rayos en Bogotá 2022 2023 [16] …

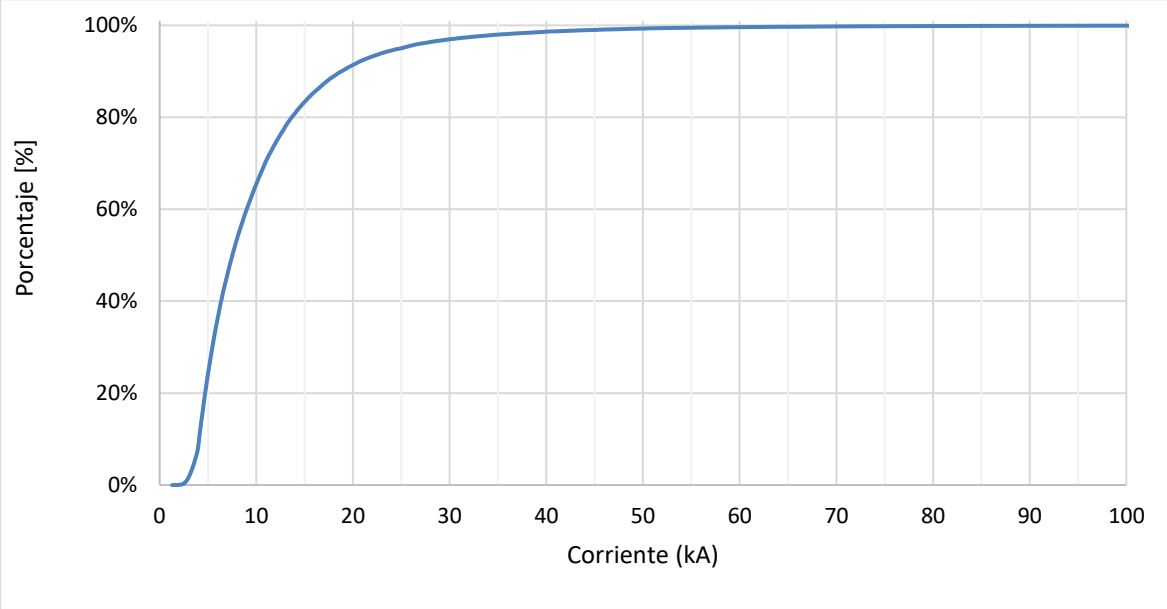
de rayo registradas en el año 2022 y parte del año 2023. Un resumen de las estadísticas se muestra en la **Tabla 2-1**[16] y la **Tabla 2-2**.

Así mismo, en la **Figura 2-3** se presenta en una imagen de Google Earth preparada por la compañía Keraunos acerca de la ubicación de los rayos sobre la geografía de Bogotá en los dos días de mayor actividad de rayos en el año 2022 y parte del 2023.

Allí se ha adicionado, además, la ubicación de una parte del sistema eléctrico de alto voltaje de la ciudad con algunas de las subestaciones 230, 115 y 57,5 kV junto con los recorridos aproximados de varias líneas de transmisión que las interconectan.

La información de la **Figura 2-3** da una clara idea acerca de los impactos de los rayos sobre las áreas de Bogotá y las regiones cercanas de la Sabana de Bogotá, así mismo destaca las áreas fuertemente influenciadas y su relativa cercanía a las líneas de trasmisión y a las subestaciones eléctricas indicadas.

Figura 2-2: Bogotá corrientes de rayo leídas en porcentaje acumulativo año 2022 [16]



[16] Keraunos, por solicitud, informe sobre Estadísticas rayos en Bogotá 2022 2023 [16]

Las zonas sobre las cuales se ha realizado la observación de los rayos corresponden a los municipios en la Sabana de Bogotá indicados en la **Tabla 2-1** y la **Tabla 2-2** mostradas a continuación:

Tabla 2-1: Municipios de la sabana

Municipios de la Sabana			
BOGOTÁ, D.C.	EL ROSAL	SOPÓ	ZIPAQUIRÁ
SOACHA	COTA	GUATAVITA	SESQUILÉ
MOSQUERA	SUBACHOQUE	NEMOCÓN	CHOCONTÁ
MADRID	TABIO	SUESCA	TOCANCIPÁ
FUNZA	CHÍA	SIBATÉ	GACHANCIPÁ
FACATATIVÁ	CAJICÁ	TENJO	COGUA

Tabla 2-2: Estadística de información de rayos sobre Bogotá en 2022.

Total, rayos Nube-Tierra	55588	
Periodo	2022	
Parámetro	Corriente [kA]	
Corriente promedio	10,21	
Corriente mediana	7,6	
Corriente mínima	1,3	
Corriente máxima	226,6	
Percentil 1 %	2,9	1% de los datos <2,9 kA
Percentil 10 %	4,1	10% de los datos menor a 4,1 kA
Percentil 90 %	18,8	90% de los datos menor a 18,8 kA
Percentil 99 %	44,8	1% de los datos mayor a 44,8 kA
	4,1 a 18 kA	85,9% de los datos entre 4,1 y 18 kA

Tabla 2-3:

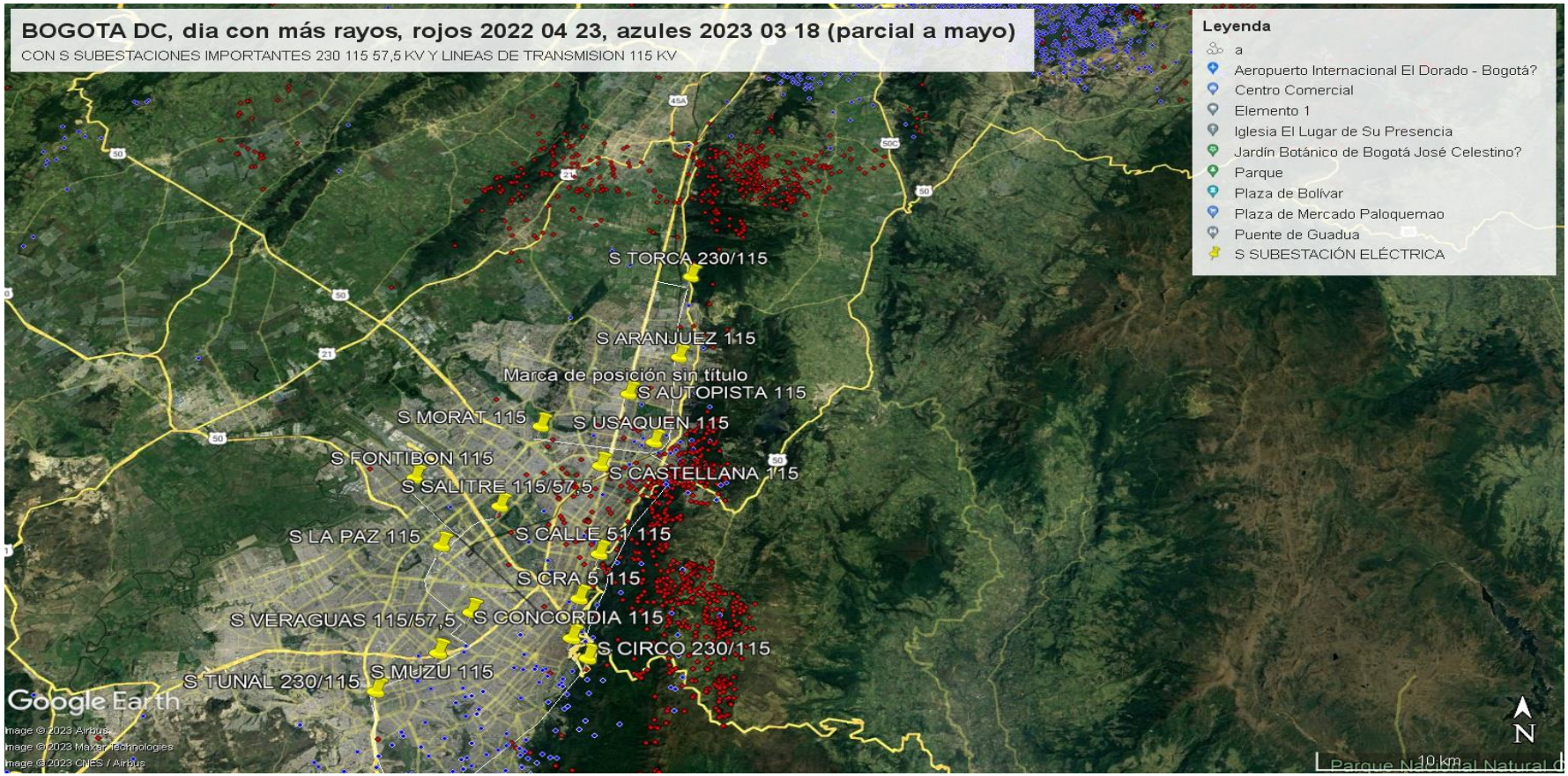
Distribución de los rayos en la sabana de Bogotá año 2022 [16]

Rango kA	# rayos	
0 a 2,9	522,5272	0,94%
2,9 a < 4,1	5207	9,37%
4,1 a < 18,9	44299	79,69%
18,9 a < 20	712	1,28%
20 a < 30	3106	5,59%
30 a < 45	4947	8,90%
45 a < 60	337	0,61 %
60 a 226	212	0,38%
< 20 kA	50740,5272	91,28%

Las estadísticas mostradas en la **Tabla 2-2** indican que la corriente de rayo promedio en la región de Bogotá es 10,2 kA, así mismo el rango de corriente de rayo que más se presenta se puede localizar entre 4 a 19 kA. Así mismo, los rayos menores a 20 kA corresponden al 90,53% de los ocurridos, mientras que los rayos mayores a 45 kA son de poca ocurrencia. El rayo máximo registrado fue de 226 kA.

Es importante mencionar la relación que se observa entre la **Figura 2-1** y la Figura 2-2. Puede notarse como mientras en la primera, aplicada de manera muy general según varios autores académicos se observa que la corriente del 50% de probabilidad de ocurrencia es aproximadamente de 30 kA, la segunda, aplicada a Bogotá y su sabana corresponde apenas a 10 kA.

Figura 2-3: Imagen preparada por la firma Keraunos en Google Earth con muestra de rayos sobre la ciudad de Bogotá.[17]



[17] En color amarillo delgado algunas líneas de transmisión de energía y subestaciones eléctricas de 230 kV, 115 kV, 57,5 kV. Igualmente, los sitios y días de más impactos de rayos, 2022-04-23 en color rojo y 2023-03-18 en color azul. [16]

2.2 Efectos del Rayo

2.2.1 Sobrevoltajes e Impulsos causados por los rayos

La energía de la descarga de rayo oscila entre 36 y 360 Mega Julio, genera potencias destructivas del orden de 10^4 a 10^6 MW y sobrevoltajes de millones de voltios en el sitio de impacto. Estos sobrevoltajes de corta duración o impulsos tipo rayo [18] se caracterizan por un rápido ascenso a su valor máximo o tiempo de frente muy rápido y un descenso más lento o tiempo de cola. Igualmente, las ondas de corriente subsecuente aparecen con un pequeño retraso de algunos microsegundos respecto al sobrevoltaje que las ocasiona.

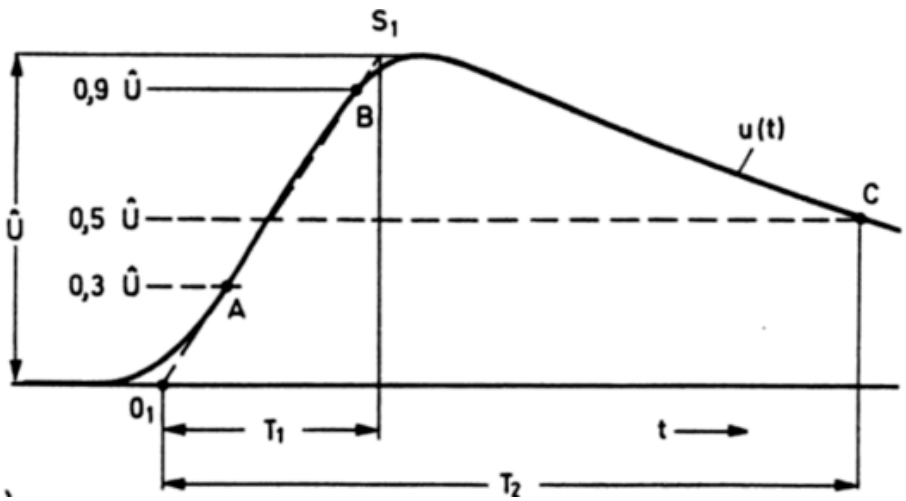
Los impulsos y sobrevoltajes generados para pruebas en laboratorio se encuentran normalizados [19] [10]. Las consiguientes ondas de corriente se representan como de dos tipos de duración, la rápida en 8/20 microsegundos y la lenta de 30 hasta unos 300 microsegundos y algunas con frente empinados 30/80.

Es necesario indicar que la onda de sobrevoltaje generada a lo largo de la línea ocasionará igualmente sobrevoltajes a través de los aislamientos tanto en las estructuras de las líneas y sus cadenas de aisladores como en estructuras de las subestaciones y en sus equipos con peligro de descargas con corrientes de rayo a tierra. Esto constituye entonces el tema de la soportabilidad del aislamiento y la protección adecuada de los equipos ante estos fenómenos.

---

[18] Ver **Anexo A** Definiciones IEC 60071.
[19] Ver [10] norma IEEE Std 4 cap. 8 y 9 para determinación de tiempos T.

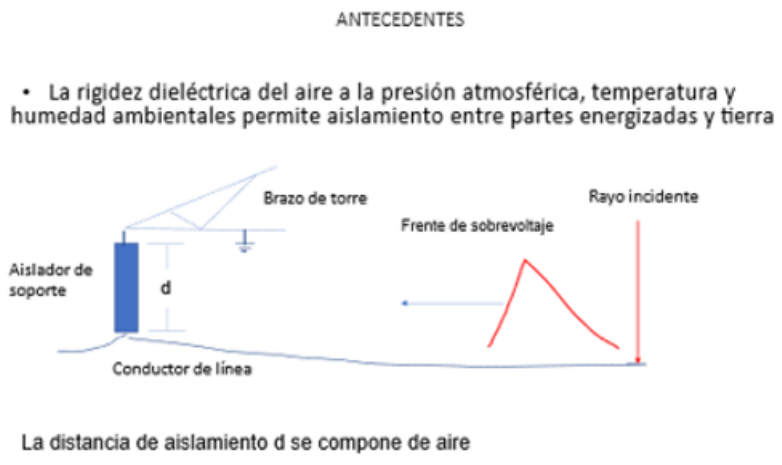
Figura 2-4: Forma normalizada de ondas de impulso y sobrevoltajes por rayo y manobra para pruebas en laboratorio [10]



2.2.2 El Sobrevoltaje y su desplazamiento.

Como se muestra en la Figura 2-5 cuando un rayo impacta una línea de transmisión o su cable de guardia, su corriente I genera dos ondas de voltaje de igual magnitud las cuales se alejan del sitio del impacto.

Figura 2-5: Sobrevoltaje sobre la cadena de aisladores por Impacto de rayo y distancia **d**,



La amplitud del sobrevoltaje de impulso por rayo que se produce sobre la línea de transmisión puede calcularse mediante la ecuación (2.1)[20].

$$\Delta V = (I/_2) \times Zc \qquad (2.1)$$

Donde:

ΔV Amplitud de la onda de Sobrevoltaje [kV]

I Amplitud de la Corriente de rayo [kA]

Zc Impedancia característica del medio conductor [Ω]

A manera de ejemplo puede mencionarse que, si un rayo de 20 kA impacta directamente el conductor de una línea aérea, se dividirá en dos ondas de corriente de 10 kA que viajarán sobre la línea como dos ondas que se alejan del sitio de impacto. Si la impedancia característica de la línea Zc es de 350 ohm, las ondas de corriente producirán sobrevoltajes pico de 3500 kV. Si la energía de estas ondas viajeras de voltajes y corrientes no se disipa a lo largo de la línea, las ondas de voltaje y corriente podrán viajar sobre la misma hasta el terminal de la línea en la subestación.

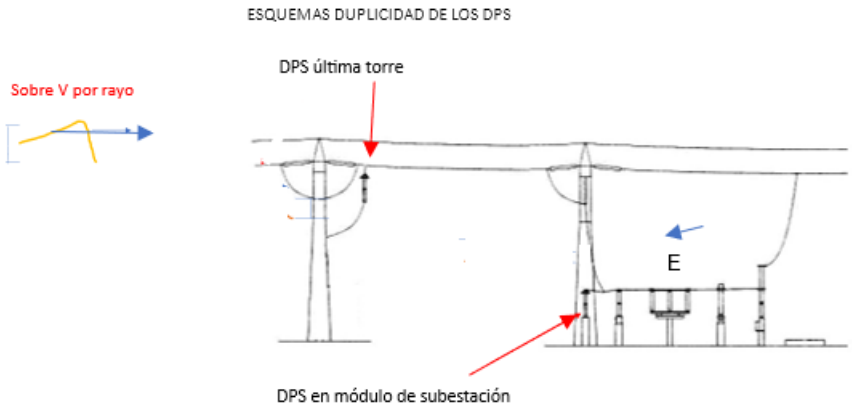
Es de esperar que durante el viaje de la onda hasta la subestación la sobretensión se vea disminuida, tanto por flameo inverso en una o varias cadenas de los aisladores soporte de las estructuras de la línea, o como consecuencia de las pérdidas de potencia por el efecto corona a lo largo del conductor de la línea de transmisión. El sobrevoltaje será disminuido a niveles soportables por los equipos si se instalan descargadores de sobrevoltaje conocidos como DPS tanto en la línea de transmisión como a su llegada a la subestación.[21]

Según las normas internacionales de coordinación de aislamiento, tanto los aislamientos entre fases y fase a tierra, como los de los equipos de la subestación, se eligen para soportar sobrevoltajes e impulsos de maniobras o rayo [22] sin experimentar daños. Los

[20] Siegert [12] p 875
[21] [9] pp 259-261 acerca de la protección ofrecida por los cables de guarda.
[22] **Anexo A** Definiciones.

niveles de soportabilidad de estos se han denominado tradicionalmente como BIL para el rayo y BSL, ante maniobra. Los niveles de soportabilidad se establecen en las normas (ver Tabla del **Anexo H**) de acuerdo con el nivel del voltaje de operación más alto Vm.[23] de las instalaciones. Para el nivel de 115 kV, el BIL[24] máximo es de 500 kV pico con la forma de onda de la **Figura 2-4**. El **Anexo H** presentan los niveles normalizados de soportabilidad al sobrevoltaje (BIL) de acuerdo con la norma IEC, para instalaciones en el rango I, con voltajes más altos entre 1 kV rms y 245 kV rms.

Figura 2-6: Sobrevoltaje incidente y sobrevoltaje reflejado



El caso que se estudia en este trabajo corresponde a la distancia de aire que existe entre el cable energizado y las estructuras. Para ello, se define una distancia entre los conductores eléctricos y las estructuras aterrizadas (Ver apartado 3-2), que en adelante se denominará la distancia **d**, se denomina en este trabajo como la distancia básica de aislamiento. Para aclaración de la definición de esta distancia ver Figura 3-1, donde se presentan vistas de perfil y planta en una subestación de potencia tipo AIS**.**

[23] **Anexo A** Definiciones.
[24] Se utilizará en adelante las expresiones BIL o BSL términos tradicionales que no aparecen en la Norma [5] para referirse a sobrevoltajes de soportabilidad normalizados de los equipos por rayo y maniobra.

El aire es entonces el elemento que soporta los voltajes y sobrevoltajes entre conductores y entre estos y tierra lo que ocasionaría, si no hay soportabilidad, una falla del aislamiento. La interacción entre la operación de los DPS y el nivel de soportabilidad de los aislamientos ante sobrevoltajes en especial los de impulso por rayo y maniobra es uno de los fundamentos de una buena coordinación del aislamiento.

2.3 Sobrevoltaje por maniobra

Se ha comprobado que los sobrevoltajes por maniobra en las líneas de transmisión son significativos a niveles de voltajes nominales mayores a los 500 kV. Estos sobrevoltajes de maniobra son ocasionados por las aperturas o cierres de líneas largas con carga atrapada o por el efecto inductivo en líneas largas. En general, los sobrevoltajes de maniobra son de menor amplitud a los sobrevoltajes tipo rayo para los niveles de voltajes del Rango 1, es decir, menores a los 245 kV. Esta apreciación surgió a partir de las investigaciones realizadas en los países desarrollados[25] y de gran tamaño geográfico que requerían cada vez más altos voltajes para el transporte de carga a los clientes desde los sitios distantes de Generación.

Estudios y pruebas realizadas alrededor de los años 70, por la antigua Empresa de Energía Eléctrica de Bogotá, a raíz de la conversión de parte de sus instalaciones energizadas a 57,5 kV al nivel de 115 kV dieron muy buenos resultados. En efecto, los estudios permitieron la utilización de buena parte de las estructuras de soporte, utilizadas tanto en las líneas como en las subestaciones a nivel de 57,5 kV en el nuevo nivel de voltaje de 115 kV. Este cambio a 115 kV requirió la aplicación de ciertas recomendaciones tales como el uso de los DPS convenientemente seleccionados en sus niveles de protección NPR[26], mediante el refuerzo con más aisladores en todos los soportes de las líneas de transmisión y al interior de la subestación con el reforzamiento del apantallamiento para evitar posibles impactos del rayo sobre los equipos. Hasta la fecha no se han presentado inconvenientes

[25] Siegert [12] p 823…
[26] Sobrevoltaje al cual se inicia la descarga de energía a tierra a través del DPS

desde el punto de vista de los sobrevoltajes de origen externo a estas subestaciones

Los detalles acerca de la realización de las pruebas y sus resultados se presentan más adelante en el **Anexo D**. Las Conversiones del nivel de voltaje se efectuaron luego de la realización de estudios previos y ensayos reales mediante la ejecución de maniobras de aperturas y cierres sobre los interruptores para 115 kV, voltaje aplicado desde subestaciones a 115 kV cercanas a las nuevas a convertir y aplicados sobre tramos de las líneas de transmisión ya preparadas en su aislamiento para tal fin.

Los sobrevoltajes se obtuvieron en la práctica al ejecutar maniobras de varios (1) recierres y reaperturas (2)[27]. Los valores de voltaje fueron tomados mediante registros oscilográficos alimentados en bajas tensiones a partir de divisores capacitivos conectados a la instalación en prueba entre el nivel de 115 kV fase y tierra. Ver igualmente detalles de las conexiones en **Anexo D**.

En general, los valores máximos de los sobrevoltajes obtenidos en estas pruebas fueron los siguientes: Fase a Fase hasta 3,4 p.u. y fase tierra hasta 4,4 p.u. En términos de los valores pico de la onda de 60 Hz equivalen a 439 kV pico a tierra y 552 kV fase- fase. Estos valores de sobrevoltaje por maniobra son significativos ya que el sobrevoltaje de soportabilidad de los equipos al impulso por maniobra, BSL,[28] no se tienen en cuenta en sistemas energizados menores a 245 kV rms. Resulta interesante comparar estos resultados, 439 y 552 kV, con el valor de 550 kV pico, correspondiente al voltaje de soportabilidad, pero al impulso tipo rayo[29] que debe soportar el aire como aislante al nivel de voltaje nominal de 115 kV rms.

[27] (1) cierre inmediato de interruptor una vez abierto (2) apertura inmediata de interruptor una vez cerrado.
[28] Ver **Anexo A**, Definiciones
[29] Equivale al BIL, Ver Tabla en **Anexo H** y apartado 3.2 pp 23 y 25

2.4 Sobrevoltaje disruptivo Ud

A pesar de la existencia de las sobretensiones expuestas, los equipos de los sistemas eléctricos deben diseñarse, probarse y fabricarse para soportar los voltajes requeridos en su vida operativa y en el rango de sus condiciones de servicio[30]. Por lo tanto, la práctica de la ingeniería a través del tiempo acordó tomar las medidas a través de la normativa para que los equipos vean limitadas estas sobretensiones a valores soportables a los cuales se diseñaran.

Estos valores de sobretensión obedecen a formulaciones aplicadas de acuerdo con fórmulas empíricas respaldadas por ensayos de laboratorio.

Producto de ello a continuación se ilustra la fórmula empleada según el autor Hilgarth [31]l la cual se aplica a configuraciones punta - placa[32] ante voltajes tipo rayo para determinar el valor del voltaje disruptivo [33] o el que causa descarga disruptiva para pruebas. Por el carácter destructivo se conoce como otro tipo de sobrevoltaje.

$$U_d = 15\ kV + (5{,}1\ kV / cm) \times s \qquad (2.2)$$

Donde s corresponde en este trabajo a la distancia **d** entre electrodos. La fórmula se aplica inicialmente a ensayos con ondas de 60 HZ, pero es válida para este tipo de configuración con campo no uniforme.

3. Generalidades sobre las Distancias de aislamiento d y d2

El aislamiento en el aire entre un conductor desnudo a potencial y la tierra, lo establece el nivel de potencial máximo esperado en el conductor ante un sobrevoltaje tipo rayo o

[30] [23] p 39
[31] [18] p 102
[32] Ver capítulo 3 p 20 y apartado 4.4.2 p 39
[33] Ver Anexo 1, Definiciones

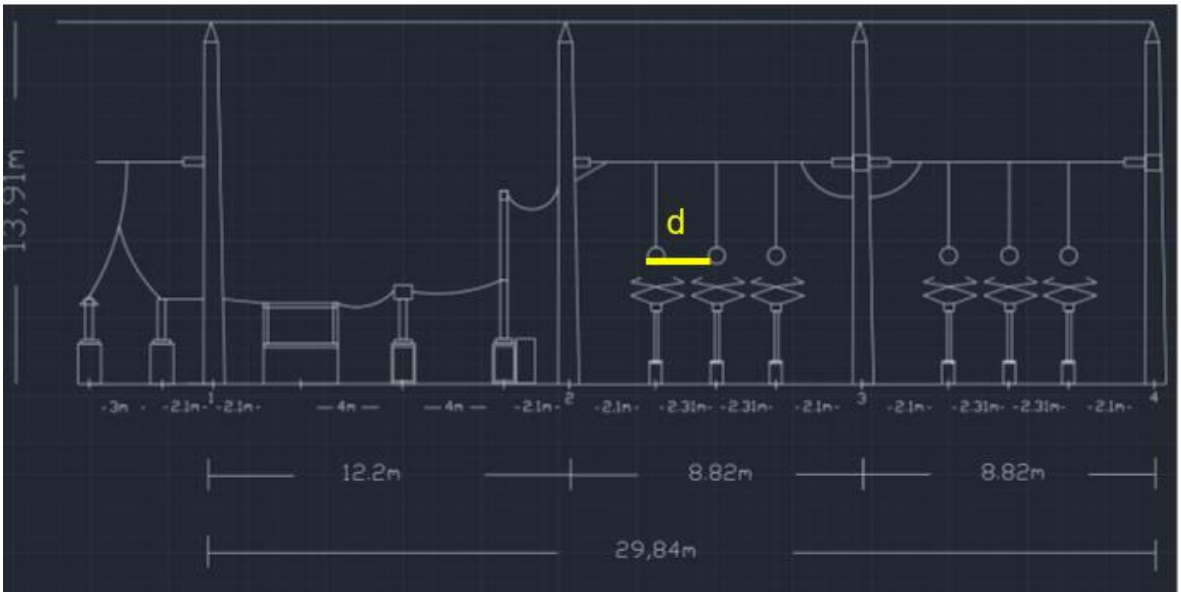
maniobra especificada y que es soportado por el aire sin disrupción a través de la distancia interelectródica **d**[34]. La distancia **d** entre fases se considera igual a la distancia fase-tierra en sistemas con nivel de voltajes del rango 1 o menores a 245 kV [2].[35]

Para un ensayo de laboratorio la distancia **d** se modela mediante un arreglo de electrodos punta-placa, el cual simula adecuadamente la configuración conformada por un conductor eléctrico redondo y una porción lateral de un equipo o de una columna soporte. La referencia [11] [36]indica como es el montaje en laboratorio para ensayo de soportabilidad del aire a través de la distancia d entre electrodos placa - placa y punta - punta en campos uniformes y no uniformes [37]para diferentes ondas de voltaje.

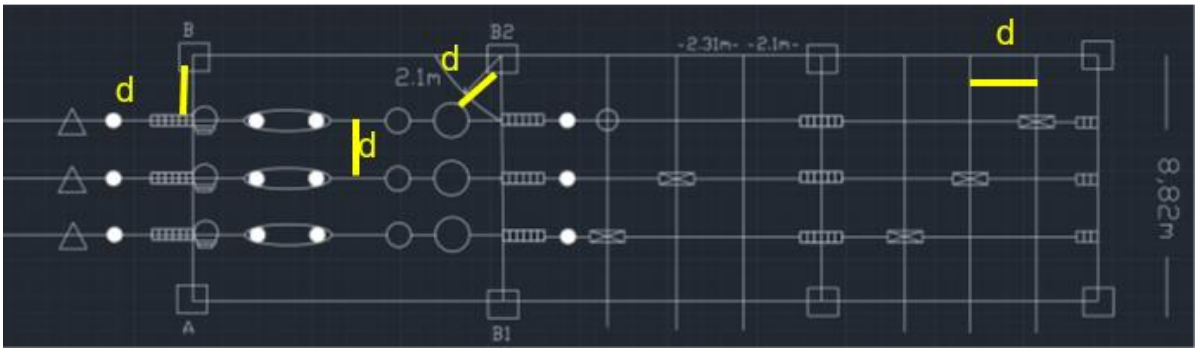
La Figura 3-1 presenta un ejemplo de la distancia interelectródica **d** observada en un patio de conexiones típico de subestación de potencia en configuración doble barra. Se aprecia la distancia **d** entre fases o entre fase-tierra parámetro esencial en el diseño de la subestación ya que determina en gran medida el tamaño de la instalación y como puede ser afectado ante cambios importantes de esta distancia.

Figura 3-1: Vistas de las distancias disruptivas **d**: a) perfil y b) planta de un módulo de subestación

[34] Configuraciones de electrodos [9]
[35] Ante impacto de rayo en una fase se igualan momentáneamente los voltajes en las tres fases, ver 5.5.2 Figura 5.12 p 62 y p 67 "… resultados simulación en ATP"
[36] [11] pp 30-32
[37] Ver apartado 4.4 p 36 rompimiento del aire en campos no uniformes.



a)



b)

3.1 Diferentes distancias

La distancia básica de aislamiento **d** debe cumplir con los requerimientos del aislamiento eléctrico, evitando las fugas de corriente entre electrodos y en este caso particular entre el conductor energizado y la columna soporte aterrizada. Igualmente, las normas recomiendan una distancia disruptiva **d** para cada nivel de voltajes nominales

normalizados en los cuales se han clasificados los sistemas de potencia. Ante estos niveles de sobrevoltaje, el aire debe soportar el esfuerzo denominado “Nivel Básico de Aislamiento en el aire”.

Existe además otra distancia mínima d2[38] a la cual debe permanecer una persona respecto a la distancia disruptiva d para realizar movimientos donde sea requerido, en la cercanía de los puntos energizados, tal como se muestra en la:

Figura 3-2. A esta distancia se le conoce como “Distancia de Seguridad d2”. Las distancias en aire en función del voltaje de las instalaciones eléctricas han sido claramente definidas y tenidas en cuenta a través del tiempo y constituyen un factor determinante para establecer, por un lado, las distancias de aislamiento y por el otro, las dimensiones de las instalaciones eléctricas. Lo anterior puede resumirse diciendo que el Aislamiento eléctrico en una instalación eléctrica es:

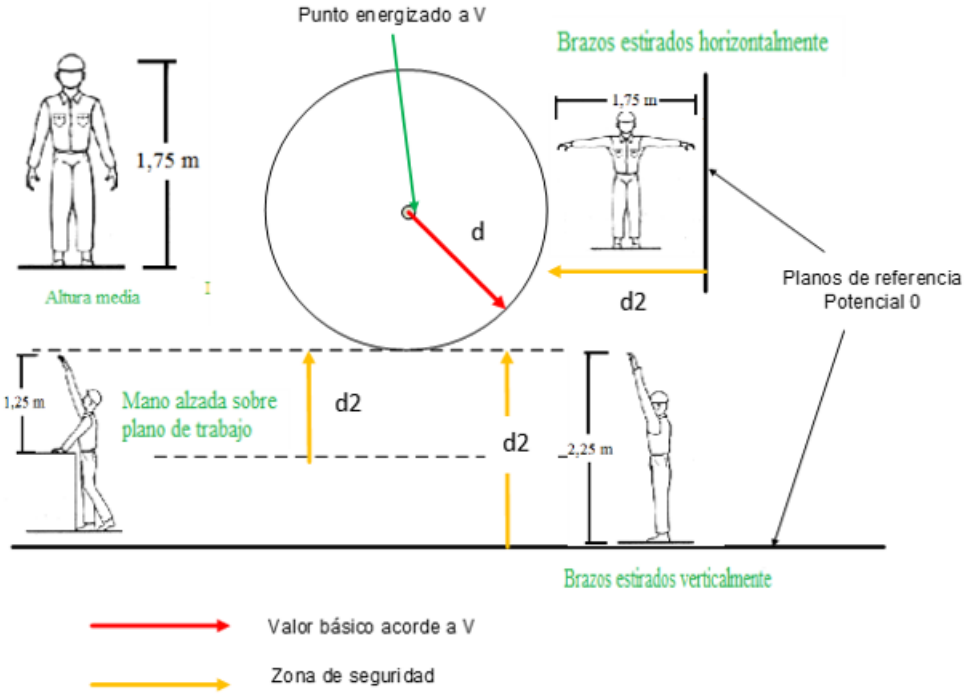
Aislamiento eléctrico = Distancia básica de aislamiento d + Distancia de Seguridad d2.

Esta Tesis se ocupa de la determinación de la distancia d, dejando la determinación de la Distancia de Seguridad d2 a los temas de seguridad ocupacional, salvo algunas excepciones que se indicarán en su momento. Las mencionadas distancias d y d2 se

[38] RETIE, recomienda esta altura mínima d2 en 3m, pero puede aceptar menores acordes a normas internacionales al respecto según casos especiales, procedimientos y/o sitios específicos de trabajo (ver Figura 3-2) y a consideraciones de seguridad ocupacional. Esta distancia no es objeto del presente trabajo.

muestran en la Figura 3-2:

Figura 3-2: Determinación de los componentes de la distancia de aislamiento



3.2 Determinación de la distancia de aislamiento

Se han desarrollado normativas para establecer una distancia mínima en aire, conocida

como “Clearance Distance”,[39] como un espacio de aire a través del cual no se presentará descarga disruptiva en el 90% de las veces [40]en que ocurra un sobrevoltaje especificado entre un punto de red energizado y el nivel de referencia tierra (ver **Tabla 3-1**) y [4].

Este sería el caso de la distancia entre un conductor eléctrico de fase soportado por la cadena de aisladores en un brazo de una estructura o entre un conductor y una columna de soporte estructural dentro de la subestación (Ver Figuras 2-5 y 3-1).

El voltaje de soportabilidad del aire como aislante para ensayos se conoce como el “Withstand Voltage”[41]. Se ha conocido en el lenguaje técnico como el BIL (Basic Insulation Level) del equipo[42] aislante, en este caso el aire (ver numeral 3.4).

3.3 Las Normas sobre distancias mínimas de aislamiento en el aire

3.3.1 Norma europea CENELEC EN 50341-1

Considera los aspectos de la reglamentación de líneas aéreas eléctricas superiores a 45 kV en corriente alterna en relación con el diseño, construcción y demás factores que afectan su entorno tales como las distancias de aislamiento para personas y trabajadores que actúen en su entorno.

Este apartado permitirá establecer una comparación entre las distancias de aislamiento normalizadas para la línea de transmisión y las distancias normalizadas en el ámbito de la subestación de potencia. Como se indicará más adelante, la nueva distancia recomendada en esta investigación se apoya en la instalación de los DPS en el tramo final de la línea de transmisión en la estructura anterior a la subestación.

---

[39] [4] p 15, …
[40] [17] [5] pp,7,8,
[41] IEC 60071-1 [5]
[42] Ver **Anexo A** para definiciones.

La norma en mención define las distancias de seguridad Del y Dpp con base en los términos definidos anteriormente (ver ecuaciones (3.1) y (3.2)) [43]

$$\mathrm{Del} = \frac{\mathrm{U\ 90\%\ ff\ is}}{530 * \mathrm{Ka} * \mathrm{Kzff} * \mathrm{Kg\ ff}} \tag{3.1}$$

$$\mathrm{Dpp} = \frac{1{,}2 * \mathrm{U\ 90\%\ ff\ is}}{530 * \mathrm{Ka} * \mathrm{Kzff} * \mathrm{Kg\ ff}} \tag{3.2}$$

A continuación[44] algunas definiciones y símbolos que aplican a los cálculos de las distancias de aislamiento en esta Norma CENELEC

Us Voltaje a frecuencia industrial más alto del sistema.

U 90% ff Voltaje 90% soportable en el aire por impulso tipo rayo

Del Distancia de soportabilidad del aire entre conductor y objetos conectados a tierra para prevenir carga disruptiva ante sobrevoltajes de frente rápido o lento (metros)

Dpp Distancia de Soportabilidad del aire entre conductores de fase para prevenir carga disruptiva ante sobrevoltajes de frente rápido o lento (metros)

Ka Factor de corrección por altitud sobre el nivel del mar.[45]

Kg Factor de corrección para cada tipo de voltaje soportado expresado en términos del factor de gap ante impulso tipo maniobra[46], Kg=1,3 para Del. Kg = 1,6 para Dpp

Kg ff Factor de gap para gap de aire en términos de Kg, Kg ff = 0,74+0,26*Kg

[43] [4] Tabla E.5 p 165…
[44] [4] pp76, 77…y su Anexo E pp158…
[45] [4] Definiciones y Tabla E.4 pp 158, 164…
[46] [4]Valores Kg, pp160…

Kzff Factor de desviación para soportabilidad ante distribución de voltaje del gap de aire ante sobrevoltajes de frente rápido, Kzff = 0,961

La **Tabla 3-1**[4] extraída parcialmente [47] de esta Norma indica las distancias especificadas Del y Dpp en 1,04m fase - tierra y 1,17 m fase-fase a 1000 msnm, los términos Ka y Kg [48] para sobrevoltaje normalizado de 550 kV pico.

Tabla 3-1: Norma EN 50431 Correlación entre sobrevoltajes de impulso normalizados por rayo y los espacios mínimos de aislamiento en aire con Ka a 1000 msnm [49]

Lightning withstand voltage $U_{90\%_ff_ls}$ of the line insulator strings (kV)	D_{el} (in metres) K_g = 1,3 K_a (1 000 m)	D_{pp} (in metres) K_g =1,6 K_a (1 000 m)
250	0,48	0,54
300	0,58	0,65
350	0,67	0,74
400	0,77	0,85
450	0,85	0,96
500	0,95	1,06
550	1,04	1,17
600	1,14	1,26
650	1,23	1,37
700	1,33	1,47
750	1,41	1,58
800	1,50	1,68
850	1,60	1,79
900	1,69	1,89
950	1,78	2,00
1 000	1,88	2,08
1 050	1,97	2,19
1 100	2,05	2,29

[47] [4] p 78
[48] [4] p 161
[49] [4] p 164

Cálculos realizados en las fórmulas (3.1) y (3.2) y los factores ya indicados para Ka factor de altura a 1000, 2500 y 3000 msnm arrojan los siguientes valores para Del, **Tabla 3-2** y para Dpp **Tabla 3-3**.

Tabla 3-2: Parámetro Del para diferentes alturas msnm

Del para Ka a h de 1000, 2500 y 3000 m y BIL de 550 kV			
Factores		h (msnm)	Del (m)
Ka	0,956	1000	1,05
Ka	0,875	**2500**	**1,14**
Ka	0,844	3000	1,19

Tabla 3-3: Parámetro Dpp para diferentes alturas h msnm

Dpp para Ka a h de 1000, 2500 y 3000 m y BIL de 550 kV			
factores		h	Dpp
Ka	0,956	1000	1,26
Ka	0,875	**2500**	**1,37**
Ka	0,844	3000	1,42

De acuerdo con los cálculos para corrección por altura con Ka, en **Tabla 3-2** y **Tabla 3-3** los valores de estas distancias de seguridad para Bogotá son 1,14 m para fase-tierra y 1,37 m entre fases.

Las normas aplicadas hoy en subestaciones (Ver numeral 3.3.2) para sistemas hasta 245 kV unifican las distancias como una sola, Norma IEC 60071 [5].

3.3.2 Norma IEC 60071-1/2

Esta Norma aplica a las subestaciones de potencia en los sistemas trifásicos en corriente alterna que poseen equipos a los diferentes niveles con los voltajes más altos[50] superiores a 1 kV. Especifica los procedimientos para la selección de los voltajes de soportabilidad dentro de los aislamientos fase -fase, fase-tierra y longitudinales. Igualmente define la lista de voltajes de soportabilidad a los sobrevoltajes a seleccionar para los equipos en los niveles de los voltajes establecidos[51]. Es importante mencionar que varios de los principios y definiciones de estas Normas coinciden[52] [53].

Para las distancias de aislamiento y “Clearance Distances”, la norma 60071-2 [5] [54] [55] establece una correlación entre los voltajes normalizados de soportabilidad del tipo rayo y las distancias mínimas en aire que los soportan (“Clearance Distances”) o sin disrupción entre puntos energizados y tierra, ver **Tabla 3-2** tomada de la Tabla A.1 de la Norma.

Las distancias mínimas de aislamiento para las instalaciones eléctricas referidas a través del aire quedan establecidas de acuerdo con esta norma, por lo tanto, se aplican a nivel de los sistemas eléctricos del mundo actual y estarán sujetas a las correcciones según las condiciones ambientales referidas a las normalizadas para instalaciones hasta los 1000 msnm. El concepto de la distancia básica de aislamiento **d** que hasta ahora se ha definido en este trabajo equivale a las distancias establecidas en la Norma y de la cual se pretende

[50] Ver en **Anexo A** definiciones de la norma 60071-1
[51] Ver Tabla de la Norma 60071-1 [5] **Anexo H**
[52] Ver correspondencia con el numeral 3.3.1 anterior
[53] [5], pp 23 - 26 pp 59 - 62
[54] [6] IEC 60071-2, su anexo A, Tabla 2, p 118
[55] [5] IEC 60071-1, pp 31…

recomendar una variación.

Mientras tanto, la Norma 60071-1(Ver Anexo H) establece para cada nivel de los voltajes normalizados, los sobrevoltajes de impulso tipo rayo correspondientes.

Tabla 3-4: Distancias mínimas de aislamiento en aire Norma IEC 60071-2

Standard lightning impulse withstand voltage kV	Minimum clearance mm	
	Rod-structure	Conductor-structure
20	60	
40	60	
60	90	
75	120	
95	160	
125	220	
145	270	
170	320	
250	480	
325	630	
450	900	
550	1100	
650	1300	
750	1500	
850	1700	1600
950	1900	1700
1050	2100	1900
1175	2350	2200
1300	2600	2400
1425	2850	2600
1550	3100	2900
1675	3350	3100
1800	3600	3300
1950	3900	3600
2100	4200	3900

NOTE – The standard lightning impulse is applicable phase-to-phase and phase-to-earth.

For phase-to-earth, the minimum clearance for conductor-structure and rod-structure is applicable.

For phase-to-phase, the minimum clearance for rod-structure is applicable

Como se expresó al inicio de este capítulo es necesario finalizar diciendo que la distancia **d** entre fases y entre fase y tierra a niveles de voltaje del Rango 1, >1kV y <= 245 kV, se define como la distancia básica de aislamiento soportada por el aire ante una sobretensión máxima especificada tipo impulso por rayo.

Mientras tanto la distancia d2[56] corresponde a la distancia de seguridad que permite definir los acercamientos de los seres vivos.

El sobrevoltaje máximo soportado o “Withstand Voltaje” [57]ante sobrevoltaje tipo impulso por rayo, corresponde a un valor determinado que corresponde en cada caso a cada uno de los valores de los voltajes especificados en el Rango 1. Este valor corresponde numéricamente al conocido tradicionalmente como el BIL o nivel básico de aislamiento ante impulsos de voltaje tipo rayo del equipo de la instalación, para cada nivel del voltaje especificado.

[56] Ver Figura 3-2, p 22
[57] Ver página 27.

4. La ruptura del aire y el aislamiento

4.1 El primer coeficiente efectivo de ionización $\bar{\alpha}$ y el coeficiente de recombinación

El proceso de soportabilidad disruptiva a través de los espacios interelectródicos aislados en gas se simula en laboratorio, como es conocido, mediante ensayos de aplicación de voltajes DC, a frecuencia industrial y/o de impulsos de voltaje a través de diferentes distancias interelectródicas **d**.

La disrupción y corriente eléctrica resultante a través del espacio más corto entre electrodos, se explica bajo los modelos del primer o segundo coeficiente de Townsend [58], α y γ, dentro de los cuales hay otros efectos que contribuyen a la descarga o Streamer.

Bajo el primer coeficiente la descarga es función de factores tales como la forma y distancia entre electrodos, el valor del campo eléctrico E, la presión establecida en el medio, la Descarga Térmica y la cantidad de electrones liberados que alcanzan el ánodo, pero no se autosostiene.

[58] Kuffel [8], pp 297-298

El segundo coeficiente se identifica ante aumento de la corriente de descarga. El aumento del campo eléctrico favorece la presencia de más y más electrones libres e iones positivos. La ionización inicial se ve aumentada al extraer por choque de iones positivos contra el cátodo más y más electrones que regresarán de nuevo al ánodo creándose así una nube conocida como avalancha de iones. Muchos se recombinan, pero otros alcanzarán el electrodo opuesto, ánodo o cátodo, incrementando[59] la corriente de la descarga. El proceso se ve influenciado principalmente por emisión de Fotones en la cabeza de la avalancha como se presenta en la Figura 4-1[60].

Sin embargo, cuando la distancia interelectrodica aumenta y el campo eléctrico se mantiene dentro de ciertos límites de ocurrencia [61], el primer coeficiente de ionización α se modifica debido al proceso de recombinación de los electrones libres, el cual es descrito mediante el coeficiente de recombinación η o “attachment coefficient” por su nombre original en inglés. El coeficiente de recombinación disminuye los electrones libres en el gas[62], reduciendo los que efectivamente participan en la ionización del gas, lo cual se contempla en el coeficiente efectivo de ionización $\bar{\alpha}$ que se expresa en la ecuación (4.1)

$$\bar{\alpha} = \alpha - \eta \qquad (4.1)$$

Estos nuevos coeficientes se describen más adelante y en el apartado 4.2.2 sobre rompimiento por el coeficiente efectivo de ionización $\alpha - \eta$ y el attachement, . Además, de este proceso de recombinación por captura o atrapamiento de electrones, se encontró que el

[59] Kuffel [8], pp 321…
[60] Kuffel [8], pp 328-329
[61] Ver p 63
[62] Kuffel [8], pp 306…308

factor α es función de la relación f(E/p)[63] a bajas presiones[64], como se muestra en la ecuación (4.2)

$$\alpha = p * f\frac{E}{p} \tag{4.2}$$

Por tal razón la I descarga inicial explicada a través del primer coeficiente de ionización de Townsend

$$I = I_0 e^{\alpha d}. \tag{4.3}$$

Se puede expresar en función del coeficiente efectivo de ionización $\alpha - \eta$ [65]:

$$I = I_0 \left[\frac{\alpha}{\alpha - \eta} e^{(\alpha-\eta)d} - \frac{\eta}{\alpha - \eta} \right]. \tag{4.4}$$

Con η= 0 la corriente se mantiene como en (4.3) pero se incrementa a mayores valores de la distancia interelectródica **d** [66].

Si se grafican a escala logarítmica el log **I** vs. **d** se obtienen de la ecuación (4.3) una línea recta con pendiente α . A su vez de la ecuación (4.4)) se obtiene otra línea recta con pendiente, $\alpha - \eta$, evidentemente menos inclinada, que da origen a la ecuación (4.5).

[63] En adelante p: presión, d: distancia entre electrodos, E: del campo eléctrico entre electrodos
[64] Kuffel [8] pp 304…308
[65] Kuffel [8], formula (5.55), pp308
[66] Kuffel [8] p 308

Mediante esta ecuación los investigadores determinaron la variable K.

$$I' = K * I_{\circ}"(e^{(\alpha-\eta)d}) \qquad (4.5)$$

Los investigadores Geballe y Harrison, (ver Tabla 5-5 [8]) evaluaron los valores de $\boldsymbol{\alpha}$ y η en función de la relación E/p como se indica en la **Tabla 4-1**. Esta propiedad se empleará más adelante en el numeral 4.2.4. Sin embargo, es importante observar como el nuevo coeficiente solo se aplica para relaciones interelectródicas E/p de 32,5 a 60.0 V/cm-torr.

Tabla 4-1: Distintas Variaciones de α /p y $\eta\,/p$ en función de E/p para el aire y oxígeno de acuerdo con Geballe y Herrison [67]

[67] Kuffel [8] p 309

E/p V/cm. torr	Oxygen			Air		
	α/p	η/p	$\alpha/p-\eta/p$	α/p	η/p	$\alpha/p-\eta/p$
25.0	0.0215	0.0945	−0.0730	0.00120	0.00495	−0.00375
27.5	0.0293	0.0900	−0.0607	0.00205	0.00473	−0.00268
30.0	0.0400	0.0851	−0.0451	0.00340	0.00460	−0.00120
32.5	0.0532	0.0795	−0.0263	0.00560	0.00460	+0.00100
35.0	0.0697	0.0735	−0.0038	0.00880	0.00475	+0.00405
37.5	0.0862	0.0685	+0.0177	0.0130	0.00497	+0.0080
40.0	0.107	0.0645	+0.043	0.0190	0.00530	+0.0137
42.5	0.128	0.0605	+0.068	0.0260	0.00575	+0.0203
45.0	0.152	0.0570	+0.095	0.0340	0.00635	+0.0227
47.5	0.179	0.0535	+0.126	0.0460	0.00700	+0.0390
50.0	0.206	0.052	+0.154	0.057	0.00780	+0.049
52.5	0.234	0.049	+0.185	0.070	0.00870	+0.061
55.0	0.263	0.047	+0.216	0.087	0.00967	+0.077
57.5	0.292	0.045	+0.247	0.102	0.0108	+0.091
60.0	0.323	0.043	+0.280	0.120	0.0119	+0.108
62.5	0.355	0.0415	+0.314	0.140	–	–
65.0	0.383	0.040	+0.343	0.170	–	–
70.0	0.450	–	–	–	–	–
72.5	0.480	–	–	–	–	–
75.0	0.518	–	–	–	–	–

Los voltajes y Campos soportables y disruptivos[68] en valor y forma y a diferentes distancias interelectródicas d [69] y formas de electrodos, pueden evaluarse a partir de los coeficientes α, γ, η , conocidos para los gases llamados electronegativos como SF6, Freón y otros incluido el aire. El aire es un gas electronegativo por la presencia del Oxígeno.

[68] Ver definiciones **Anexo A**
[69] Distancia más corta entre electrodos de un ensayo

Se establece adicionalmente y en general que la descarga, interpretada como falla del aislamiento o disrupción en el medio aire, se facilita a través de variaciones en las condiciones ambientales de humedad, presión y temperatura.

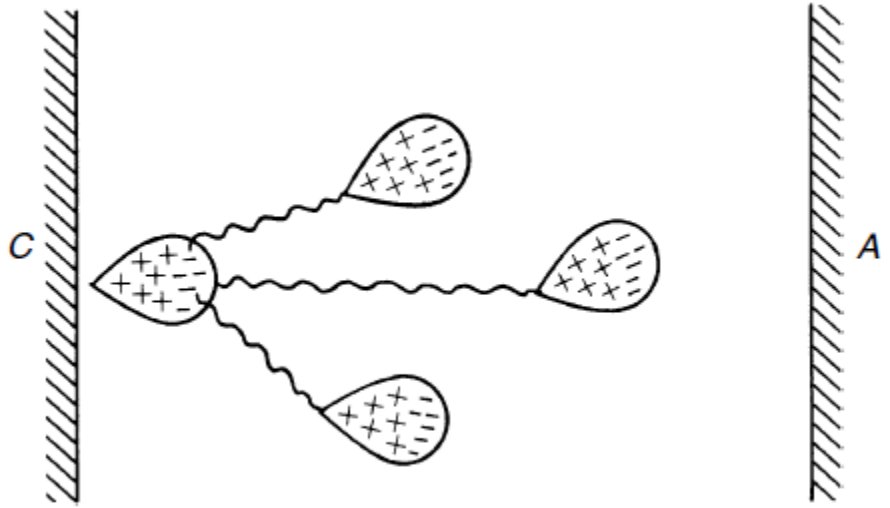
4.2 El aislamiento en los campos eléctricos uniformes y no uniformes

4.2.1 Transición de la descarga no auto sostenida al rompimiento del medio

Townsend formuló el concepto de un segundo coeficiente para campos uniformes al encontrar como el crecimiento de la corriente leída es muy notable y cómo se autosostiene por la “cabeza de descarga llena de electrones o nube, que viajan de regreso hacia el ánodo, Ver **Figura 4-1**. El proceso de liberación de más y más electrones y a su vez iones positivos viajando en sentidos opuestos establecen estos volúmenes como la “cabeza” indicada explicando así el establecimiento de la descarga autosostenida.

Figura 4-1: Descarga autosostenida, las cabezas y nube de electrones hacia el Ánodo y + al cátodo [8][70]

[70] [8] p 329



Mientras el voltaje entre los electrodos en el gas aumenta por una fuente externa y debido ya al poco incremento de la pérdida de electrones, “attachement”, la corriente al ánodo incrementa de acuerdo con la conocida expresión de la ecuación de Townsend (4.6)[71] hasta la ruptura del espacio interelectródico.

$$I = I_0 \frac{e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{ad} - 1)} \qquad (4.6)$$

[71] [8] p 324

De la ecuación (4.6) y de acuerdo con Kuffel[72] se pueden presentar los siguientes tres posibles desarrollos según el denominador de la ecuación (4.6):

Con $(e^{\alpha d} - 1)$ <1 la descarga no se autosostiene.

Para $(e^{\alpha d} - 1)$ > 1 el número de electrones libres es suficiente para producir por choque más y más iones positivos, la descarga es autosostenida y a mayores valores de voltaje aplicados es más rápida. Con la expresión del denominador $\gamma(e^{\alpha d} - 1)$ = 1 se define el umbral de rompimiento o Criterio de Townsend para inicio de la descarga.

Si el voltaje externo no se incremente y el campo eléctrico en el espacio interelectródico no es suficiente para producir la descarga, la ecuación se modifica por el coeficiente η [73] tal como se muestra a continuación:

$$\frac{\alpha\gamma}{\alpha-\eta}\left(e^{(\alpha-\eta)d} - 1\right) = 1 \qquad (4.5)$$

Aproximadamente y si: $e^{\bar{\alpha}d} \gg 1 \quad \text{and} \quad \alpha \gg \eta$ resulta:

$$\left(\gamma e^{(\alpha-\eta)d} = 1\right) \qquad (4.6)$$

Define la condición para inicio de rompimiento del medio. Luego en una forma alternativa para el proceso Townsend se reescribe como

[72] Kuffel, pp 324-325
[73] Kuffel, pp 325

$$\alpha^{-}d = \ln\left(\frac{1}{\gamma} + 1\right) = K \qquad (4.7)$$

Donde K se trata como una constante y ya se tiene la expresión para la captura de electrones. Cabe notar que el coeficiente γ ya no aparece más porque es muy pequeño y se comprobó que ya que está implícito dentro de los mecanismos que facilitan la formación de la descarga autosostenida. La formación de la descarga ocurre generalmente cuando la carga en la cabeza de la avalancha alcanza el valor n[74], ocasionada principalmente por el "arranque de electrones del cátodo", calculado de acuerdo con la ecuación (4.9):

$$n = n_{\circ} e^{\alpha \mathrm{Xc}} = \text{aproximadamente a } 10\text{^}8 \text{ portadores} \qquad (4.8)$$

Donde Xc es la longitud que alcanza el largo de la avalancha medido en la dirección del campo cuando alcanza un tamaño crítico. Anta la poca influencia del coeficiente γ en la ruptura autosostenida, el concepto del rompimiento por Streamer, que se tratará enseguida, y la consiguiente formación de un canal de conducción de la avalancha de iones positivos y negativos explica satisfactoriamente el rompimiento autosostenido por choques y liberación de iones positivos y negativos o por arranque de las placas de cátodo de más y más iones negativos, todos en la búsqueda del terminal opuesto. (Ver **Figura 4-**)

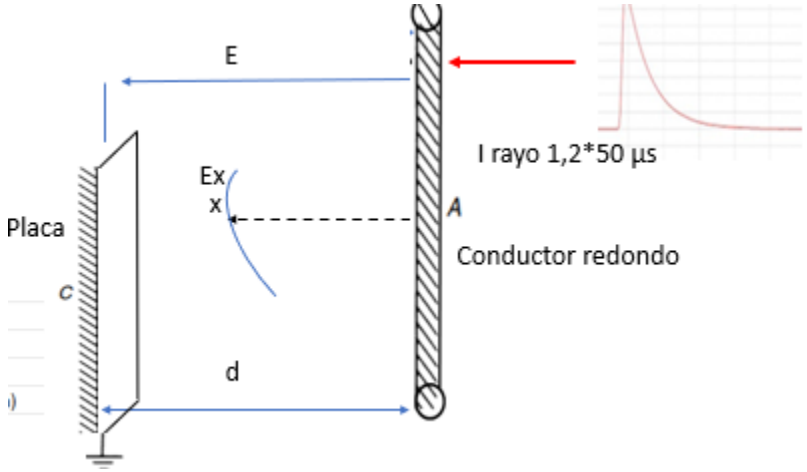
4.2.2 El concepto de la avalancha y rompimiento por Streamer

El modelo de aplicación de esta investigación contempla la distancia y el estudio del rompimiento en una configuración conductor –

[74] Kuffel, pp 327

(ánodo) y placa (cátodo). Ver Capítulo 3. La Figura 4-2 presenta el gap Inter electrodos **d**, bajo la aplicación del campo externo E variable a la distancia x del conductor, por lo tanto, el Campo es desde ya no uniforme. El aire es exigido y ante el crecimiento del campo externo puede presentar desde posible efectos corona, brillo, chispa y avalancha de electrones y de iones positivos hasta la disrupción del medio.

Figura 4-2: Modelo de aplicación configuración conductor – placa

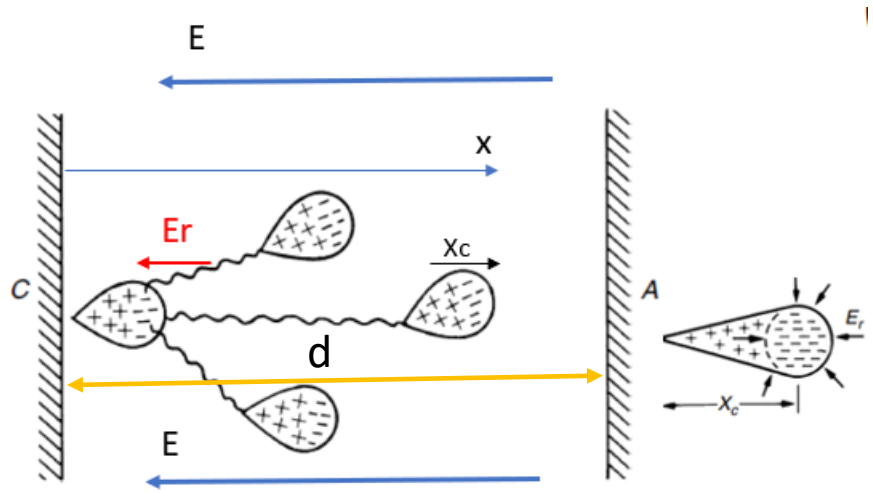


En la medida de aumento del campo externo E y según soportabilidad del aislante se presenta la disociación de las moléculas con liberación de electrones los cuales al chocar con otras moléculas producen pequeñas partes con átomos disociados que presentan pequeños avances de longitud Xc. Se crean cada vez más y más partes hasta formar nubes de electrones que forman el streamer y en seguida una avalancha ya incontenible formando un canal de conducción.

Al mismo tiempo el campo eléctrico en la cabeza de los iones positivos Er crece (ver Figura 4-3) y al igualar el valor del campo aplicado E, inevitablemente llegan al cátodo.

La longitud del streamer con importante contenido de electrones puede calcularse de acuerdo con **(4.8)** donde Xc >= **d** (Figura 4-3) es señal de ruptura del medio y el seguro alcance de electrones al ánodo, con d el umbral de la distancia de rompimiento. El valor de αXc que oscila entre 18 a 20, cifra que corresponde al número de electrones libres que están en capacidad de producir descarga autosostenida.

Figura 4-3: Er campo radial de la cabeza de la avalancha Er, E campo de transfondo aplicado, Xc longitud de avalancha [75]



En base a experimentos y asunciones Raether [76] llega desde (4.7) y (4.8) a la expresión

[75] Kuffel, pp 330
[76] Kuffel, pp 329

$$\alpha\,\mathrm{Xc} = 17{,}7 + \ln \mathrm{Xc} + \ln \frac{Er}{E} \qquad (4.9)$$

De otra parte, Meek [77] expresó la magnitud del campo Er con la expresión:

$$E_r = 5.3 \times 10^{-7} \frac{\alpha e^{\alpha x}}{\left(\frac{x}{p}\right)^{1/2}} \text{ volts/cm} \qquad (4.10)$$

Con x distancia a donde llega la avalancha, p (atm) y α (ion/cm) primer coeficiente de Townsend.

Bajo el concepto de E = Er y x en el límite **d** se llega a la expresión[78]:

$$\alpha d + \ln \frac{\alpha}{p} = 14.5 + \ln \frac{E}{p} + \frac{1}{2} \ln \frac{d}{p}. \qquad (4.11)$$

Que resulta por prueba y error permite determinar el valor de α conocido el valor del E aplicado cuando se satisface esta igualdad.

La importancia de este concepto radica en el hallazgo de un valor de α de acuerdo con las condiciones de medio, situación para determinar con bastante aproximación el valor de Xc:

$$\mathrm{Xc} = 20/\,\alpha \quad (\mathrm{cm}) \qquad (4.12)$$

Y se puede deducir que con X>d hay rompimiento y X=d se encuentra en el umbral.

---

[77] Kuffel, pp 331
[78] [8] Kuffel, p 331

Valoración del campo no uniforme. Desde el punto de vista de la configuración barra – placa se conoce la siguiente expresión para valorar el campo de transfondo E a distancia radial X en frente del conductor, así[79]:

$$\mathrm{E} = \frac{Vs}{LN(\frac{2d}{a})} * \frac{2d}{x(2d-x)} \quad [\,V/cm] \tag{4.13}$$

Donde los nuevos términos son, Vs, voltaje externo aplicado y a diámetro del conductor (cm)

Valoración del coeficiente α. Ya se tiene entonces la herramienta para calcular este coeficiente, variándolo hasta encontrar E = Er aproximadamente y al mismo tiempo el cumplimiento de igualdad de las dos partes de la ecuación 4.11.

A continuación, se presenta la Tabla 4-2 con varios resultados. Como se observa, en primer lugar, se presentan los datos iniciales, a continuación, los cálculos de Vs, E y con un valor inicial de α calcular Er, variar α hasta igualar E con Er y a la vez verificar la igualdad de las dos partes de la ecuación (4-11).

[79] [24]

Tabla 4-2

CASOS CON I/2 RAYO 5 kA, 10 y 1 kA (I RAYO EN LINEA DE TRANSMISION)

$$\alpha d + \ln \frac{\alpha}{p} = 14.5 + \ln \frac{E}{p} + \frac{1}{2} \ln \frac{d}{p}$$

N°	p (at)	Irayo/2 (A)	a radio (cm)	d (cm)	X (cm)	Vs (v)	E (v/cm)	α	form α	resto form	Er (V/cm)	Xc (cm)
1	1,0	5000,0	2,0	80,0	80,0	1750000,0	9984,0	0,337	25,8	25,9	9957,0	59,4
2	1,0	5000,0	2,0	120,0	120,0	1750000,0	6092,3	0,225	25,6	25,6	6087,5	88,7
3	0,8	5000,0	2,0	80,0	80,0	1750000,0	9984,0	0,338	26,3	26,3	9995,1	59,1
4	1,0	10000,0	2,0	80,0	80,0	3500000,0	19967,9	0,345	26,5	26,6	19818,8	58,0
5	1,0	10000,0	2,0	110,0	110,0	3500000,0	13538,3	0,272	28,6	26,4	135593,6	73,5
6	1,0	1057,0	2,0	30,0	30,0	369950,0	7251,4	0,841	25,0	25,1	7260,9	23,8

En la Tabla 4-2 se observa como la distancia desarrollada Xc 59,4 por el Streamer para rayos de 10 y 20 kA. No hay acercamiento a la distancia de gap d: 80 cm.

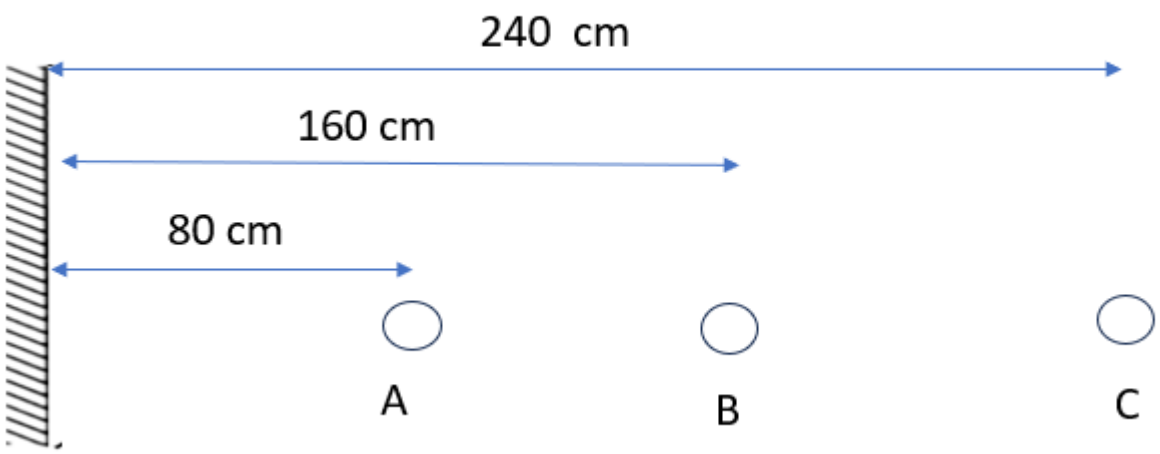
Se muestra el caso 3, presión 0,8 at. a la altura de Bogotá, Xc 59,1. El caso 7 corresponde a prueba de laboratorio que presentó rompimiento, desviación de 10%, gran probabilidad de falla.

La Tabla 4-3 presenta los resultados por los campos de las otras fases B y C a la placa en el momento de la presencia del rayo en Fase A y el acople de las dos fases.

Tabla 4-3

		CASO CON d=80 Y ACOPLE DE CAMPOS DESDE LAS 2 FASES CONTIGUAS, DISPOSICION HORIZONTAL										
N°	p (at)	Irayo/2 (A)	a radio (cm)	d (cm)	X (cm)	Vs (v)	E (v/cm)	α	form	resto form	Er (V/cm)	Xc (cm)
Fase B	1	10000	2	160	160	3500000	1596,529186	0,1636	24,359	24,41317	1589	122,28
Fase C	1	10000	2	240	240	3500000	853,259554	0,109	23,9311	23,98938	846	183,57
ACOPLE	1	20000	2	160	160	7000000	3193,058372	0,1681	25,1128	25,10632	3377,29	118,98

No hay ruptura el aislamiento en la estructura por campos acoplados



4.2.3 Distancia disruptiva interelectrodica por coeficiente de Attachement

En ciertos valores de campos no uniformes se establece otro método para establecer la rigidez dieléctrica del aire. Así en la **Figura 4-**[80] aparece la distancia Xc' de una avalancha dentro de una configuración de electrodos punta-placa.[81]

Este concepto considera que para campos no uniformes la aparición de los nuevos coeficientes: $\boldsymbol{\alpha}$, $\boldsymbol{\alpha} - \eta$ que el attachement y los valores de campo/presión, E/p obtenidos dentro del medio electrolítico se pueden aplicar a campos no uniformes como el ocasionado por los electrodos varilla-placa, caso de este estudio. Esta consideración en el sentido de la no observancia de campos muy concentrados que facilitarían una ruptura sin ninguna contemplación como se tiene entendido hasta el presente para estos campos no uniformes. Solo se sigue una línea crítica de campo como lo indica la **Figura 4-4.**

Es importante mencionar que este procedimiento no aplica para casos en que los valores de campo/presión no se encuentren dentro de los relacionados en la **Tabla 4-1** de Geballe[82], casos en los cuales no existe el coeficiente efectivo de ionización $\alpha - \eta$, el aire no alcanza a comportarse de manera electronegativa debido al valor del campo aplicado y no existe el proceso de attachement.

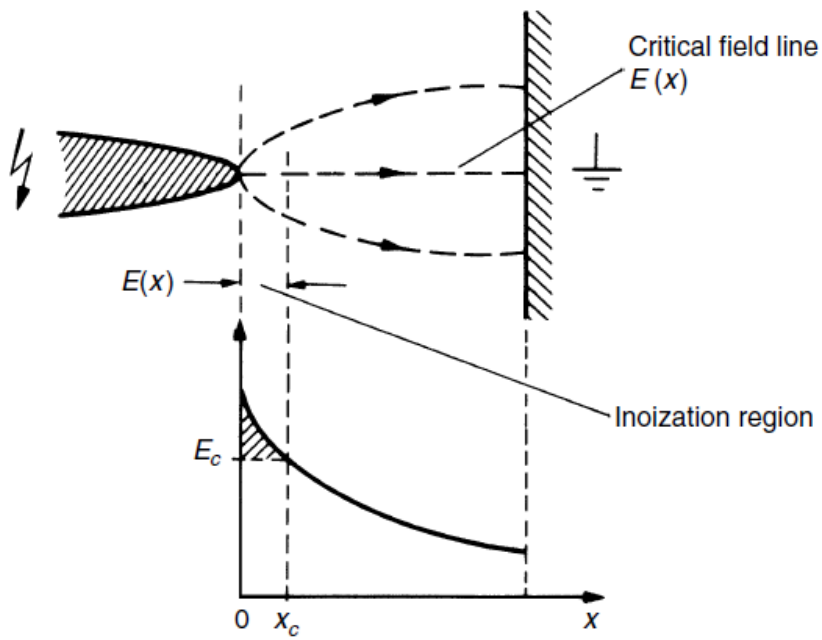
La **Figura 4-** en mención indica que el Campo eléctrico E presente a la presión p baja de 1 atmósfera permite un avance parcial de la disrupción a la distancia x, región ionizada, y si esta región posee suficiente distancia electródíca para llegar al ánodo hay descarga. Si la distancia x hasta la distancia d interelectródica no es suficiente para aumentar en avalancha porque necesita más espacio físico para crear más iones y alargar la avalancha o streamer (ya definido), hasta otra distancia x mayor a la distancia electródíca fija **d**, no

[80] Tomada de la Figura 5-27 de [8], pp343
[81] Corresponde a los considerados en la Figura 3-1, p 29.
[82] …p 34

hay descarga.

Este concepto sobre la distancia x, se trata de nuevo en 4.4.2 más abajo, con el nombre de Xc´.

Figura 4-4: La función de ruptura en medio no uniforme según el coeficiente de Attachement



La teoría expuesta sea aplica al caso de electrodos punta placa de la **Figura 4-** [83] siempre que se logre establecer tanto la magnitud de un nuevo coeficiente de ionización disminuido por el coeficiente de recombinación (attachment) η, con la captura de electrones libres. Depende de un alto valor del campo aplicado, de una distancia d grande y a presiones bajas. La magnitud de estos se observa en los resultados obtenidos más adelante en la **Tabla 4-** en $f\ (\frac{E}{p})$

Por lo tanto y con base en el factor de recombinación η el nuevo factor de la ecuación será $\boldsymbol{\alpha}^{-} = \boldsymbol{\alpha} - \eta$ queda establecido el parámetro para campos no uniformes es suficiente considerar el nuevo coeficiente para encontrar los nuevos factores en la Tabla 4-1 como funciones de $f(\frac{E}{p})$.

$$\boldsymbol{\alpha}^{-}/\boldsymbol{p} = \boldsymbol{\alpha}/\boldsymbol{p} - \eta/\boldsymbol{p} \qquad (4.9)$$

Así según [8] [84] a partir de las ecuaciones (4.9) a (4.11), la obtención del camino de disrupción más corto a lo largo de la distancia interelectródica d y la distancia Xc, se llega a la expresión:

$$\int_0^{Xc<d} \boldsymbol{\alpha}^{-}\,\mathrm{dx} = \ln\,(\mathrm{Ncr}) = 18 - 20 \qquad (4.10)$$

Dado que la V de ruptura a una presión p y distancia disruptiva d, el término E/(pd) (volt /cm) y con el factor α^{-} considera el campo

[83] [8] pp 343
[84] Kuffel [8] pp 330 - 343

como no uniforme[85], ya que α^- es función de x [86] (ver **Figura 4-**). Al efectuar la integral de manera inmediata:

$$Xc' = \frac{Ln\ 10^8}{\alpha^-} \quad \text{[cm]} \qquad (4.16)$$

Ver Ncr de la ecuación (4.9), 10^8 portadores, ln 10^8 = 18,2[87]

La condición Xc > **d** implica la necesidad de poseer un camino más largo dentro del canal para encontrar el número suficiente de iones cargados y alcanzar disrupción. Implica entonces no disrupción o muy pocas probabilidades de éxito dentro del espacio **d**. Para ello requiere un **d** mayor. Esta condición se presentará en el numeral 4.4 sobre rompimiento en campos no uniformes.

4.2.3.1Procedimiento para estimar Xc por Attachement y su relación con d.

1) Consultar en la Tabla 4-1 los coeficientes α /p, η / p y su diferencia para rangos de campos ya establecidos a presión de 1 atm, 760 Torr, en términos de E/p (Voltios / cm-Torr) para el aire.

[85] Kuffel [8] p 309 y pagina 43 al final
[86] Cooray [19] p 85
[87] Kuffel [8] p 327, p 331

2) Calcular el sobrevoltaje V (kV) [88] ocasionado por rayo que al incidir directamente sobre la línea de transmisión sobrepasa el cable de guarda y hace impacto en el conductor. Recordar de (2.1) que Zc es la impedancia característica de la línea de transmisión, un valor típico 350 ohm.

El Sobrevoltaje esfuerza el aislamiento a través de la distancia **d** en la subestación entre los electrodos placa- conductor redondo[89]. Con estos V, **d**, y p (presión atmosférica) calcular campo interelectródico V/(**d***p).

3) Calcular Xc', según el factor $\bar{\alpha}/p$, o, (α - η) /p según los intervalos de la Tabla 4-1.

4) Comparar Xc' obtenido contra distancia interelectródica **d** y si se establece la condición de ruptura con Xc' > d.

5) Resultados

Para Xc' < d hay ruptura del medio interelectródico por suficiente concentración de iones y recombinaciones para alcanzar el electrodo opuesto (Ver representación en la **Figura 4-**).

Por el contrario, con Xc' > d no hay la ruptura en el medio. No hay suficiente aire en el espacio interelectródico para obtener más y más iones positivos en tránsito entre el ánodo y el cátodo, y por lo tanto el rompimiento inicial o streamer no avanza, el campo dentro

[88] Ver ecuación (2.1) p 15
[89] Ver dibujos en Figura 2-5, Figura 2-6 y Figura 3-1

del gas es insuficiente y la descarga se detiene.[90]

A continuación, la **Tabla 4-** presenta varios resultados de obtención de la **Xc >d** y E/p > 30 kV/ (cm-Torr)[91] con todos los casos sin rompimiento, mientras que la Tabla del **Anexo B** presenta otros casos con o sin rompimiento según se deduce de la comparación entre **d** contra la Xc obtenida.

4.2.3.2 Explicación caso específico en Tabla 4-3

Caso del renglón 3, por ejemplo, en Bogotá con **d**=80 cm, 550 Torr, I rayo de 10 kA, entrando 5 kA a la subestación.
Consultados los valores de los coeficientes α/p, η/p, $\bar{\alpha}/p = \alpha/\mathrm{p} - \eta/\mathrm{p}$ de la Tabla 4-1 corregidos a 550 Torr se determina Xc´´ = 18,2/($\bar{\alpha}$ /p) en 993 cm. El **d** establecido actualmente a partir de la Norma 60071-1 se encuentra en el rango de 150 a 160 cm.
Ver otros casos, por ejemplo, los casos con gap **d** de 50 y 110 cm con p de 550 y 760 Torr.

La Tabla mostrada en el **Anexo B** presenta otros casos estudiados con o sin rompimiento según el criterio con Xc´´ **>d** para diferentes presiones del medio y diferentes distancias **d.**

La Tabla 4-1 no contempla coeficientes para los rangos con E/p cercanos o menores a 30 (kV/cm-Torr) y mayores a 65, casos que en la ecuación [14] resulte en división por la diferencia muy pequeña entre $\alpha/\mathrm{p} - \eta/\mathrm{p}$, (casi 0) o negativos y para valores de η para un “attachement” muy bajo, ver en **Figura 4-**. [92] el dibujo que presenta las características de estos coeficientes en relación con el

[90] Ver apartado 4.4.2 el mismo tema con otro autor.
[91] Ver párrafo anterior a 4.4.2 para E= 30
[92] Ver Conclusiones.

campo interelectrodíco.

4.2.3.3Concepto según el autor Cooray [19]

Este autor contempla en su teoría acerca de la descarga en arreglos de electrodos en configuraciones no uniformes, valores límites del campo interelectródíco para el inicio de un streamer y la formación de una descarga. En efecto el autor fija un valor de este campo dentro del canal en el rango de 1* 10^4 a 2* 10^4 V/cm a 1 atm[93]. la longitud del streamer positivo garantiza su descarga al llegar al cátodo mientras que el streamer negativo no llega al cátodo[94]. Por lo tanto, la situación más crítica corresponde a los streamer positivos que se forman en un arreglo punta positivo-placa negativo. Dado que los rayos en su mayoría depositan carga negativa, estos cálculos tienen un margen de error que corresponde aproximadamente a la relación entre los rayos a tierra negativos, que ocurren con mayor frecuencia, y los rayos positivos.[95]

Los cálculos realizados para encontrar este último valor de Campo en los casos citados de la **Tabla 4-** arrojan los valores indicados en la columna del extremo derecho de la Tabla. Sirven estos como comparación a los realizados con la metodología seguida hasta el momento.

De lo indicado por este autor se desprende que la obtención de este valor límite indica el umbral para inicio de rompimiento dentro del canal. Nótese que estos límites se encuentran muy cerca al valor crítico del campo para rompimiento en aire de 3*10^4 V/cm a 1 atm.

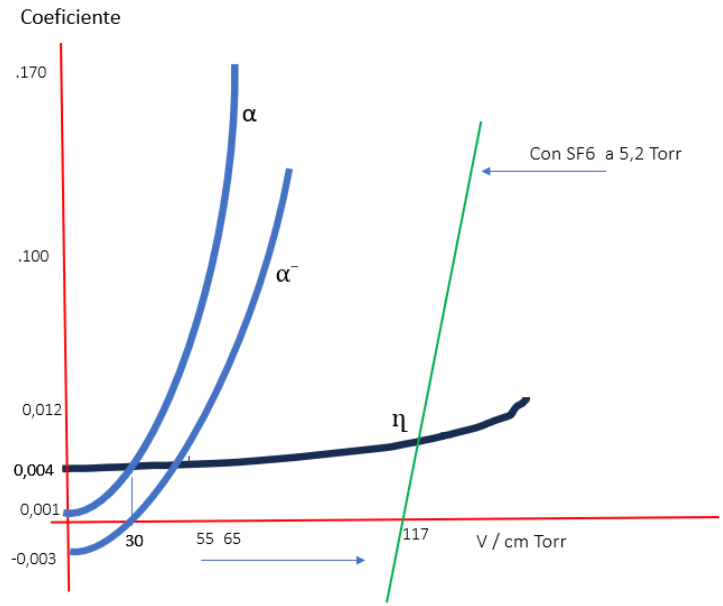
---

[93] [18] p 85
[94] Citación textual al autor
[95] Ver estadística en p 42.

4.2.3.4 Relación gráfica de los valores esperados de α y η en f (E/p)

La Figura 4-5 [96]. Ilustra, según el autor Günter Hilghart [18] acerca de la forma general de los coeficientes α y η y en función de la relación E/p. En esta figura se ilustra el concepto del E/p > 30 y E/p<65, referidos a la Tabla 4-1.

Figura 4-5: Los coeficientes del proceso de recombinación con α, α⁻ en aire y comparación con gas SF6.



[96] [18] pp 77 Gráfico desde los datos de la Tabla 4-1 con resultados en **Tabla 4-** y **Anexo B**

GRAFICO COEFICIENTES IONIZACION Y RECOMBINACION (α α^- η) vs CAMPO / p EN AIRE ([V / cm Torr] a 1 atm)

4.2.3.5 Conclusiones según la Tabla 4-

a) Fila 3 de la Tabla 4-4: Distancia de gap de 80 cm, 550 Torr en Bogotá ante I rayo de 10 kA viajan en caso hipotético 5 kA a la subestación, con Zc de 350 ohm, sobrevoltaje por impulso de I rayo V 1750 kV y E/p = 45,45 (V/ cm Torr), se necesita Xc de **993 cm > 80 cm.** No hay espacio suficiente a lo largo del eje del canal de la descarga para la formación del streamer, por lo tanto, no hay descarga.

Tabla 4-4: Resultados con Xc > d en todos los casos

p Torr	**d** (cm)	I/2 (kA)	Zc (Ω)	V (kV)	E/p (V/cmTorr)	α /p	η / p	(α - η) /p	Xc (cm)	d (cm)	I (kA)	E (kV/cm) p 1 atm[97]
760	110	10	350	3500	41,87	0,0260	0,0058	0,0203	928,40	110	20	32
550	110	7,5	350	2625	43,39	0,0330	0,0058	0,0377	499,28	110	15	23
550	**80**	**5**	350	1750	39,77	0,0190	0,0053	0,0189	**993,08**	**80,0**	10,0	21,8
550	50	2,5	350	875	***31,82***	0,0056	0,0045	0,0015	12368,42	50,0	5,0	17,5
550	50	5	350	1750	63,64	0,1400	0,0120	0,1769	106,29	50,0	10,0	35
550	60	4,3	350	1505	45,61	0,0340	0,0064	0,0382	492,05	60,0	8,6	25
550	110	10	350	3500	57,85	0,1020	0,0108	0,1260	149,18	110	20	32

[97] E a presión p 1 atm, corresponde al tema del numeral 4.4.4

760	70	5	350	1750	32,89	0,0570	0,0048	0,0523	359,81	70	10	25
760	110	8	350	2800	33,49	0,0061	0,0046	0,0015	12533,33	110	8	25,4
760	110	5	350	1750	20,93					110	10	*****15909
550	80	**7,5**	350	2625	59,66	0,1200	0,0119	0,1494	**125,86**	**80**	15	32,8

*****No cumple criterio E/p > 30

b) Fila 4 de la Tabla 4-4, muy cerca del campo de 30 (V/cm Torr) se presenta la máxima recombinación, ya que al igualarse α con η, la resta de estos valores es aproximadamente 0. Por lo tanto, la distancia Xc es muy grande y no habría formación de streamer. Sin embargo, a partir de un campo cercano a 65 (V/cm-Torr) se presenta la descarga ya que el coeficiente α empieza a ser mayor al coeficiente η , ya no hay más recombinaciones dentro del gas. Así, a 1 atm, d= 50 cm y rayo de 5 kA, Xc es 18800 cm y por lo tanto en este caso no se espera ruptura del medio.

c) Para el cuadro del **Anexo B**, al final, filas 1, 2 y 3, en caso hipotético de rayos de 20, 15 o 10 kA y **d**=110 cm, Xc > **d**, no hay rompimiento. Recuérdese que la distancia 110 cm es la recomendada por norma IEC 60071 hasta 1000 msnm para nivel de 115 kV. En la última fila de la **Tabla 4-** se demuestra que a 550 Torr el rayo de **15 kA tampoco** ocasiona ruptura dentro del espacio interelectródico **d** seleccionado por este estudio, Xc > 80 cm.

d) Esta investigación recomienda utilizar la distancia **d = 80 cm**, entre electrodos varilla-placa-tierra, dentro de los cuales el aire impide descarga ante los rayos de 20 kA[98], los de más probable ocurrencia sobre las líneas del Sistema de Transmisión de Bogotá a 115 kV.

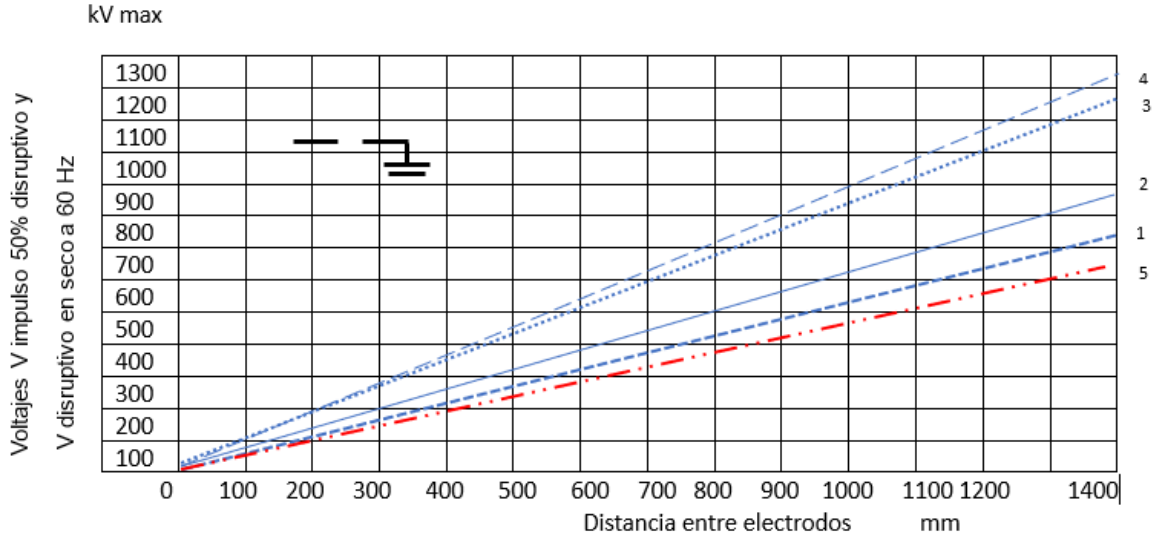
[98] Ver p 11

4.3 La selección tradicional de la Distancia para distancias grandes entre electrodos

En la **Figura 4-** se presentan los resultados del voltaje disruptivo V 50%, en el aire, con diferentes formas de onda, en función de la distancia interelectrodica **d** obtenidos en pruebas dieléctricas [99] [1]. Esta figura compendia una de las fuentes de consulta vigentes por mucho tiempo en el ámbito de la ingeniería en materia de aislamiento. Como se ha indicado a través de esta investigación, hay otros estudios más actualizados en este campo.

Figura 4-6:

Impulsos de sobrevoltaje[100] 50% disruptivo y sobrevoltaje a frecuencia industrial vs. distancia electrodos, varios Voltajes: 1: +1,5/40 µs, 2: -1,5/40 µs, 3: +1/5 µs, 4: -1,5/40 µs, 5: 60 Hz a condiciones normales de presión, temperatura y altura h msnm



Para las distancias **d** del orden de 1000 mm y mayores, se observa un incremento lineal de los sobrevoltajes disruptivos con la distancia **d.** Por ejemplo, para la distancia de 1000 mm [1], onda tipo +1,5/40, el voltaje 50% es 650 kV.

---

[99] A Roth [1] pp 299

[100] O sobrevoltaje de impulso, ver **Anexo A**, Definiciones

4.4 La distancia d según norma IEC 60071-2

La Tabla 3-4 del apartado anterior presenta la recomendación de la Norma IEC 60071-2, para la determinación de la distancia de aislamiento en aire en función del BIL de la instalación referida.

Es importante destacar la estrecha correlación que se observa entre los resultados de la Figura 4-6 y la **Tabla 3-4**.

Particularmente para el caso del voltaje nominal de 115 kV rms se ha establecido el voltaje máximo soportable al impulso tipo rayo es de 550 kV, tal como se indica en la Tabla H-1 del anexo H. La distancia interelectródica **d** recomendad por la Norma 60071-2 para este nivel de voltaje y voltaje máximo soportable tipo rayo es 110 cm, ver Tabla 3-4. La distancia interelectrodica **d** recomendad en esta investigación para Bogotá es 80 cm.[101]

[101] Distancia **d** recomendada Bogotá con corrección del factor presión atmosférica incluida a este nivel de altura Ver pp 44 y 45

5. Cálculo de sobrevoltajes causadas por los rayos con el programa ATP y su control

5.1 El dispositivo de protección contra sobrevoltajes DPS

El DPS de tipo óxido metálico -OM- es un varistor que se conecta en paralelo o Shunt al voltaje de operación del sistema de potencia, o conexión Shunt, entre el equipo a proteger y la tierra. Usualmente el OM de los DPS se agrupa en forma de pastillas conectadas en serie, las cuales cambian rápidamente su impedancia a tierra desde valores muy altos a valores muy bajos en función del voltaje aplicado entre sus extremos.

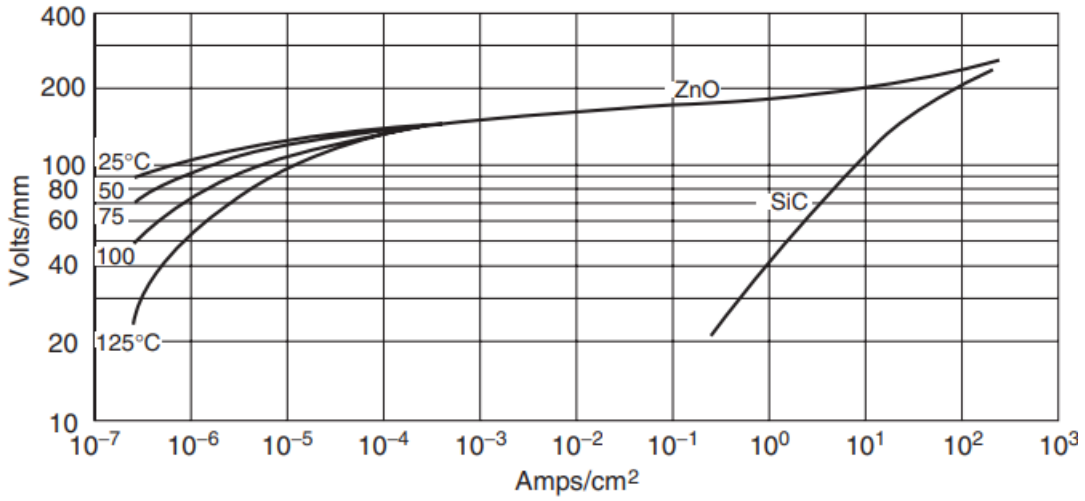
El DPS una vez conectado a la frecuencia industrial y a los valores más altos de voltaje permitirá la circulación a tierra a través de las pastillas de corrientes muy bajas, del orden de pocos microamperios.

Sin embargo, ante impulsos de sobrevoltaje ocasionados, por ejemplo, por impulsos de corriente asociados al rayo, la rápida variación de la impedancia del DPS permite la derivación a tierra del impulso de la corriente de rayo que impactó el conductor de fase.

La Figura 5-1 [8] presenta la característica de Campo unitario (V/mm) – Densidad de corriente (A/mm2) de un DPS de ZnO. Es de notar que esta característica es la apropiada para descargar los sobrevoltajes ya que se logra, como ya se indicó, un paso en pocos microsegundos de no conducción a conducción, situación que se ha mejorado bastante en relación con la observada en los DPS de la tecnología anterior, conocidos como de Carburo Silicio SiC (Ver Figura). En estos últimos, la presencia interna de aire debida a su construcción los hacía muy peligrosos por alto riesgo de explosión.[102]

[102] [7] Volker, p17

Figura 5-1: Característica campo unitario en función de la densidad de corriente en DPS tipo óxido metálico ZnO contra antiguo en carburo silicio SiC [8]



La Confiabilidad del DPS

Puede decirse que la combinación de la operación de los cables de guarda en la función de apantallamiento y la actuación de los DPS blindan los sobrevoltajes externos a un poco menos de los niveles de tolerancia de soportabilidad de los equipos, al disminuir ante su correcta actuación la tensión aplicada por influencia del rayo entre partes vivas y tierra. Como entre los elementos que soportan las sobretensiones se encuentra el aire y estas se limitan convenientemente por los DPS, por ello se pretende recomendar la reducción de las distancias de aislamiento fase-tierra.

Cabe presentar ahora la perspectiva de fallo de la operación de los DPS. Para ello es importante resaltar la presentación que realizan los fabricantes en este sentido.

En efecto, las técnicas recientes de fabricación[103] [104]de las pastillas de oxido metálico OM con mayores densidades de las corrientes de conducción permiten una mejor repartición

[103] Volker, [7], pp 23…30
[104] [2] p 55

de las presiones internas con gran aumento en absorción térmica[105] de energía, cualidades que los hacen más seguro a la operación sin riesgos de explosión.

Garantía de los DPS

Los DPS garantizan controlar el nivel de la sobretensión y mantenerla en su valor de operación a la conducción hasta su extinción en su NPR - Nivel de operación por rayo-, comportamiento esperado ante diferentes casos de sobretensión como se estudia en el numeral 5.5

Los beneficios

Como se discutirá más adelante, la reducción de las distancias de aislamiento implica otros beneficios que justifican esta investigación[106].

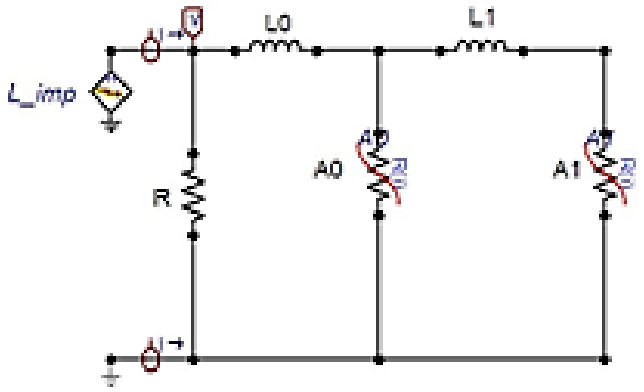
5.2 El modelo del DPS para el ATP

Para la simulación en ATP el modelo más utilizado del DPS es el llamado del tipo Pincetti denominado como dependiente de la frecuencia [20]. La composición de este modelo que consta de resistencias variables y algunas inductancias apropiadas se presenta en la **Figura 5-2**. Este representa muy bien el comportamiento del descargador de OM, las inductancias L0 y L1 con las resistencias variable A0 y A1 constituyen las dos partes del modelo. La A0 representa adecuadamente los frentes de onda más rápidos con lo cual resulta mayor corriente en el componente A0 que en el A1 y por lo tanto A0 desarrolla un voltaje más alto.

Ver igualmente en la Figura 5-2 la fuente de corriente Limp que inyecta la corriente de rayo seleccionada

[105] Kuffel, [8], pp 502…
[106] Revista ABB [3] p 49-53

Figura 5-2: El modelo DPS tipo Pincetti para el aplicativo ATP [20]



5.3 El modelo del esquema eléctrico para reducción de las sobretensiones.

El modelo esquemático de la subestación para garantizar la reducción de las sobretensiones peligrosas que puedan ingresar a la misma se ilustra en las **Figura 5-3** y **Figura 5-4**.

Se propone un juego de tres unidades de DPS adicionales al esquema tradicional actualmente utilizado, que está conformado por tres unidades que se instalan, una por fase, en el módulo de llegada de línea de la subestación. Estos DPS adicionales se ubican uno por fase, en la última estructura o torre de soporte, según el caso, antes de su llegada a su módulo de conexión. Esta disposición permite la reducción de la sobretensión en dos etapas[107] y a su vez ofrece la perspectiva de un doble factor de seguridad ante posibles daños, desperfectos o desconexiones a tierra de alguno(s) de ellos que puedan ocurrir durante la operación.

---

[107] Ver 5.4.2 características de DPS nuevo y dos resultados por su aplicación en **Tabla 5-2**: Relación de figuras con los resultados obtenidos con el programa ATP.

El doble juego de DPS permite a su vez disminuir las posibles sobretensiones de paso y de contacto que puede llegar a la instalación, las cuales serán menos peligrosas tanto para los equipos como para los seres vivos presentes.

Como se verá en los resultados de simulaciones en el apartado 5-6 las sobretensiones no llegan a los valores para los cuales se han diseñado tradicionalmente las distancias del aislamiento entre las estructuras y los conductores de fase.

Figura 5-3:

Esquema eléctrico de la línea de transmisión con doble juego de DPS

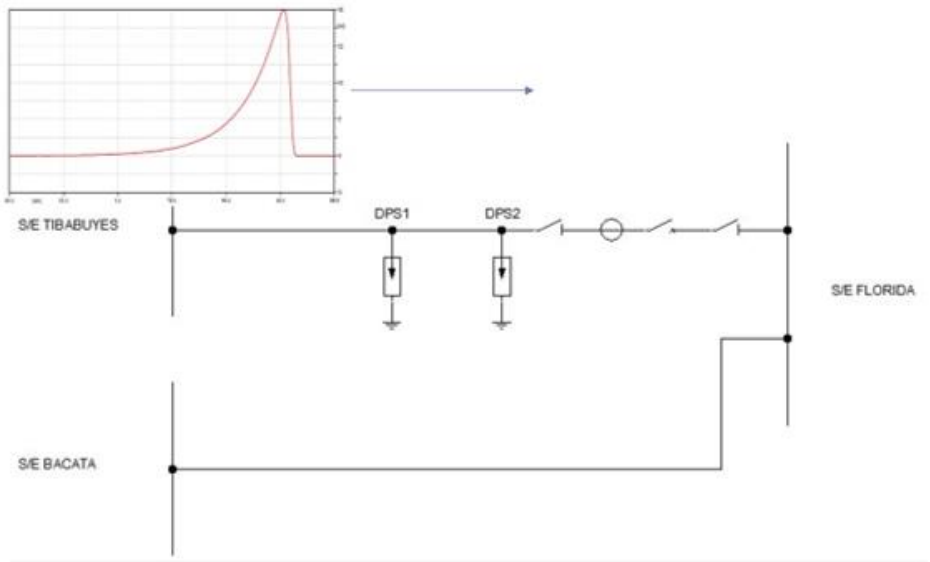
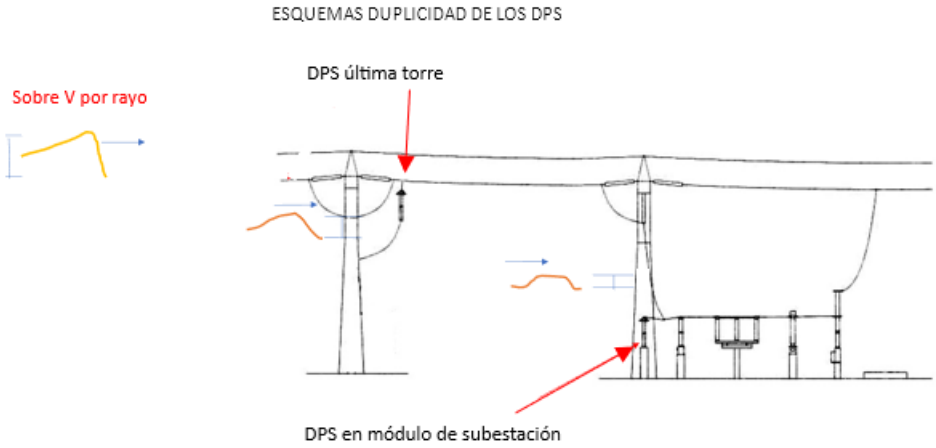


Figura 5-4: Conexión de doble juego de DPS a la entrada de la subestación



5.4 El Modelo del DPS y funcionamiento en ATP

5.4.1 El Modelo del ATP

Se trata entonces de utilizar el aplicativo de ALTERNATIVE TRANSIENT PROGRAM ATP, plataforma Windows del EMTP, Electro Magnetic Transient Program, ampliamente utilizado en aplicaciones transitorias de la alta tensión.

El modelo para este desarrollo posee sus propios generadores, un modelo π para 2 líneas 115 kV, el módulo terminal de línea de la Subestación, un transformador 30 MVA 115/13,2 kV, un modelo del rayo aplicado y los dos juegos de descargadores, uno en el módulo de línea y el otro, en la última torre antes de llegar al módulo. Se presentan tanto en la **Figura 5-6** como en el detalle ampliado de la parte de los módulos de línea, transformador y barraje de la instalación (ver **Figura 5-7**).

La **Tabla 5-3** presenta un resumen de resultados obtenidos en los 8 casos de simulaciones que se presentan a continuación. En las aplicaciones con un juego de DPS, actúan a un nivel de protección NPR de 260 kV en el frente de sobretensión. Para el juego adicional se utilizaron DPSs que actúan a un nivel del frente de sobretensión de 300 kV.

5.4.2 Características del doble juego de descargadores

Los DPS seleccionados [108] que hacen parte del programa para el doble juego propuesto en valores comerciales, se han seleccionado con las características principales que se indican en **Tabla 5-1**. Se incluye impulso de corriente 8/20 µs y 10 kA.

---

[108] [20], p 302

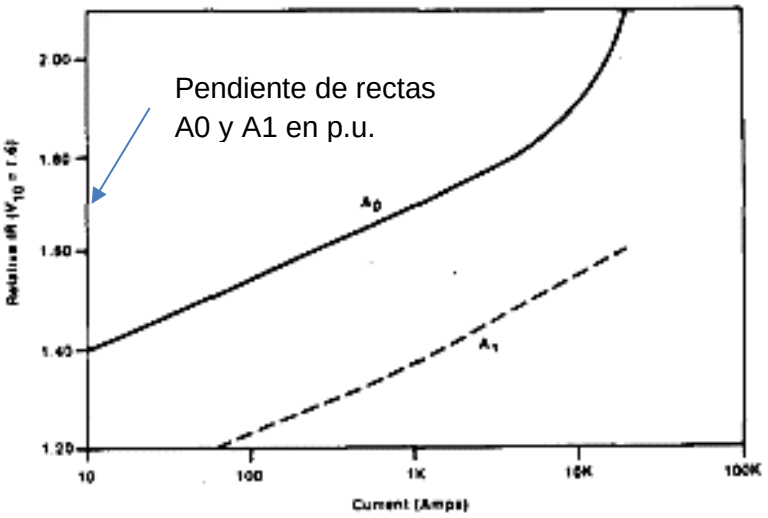
Tabla 5-1: Características de los dos juegos de DPS, 10 kA, 8/20

Juego DPS	Sitio	Vn (kV)	NPR (kV)
1	Módulo de línea	108	231
2	Ultima Torre (nuevo)	132	283

Las tensiones de reacción NPR (Nivel de protección por Rayo) utilizadas en el modelo operan en los niveles de protección 260 y 300 kV para impulso de corriente tipo rayo 10 kA forma 8/20. Los DPS ilustrados son del fabricante ABB, tipo **PEXLIM P-Z**, ver referencias y obtención de datos en el **Anexo E**.

Para la selección de las dos características de operación tanto del DPS instalado en el módulo como el adicional se recomienda ver el Anexo F. La modificación realizada al programa para el DPS adicional 109 se utilizó el documento [20] de IEEE Grupo de trabajo 3-14 para variar las características no lineales de las resistencias A0 y A1. Ver Figura 5-5.

Figura 5-5: Características no lineales A0 y A1 del juego adicional de DPS [20]



[109] Ver resultados con nuevo DPS últimas dos filas en la **Tabla 5-2**: Relación de figuras con los resultados obtenidos con el programa ATP. aplicado para 2 rayos

Figura 5-6: Instalación de las líneas de transmisión que llegan a subestación Florida modeladas en ATP

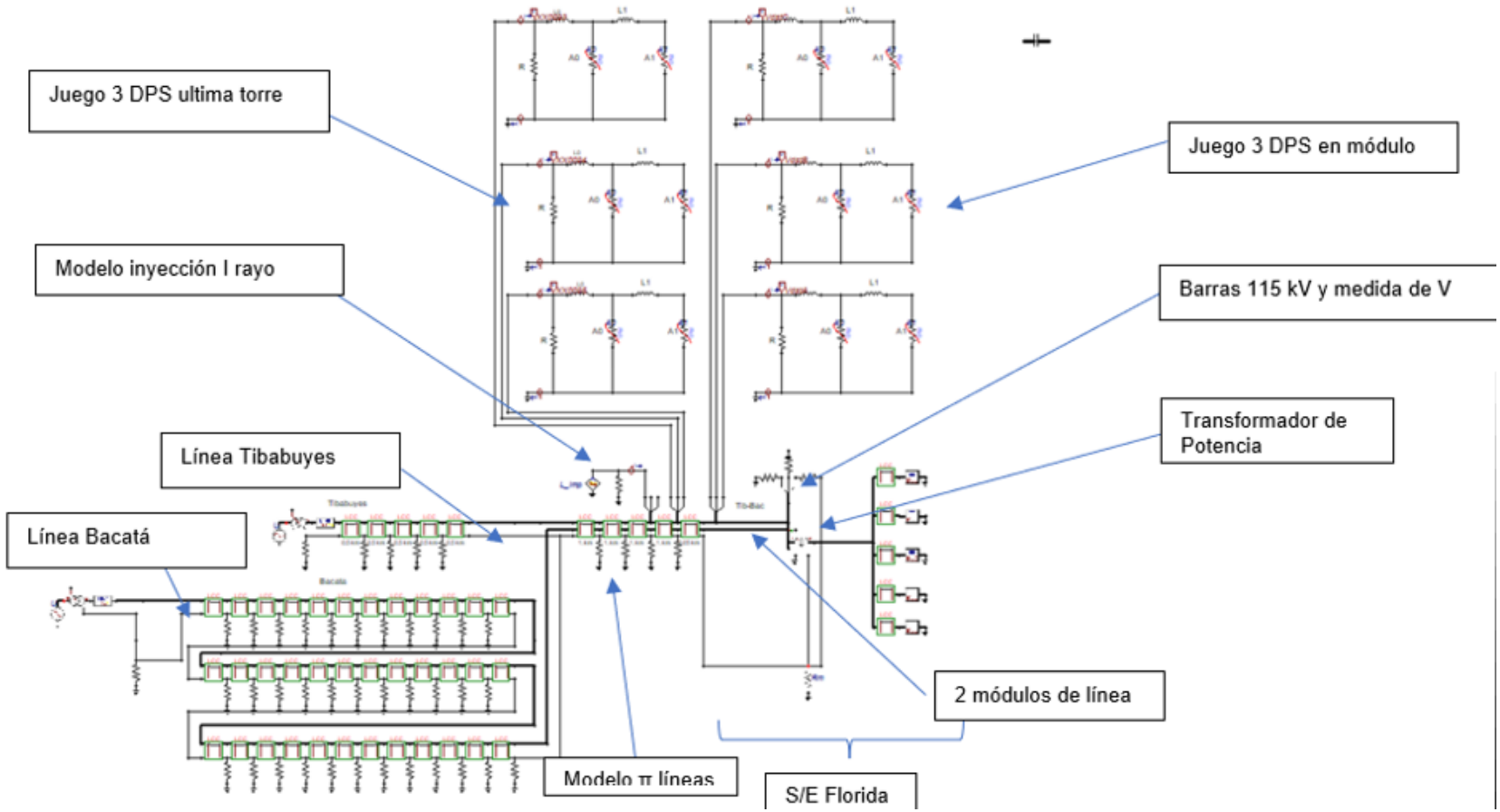
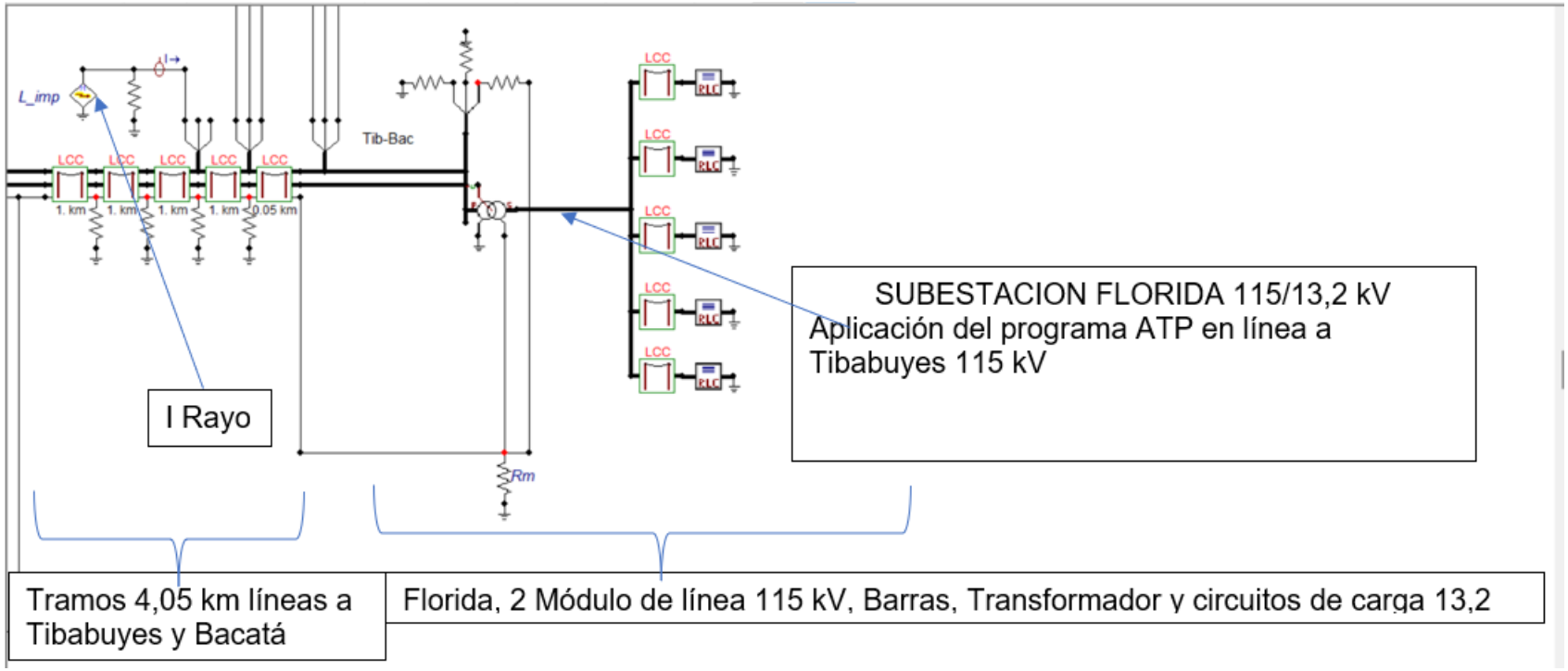


Figura 5-7: Instalación en subestación Florida 115 kV DE Figura 5-6, detalle y ampliación del módulo de llegada de línea



5.5 Aplicación del programa ATP

5.5.1 Introducción general

Se presenta el desarrollo y los resultados obtenidos por el programa ATP para diferentes corrientes de rayo que impacten las líneas de transmisión y los sobrevoltajes de impulso fase - tierra que llegan como consecuencia a la subestación en sus diferentes manifestaciones ente la intervención de los DPS.

En el modelo la corriente de rayo se inyecta en la fase C del sistema, al asumir que es la de mayor altura al piso. La simulación en ATP presenta la forma y magnitud de los voltajes obtenidos como respuesta de los DPS en el módulo de conexión de la subestación, en la última Torre previa a la llegada, así como la lectura del voltaje en el barraje de la subestación

Se presentan los casos de las simulaciones, primero con un solo juego de DPS, y luego con doble juego de DPS. Este último con el juego de DPS adicional ubicado en la última torrea antes de la subestación. Se obtienen así varias gráficas con los voltajes leídos y las corrientes de rayo aplicadas.

La **Tabla 5-2** resume el contenido de las Figuras presentadas a continuación donde la **(x)** indica las variables registradas.

Tabla 5-2: Relación de figuras con los resultados obtenidos con el programa ATP.

Figura	# juego DPS	I rayo(kA)	V torre kV			V módulo kV			V barraje kV		
			Φ A	Φ B	Φ C	Φ A	Φ B	Φ C	Φ A	Φ B	Φ C
Fig. 5-8 a 5-10	1	10	x			x	x	x	x	x	x
Fig.5-11 a 5-13	2	10	x	x	x		x	x		x	x
Anexo 0	1	2,5	x	x				x		x	
Anexo 0	2	2,5	x	x				x		x	

Así las figuras según **Tabla 5-2** corresponden a simulaciones con I rayo 10 kA, uno o dos juegos DPS. El **Anexo 0** presenta para I rayo de 2,5 kA. La **Tabla 5-3** presenta el resumen de resultados de los sobrevoltajes máximos obtenidos con otras corrientes de rayo.

5.5.2 Resultados de Voltaje V vs. Tiempo en programa ATP

Información general para la lectura de los gráficos.

En las gráficas, la ordenada a la izquierda de los gráficos se indica la escala de voltios y a la derecha la corriente de rayo en kA.

El programa del ATP entrega las siguientes convenciones que se indican para cada caso en la parte inferior de los gráficos, así:

X0094 Voltios torre Fase A
X0095 Voltios torre Fase B
X0096 Voltios torre Fase C

VDSTA Voltios módulo de línea fase A
VDSTB Voltios módulo de línea fase B
VDSTC Voltios módulo de línea fase C

X0003A Voltios Barraje Fase A
X0003B Voltios Barraje Fase B
X0003C Voltios Barraje Fase C

Las identificaciones en la parte inferior de las gráficas van precedidas por **c** para las corrientes y por **v** para voltaje. La identificación por colores se indica en cada una de las figuras.

Figura 5-8: 1 juego de DPS en módulo de línea, Escalas: Voltajes -200-0- +200 kV, tiempo 0 a 0,2 ms. I rayo: 0-10 kA. Rayo de 10 kA en fase C curva roja (c: xx0095), Voltaje módulo Fase C curva azul (v: VDSTC), Voltaje de barras Fase C (v:x0003C) curva verde superpuesta al Voltaje del módulo.

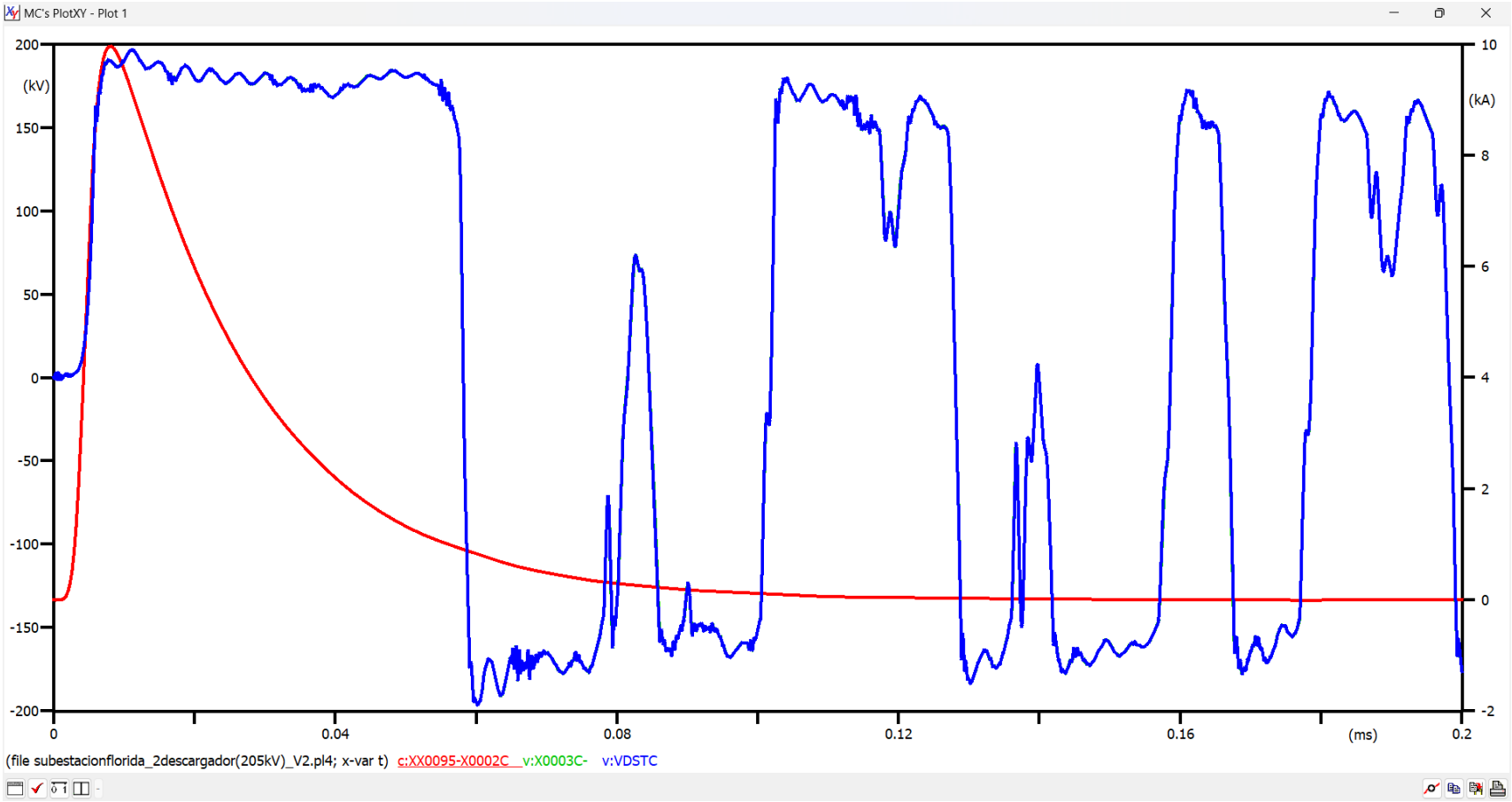


Figura 5-9: Complemento a la Figura 5-8, 1 juego DPS en módulo de línea. Escalas: Voltajes -200-0- +200 kV, tiempo: 0 a 0,2 ms Desde impacto del rayo, Voltaje Fase A del módulo, curva verde. Voltaje Fase A en barraje con transitorios, curva roja superpuesta.

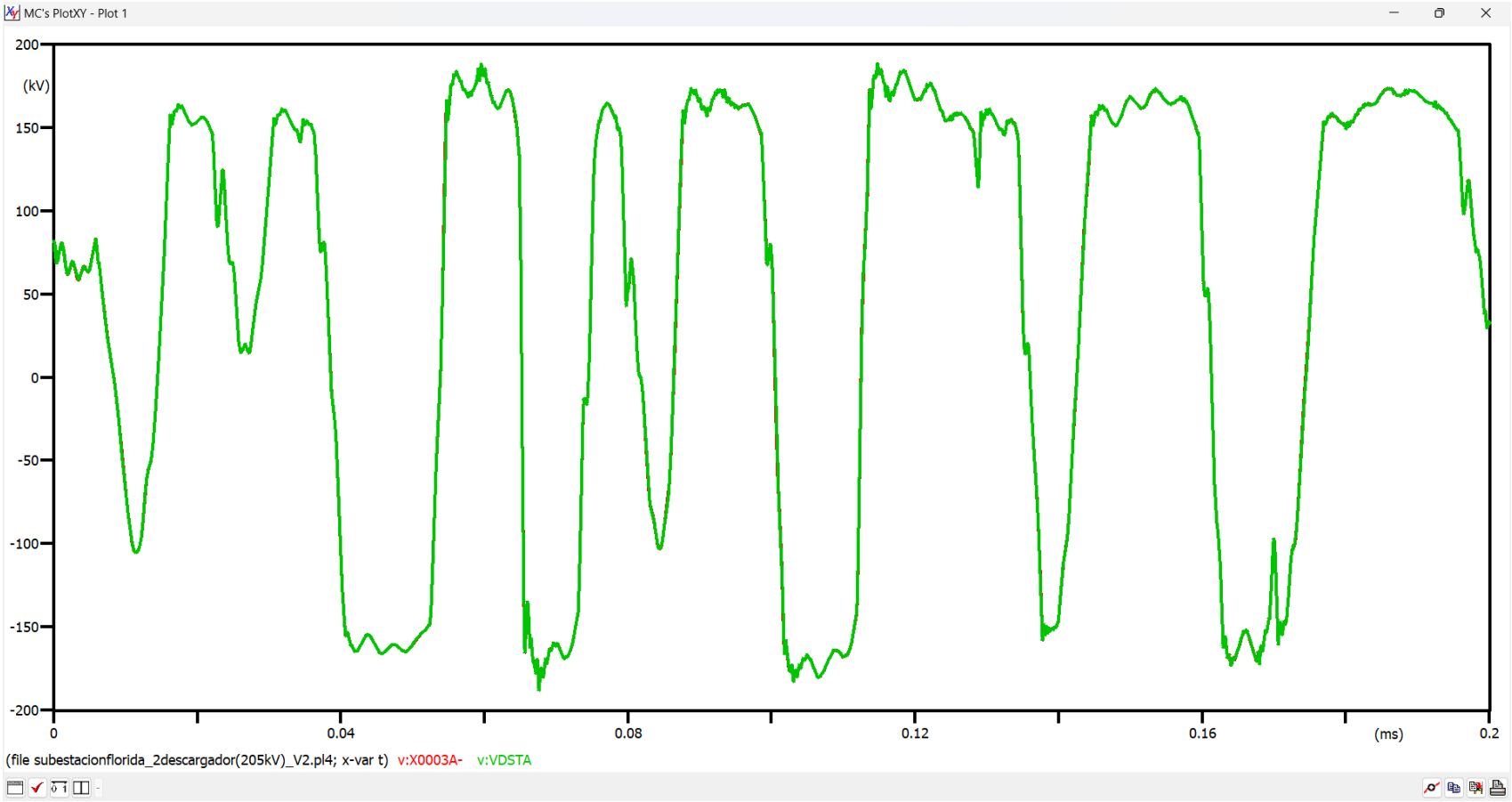


Figura 5-10: Complemento a Figura 5-8. 1 juego DPS. Escalas: Voltaje: -200-0- +200 kV, tiempo: 0 a 0,2 ms desde el Impacto del Rayo. Voltaje del módulo Fase B, curva verde, Voltaje de Barras Fase B curva roja superpuesta a curva verde.

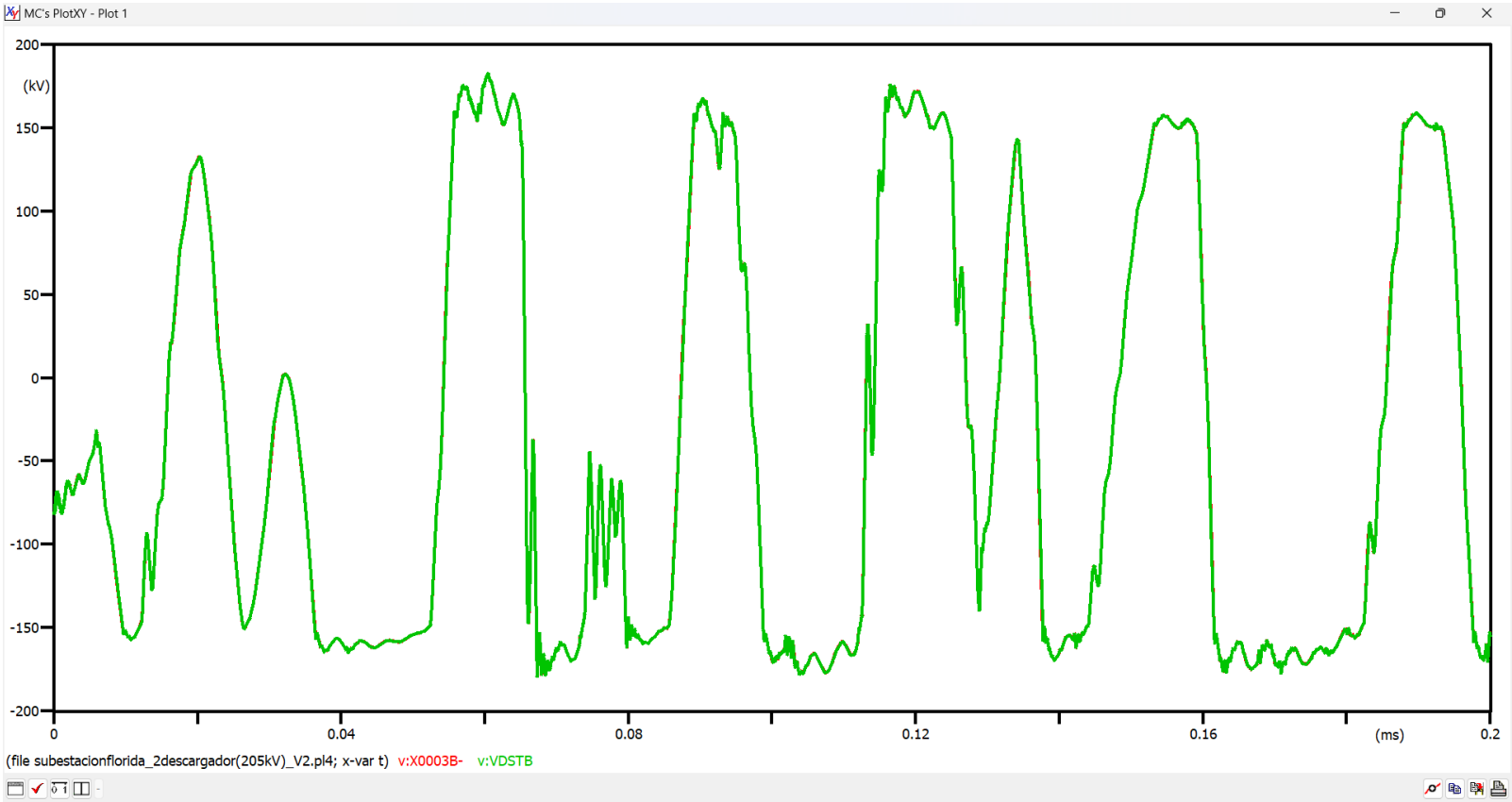


Figura 5-11: Dos juegos de DPS: en módulo de línea y ultima estructura antes de la llegada a la subestación. Escalas: Voltaje -200 – 0 - +200 kV, tiempo: 0 a 0,2 ms desde impacto Rayo de 10 kA en fase C curva roja. Voltaje de módulo Fase C curva azul. Voltaje de barras Fase C (v:x0003C) curva verde superpuesta al Voltaje del módulo.

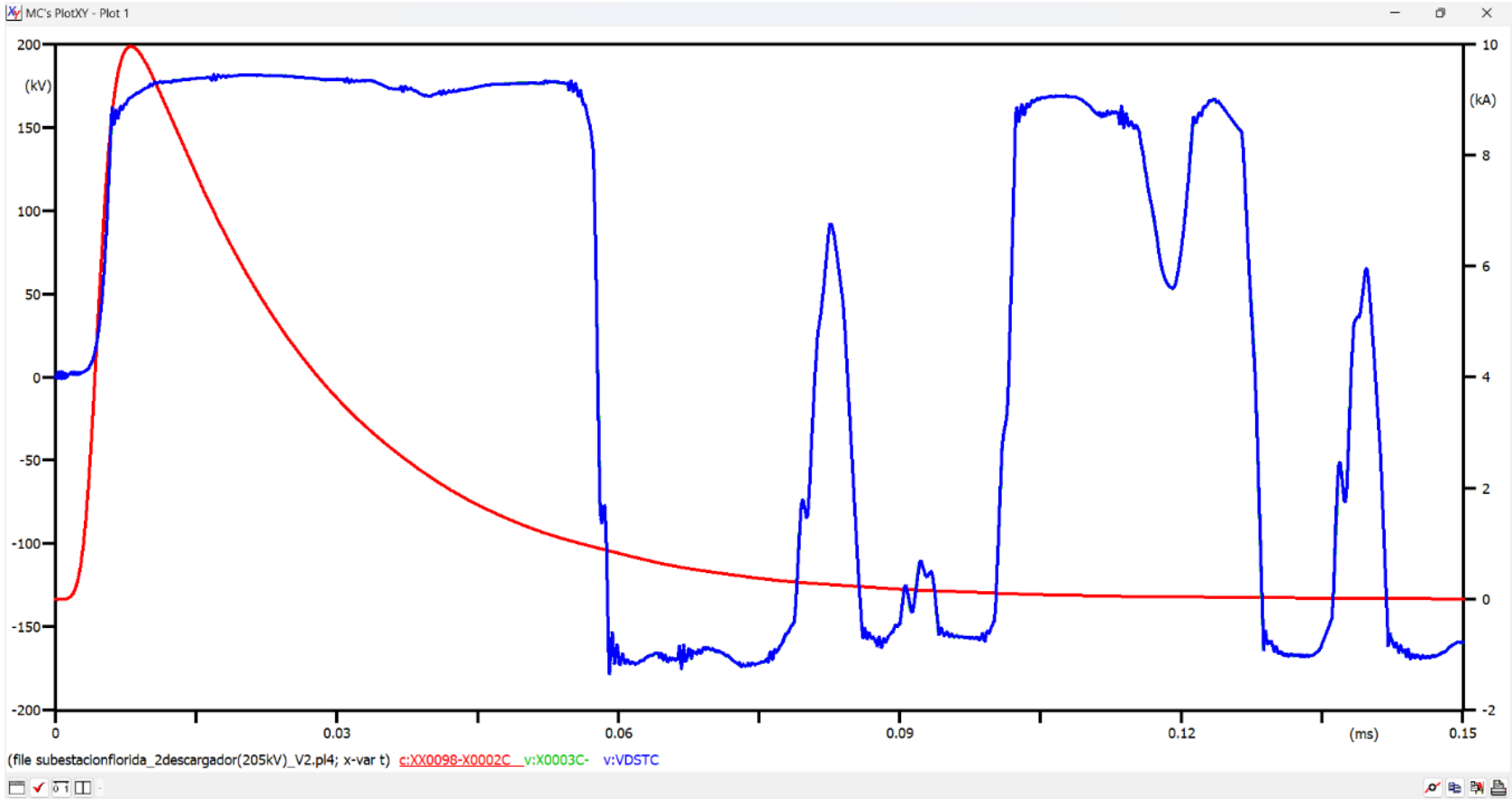


Figura 5-12: Complemento a

Figura **5-11**.

Dos juegos DPS. Escalas: Voltajes escala -200-0-+200 kV, tiempo 0 a 0,2 ms., Voltaje en ultima torre Fase A, curva roja y Fase B curva verde, Voltajes módulo fase B, Voltaje en barras Fase B curva azul (superpuesta a la café). Nótese que el voltaje en la torre es mayor que los correspondientes en módulo y barraje.

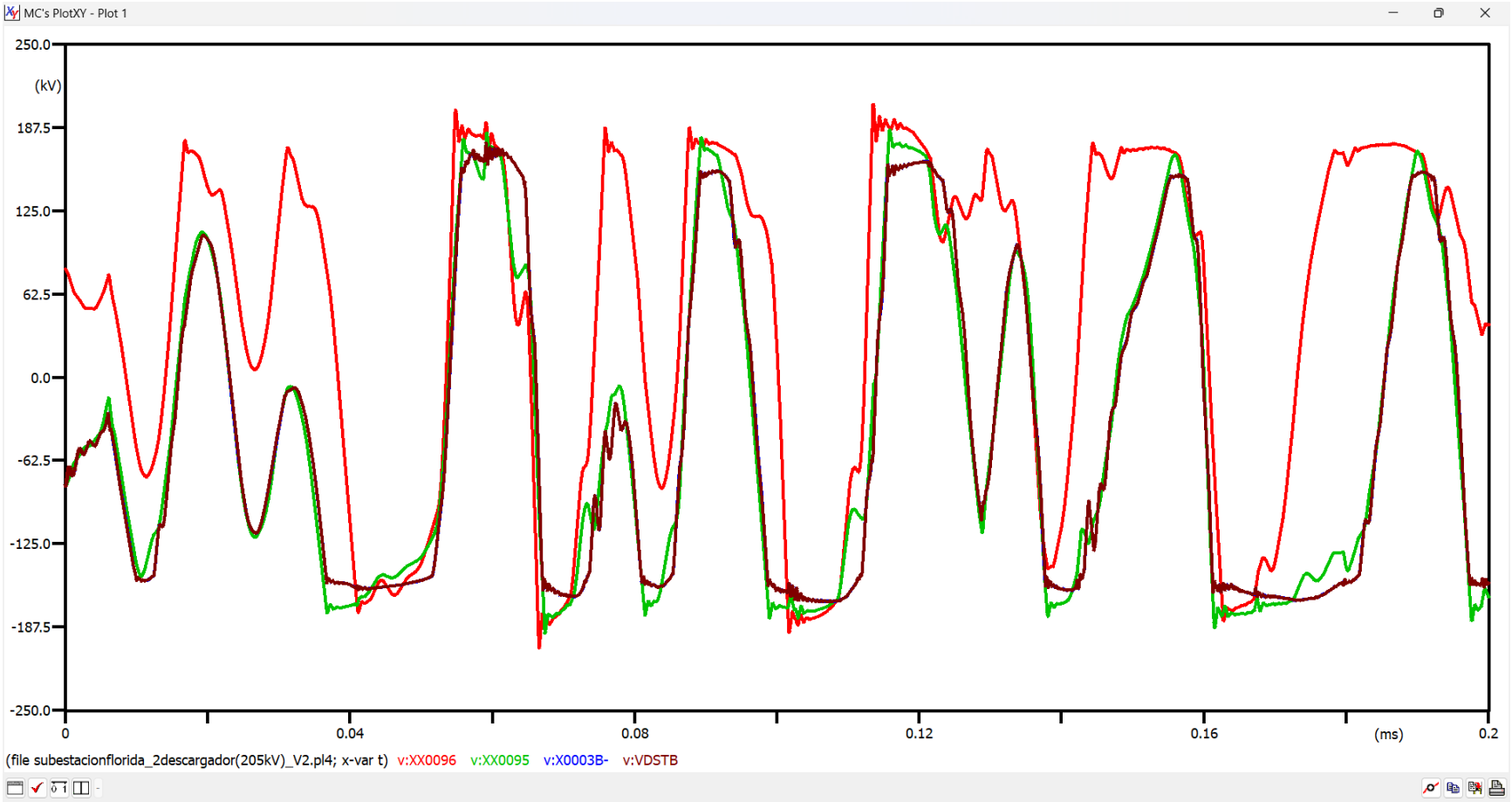
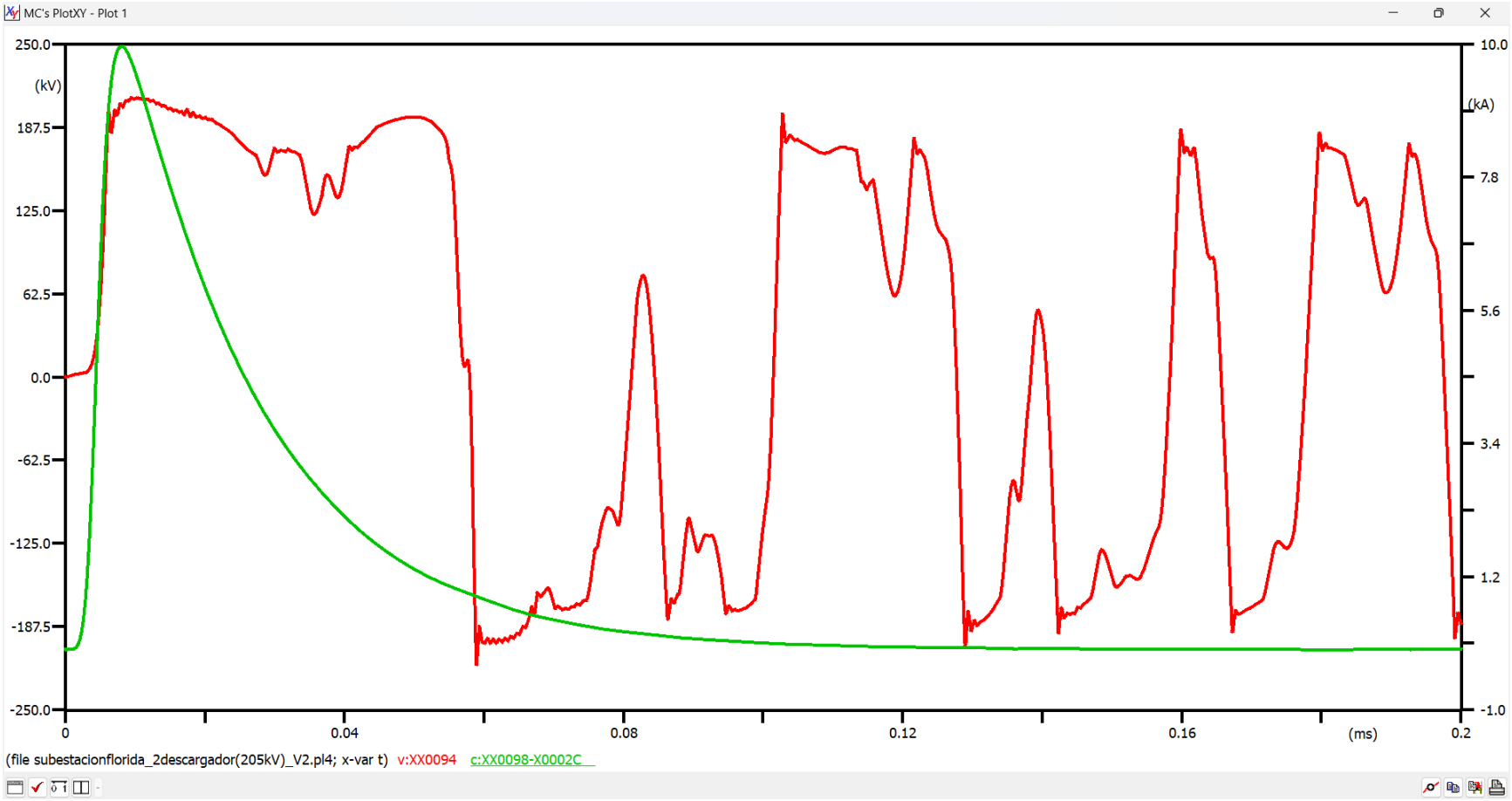


Figura 5-13: Complemento a

Figura **5-11**, dos juegos DPS. Escalas: Voltajes -200-0-+200 kV, tiempo 0 a 0,2 ms

Corriente de rayo curva verde, Voltaje en ultima torre Fase C, curva roja. Nótese que el voltaje en la torre es mayor que los correspondientes en módulo y barraje



5.5.3 Cuadro resumen de los casos simulados con uno y dos juegos de ATP

La **Tabla 5-3** presenta los resultados que arroja el programa para algunos de los casos contemplados. Aparecen los voltajes máximos fase-tierra y las corrientes inyectadas. Los voltajes corresponden al inicio de conducción del DPS para las diferentes corrientes de

rayo (kA) en los casos con un juego de DPS, con doble juego y con los nuevos (ver 5.3.2), Los datos se indican en el orden del faseado A/B/C o C/B/A indicados

Se resaltan en azul y en rojo, subrayados por el autor, los voltajes máximos por fase y el caso especial con impulso de corriente tipo I rayo de 10 kA.

Tabla 5-3: Cuadro resumen de actuación juegos de 1 o 2 DPS, sobrevoltajes máximos Fase-tierra leídos y varios casos I rayo

Caso	I Rayo (A)	V Torre fases C/B/A (kV)	V Barras fases A/B/C (kV)	Modulo fases C/B/A (kV)
1 DPS	2500	(No hay DPS)	161.1 82.5 177.9	177.9 82.5 161.1
2 DPS	2500	185.2 57.8 172.5	156.3 62.4 170.3	170.3 62.4 156.3
2 DPS	5000	198.5 169.5 186.2	170.6 154.9 177	177 155 170.6
1 DPS	5000	(No hay DPS en torre)	176,3 160 187	187 160 176
1 DPS	10000	(No hay DPS en torre)	188 182,5 197	197 182,5 188,3
2 DPS	10000	210 185.4 205	180.5 175.7 1827	182 175-6 180.4
DPS nuevo en Torre	2500	174 81 167	207.7 81.7 173.3	173.3 81.7 207.6
DPS nuevo en Torre	10000	190.6 181.2 185.7	207.7 178.3 186.7	186.7 178.3 207.7

5.5.4 Análisis a las Figuras 5-8 a 5-13

Análisis Figura 5-8

Con un juego de DPS en módulo de línea e I rayo 10 kA en Fase C (c… -x0002C)[110] se obtienen Voltaje de barraje Fase C: (v:x0003C) y modulo Fase C (v: VDSTC)

El Voltaje del módulo de barras Fase C inicia en 0 kV fase – tierra 60 Hz antes del impacto del rayo, luego con el impacto a los 0,2 ms hay varios transitorios que se superponen a las ondas de voltaje 60 Hz. Estos tomarán su forma de nuevo a 60 Hz transcurridos unos 10 ms luego del paso del rayo[111].

Voltaje de barras Fase C superpuesto al leído en el módulo. El programa entrega los siguientes valores máximos desde el inicio hasta 20 ms de cada parámetro. Indica de izquierda a derecha en kV pico, los 3 primeros corresponden a las Barras fases A-B-C, siguen los del Módulo fases C-B-A, en su orden y al final I rayo (A), así:

Valores máximos: Barras fase A:188 kV, Barras fase B:183 kV, Barras fase C: 197 kV, Módulo fase C:197 kV, Módulo Fase B: 183 kV, Módulo fase A :189 kV
I Rayo: 10000 A

Análisis Figura 5-9

Continuación evento anterior pero leído en Fase A. Voltaje en fase A, inicia en el gráfico antes de caída de rayo en aproximadamente 60 kV a tierra, 60 Hz, luego con I rayo en t 0,2 ms el Sobrevoltaje aproximado con varios transitorios de picos positivos y negativos por energía del rayo oscilan ente + 190 y -190 kV pico se superponen a la onda normal de voltaje a 60 Hz. Esta tomará su forma transcurridos unos 10 ms con paso del rayo.

---

[110] Identificación que arroja el programa ATP para corrientes con c y voltajes con v. Se pueden repetir posteriormente.
[111] Tiempo leído en la simulación del estudio en ausencia de la operación del DPS para I rayo 5 kA.

Análisis Figura 5-10

Continuación evento de la **Figura 5-8** anterior en Fase B. Voltaje en fase B, inicia en el gráfico antes de caída de rayo en aproximadamente 60 kV negativos a tierra, 60 Hz, luego con I rayo en escenario de t a 0,2 ms el Sobrevoltaje aproximado con varios transitorios de picos positivos y negativos por energía del rayo oscilan ente + 190 y -190 kV pico se superponen a la onda normal de voltaje a 60 Hz. Esta tomará su forma transcurridos unos 10 ms con paso del rayo.

Análisis
Figura 5-11

Con dos juegos de DPS en módulo de línea y ultima torra antes de ingreso a la subestación e I rayo 10 kA en Fase C (c… -x0002C)[112] se obtienen Voltaje de barraje Fase C: (v:x0003C) y modulo Fase C (v: VDSTC)

El Voltaje del módulo en Fase C inicia en 0 kV fase – tierra 60 Hz antes del impacto del rayo, luego con el impacto a los 0,2 ms hay varios transitorios por energía de este que se superponen a las ondas de voltaje 60 Hz. Estos tomarán su forma de nuevo a 60 Hz transcurridos unos 10 ms luego del paso del rayo[113].

El Voltaje de barras Fase C se superpone al leído en el módulo.

El programa entrega los valores máximos del voltaje en kV pico fase tierra y Corriente de rayo en Amperios desde el inicio hasta 20 ms así:

-Torre fase C:210 kV, Torre fase B:185 kV, Torres fase A: 205 kV,
-Barraje fase A:180 kV, Barraje fase B: 176 kV, Barraje fase C :182 kV
-Módulo fase C:182 kV, Módulo Fase B: 176 kV, Módulo fase A :180 kV
-I Rayo: 10000 A

[112] Identificación que arroja el programa ATP para corrientes con c y voltajes con v. Se pueden repetir posteriormente.
[113] Tiempo leído en la simulación del estudio en ausencia de la operación del DPS, rayo 5 kA.

Los voltajes en la polaridad negativa aparecen con valores máximos de -170 kV. Los voltajes de actuación de los DPS de módulo y los leídos en barraje disminuyen en un rango de 8 a 14 kV con respecto a los leídos con el caso de un juego de DPS y en general con dos juegos de DPS estos voltajes no sobrepasan los 182 kV positivo. En los casos con un solo juego llegan hasta los 192 kV positivo. Sin embargo, en este caso los voltajes leídos en torre en un caso llegan a los 209 kV positivo.

Análisis Figura 5-12

Continuación evento de
Figura 5-11 anterior pero leído en Fases A y B. Voltaje en fase A, inicia en el gráfico en Torre antes de caída de rayo en aproximadamente 67 kV a tierra, 60 Hz, y en torre Fase B inicia el gráfico en 67 kV negativo a tierra, Sobrevoltaje aproximado con varios transitorios de picos positivos y negativos por energía del rayo oscila entre + 190 y -185 kV pico se superponen a la onda normal de voltaje a 60 Hz. En fase B leída en barraje y módulo es más benigna, los transitorios oscilan entre los 180 kV positivo y 160 kV negativo. Los voltajes tomaran su forma a 60 Hz en unos 10 ms luego del inicio del rayo.

Análisis Figura 5-13

Continuación evento de la
Figura 5-11 anterior en Fase B. Voltaje en fase B en torre inicia a 60 Hz en 0 voltios, pero con el rayo el voltaje alcanza los 207 kV fase tierra en las dos polaridades que se a la onda normal de voltaje a 60 Hz. Esta tomará su forma transcurridos unos 10 ms con el paso del rayo.

Análisis General

Los niveles de los sobrevoltajes ocasionados por impulso de rayo tratan de igualarse en las tres ondas de voltaje del sistema trifásico como puede apreciarse dentro del lapso de las simulaciones de 0 a 0,2 ms de actuación del rayo.

Los sobrevoltajes que puedan llegar a la subestación por impulsos de rayo de 10 kA, que implican un rayo de 20 kA, se controlan por los DPS en el cumplimiento de sus funciones de protección al aislamiento de la subestación. Estos sobrevoltajes no van más allá de los

192 kV fase-tierra en las dos polaridades tal como se investigó en la simulación con el programa del ATP.

Los resultados observados para las diferentes corrientes de rayo tanto en este apartado como los del **Anexo 0** permiten definir acerca de la sobretensión máxima para actuación de los DPS de valores inferiores a 200 kV fase-tierra, salvo en un solo caso observado en los DPS en la última torre previa a la llegada a la subestación se ha superado ligeramente los 200 kV en una sola fase. Ver la **Figura 5-13**, caso de doble DPS para I rayo de 10 kA.

Estos resultados Implican desde el punto de vista de la ocurrencia, los sobrevoltajes en aire en los espacios entre el conductor energizado y la superficie lateral no superan 200 kV pico fase-tierra. Este espacio corresponde a la distancia interelectródica **d** ya presentada. Por lo tanto, el valor del voltaje de soportabilidad del aislamiento aire de 550 kV pico fase-tierra[114] puede disminuirse y por lo tanto corregir esta distancia **d** a una menor en este nivel de voltaje nominal de 115/123 kV.

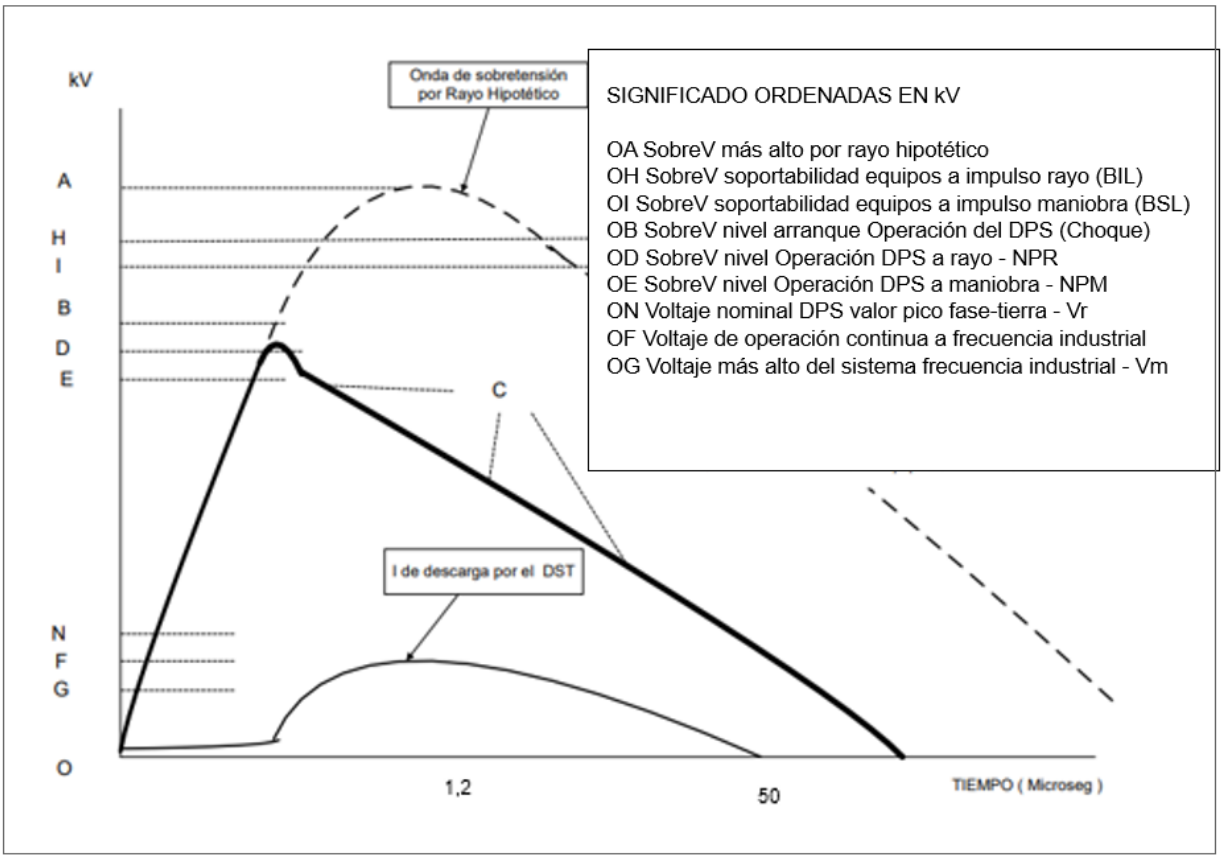
5.5.5 La coordinación del aislamiento

Los resultados permiten obtener entonces un nuevo concepto para la soportabilidad del aire, quedando a disposición el estudio para una recategorización del BIL para el resto de los aislamientos no autoregenerables como es el caso de todos los equipos del módulo.

La **Figura 5-14** presenta un gráfico aproximado acerca de las precisiones sobre los niveles de los voltajes vs. Tiempo que se deben observar en la coordinación del aislamiento. En particular el parámetro O-H acerca del sobrevoltaje de soportabilidad al rayo debe admitir uno nuevo de menor valor para lo cual se debería reevaluar la soportabilidad del aire como aislante ante los sobrevoltajes de impulso por rayo de frentes rápidos. Igualmente crear una mayor aceptación en el comportamiento de los DPS de nuevas tecnologías. Este nuevo nivel debería fijarse un poco más debajo de los 550 kV pico, a un nivel inferior acorde con la nueva distancia **d** propuesta en este estudio.

[114] Ver pp 44, 45, 47.

Figura 5-14: Los parámetros para la coordinación del aislamiento V vs T [22]: dibujo libre del autor.



6. La práctica de la ingeniería en la reducción de la distancia de aislamiento

6.1 Observaciones para la reducción de las distancias de aislamiento

Las recomendaciones entregadas según la práctica por varios autores [1], indican que toda la formulación intentada como un resultado desde las prácticas de laboratorio con diferentes formas de electrodos no se pueden extender a la práctica de las aplicaciones reales de ingeniería. Los motivos son dos.

Uno, el difícil cumplimiento en la práctica de la obtención de campos eléctricos uniformes, como ocurre entre electrodos planos o entre esferas, entre partes de la instalación en tensión y las estructuras próximas conectadas al potencial de tierra y entre las cuales se debe mantener el aislamiento eléctrico.

Dos, aun tratándose de campos eléctricos uniformes que se pudiesen obtener sobre el aire entre las partes energizadas y las estructuras de soporte, siempre hay que contar con la presencia de polvo y partículas fibrosas [115].

Se puede deducir que la selección normalizada de las distancias de aislamiento tradicional parte de los ensayos realizados entre electrodos de puntas o punta – placa.

Se pretende llegar como resultado de esta investigación y con base en lo expuesto en 6.1.1 a 6.1.3, acerca de la selección de las distancias de aislamiento y nuevas perspectivas.

---

[115] [1] AR pp313

6.1.1 Disminución de la distancia de aislamiento fase-tierra en aire.

Los valores acordados por las normas internacionales para el BIL[116] a los diferentes voltajes normalizados se originaron con base en ensayos de laboratorio y las aproximaciones para la obtención de las distribuciones gaussianas de probabilidad de ocurrencia de tensiones disruptivas del 10%.

De la observación de los datos indicados en la **Figura 4-**, (caso 1), la correlación de distancias disruptivas entre electrodos al aire a un sobrevoltaje del 50% disruptiva de 800 kV se obtiene a una distancia entre electrodos de 110 cm. Esta distancia será entonces la esperada como el voltaje mínimo de soportabilidad ante sobretensión del 50% de ocurrencia de disrupción entre electrodos. La distancia de 110 cm es la actual recomendada por Norma 60071-1 para las distancias de aislamiento fase-fase y fase-tierra en instalaciones a 115 kV.

La utilización de la actual normativa de selección de distancia de seguridad **d** implica un margen de seguridad desde los 550 kV, valor actual del BIL a 115 kV, hasta los 800 kV, según la **Figura 4-6**, caso 1, sobrevoltaje del 50% disruptivo.

Lo anterior indica que se estaría perdiendo una buena oportunidad de aprovechar mejor los espacios físicos con la reducción de la **d** como se recomienda en esta investigación desde los 110 cm hasta 80 cm[117]. Cabe decir que, a nivel de la ciudad de Bogotá, la distancia **d** 110 cm se corrige a 160 cm aproximadamente, considerando factores de seguridad del 5 al 10%. Obsérvese la disminución de la distancia básica propuesta a la altura de Bogotá DC y sus alrededores

[116] Ver aclaración del uso expresión BIL y BSL en nota 20 pp 26
[117] Ver p 47

6.1.2 Aplicar los cambios

Con base en las aplicaciones acerca de los coeficientes de ionización y recombinación en función de la presión p del medio y discutidas en el apartado 4.5 acerca de la distancia de aislamiento para el nivel de 115 kV (ver ecuación (6.1)):

$$\alpha/\mathrm{p},\ \eta/\mathrm{p},\ \bar{\alpha}/p \qquad (6.1)$$

Pues, debe recomendarse iniciar esta aproximación que desde el punto de vista teórico se encuentra bien sustentada con las técnicas modernas. Nos lleva esto a concebir una fuerte corrección para disminuir la distancia de aislamiento en las aplicaciones al nivel de voltaje tensión que aplica a esta investigación. La distancia recomendada al final del capítulo 4 es 80 cm a la presión al nivel de la altura de Bogotá de 550 Torr, o 0,072 Pa en unidades SI.

6.1.3 Calidad de los dispositivos DPS

Acerca de los desarrollos alcanzados por los fabricantes en los procesos de producción del equipamiento para altos y extra altos voltajes y a lo indicado en el capítulo anterior sobre el control a la sobretensión por rayo, se demuestra que con la correcta selección de unas protecciones adecuadas y seguras ante las sobretensiones que estas limitan, “tensión de reacción o nivel NPR del DPS” es posible variar el valor asignado al sobrevoltaje de impulso, onda de rayo o el máximo esperado en la subestación.

Efectivamente con la propuesta de instalación de un doble juego de DPS en la última torre antes de la subestación y el DPS del módulo de línea, se encontró de los ensayos en el ATP del capítulo 5 que ante rayo de 20 kA[118] con rayo que entra de 10 kA se limita el sobrevoltaje de impulso entre conductor y placa a valores no mayores a los 200 kV pico fase tierra.

Es evidente al comparar este valor máximo con el BIL de 550 kV pico fase-tierra especificado al nivel de tensión de operación de 115 kV rms que el sistema se encuentra especificado en cuanto a las sobretensiones por rayo acorde a la sobretensión de impulso por rayo 50% disruptiva, que no llegará a la subestación dados los controles establecidos.

[118] I rayo en Bogotá en 91% de los rayos leídos son menores a 21 kA, 3.5.3 página 20

La llegada de un impulso de este orden directamente a los equipos implica su avería o destrucción[119].

Con ello se abre una nueva perspectiva acerca de la selección de las distancias de aislamiento y la coordinación del aislamiento. Los sobrevoltajes, en caso de presentarse el impacto de rayo sobre un conductor de fase externo a la subestación, seguirán siendo controlados como hasta el presente con la intervención adecuada de los DPS y mejor aún por el del doble juego de DPS propuesto.

6.2 Revisión a la práctica actual en altas tensiones del Rango 1 de IEC

6.2.1 En Medias tensiones

Las recomendaciones por parte de fabricantes en niveles de medias tensiones recomiendan la disminución del BIL de los equipos ante el ofrecimiento cada vez mejorado en los niveles de muy buena calidad de respuesta ofrecidos por los DPS.

Uno de los fabricantes expresa [3] [120] : “La sobretensión difícilmente será superior a la tensión residual del aislamiento y por lo tanto y en la medida en que se logre una red con márgenes de aislamiento ampliamente distribuidos se debe revisar la coordinación del aislamiento y por lo tanto proponer una baja a las normas”

En efecto, el cumplimiento de los niveles de protección y por lo tanto el manejo de la tensión residual de aislamiento hasta su extinción con base en la soportabilidad de la energía ofrecidos actualmente garantizan como lo han hecho hasta ahora estos equipos.

En la revista técnica de ABB [3] propone los datos en su Tabla 2 [121]de la cual se indica un extracto en la **Tabla 6-1**. Propone para nivel de voltaje normalizado de 36 kV una

[119] Ver ecuación 2.1 e implicaciones pp 15
[120] [3] Nuevos enfoque en protección de sobrevoltajes pp 50-55
[121] Revista ABB 1/2002 [3] p 52

disminución en el BIL normalizado desde 145/170 kV a valores menores a 120 kV. Ver en **Anexo H** los niveles del BIL norma IEC 60071-2 la ubicación de esta recomendación.

Tabla 6-1: Recomendaciones Revista ABB 2 2002

Vn kV rms	BIL actual kV pico	BIL propuesto kV pico
36	145/170	< 120

6.2.2 Proyección para el sistema de 115 kV

Por lo niveles de confianza de los materiales utilizados en la fabricación de los actuales DPS en óxidos de Zinc y unas mezclas aglomeradas que presentan un mejor comportamiento en cuanto a la repartición y extracción del calor en la transmisión a tierra de la sobretensión, los actuales DPS son cada vez más seguros en su aplicación.

Se cita a continuación lo expresado dicho en la referencia [1] en cuanto a la práctica en las instalaciones de altas tensiones y su recomendación en cuanto a" la tendencia en la mejora de las protecciones por sobretensión disminuyendo en cambio la rigidez del aislamiento de la instalación a fin de llegar a instalaciones más económicas" [122]. Dicen además que "en el caso de centrales y subestaciones es posible reducir el aislamiento en los componentes, como transformadores e interruptores, de las sobretensiones tanto internas como externas, determinantes en la elección de los aislamientos por medio de los descargadores"[123].

Este criterio es igualmente válido en la determinación de la distancia del aislamiento en aire, igualmente seleccionada en las normas con base en el BIL esperado del aire, que es el mismo aplicado al nivel de la tensión nominal de la instalación.

6.3 Reducción de la distancia de aislamiento

La recomendación formulada al final del capítulo 4 se reitera indicando que con base en el comportamiento físico del aire en una de sus etapas de aislamiento ante sobrevoltajes de impulso por rayo y su gran coeficiente de recombinación en función del campo electrodítico

[122] [1] Roth A, p 726
[123] [3] ABB, pp 54-55

es completamente viable recomendar la reducción de la distancia de aislamiento fase-tierra y fase-fase a nivel de las instalaciones de 115 kV y a la altura de Bogotá a un valor de 80 cm, incluida la corrección por presión en Bogotá como se ha indicado según los cálculos realizados en el capítulo 4.

Compárese este último valor con los 110 cm propuestos por la Norma 60071-2 a nivel del mar y hasta los 1000 msnm.

7. Riesgo de la descarga por rayo a la distancia d

7.1 El voltaje por rayo aplicado es una variable probabilística

Acorde a lo indicado tradicionalmente para disrupciones en campos no uniformes [124] y ante sobrevoltajes de impulso por rayo se espera la ruptura del medio ante voltajes menores que las soportables en campos uniformes y con bastante dispersión en los valores esperados, varios en el frente y muchos más en los tiempos de descenso del impulso. Sin embargo, lo expuesto en el capítulo 4, apartado 4.4, permite un punto de vista similar al admitir el comportamiento satisfactorio del aire ante ciertas condiciones de campos eléctricos no uniformes como es el caso de este estudio.

Efectivamente según Cooray, [125] acerca de la descarga como resultado de sobrevoltajes de impulso en campos no homogéneos ante electrodos de placas paralelas y en relación con el inicio de la avalancha o streamer, dice que esta obedece a dos condiciones que deben cumplirse:

1. El voltaje externo Vi aplicado por rayo y por lo tanto la presencia de campo eléctrico entre electrodos debe exceder un cierto valor crítico de tal manera que la ionización acumulativa y las recombinaciones para obtener electrones y a la vez iones que alcancen los dos electrodos sean posibles a lo largo del gap.

2. El voltaje Vi aplicado debe mantenerse una fracción de tiempo suficiente para producir

---

[124] Kuffel [8] pp 361
[125] Cooray, [19]

esta descarga, tiempo que debe ser mayor al transcurrido cuando la formación de más electrones y iones dentro del canal de descarga tienda a desaparecer.

El autor Cooray indica que el campo crítico en campos no homogéneos, la iniciación de la primera avalancha[126] debe oscilar entre 1 a 2 *10^4 V/cm, para que los iones positivos alcancen el cátodo, pero en estas condiciones las avalanchas (streamer) negativas no alcanzan aún a llegar al ánodo, Por lo tanto, la garantía para la descarga se estima en valores mayores a 2 *10^4 V/cm[127] [128].

Sobre este último aspecto la condición debe corresponder a un campo producido por la tensión externa del rayo a una duración importante la cual determina el alcance del proceso de ruptura entre gaps. La ocurrencia del rayo exitoso en su intensidad y su duración se convierten en la intensidad del rayo y por lo tanto es una variable probabilística.

Esta condición coincide con el hecho de la presencia del coeficiente efectivo de ionización (α - η) según la presencia de la relación (campo/ presión baja) en el medio interelectródico.

Bajo estos criterios se realizaron los cálculos de los V/cm a 1 atm a la derecha en la **Tabla 4-**, para todos los casos y se indican en esta columna, final a la derecha de la misma Tabla.

Un pequeño análisis de esos resultados indica como a la distancia **d** de 80 cm, el campo de inicio es 2,18* 10^4 se puede catalogar en el límite en el cual no hay la descarga. La razón para ello estriba en observar que para la distancia normalizada de 110 cm a 760 Torr este campo ya convertido a 1 atm con rayo 20 kA es 3,18*10^4, y con rayo de 16 kA el valor es 2,54*10^4, valores bastante cercanos que permiten un acercamiento teórico a lo establecido en la discusión sobre las nuevas consideraciones de los coeficientes tal como se presentó en el Capítulo 4.

---

[126] La primera avalancha (streamer) no es aún la realización de la descarga entre electrodos.
[127] [19] pp85
[128] **Tabla 4-** columna penúltima a la derecha presenta el valor de este parámetro.

7.2 La probabilidad de ocurrencia de descarga sobre la línea con falla del aislamiento.

El rayo que más se presenta en Bogotá en el 90,53% de los casos según lo indicado en el apartado 2.1.3 se encuentra dentro del rango 4 a 20 kA, (2 a 10 kA entrando a la subestación, caso hipotético). El caso de ocurrencia por impacto directo de rayo a la línea de transmisión será controlado por los DPS[129].

Para el cálculo nos apoyamos en lo que sigue en la formulación tradicional[130] a partir del apantallamiento presentado por los cables de guarda, y el método de Burgsdorf-Kostenko. Para el cálculo del nivel de descargas en la zona de Bogotá se utilizan los datos encontrados en el Capítulo 3. Allí se indica el comportamiento de los rayos en la sabana de Bogotá[131] [16] y el número de descargas de rayo de 55582 en la sabana de Bogotá en 2022.

El método propuesto relaciona ahora la densidad de rayos a tierra D por Km^2 de líneas en un año y por 100 Km de línea, en relación con el número de las descargas en la región de la sabana de Bogotá con la siguiente formulación:

-Probabilidad $P_{\circ}$ expresada como un % de caída de rayos del total que caen en el área cubierta por las líneas de transmisión [12] según ecuación (7.1)

$$\mathrm{Log10}\ P_{\circ} = ((\theta * \sqrt{H})\ /90) - 2 \qquad (7.1)$$

Con θ ángulo de apantallamiento en ° sexagesimales y H altura g del cable de guarda al piso en metros.

-Probabilidad P de caída del rayo a la corriente media de rayo en Bogotá, 10,2 kA, comparada contra una de 31,5 kA para flameo según ecuación (7.2)

$$\mathrm{P\ Irayo} = 1/(1 + (10{,}2/31{,}5)\text{^}2{,}6\ ) \qquad (7.2)$$

Ni estima el número esperado de salidas en las líneas por falla del apantallamiento por cada 100 kM de línea obedece a la expresión según ecuación (7.3)

---

[129] Ver capítulo 5, **Tabla 5-3** y conclusiones pp. 65-69.
[130] [12] pp 873 …875, corresponde la formulación empleada en este apartado
[131] Cía. Keraunos, Bogotá, 2022.

$$\mathrm{Ni} = \mathrm{D} * \mathrm{P_o} * \mathrm{P\ Irayo} / 100 \qquad (7.3)$$

Ante ausencia de información oficial por parte de las empresas de energía, los cálculos se basan en las siguientes premisas nacidas en conocimientos previos de varios ingenieros en su experiencia y conocimiento del sistema, se menciona la existencia de 105 líneas de transmisión a 115 kV con una longitud promedio por línea de 14 Km. De otra parte, el área aproximada de la sabana de Bogotá se puede estimar en 4250 Km².

Nivel de descargas de rayo en la zona:

El ancho W de la línea para estimar el área de afectación de posibles rayos en su entorno en función de la altura del cable de guarda h en 20 m y la distancia entre cables de guarda b para estructura doble circuito es máximo de 2 m según ecuación (7.4)

$$\mathrm{W} = 4 * \mathrm{h} + \mathrm{b} = 82\ \mathrm{m} \qquad (7.4)$$

El área promedio Aprom[132] ocupada por el ancho de línea es a la longitud de las líneas como:

Aprom = W * L prom * N° líneas = 0,082*14*105 = 120,54 Km^2

La densidad de rayos D sobre el área ocupada por las líneas en relación con el área estimada de Bogotá por cada 100 Km de líneas es:

D = 55582*(120,54/4250) /100 = 15,76 rayos por cada 100 km de línea

Cálculos de probabilidades de falla en líneas:

Los cálculos realizados a partir de la formulación citada más arriba partiendo de la corriente de rayo promedio entrando a la subestación de 10,2 kA[133], los resultados consignados en

[132] Denominación para este estudio
[133] Tabla 2-2

el **Anexo F** son:

- Probabilidad de caída de rayo en la zona 0,17%
- Probabilidad de flameo por caída de rayo I de 10,2 kA en una línea en relación con 31 kA: 0,95
- Cantidad de flameos al año por rayos en 100 km de línea: 0,26
- Se espera 1 flameo cada 3,8 años por 100 km de líneas.

Se indican allí casos con diferentes valores en altura del cable de guarda y ángulo de apantallamiento.

7.3 Metodología para estimar el riesgo de disrupción en aire por rayo con nueva d.

Implica seguir los pasos indicados para establecer el tipo de riesgo al recomendar la disminución de las distancias de aislamiento al aire.

7.3.1 Estimación del riesgo de toque de rayo sobre la línea de transmisión

En extensión a la formula (7.1) del numeral anterior se puede estimar el número de choques Ni' de rayos que no impactan sobre el cable de guarda, pero sí sobre la línea de transmisión por cada 100 kM de líneas del sistema. Estos viajarán por la línea hasta su flameo en alguna cadena de aisladores, con disminución de energía por efecto corona o en último término la llegada a la subestación con la consiguiente esperada actuación de los DPS para su control.

$$\mathrm{Ni}' = \mathrm{D} * \mathrm{P}_{\circ}/100$$

Con los datos del numeral 7.2 calculados como se muestra en el **Anexo F, resulta**:

D = 15,69 rayos por año por cada 100 kM de línea y $\mathrm{P}_{\circ} = 0{,}17\%$

- Ni' = 0,027 impactos por cada 100 kM- año en las líneas de 115 kV
- # impactos esperados-año sobre el total de las líneas es de 0,39-año.
- Cada 3 años aproximadamente se espera un impacto directo sobre el sistema de las líneas de transmisión a 115 kV.

7.3.2 La seguridad del DPS y el voltaje disruptivo del aire.

En los apartados 6.1.11 a 6.1.4 se discutió acerca de las observaciones, conveniencia y la calidad en la operación de los DPS de última generación. Es importante mencionar ahora como los DPS deben cuidar también la no ocurrencia de voltajes disruptivos a través del aire, tal como se indicó desde el capítulo 2 del presente trabajo.

Tal como se definió en el apartado 2.4 la consideración se reduce a estimar cual es la distancia **d** entre gap a la cual se limita el aire como aislante. La ecuación (2.2)[134] se desarrolla únicamente en función de d y establece el límite de soportabilidad del aire a estas distancias

A partir de (2.2) se construye la Tabla 7-1 para el voltaje disruptivo del aire a diferentes distancias. Son los voltajes máximos de esfuerzo del aire sin pérdida de aislamiento a condiciones ambientales normales.

Tabla 7-1 Correlación distancia d y el voltaje disruptivo.

d (cm)	Ud (kV)
20	117
38	209
40	219
60	321
80	423
110	576
200	1035

La distancia **d** recomendad 80 cm, Ud 423 kV pico. Referidos a la Tabla 4-2 cálculo de Xc, caso 1, se aplica Vs 1750 kV pico a **d**. La práctica de la ingeniería limita este valor a Ud 423 kV pico, ver Tabla 7-1.

Con **d**:110 cm (IEC 60071-1, Tabla 3-4) BIL aire 550 kV pico; Ud: 576 kV pico (Tabla 7-1).

[134] Ver p 19

7.3.3 Margen de operación del DPS y una nueva coordinación del aislamiento

Las correcciones para condiciones ambientales diferentes a la normalizada se realizan para un ambiente de la Ciudad de Bogotá, con temperaturas de 14 a 16 °C, con corrección atmosférica δ.

La Tabla 7-2 presenta la corrección para el voltaje disruptivo Ud con d a 80 cm desde condiciones normales a nuevas en Bogotá.

Tabla 7-2 Cambio U disruptiva en Bogotá.

d gap (cm)	p cm HG	T (°C)	δ	p1	T1	δ1	Ud(kVp) normal	Ud(kVp) Bogotá
80	760	20	1	550	14	0,739	423	312,52
				560	16	0,747		316,00

La Tabla 7-3 presenta el margen de operación para errar el DPS referido a la tensión del nivel de operación NPR del DPS, umbral los voltajes disruptivos Ud de aire Ud y el BIL del equipo para I rayo 10 y 20 kA.

Tabla 7-3 Margen de operación del DPS desde su NPR a los niveles Us del aire y BIL

	V res máx (kV) simulación por ATP (1) y según datos de fabrica DPS			
	I ray 10 kA (5 kA en DPS)		I ray 20 kA (10 kA en DPS)	
	DPS2	DPS 1 y DPS 2	DPS2	DPS 1 y DPS 2
V res máx. (kV) por ATP	187,0	177,0	197,0	182
V res máx. (kV) x dato fabrica del DPS (3)	231,0	231	243	243
Margen desviación operación DPS % de V res a Ud 312,5 kV (3)	69,0	78,5	60,4	73,6
Margen desviación operación DPS % al BIL de los equipos de la subestación (2)	194,1	210,7	179,2	202,2

(1) Ver capítulo 5
(2) BIL 550 kV
(3) Por resultados simulacion ATP

El nivel máximo de exigencia dependerá del rayo que absorbe, de nuevo es probabilístico para valores de rayo menores a 20 kA, el 91% de los rayos que ocurren.

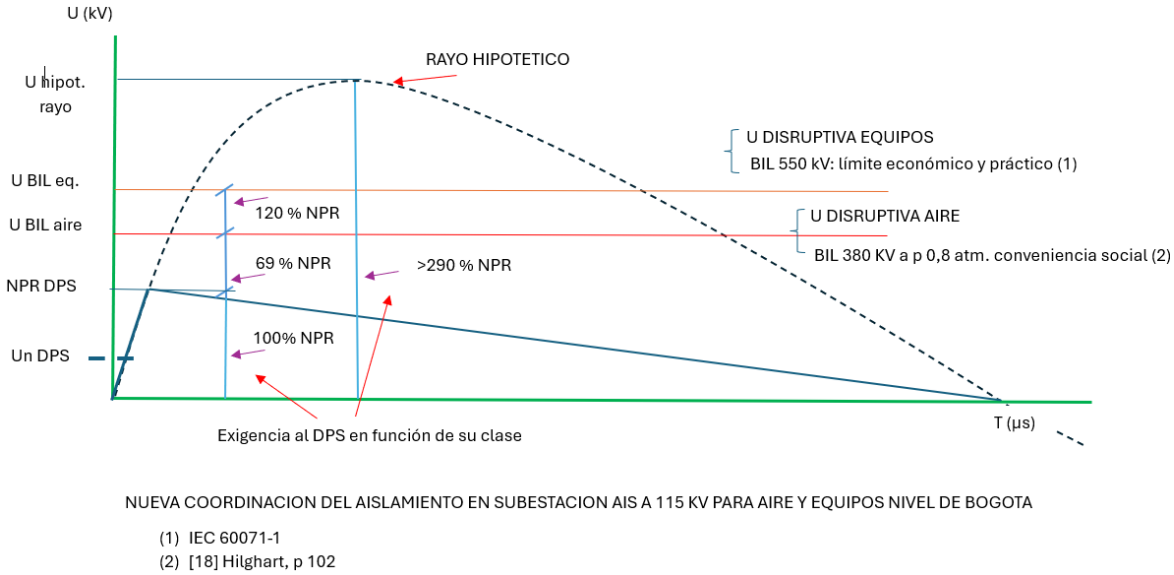
Con base en lo anterior se considera que el DPS cuida dos márgenes de protección y la

coordinación respectiva.

La primera, coordinará que en caso de rayo de 10 ó 20 kA a que sea sometido opera antes de disrupción a través del aire entre conductor y borde de la estructura. Posee un margen de operación excedida del 69% a partir de su nivel de operación NPR.

La segunda coordinará su operación de manera que no se presente la sobretensión al BIL del equipo, para ello el margen de error de un 120% a partir de su nivel de operación NPR.

Figura 7-1. Nueva consideración de la Coordinación del aislamiento



7.3.4 Los riesgos al equipo por reducción de la distancia de aislamiento.

<u>Por presión y temperatura del aire</u>

Como se puede observar con los resultados presentados en las Tablas 7-1 y 7-2 el voltaje disruptivo Ud disminuye en 26%, pero al cambio de condiciones en Bogotá, diferentes p y T, el margen de variación es del 1,2%.

La condición del cambio del voltaje soportable se absorbe muy bien en el doble juego de los DPS como lo demuestra las simulaciones realizadas por ATP en el capítulo 5 y loa amplio márgenes de operación antes de alcanzarlo como se ilustra en la Tabla 7-3.

Por humedad del ambiente.

Se hace referencia al concepto expresado en la referencia [23][135] en cuanto a una traducción libre del apartado 4.2.1 b) de la Norma IEC 60071-1 sobre Coordinación del aislamiento:

"Coordinación de Aislamiento, parte 2", que en su numeral 4.2.1 b) dice "para la determinación del factor de corrección atmosférica aplicable, se debe asumir que los efectos de la temperatura ambiente y la humedad tienden a cancelarse entre sí. Por lo tanto, para propósitos de coordinación del aislamiento, sólo la presión del aire correspondiente a una altitud de una locación necesita ser tomada en cuenta tanto para aislamientos secos y mojados".[1] [1]

Por afectación a los equipos de la subestación.

Debido a la coordinación del doble juego recomendado de los DPS lo cual disminuye los voltajes residuales a los cuales serán sometidos en el evento de un sobrevoltaje por rayo, el efecto en la soportabilidad a sobrevoltajes puede despreciarse. Máxime si se tiene en cuenta que un posible rayo que ingrese sin control con Vd de 1750 kV pico destruirá el equipo y las instalaciones, por ello las limitaciones en diseño de los equipos ante exigencias extremas y poco probables como ya se indicó anteriormente.

En cuanto a posibles sobre corrientes, el cambio en las distancias de aislamiento no tiene influencia algún ante posibles aumentos de corriente y de temperatura. Por esta última, pues estos estarán diseñados para soportar las temperaturas en tiempo de duración hasta de 1 hora.

El caso de los interruptores de potencia no tiene implicación por cuanto está diseñados, en otro tipo de eventos ante fallas a tierra para interrumpir hasta 80 kA, según las exigencias. Los demás equipos soportarán las corrientes y temperaturas para las cuáles fueron diseñados en tiempos muy largos en comparación con los microsegundos de duración de una hipotética descarga de rayo.

---

[135] [23] p 3.

Por afectación a las personas y seres vivos en general y las puestas a tierra.

La reducción de las distancias de aislamiento fase - tierra se concibe en relación directa con la correcta limitación de los sobrevoltajes por rayo que lograren ingresar a la subestación. La limitación se ha realizado desde tiempos antiguos a través de los DPS con la conducción en caso tal de estas energías a las mallas de puesta a tierra, sitio adecuado y diseñado para tal fin.

Por lo tanto y ante esta situación de limitación de sobrevoltajes que es la aplicada actualmente, se deduce que no hay aumento de riesgo en lesiones a los seres vivos, tanto ante descargas directas, como a las tensiones de paso y de contacto que se puedan desarrollar ante una descarga.

Para el caso del riesgo de toque por las personas a los conductores que se encontrarán a distancias más cercanas de las estructuras de soporte la situación no existirá por cuanto los conductores y elementos energizados deben estar a una altura del piso mayor a 3 m como lo exige la normativa. Lugo el riesgo de toque siendo al mismo al actual.

8. Historia: la reducción de distancias de aislamiento en Bogotá DC

8.1 La historia

En Bogotá se realizó la experiencia de conversión de 57,5 kV a 115 kV con la reducción de las distancias de aislamiento en 4 subestaciones del sistema de 57,5 kV pertenecientes a la antigua Empresa de Energía Eléctrica de Bogotá, EEEB SA ESP. El programa se inició con la realización de varios estudios y pruebas reales en vivo desde el año 1975 y su construcción en 1980 previa la realización de pruebas ante sobretensiones inducidas por maniobras sobre una línea de transmisión al nivel de 115 kV. La conversión se logró con éxito total desde esta fecha hasta el presente en 4 subestaciones del sistema: Morato, Techo, Usaquén y Calle 51.

El programa contempló la utilización de las estructuras utilizadas originalmente para reubicar en el mismo espacio y sin modificación de distancias, el 80% de los nuevos equipos a 115 kV.

La distancia de aislamiento fase a tierra mínima obtenida en esta nueva disposición a 115 kV se estableció en 1 m, con una reducción del 40% con relación a las distancias establecidas con corrección para Bogotá de acuerdo con las normas internacionales utilizadas para tal fin.

Las subestaciones han funcionado satisfactoriamente hasta la fecha, tanto desde el punto de vista de su funcionamiento eléctrico como de su aislamiento y protección ante sobrevoltajes. [136]

8.2 Las pruebas realizadas

Las pruebas se realizaron generando ondas de Voltaje por cierres y aperturas manuales inmediatas desde interruptores de las líneas a 115 kV. En el caso que se indica en el **Anexo D**, las ondas viajan dentro de sistema desde la subestación Concordia hasta el otro extremo en la subestación Calle 51. Los sobrevoltajes se originan ante las maniobras de cierres y recierres consecutivos en el interruptor de potencia a 115 kV del terminal de línea en Calle 51. Los ingenieros autores de esta época[137] indicaron que no era posible realizar pruebas directas con corrientes reales de rayo por lo tanto únicamente se realizaron a la maniobra.

Con estas operaciones se energizó en cada prueba de cierres el barraje de Usaquén sitio en el cual se realizaron observaciones y/o ruido ante posibles flameos entre fases o a tierra a través de las estructuras que recibirían los nuevos equipos a 115 kV. Se capturan además las imágenes de las formas de onda y se revisaron posibles operaciones de los descargadores de sobretensión DPS. Los recierres y reaperturas originan sobretensiones por cierres sobre el condensador natural de la línea y además por la influencia de las inducciones entre fases de esta.

Se utilizaron en los módulos DPS de 96 kV, voltaje nominal, equipos de medición consistentes en divisores capacitivos y osciloscopios para registrar las respuestas ante sobretensiones.

---

[136] Los autores de estas pruebas mencionan que en una de las pruebas de la subestación Morato, línea a la Central térmica Termo Zipaquirá de 40 km de longitud, se desconectaron los DPS como una condición de prueba y se averió uno de los aisladores de la línea a Termo Zipaquirá, por efecto Ferranti, posiblemente. Se reemplazó y se efectuó nueva prueba exitosa ya con DPS.

[137] El autor de este estudio menciona la entrevista al respecto de esta experiencia con el Ingeniero electricista Sergio Guzmán Benavides, miembro del equipo Consultor de la EEEB de la época, diseñador y activo participante en estas pruebas.

No se realizaron pruebas para posibles sobretensiones por rayo. El informe final concluye que con la selección de los DPS adecuados y contando con un buen apantallamiento, la combinación con los cables de guarda suficientes y contando con las resistencias de puesta a tierra convenientes se lograba una buena respuesta en la prevención de rayos, tanto por impacto en el recorrido de la línea o directo sobre la misma subestación.

En el **Anexo D** presenta unas muestras con algunos resultados numéricos y gráficos de los ensayos y el esquema de las conexiones realizado en altos voltajes en 1975. Sorprende notar que se presentan sobretensiones en los rangos desde 1,5 a 4 en p.u. Esta es una situación interesante por cuanto este nivel a una sobretensión de 400 kV pico fase -tierra equivalente al BSL.

Igualmente, en los **Anexo D** se presentan una parte de las memorias escritas con posterioridad[138] de las cuales se extraen las conexiones que se realizaron en los patios convertidos a 115 kV, algunos datos característicos de la subestación y un dibujo de las conexiones realizadas en el antiguo patio de 57,5 kV. En estas ya se destaca la obtención de la distancia fase tierra de 0,80m y en general la recomendación para diseñar las distancias fase-tierra en cercanías a este valor dado ante pruebas teóricas contratadas por EEEB con la EPRI previas a la ejecución de este proyecto de conversión.

[138] Rudas Lleras Víctor, [17] pp 5 a 10

9. Disposición constructiva para subterranización de Subestación 115 kV

9.1 Generalidades

La subterranización de la subestación convencional a barraje sencillo con barraje y acometidas en el sistema convencional AIS es posible contando con la reducción de las distancias de aislamiento y además con los nuevos equipos del tipo hibrido.

Vale la pena aclarar que el estado actual del arte ya no es usual la utilización del juego de equipos en la construcción aislada tradicional. En efecto, tanto los seccionadores como los interruptores, los CT y VT se encuentran todos en un solo alojamiento constituyendo así los equipos híbridos que cuentan con el SF6 como elemento aislante, todo instalado dentro de recipientes adecuados.

Esta idea permite ubicar la instalación en áreas más reducidas a las actuales y aún en subterráneos, dado que el barraje y los demás equipos del tipo hibrido pueden instalarse al aire en dimensiones reducidas acordes a las distancias recomendadas en este trabajo. No es necesario acudir a la instalación del barraje en un medio encapsulado con el SF6 como aislante. Esta situación correspondería a una subestación GIS a costos mayores. Permite también el ahorro de espacio con las consiguientes ventajas. En efecto se puede reutilizar el lote físico que quedaría libre en el nivel superior. Ver un dibujo aproximado en el **Anexo G**.

9.2 Idea aproximada de una subestación a 115 kV subterránea.

El **Anexo G** presenta un esquema con una disposición a esta propuesta para una subestación de barra sencilla con módulos de línea y de transformación y el paso a las

celdas de circuitos de distribución. El esquema constructivo se duplica o triplica en extensión según el número de bahías de línea y transformación deseado.

10. Cumplimiento de Objetivos, Conclusiones y recomendaciones

10.1 Cumplimiento de los objetivos planteados

La incertidumbre acerca de la ocurrencia de sobrevoltajes peligrosos tipo rayo sobre los equipos de la subestación a 115 kV se reduce para los equipos de la subestación y para el personal al limitar los sobrevoltajes a magnitudes de razonable soportabilidad técnica y de economía a través de la aplicación de la técnica profesional de la ingeniería. Esta recomienda diseñar y construir los equipos para soportar voltajes de operación permanente. Para ello, estos sobrevoltajes indeseados con muy baja probabilidad de ocurrencia se desvían a través de equipos DPS, tal como se ha realizado desde el inicio de la historia de las aplicaciones de la electricidad. Los actuales poseen mejores y más adecuados comportamientos de acuerdo con las tecnologías y mejores materiales utilizados actualmente. Esta investigación recomienda entre otros duplicar la instalación adicionado un juego más en lugares adecuados.

El conocimiento de estadísticas elaboradas por empresas expertas en la ubicación y medición de las corrientes de rayo para los años 2022 y 2023 ha permitido conocer que los impactos de rayo son mucho menores, alrededor de un 50% en magnitud con relación a los valores de referencia obtenidos de otros países y recomendados por la normativa internacional al respecto. Esta situación permite entonces optimizar con la utilización de menores volúmenes de aire y por lo tanto menores áreas de terreno

Utilizar menores áreas de terreno es un avance muy importante, cada vez la densidad poblacional es mayor y los espacios necesarios para la construcción de nuevas instalaciones eléctricas de beneficio común son de más difícil adquisición. De otra parte , se podrían reutilizar los espacios que pueden ser liberados a través de remodelaciones para otras actividades de uso y beneficio a las comunidades.

Se ha demostrado que la opción de reducir las distancias de aislamiento a través del aire se puede reducir considerablemente dado que la soportabilidad del aire como aislante se reduce de manera no proporcional a las exigencias de los sobrevoltajes. Muy pequeña en soportabilidad a distancias de aislamiento casi del doble. Así en Bogotá la distancia de aislamiento se puede reducir desde 1,60 m a la nueva de 0,80 m sin riesgos a la operación esperada de la instalación, a los equipos y en especial a las personas.

Se realizaron pruebas de laboratorio en instalaciones del laboratorio de alta tensión de la universidad LABE. Los resultados para la disposición cable – placa, placa a tierra se presentan en el Anexo I. Cabe indicar que las pruebas sin disrupción se cumplieron satisfactoriamente para distancias entre electrodos de 80 y 110 cm con voltajes impulso pico entre 308 y 370 kV, lo cual corrobora el cumplimiento de los voltajes de soportabilidad en aire a estas distancias de gap a la altura de Bogotá D.C. Ver la formulación de estos parámetros en el capítulo 7, apartado 7.3.3, p 93.

10.2 Conclusiones

El aire como material aislante en su proceso de aislamiento eléctrico debe ser considerado suficientemente por los procesos de recombinación en su estructura atómica o de soportabilidad superior a la normalmente esperada ante los esfuerzos eléctricos los que sea sometido.

Esto se logra en particular para este estudio durante el desarrollo de la descarga por rayo en un medio en aire entre electrodos varilla placa a distancia interelectródica d, por la operación combinada la selección y ubicación más adecuada de los DPS de tecnologías actualizadas, equipo tradicional desde el inicio de las instalaciones eléctricas.

Debido a este trabajo combinado se recomienda ahora disminuir las distancias de aislamiento tradicionales fase-tierra tradicionales en el campo de las subestaciones desde 110 cm a condiciones atmosféricas normales hasta 80 cm en condiciones a 2600 m.s.n.m

La incertidumbre en el conocimiento de la ocurrencia de corrientes de rayo sobre la sabana de Bogotá ha permitido conocer que la ocurrencia de rayos es de menor impacto en cuanto a su magnitud, situación que favorece la idea de disminuir las distancias de aislamiento ante sobrevoltajes por rayo de manera ostensible,

Se hace necesario aprovechar la mejor calidad y entregar mayor confianza en los descargadores DPS de óxido de Zinc. Estos son muy buenos limitadores de las posibles sobretensiones peligrosas cuando ingresen a la subestación. Esta investigación demostró que la probabilidad del ingreso de rayos en su magnitud es menor a la esperada, el orden de su magnitud es de aproximadamente un 50% a la cifra manejada por la ingeniería. La posibilidad de ingreso a la subestación de rayo a la subestación será efectivamente controlada por los DPS construidos cada vez con mejores materiales y tecnologías.

De otra parte, se sabe que un rayo pleno, por pequeño que sea y que penetre en la subestación sin ser disminuido por los DPS causará daños, no obstante, la soportabilidad a la que están diseñados los equipos.

Las aplicaciones realizadas en la Empresa de Energía Eléctrica de Bogotá, hoy ENEL SA ESP al convertir hace 50 años varias subestaciones desde 57,5 a 115 kV aumentan la confianza en la utilización de distancias de aislamiento más cortas y llama la atención acerca de valores importantes de sobretensión por maniobras en líneas largas mayores a 10 kM, que no se tienen en cuenta por la normatividad en niveles de tensión del rango inferior a los 300 kV.

10.2 Recomendaciones

Abrir en la mentalidad de los ingenieros de Planeación y de Diseño de las empresas de servicios eléctricos la inquietud acerca de utilizar la idea sobre de la reducción de las distancias de aislamiento como se recomienda en este estudio. Dará paso a nuevas perspectivas en los dos campos: La reutilización de espacios al aire libre utilizando y remodelando las subestaciones existentes en sus ampliaciones, y en la apertura a la construcción de nuevas subestaciones a 115 kV en áreas subterráneas.

Iniciar un estudio para revisar las posibilidades similares de reducción de espacios en subestaciones a mayores niveles de tensión como 230 kV contando con la aplicación del nuevo concepto acerca de la utilización de las propiedades que ofrece el aire, tal como se han planteado en este estudio.

Mejorar los estudios acerca de la verdadera influencia de los rayos en las subestaciones de potencia en el área de la sabana de Bogotá, utilizando márgenes más amplios de datos

y haciéndolo extensivo a las líneas de transmisión y subestaciones en el siguiente nivel de tensión, 230 kV.

Plantear ante las asociaciones mundiales encargadas de la Normativa en estos aspectos técnicos la recomendación acerca de la reducción de las distancias de aislamiento eléctrico fase a tierra y posiblemente una revisión a la baja del nivel del BIL dadas las condiciones mejorables de comportamiento de los equipos que no permite llegar a estos niveles de esfuerzo para los equipos.

Es posible pensar en construir subestaciones a nivel de 115 kV en espacios reducidos y en especial en sitios subterráneos sin depender de las aplicaciones GIS[139] totalmente encapsuladas en SF6. La propuesta implica barrajes y conexiones al aire, aprovechando a la vez la bondad de los nuevos equipos híbridos que también disminuyen considerablemente los espacios requeridos ya que estos alojan en su interior la mayoría de los equipos componentes del módulo de línea. Los ahorros en dinero, espacio y disminución de contaminación ambiental lo ameritan.

Es de notar la nueva situación de la subterranización de la subestación presentaría riesgos mayores por la mayor cercanía de personal dedicado temporalmente a la supervisión de instalaciones energizadas, aunque en la actualidad la supervisión de las subestaciones ya es de carácter remoto desde los centros de control.

.

[139] Gas Insulated Switchgear.

A. Anexo: Definiciones

De acuerdo con las definiciones en la Norma IEC 60071-1 [5], a menos que se indique otra cosa.

Vn Voltaje Nominal

Valor convenientemente aproximado del voltaje usado para designar o identificar un sistema.

Vs Voltaje más alto de un Sistema

Valor más alto del voltaje de operación fase-fase (valor r.m.s.) que ocurre bajo condiciones normales de operación en cualquier momento (tiempo) y en cualquier punto de un sistema.

Vm Voltaje más alto para el equipo

Valor más alto del voltaje fase-fase para el cual se designa el equipo al respecto de su aislamiento como a otras características relacionadas a su voltaje en las normas relevantes de los equipos. Bajo condiciones normales del servicio este voltaje puede ser aplicado al equipo de manera continua.

Voltaje continuo a frecuencia industrial

Valor de voltaje r.m.s. aplicado continuamente a cualquier par de terminales de una configuración de aislamiento.

Sobrevoltaje a cualquier valor de voltaje

-entre una fase del conductor y tierra o a través de un aislamiento longitudinal, voltaje que posee un valor pico que excede el valor pico del voltaje más alto de un sistema (Vm), divididos por √3 [IEC 604-03-09 modificada], o

-entre conductores de fase, el que posee un valor pico que excede la amplitud del voltaje más alto del sistema (Vm) [IEC 604-03-09:1987, modificada)

Impulso de maniobra normalizado

Voltaje que posee un tiempo al pico de 250 µs y un tiempo a la mitad de su pico de 2500 µs

Impulso de voltaje tipo rayo normalizado

Voltaje que posee un tiempo un frente de 1,2 µs y tiempo de cola a la mitad de este valor de 50 µs

Sobrevoltaje transitorio de corta duración

Sobrevoltaje de pocos milisegundos o menos, oscilatorio o no oscilatorio, usualmente de alta amortiguación. Se divide en dos:

- Sobrevoltaje transitorio de frente bajo, SFO (Slow Front Overvoltage) usualmente unidireccional con tiempo a su pico 20 µs < Tp ≤ 5 000 µs y duración de cola T2 <=20 ms.
- Sobrevoltaje transitorio de frente rápido FFO (Fast Front Overvoltage) usualmente unidireccional con tiempo al pico 0,1 µs < T1 ≤ 20 µs y duración de cola T2<300 µs

Voltaje Soportable

Valor del voltaje de prueba a ser aplicado bajo condiciones especificadas en prueba de voltaje de soportabilidad a un aislante durante el cual se tolera un número especificado de descargas disruptivas. Sinónimo: Withstand Voltage.

El voltaje de soportabilidad se designa como:

- Voltaje de soportabilidad convencional asumido cuando el número de descargas disruptivas es cero, Corresponde a probabilidad de soportabilidad Pw= 100%
- Voltaje de soportabilidad estadístico cuando el número de descargas disruptivas toleradas Pw= 90%

Nivel de protección de impulso por rayo Upl

Valor máximo permisible del pico de voltaje en los terminales de un elemento protegido sujeto a impulso por rayo bajo condiciones especificadas.

Nivel de protección de impulso por maniobra Ups

Valor máximo permisible del pico de voltaje en los terminales de un elemento protegido sujeto a impulso por maniobra bajo condiciones especificadas.

Niveles de soportabilidad del aislamiento

Son los sobrevoltajes de soportabilidad del aislamiento asociados a los voltajes más altos Vm en los Rangos de Tensión I: 1kV< Vm <= 245 kV y Tensión II: Vm >245 kV

Clearance

Distancia entre dos partes conductivas como a lo largo de un hilo tensionado que indica el camino más corto entre las partes [140]

Rigidez dieléctrica estadística.

Es el sobrevoltaje que puede ser soportado por el aislamiento del equipo con probabilidad del 90%.

Coordinación de aislamiento

Correlación entre el aislamiento de los equipos y las características de los dispositivos protectores de modo que el aislamiento quede protegido contra los sobrevoltajes impulso de rayo y maniobra.[141]

Descarga disruptiva[142]

Una descarga que puentea completamente el aislamiento bajo prueba reduciendo el voltaje entre electrodos prácticamente a cero. Sinónimo: “ruptura eléctrica o electrical breakdown”.

---

[140] [4] p 15, …
[141] Traducción Norma CEI según [3] p 51
[142] Las definiciones a continuación [10] p 4

Voltaje de descarga disruptiva Vs:

El voltaje que causa descarga disruptiva para pruebas con cualquier tipo de voltaje incluido el impulso de voltaje que rompe en o después del valor pico; voltaje en el instante cuando ocurre la descarga disruptiva para impulsos que rompen en el frente.

Voltaje 50% disruptivo

El valor prospectivo de una prueba de voltaje que tiene el 50% de probabilidad de producir descarga disruptiva.

Voltaje residual Vres del DPS

Valor pico del voltaje que aparece entre los terminales de un DPS durante el proceso de descarga de la corriente de rayo [2] [143]

Flameo

Descarga disruptiva sobre una superficie de un aislamiento solido en un gas o en un líquido. Sinónimo: Flashover en inglés.

Ruptura dieléctrica

Descarga disruptiva entre electrodos en un gas o líquido. Sinónimo: Sparkover

Voltaje de operación del DPS [144]

El Voltaje que causa operación por actuación normal según la característica de operación e inicia la descarga a tierra.

[143] [2] p 315
[144] [8] p 7

B. Anexo: Cálculo de la distancia Xc', otros casos[145]

Tabla B-1: Cálculo de la distancia Xc´ por coeficientes de attachement, otros casos

p Torr	d (cm)	I/2 (kA) (1)	Zc (Ω)	V (kV)	E/p [V/(cmTorr)]	α /p	η / p	(α - η) /p	Xc (cm)	d (cm)	I (kA)	
760	110	10	350	3500	41,87	0,0260	0,0058	0,0203	928,4	110	20	
550	110	7,5	350	2625	43,39	0,0260	0,0058	0,0280	671,9	110	15	
760	70	5	350	1750	32,89	0,0570	0,0048	0,0523	359,8086	70	10	[146]
550	80	5	350	1750	45,45	0,0190	0,0053	0,0189	993,1	80	10	
550	50	2,5	350	875	31,82	0,0056	0,0045	0,0015	12368,4	50	5	[147]

[145] Comparar Xc vs. d: con Xc>d no hay ruptura
[146] I rayo es el doble
[147] E = 30 o cercanos la formulación del proceso de recombinación arroje el valor máximo.

550	50	5	350	1750	63,64	0,1400	0,0120	0,1769	106,3	50	10
550	50	10	350	3500	127,27	0,6518	0,1599	0,6797	27,7	50	20
550	50	15	350	5250	190,91	1,4665	0,1599	1,8054	10,4	50	30
550	10	15	350	5250	954,55	36,6645	5,1332	43,5705	0,4	10	30
550	60	4,3	350	1505	45,61	0,0340	0,0064	0,0382	492,1	60	8,6
550	20	15	350	5250	477,27	9,1661	1,2049	11,0010	1,7	20	30
550	10	30	350	10500	1909,09	146,6459	21,1884	173,3593	0,1	10	60
550	70	50	350	17500	454,55	8,2941	1,0833	9,9641	1,9	70	100
760	70	50	350	17500	328,95	4,3292	0,5374	3,7918	5,0	70	100
550	110	100	350	35000	578,51	13,4435	1,8064	16,0804	1,2	110	200
550	110	50	350	17500	289,26	3,3609	0,4071	4,0816	4,6	110	100
550	163	50	350	17500	195,20	1,5301	0,1680	1,8823	10,0	163	100
760	110	50	350	17500	209,33	1,7577	0,1968	1,5609	95,5	110	100
550	60	5	350	1750	53,03	0,0700	0,0087	0,0847	221,9	60	10

C. Anexo: Caso de aplicación con corriente de rayo de 5 kA, 2,5 kA entran a la subestación

Similar a la presentación del apartado 5-2, este anexo 3 muestra en los Gráficos A y B los resultados de los voltajes pico onda de impulso para corriente de rayo entrando a la subestación de 2,5 kA, dos casos: con un juego de DPS y doble juego de DPS.

Figura C-1: 2,5 kA y un juego DPS

Valores máximos en kV obtenidos en el programa por fases: barras A B C, módulos CBA, en su orden: 161 82 178 178 83 161 I rayo: 2500 A

I rayo curva verde oscuro. Voltios modulo Fase C color rojo, Máximo fase-tierra 177 kV. Voltios módulo fase B color verde

Figura C-1: 2,5 kA y un juego DPS

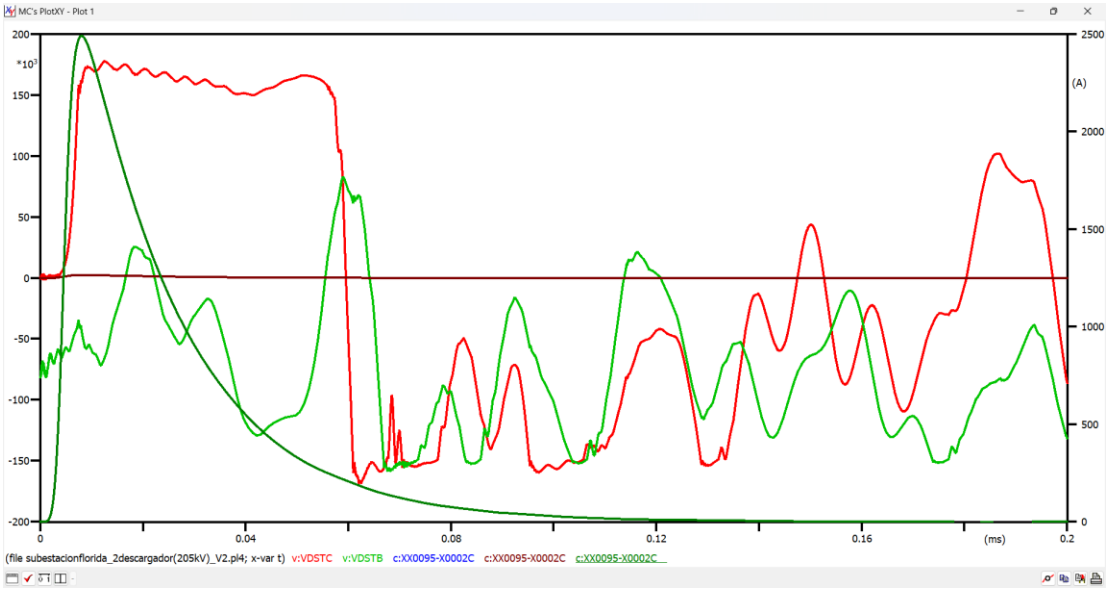


Figura C-2, viene de Figura C-1

Voltios barraje Fase A curva roja. Voltios barraje Fase C curva azul, V máximo fase-tierra 170 kV.

Voltios módulo Fase B curva café.

Figura C-2: Viene de Figura C-1

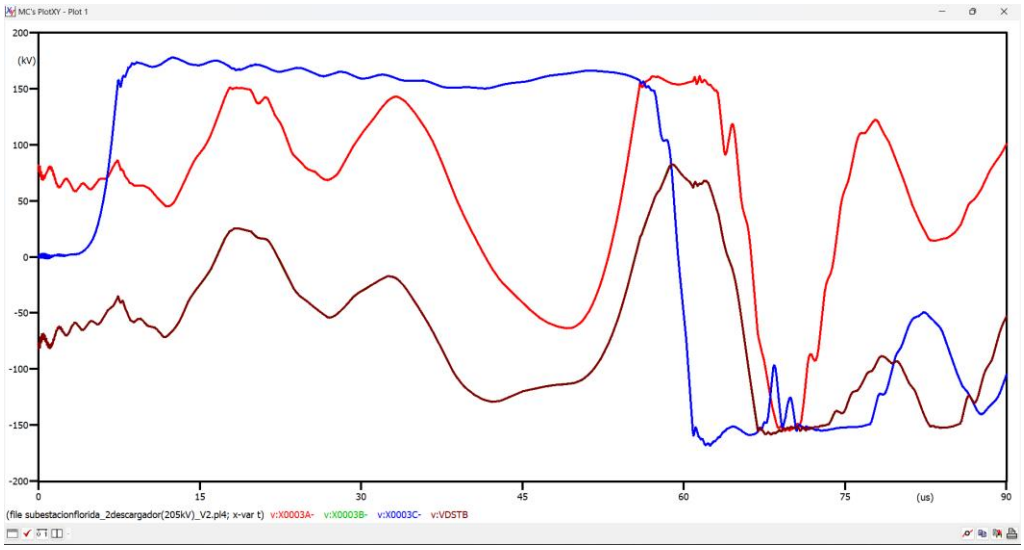


Figura C-3 viene de Figura C-1

Voltios barraje fase B, V máximo fase-tierra 80 kV.

Figura C-3: Viene de Figura C-1

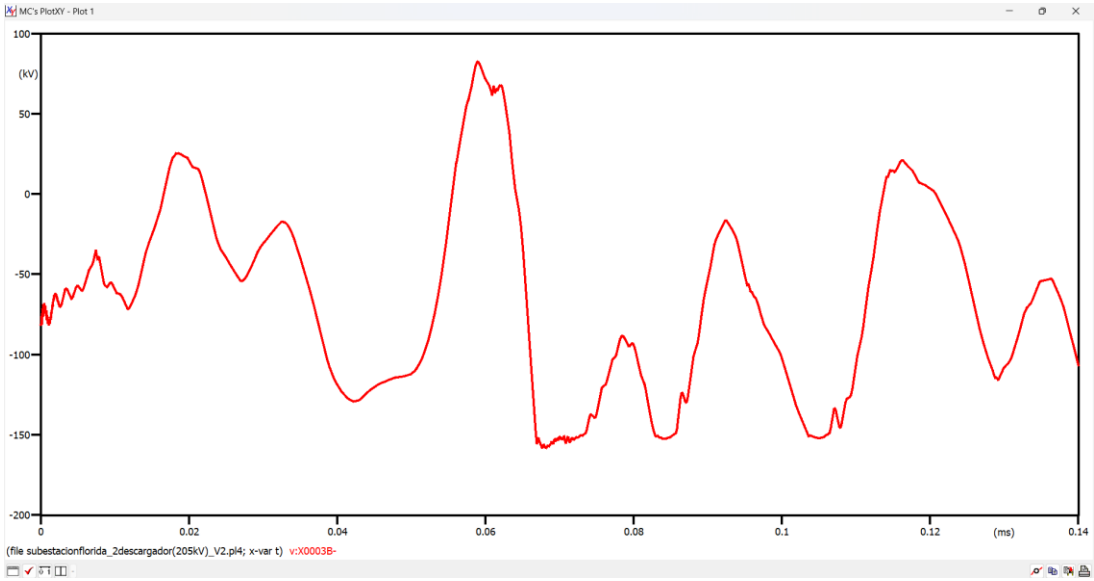


Figura C-4: I rayo 2,5 kA y dos juegos DPS

I rayo curva café. Voltios Barraje fase C curva verde, máximo 170 kV fase-tierra. Voltios modulo Fase A curva azul, Voltios Barraje fase B curva roja.

Figura C-4: I rayo 2,5 kA y dos juegos DPS

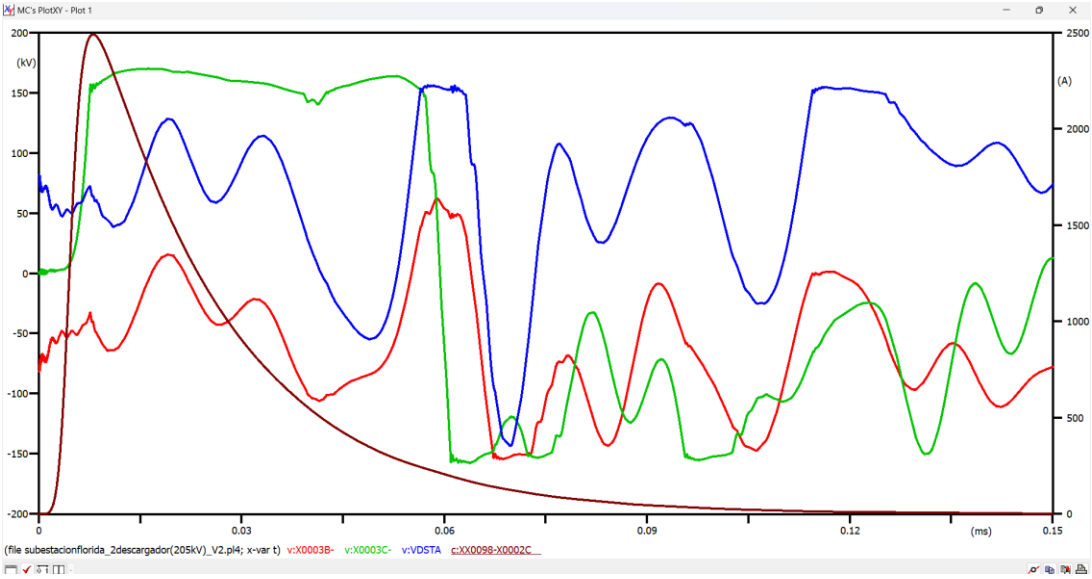


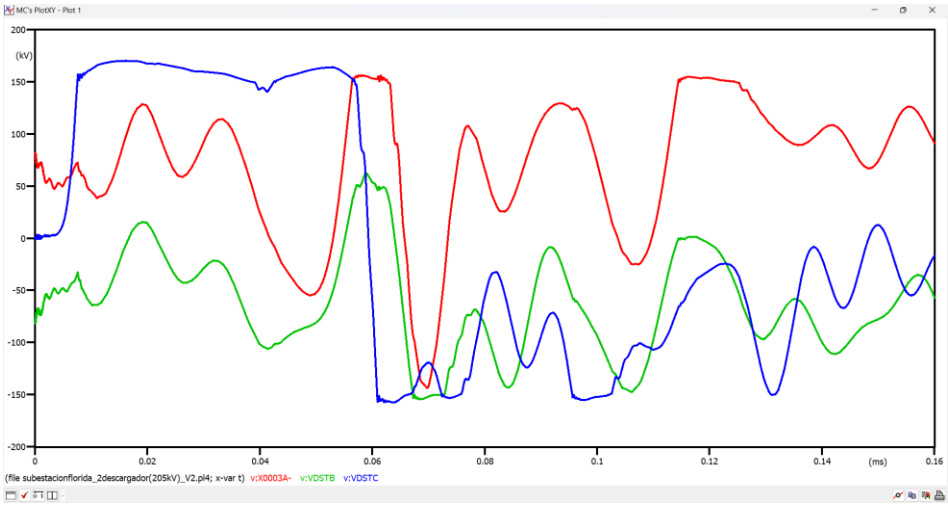
Figura C-5 Viene de Figura C-4

Voltios módulo fase C curva azul, Voltios barraje fase A curva roja, Voltios módulo fase B curva verde

Nótese en t=0 iniciando, voltios fase-tierra 60 Hz: fase C:0, fase A: 70 kV, fase B: -70 kV.

Sobrevoltaje máximo Fase C en módulo aproximadamente 175 kV.

Figura C-5: Viene de Figura C-4



D. Anexo: Conversión 57,5 kV a 115 kV

Pruebas de conversión 57,5 a 115 kV por EEEB (1975)

Figura D-1: Conexiones pruebas de aislamiento ante sobrevoltaje de maniobra, 1979

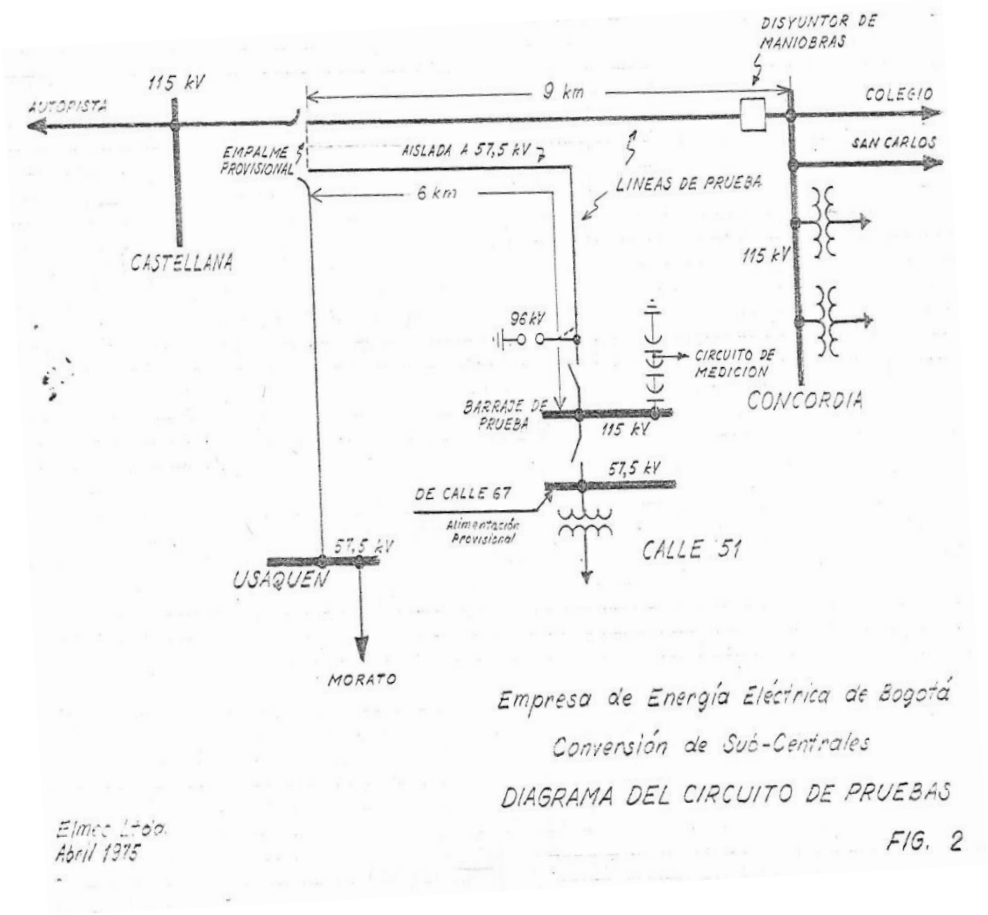


Figura D-2: Cuadro de resultados varias pruebas realizadas en 1979

Conversión de Sub-Centrales

PRUEBAS DE AISLAMIENTO EN CALLE 51

TABULACION DE RESULTADOS

I – Pruebas con Pararrayos en Calle 51

PRUEBA. No	TIPO	SOBRETENSION (Según Oscilogramas) B-N	C-N	B-C	OBSERVACIONES
1	Cierre	1,68	1,00	1,57	
3	Cierre	1,00	1,43	1,71	
4	Apertura	1,93	1,60	1,60	Operación Pararrayos ϕA - Descargas ϕC
10	Apertura	2,68	1,35	1,00	Doble Reignición ϕB
12	Apertura	1,00	1,53	1,36	Operación Pararrayos ϕA - Descargas ϕB
14	Apertura	1,00	1,00	1,00	Operación Pararrayos ϕA-
16	Apertura	1,36	1,82	1,33	Oper. Parar. ϕA - Descarg. ϕB - Reignic. ϕC
18	Apertura	1,00	1,00	1,00	Oper. Parar. ϕA - Descarg. ϕB - Reignic. ϕC
20	Apertura	1,24	1,12	1,30	Oper. Pararrayos ϕA - Reignición ϕC
21	Apertura	1,00	1,96	1,00	Oper. Parar. ϕA - Desc. Multip. ϕB - Triple Reig. ϕC
	Recierre	1,60	3,69	1,62	Descargas ϕB
	Reapertura	1,65	1,83	1,64	Reignición ϕ - Doble Reignición ϕC
22	Apertura	1,58	1,62	1,54	Oper. Parar. ϕA - Reig. y Desc. ϕB y ϕC
	Recierre	1,90	3,60	1,79	Inducción en ϕB
	Reapertura	1,10	2,80	2,15	Reignición ϕB - Doble Reignición ϕC
23	Apertura	1,50	2,00	1,53	Oper. Parar. ϕA - Reig. y Desc. ϕB y ϕC
	Recierre	1,56	1,72	1,47	
	Reapertura	1,65	1,92	1,90	Oper. Parar ϕA - Desc. ϕB - Reig. (3) ϕC
26	Apertura	1,40	1,82	1,70	
	Recierre	1,77	2,00	1,82	Oper Parar ϕA - Descarga ϕB
	Reapertura	2,30	2,55	1,50	Desc. y Reig. ϕB - Doble Reignicion ϕC
27	Apertura	1,20	1,52	1,44	
	Recierre	1,40	2,20	1,90	Oper. Parar. ϕA - Inducción en ϕB y ϕC
	Reapertura	1,80	1,45	1,00	Reignición ϕB - Oscilaciones Alta Frecuencia en ϕB-ϕC
28	Apertura	2,70	1,30	1,30	Oper Parar. ϕA, ϕB y ϕC - Reigniciones ϕB
	Recierre	2,10	2,20	1,29	Descargas ϕB
	Reapertura	2,47	1,86	1,59	Operación Pararrayos ϕA y ϕB - Oscilaciones de alta frecuencia en ϕB y ϕC

Elmec Ltda.
Abril 1975

1

ANEXO A

Figura D-3: Cuadro de resultados varias pruebas realizadas en 1979

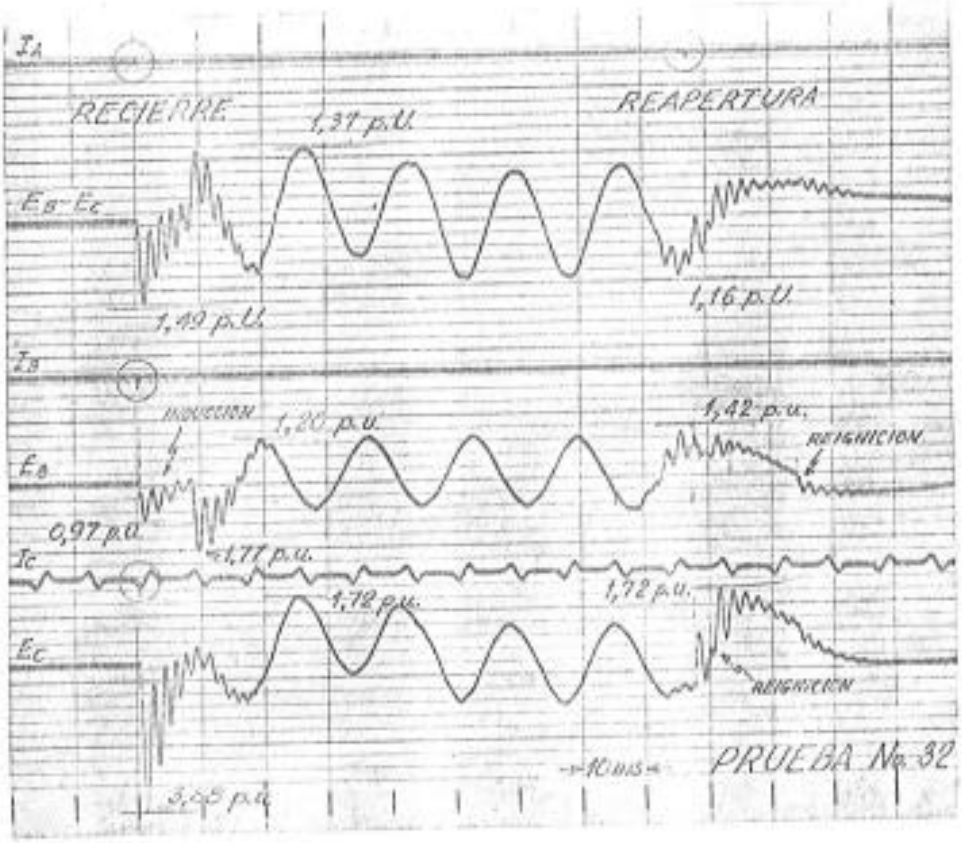
PRUEBA No.	TIPO	SOBRETENSION (Según Oscilogramas) B-N	C-N	B-C	OBSERVACIONES
29	Apertura	1,00	1,00	1,00	Oscilaciones alta frecuencia ϕB
	Recierre	2,28	2,00	2,42	
	Reapertura	1,00	1,00	1,00	Descargas ϕB
30	Apertura	1,38	2,49	2,10	
	Recierre	2,00	1,55	1,85	
	Reapertura	1,00	1,00	1,00	
31	Apertura	2,66	1,36	1,41	
	Recierre	2,97	2,00	1,56	Cresta máxima de la onda estacionaria modulada por onda transitoria de frecuencia inferior
	Reapertura	1,00	1,00	1,17	Oper. Parar ϕA - Doble Reignic. ϕC
32	Apertura	1,42	1,48	1,64	
	Recierre	1,77	3,88	1,49	Oper. Parar. ϕA, ϕB y ϕC
	Reapertura	1,42	1,72	1,16	Oper. Parar. ϕA - Descargas ϕB y ϕC
33	Apertura	2,18	1,37	1,38	Oper. Parar. ϕA y ϕB - Reignic. ϕB y ϕC
	Recierre	2,00	2,03	2,23	Descargas ϕB y ϕC
	Reapertura	2,14	1,66	1,41	Operacion Pararrayos ϕA, ϕB y ϕC - Doble Reignicion ϕC - Oscilaciones transientes de alta frecuencia en oscilograma ϕB-ϕC
34	Apertura	1,00	1,00	1,00	
	Recierre	1,57	1,93	1,73	
	Reapertura	2,82	1,00	1,13	Oper. Parar. ϕA - Desc. ϕB y ϕC - Reignic ϕB
35	Apertura	1,54	1,67	1,90	Reignicion ϕC
	Recierre	1,90	1,40	1,76	Oper. Parar. ϕA - Descarga ϕB
	Reapertura	1,00	1,06	1,09	Reignicion ϕB
36	Apertura	1,00	1,36	1,30	Descargas ϕB - Oscilaciones de alta frecuencia ϕB - Reignicion ϕC
	Recierre	1,77	1,04	1,72	
	Reapertura				No salió oscilograma
37	Apertura	2,54	2,13	2,00	Descargas y Reigniciones. ϕB y ϕC
	Recierre	2,93	2,34	3,09	
	Reapertura	1,66	2,47	1,51	Descarga ϕB - Doble Reignicion ϕC - Oscilaciones alta frecuencia en los tres oscilogramas
38	Apertura	1,64	2,20	1,67	Oper. Parar ϕA - Triple Reignic. ϕC
	Recierre	2,22	2,69	1,31	
	Reapertura	1,01	1,55	1,00	Descargas ϕB
39	Apertura	1,00	1,00	1,00	
	Recierre	1,77	2,16	1,87	Descargas ϕB
	Reapertura	1,49	1,00	1,00	
40	Apertura	1,35	1,39	1,20	
	Recierre	1,77	1,35	1,30	
	Reapertura	1,49	2,78	1,30	Doble Reignicion ϕC

Elmec Ltda.
Abril 1975

2

ANEXO A

Figura D-4: Oscilogramas prueba 32 realizados en 1975



Prueba No. 32 – RECIERRE Y REAPERTURA

Descargas de pararrayos en ϕA, ϕB y ϕC
Tensiones transientes inducidas en ϕB
Descargas sucesiva en ϕB y ϕC
Reigniciones, en ϕB y ϕC
Sobretension maxima 3,88 p.u en ϕC

Elmec Ltda.
Abril 1975

ANEXO B
Hoja No. 3

Figura D-5: Parte de estudios previos realizados por EEEB realizados en 1975

3 DISTANCIAS FASE-FASE, FASE-TIERRA Y NIVELES DE AISLAMIENTO

Tradicionalmente las distancias entre fases y fase - tierra, así como los niveles de aislamiento utilizados en subestaciones de alta tensión se han basado en las definiciones de las normas NEMA. Con la utilización de pararrayos de óxido metálico, la realización de cálculos más precisos utilizando el EMTP y los resultados prácticos obtenidos, se ha deducido que para sobre - rateo de subestaciones es posible utilizar parámetros menos conservativos, tal como se indica en la tabla 1. Aunque esta tabla no se debe tomar como una guía definitiva, sí indica la viabilidad de realización de este tipo de proyectos, así como también da una idea de los márgenes disponibles en las subestaciones construídas con esta norma. {1}

Tensión máxima kV, L- L del sistema	72.5	121	242
Tensión nominal kV, L- L del sistema	69	115	230
Mínima distancia linea-linea			
según NEMA, mm	787	1346	2260
posible, mm	546	902	1740
Mínima distancia linea-tierra			
según NEMA, mm	635	1067	1803
posible, mm	343	559	1105
Nivel de aislamiento mínimo			
según NEMA, kV	350	550	900
posible, kV	200	350	550

TABLA 1: COMPARACIÓN DE DISTANCIAS Y NIVELES DE AISLAMIENTO

Figura D-6: Parte de estudios previos realizados por EEEB en 1975

5.7 Conversiones futuras

El sistema actual de 57.5 kV tiene doce subestaciones con sus correspondientes líneas de interconexión y se ha previsto convertirlo completamente a 115 kV.

Para estas conversiones futuras, los diseños tendrán en cuenta no solamente la experiencia de las conversiones iniciales, sino también la reducción de las dimensiones de los equipos de patio por su menor nivel de aislamiento y por el uso del SF6 en los interruptores. Actualmente se tienen definidas las siguientes características constructivas principales:

Tensión nominal:	115 kV
*BIL, nivel del mar:	
- Interruptores:	550 kV
- TCs y TPs:	550 kV
- Transformadores:	450 kV
- Pasatapas:	550 kV
- Seccionadores:	520/450 kV
Pararrayos:	Oxido metálico
Dimensiones :	
- Ancho de módulo:	6.1 m
- Ancho interruptor:	3.8 m
- Alto interruptor:	4.5 m
- Separación fases:	1.15 a 1.5 m
- Mínima fase-tierra:	0.8 m
- Mínima fase-fase:	0.93 m

En la figura 6 se muestra uno de los esquemas previstos para las futuras conversiones.

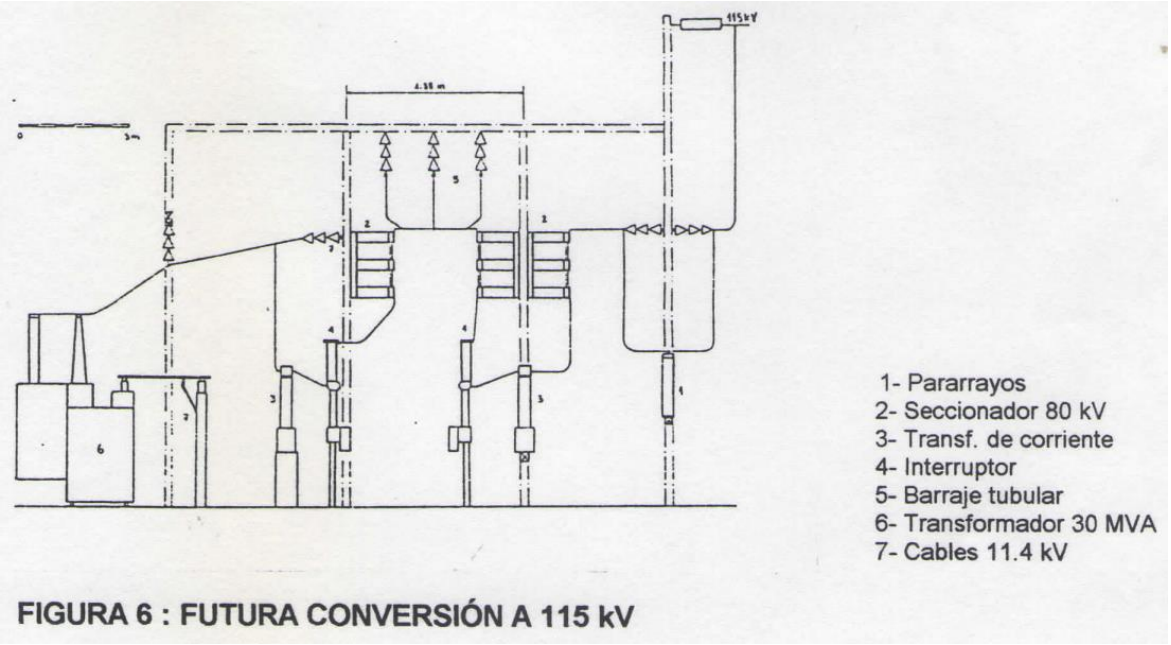
En la figura se indican interruptores de tanque vivo, pero también es posible utilizar tanque muerto, lográndose un mejor aprovechamiento del espacio.

6 CONCLUSIONES

El aumento del nivel de tensión en las subestaciones, usando las mismas áreas y algunos equipos, es una solución adecuada para atender la expansión de los sistemas eléctricos.

Las distancias de aislamiento en subestaciones de alta tensión empleando las normas tradicionales, son bastante superiores a lo mínimo requerido.

Figura D-7: Parte de estudios previos realizados por EEEB, 1975



E. Anexo: Cálculos selección nuevo juego doble del DPS

Cálculo de nuevas características del DPS juego 2

A partir de la referencia [20] para el valor A0 que trae el programa para 10 kA en 231562[148] La descarga ocurre entonces a un valor para I de 10 kA que al factor I*R de 1,9 entrega valor de la descarga del DPS en 231*1,9/1,6 = 260 kV.

Se decide pasar a otro mayor seleccionado a priori en 260025 para 10 kA y en esta proporción se ajusta la nueva tabla de características del nuevo DPS en el modelo

Para ello seleccionamos de nuevo el factor I*R de las tablas B0 y B1 de la figura 2, [20] en 1,9 para 10 kA, con lo cual el voltaje de descarga que arroja el programa será de 260*1,9/1,6= 300 kV

Revisada la tabla del fabricante, **Anexo E** se selecciona los dos juegos de DPS que corresponden una V nominal de 108 y 132 kV, para I rayo de 10 kA, forma 8/20 microsegundos para cada juego de DPS.

La clase de los descargadores seleccionados de la tabla del Anexo E1 y la especificación de los mismos a continuación.

---

[148] Valor de características de la recta de operación V vs. I del DPS para diferentes corrientes de rayo valores asignados en el programa ATP. El valor 260025 valor de operación del nuevo DPS asignado cuyas características a partir de este valor para 10 kA de I rayo toma nuevos valores ajustados a nueva característica de operación del DPS sugerido.

Figura E-1: Selección de los DPS datos de fabrica

PEXLIM P-Z

Guaranteed protective data 24 - 145 kV

Max. system voltage U_s	Rated voltage U_r	Max. continuous operating voltage[1]		TOV capability[2]		Max. residual voltage with current wave						
		as per IEC	as per ANSI/ IEEE			30/ 60 µs						8/ 20 µs
		U_c	MCOV	1 s	10 s	1 kA	2 kA	3 kA	5 kA	10 kA	20 kA	40 kA
kV_{rms}	kV_{rms}	kV_{rms}	kV_{rms}	kV_{rms}	kV_{rms}	kV_{peak}	kV_{peak}	kV_{peak}	kV_{peak}	kV_{peak}	kV_{peak}	kV_{peak}
24 [1]	24	19.2	19.5	26.5	25.2	46.1	47.7	49.1	51.3	54.0	59.2	64.8
36 [1]	30	24.0	24.4	33.1	31.5	57.6	59.7	61.3	64.2	67.5	74.0	81.0
	33	26.4	26.7	36.4	34.6	63.4	65.6	67.5	70.6	74.3	81.4	89.1
	36	28.8	29.0	39.7	37.8	69.1	71.6	73.6	77.0	81.0	88.7	97
52	42	34	34.0	46.4	44.1	80.7	83.5	85.9	89.8	94.5	104	114
	48	38	39.0	53.0	50.4	92.2	95.4	98	103	108	119	130
	51	41	41.3	56.3	53.5	98	102	105	110	115	126	138
	54	43	43.0	59.6	56.7	104	108	111	116	122	134	146
	60	48	48.0	66.3	63.0	116	120	123	129	135	148	162
	66	53	53.4	72.9	69.3	127	132	135	142	149	163	179
	72	58	58.0	79.5	75.6	139	144	148	154	162	178	195
72	54	43	43.0	59.6	56.7	104	108	111	116	122	134	146
	60	48	48.0	66.3	63.0	116	120	123	129	135	148	162
	66	53	53.4	72.9	69.3	127	132	135	142	149	163	179
	72	58	58.0	79.5	75.6	139	144	148	154	162	178	195
	75	60	60.7	82.8	78.7	144	150	154	161	169	185	203
	78	62	63.1	86.1	81.9	150	155	160	167	176	193	211
	81	65	65.6	89.5	85.0	156	161	166	174	183	200	219
	84	67	68.0	92.8	88.2	162	167	172	180	189	207	227
100	75	60	60.7	82.8	78.7	144	150	154	161	169	185	203
	78	62	63.1	86.1	81.9	150	155	160	167	176	193	211
	81	65	65.6	89.5	85.0	156	161	166	174	183	200	219
	84	67	68.0	92.8	88.2	162	167	172	180	189	207	227
	90	72	72.0	99.4	94.5	173	179	184	193	203	222	243
	96	77	77.0	106	100.3	185	191	197	206	216	237	260
123	90	72	72.0	99.4	94.5	173	179	184	193	203	222	243
	96	77	77.0	106	100.3	185	191	197	206	216	237	260
	102	78	82.6	112	107	196	203	209	219	230	252	276
	108	78	84.0	119	113	208	215	221	231	243	267	292
	120	78	98.0	132	126	231	239	246	257	270	296	324
	129	78	104	142	135	248	257	264	276	291	318	349
	132	78	106	145	138	254	263	270	283	297	326	357
	138	78	111	152	144	265	275	282	295	311	340	373
	144	78	115	159	151	277	287	295	308	324	355	389
	150	78	121	165	157	288	299	307	321	338	370	405
145	108	86	86.0	119	113	208	215	221	231	243	267	292
	114	91	92.3	125	119	219	227	233	244	257	281	308
	120	92	98.0	132	126	231	239	246	257	270	296	324
	132	92	106	145	138	254	263	270	283	297	326	357

Tabla E-2

ESPECIFICACION DE LOS DPS SELECCIONADOS DE LA FIGURA E1

El DPS 2 seleccionado como se indica en el capítulo 6.

Para (I rayo/2) entrando de 5 kA 8/20 µs y 30/60 µs

Juego DPS	Sitio	Vn (kV)	NPR (kV)	CLASE
1	Módulo de línea	108	231	1
2	Ultima Torre (nuevo)	132	283	1

Cálculo de la selección de la clase:

CALCULOS CLASE DE DESCARGA DPS #1 BAY #2 TORRE PARA DISTANCIA DE IMPACTO 5,5 KM , MITAD LINEA TIPICA

#	I r/2 (A)	V RAYO (v)	NPR (V)	n	Z (Ω)	x (m)	c (m/s)	T (seg)	W (kJ/kV)	Vn	NPR/Vn	CLASE
1	5000,00	1750000,00	231000,00	2,00	350,00	5500,00	300000000,00	0,000018	0,34	108000,00	2,14	1
2	5000,00	1750000,00	283000,00	2,00	350,00	5500,00	300000000,00	0,000018	0,33	132000,00	2,14	1

F. Anexo: Tabla de cálculos probabilidad de falla apantallamiento por rayo en líneas a 115 kV Bogotá

Tabla F-2: Tabla de cálculos probabilidad de falla apantallamiento por rayo en líneas a 115 kV Bogotá

Total, longitudes líneas 115kV, kM	Longitud Línea promedio Km	N° líneas Sistema 115 kV	H (Km)	B (Km)	W Km	Área Sabana Bogotá Km2	Aprom Km2	N° rayos en 2022	Densidad (Iray/Km2) en 100 Km de líneas
1650	14	105	0,02	0,002	0,082	4250	120,54	55582	157,6

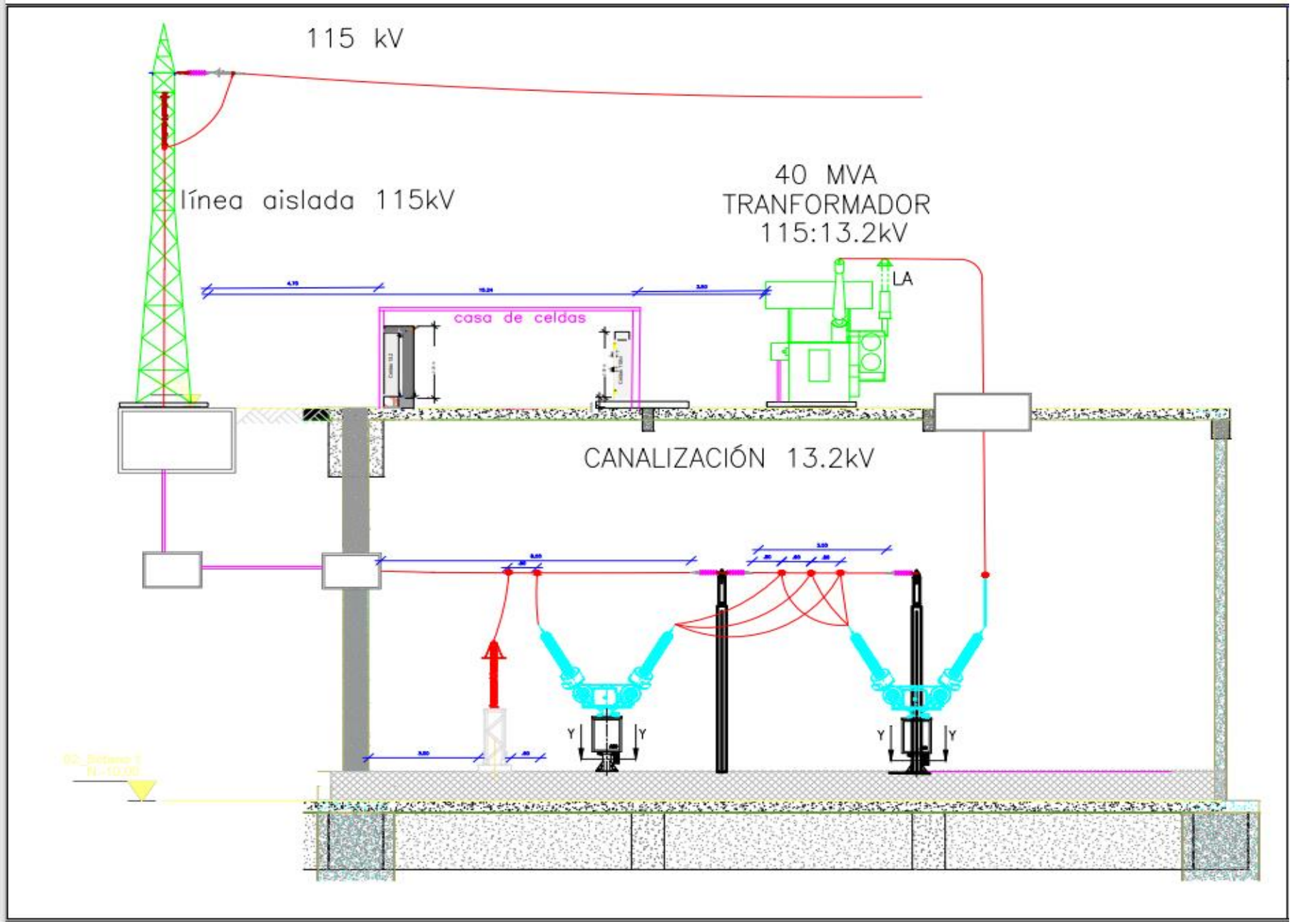
Angulo apantallamiento θ ° sex	h (m)	log Po	Ln Po	Po (%)	I Rayo kA	Pr flameo p.u.	# rayos	densidad (Iray/km2) en 100 km de líneas	flameos/año en 100 km	años para 1 flameo
20,00	30,00	-0,78	-1,84	0,17	10,20	0,95	55582,00	15,764	0,025	3,88
30,00	30,00	-0,17	-0,41	0,68	10,20	0,95			1,01	0,99
15,00	30,00	-1,09	-2,55	0,09	10,20	0,95			0,13	7,69
30,00	20,00	-0,51	-1,20	0,32	10,20	0,95			0,48	2,10
15,00	40,00	-0,95	-2,22	0,12	10,20	0,95			0,18	5,60

Figura F-1: Convenciones

θ	ang apant ° cesagesimales
h	altura cable g (Km)
W	Ancho promedio zona linea con 2 cables de g (Km)
d	Distancia c g en doble circuito (Km)
Po	Prob (%) rayo en zona de lineas
Pr flam	prob falla aislam linea por rimpacto rayo
D	Densidad rayos zona lineas (Ray/ Km2)
Ray	Rayo máximo esperado con probabilidad P ray
I Ray m	Rayo promedio en sabana de Bogotá año 2022
P Ray	Rayo más probable en Zona
L prom	Longitud promedio linea 115 kV
# lin	Estimativo # lineas 115 kV en zona Bogotá
# desc	Rayos caen en Bogotá año 2022
A prom	Area promedio ocupada por lineas en sabana de Bogotá Km 2
A Bog	Area promedio zona de influencia sabana de Bogotá

G. Anexo: Propuesta Subestación 115 kV AIS parcialmente subterránea

Figura G-1: Subestación 115 /13,2 kV parcialmente subterránea y reducción de distancias con equipos híbridos


115 kV
línea aislada 115kV
40 MVA
TRANFORMADOR
115:13.2kV
LA
casa de celdas
CANALIZACIÓN 13.2kV
Y
Y
Y
Y

H. Anexo: Norma IEC 60071 1 2002 Tabla 2

Valores de sobrevoltajes de soportabilidad para equipos a frecuencia de potencia y al impulso valor pico en rangos de los voltajes Vm más altos:
Vm < 245 kV rms, Vm >1kV rms

Tabla H-3: Norma IEC 60071 1 2002 Tabla 2

Highest voltage for equipment (U_m) kV (r.m.s. value)	Standard rated short-duration power-frequency withstand voltage kV (r.m.s. value)	Standard rated lightning impulse withstand voltage kV (peak value)
3,6	10	20
		40
7,2	20	40
		60
12	28	60
		75
		95
17,5 [a]	38	75
		95
24	50	95
		125
		145
36	70	145
		170
52 [a]	95	250
72,5	140	325
100 [b]	(150)	(380)
	185	450
123	(185)	(450)
	230	550
145	(185)	(450)
	230	550
	275	650
170 [a]	(230)	(550)
	275	650
	325	750
245	(275)	(650)
	(325)	(750)
	360	850
	395	950
	460	1050

I. ANEXO RESULTADOS PRUEBAS EN LABORATORIO LABE UN

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
Facultad de Ingeniería
Sede Bogotá

LABORATORIO DE ENSAYOS ELÉCTRICOS INDUSTRIALES LABE

LABE02S03 - HOJA ELECTRÓNICA PARA EL ENSAYO DE IMPULSO DE TENSIÓN TIPO RAYO

Fecha de emisión:	Versión:	Elaboró:	Revisó:	Aprobó:
2017-08-31	1.1	Andrés Moreno	Ing. Daniel Sánchez	Ing. Francisco Amórtegui

Fecha:	2024-03-20	**Hora**	9:46	**Hora final:**	12:49
Encargad	Henry Suarez	**Supervis**	Ing. Javier Pava		
Temperatura ambiente [°C]:	**Máx** / **Min**	**Humedad relativa [%]:**	**Máx** / **Min**		
Cotización:	LABE01C	**Informe:**	LABE02IE		

RESULTADOS DE ENSAYO

Tipo de muestra	
Código de muestra	E-MLT
Norma de referencia	NO APLICA
Tensión de ensayo [kV]	N/A
Distancia minima de descarga [m]	

N°	Condiciones ambientales Temperatura		Humedad		Factor corrección K	Tensión corregida	Configuración	Polaridad	Corriente [A]	Tensión de carga	Tensión de cresta	Tiempo de frente T_f [µs]	T_c [µs]	Descarga Si	No	Osc N°
1		°C		%			divisor 400 kV	+	n/a	30	308,1	1,62	52,8		x	
2		°C		%			divisor 400 kV			31	317,6	1,78	52,7		x	2
3		°C		%			divisor 400 kV			32,2	337	1,69	50,3		x	3
4		°C		%												
5		°C		%												
6		°C		%			divisor 400 kV			35	355	1,68	51,7		x	6
7		°C		%			divisor 400 kV			36	369,7	1,48	50,3		x	7
8		°C		%			divisor 1 MV			36	350	1,16	51,5		x	10
9		°C		%			divisor 1 MV			41,1	400,7	1,12	18,2	x		13
10		°C		%			divisor 1 MV			39,8	387,3	1,11	21,7	x		14
11		°C		%			divisor 1 MV			51,3	449,6	0,87	5,41	x		15
12		°C		%												
13		°C		%												
14		°C		%												
15		°C		%												

Criterio de	No Aplica
Observaciones:	Ninguno
Presentes:	Ing. Eliseo Gómez Moreno

Página 1

a. Bibliografía

[1] A. Roth, J. Corrales Martín, J. Amsler y G. d. Senarclens, Técnica de la alta tensión, Barcelona: Labor, 1966.

[2] Mejía y Villegas, Subestaciones de alta y extra alta tensión 2ª ed, Colombia : HMV , 2003.

[3] W. Schmidt y . F. Greuter, «Nuevos enfoques de la protección contra sobretensiones,» *ABB,* pp. 49-55, 2022.

[4] E. C. f. E. S. (CENELEC), *EN 50341-1:2001 Overhead electrical lines exceeding AC 45 kV - Part 1: General requirements - Common specifications,* 2001.

[5] I. E. Commission, *IEC 60071-1:2006+AMD1:2010 CSV Insulation co-ordination - Part 1: Definitions, principles and rules,* 2011.

[6] I. E. Commission, *IEC 60071-2:2018 Insulation co-ordination - Part 2: Application guidelines,* 2018.

[7] . Volker Hinrichsen, SIEMENS Descargadores de óxido metálico-Fundamentos, 2002.

[8] E. Kuffel y W. S. Zaengl, High Voltage Engineering Fundamentals, Elsevier Science & Technology Books, 2000.

[9] M. S. Naidu, N. Y. San, F. Washington, D. C. A. Bogota, C. Lisbon, L. Madrid, M. City, M. M. New, D. San y J. Singapore, HIGH VOLTAGE ENGINEERING Second Edition McGraw-Hill, 1995.

[10] I. P. a. E. Society, *IEEE 4-2013 IEEE Standard for High-Voltage Testing Techniques,* 2013.

[11] K. L. Chrzan, «High Voltage Laboratory Training,» *Wrocław University of Technology,* pp. 1-113, 2011.

[12] L. A. Siegert C., Alta tensión y sistemas de transmisión, 1988.

[13] H. E. Rojas, H. D. Rojas y C. A. Cortes, «Statistical analysis of negative cloud-to-ground lightning characteristics in Bogota, Colombia based on electric field measurements,» *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics,* vol. 227, 2022.

[14] J. Herrera-Murcia, C. Younes-Velosa y L. Porras, «Variation of lightning peak current parameter as a function of cloud-to-ground lightning flash density in Colombia,» de *nternational Symposium on Lightning Protection (XIV SIPDA)*, 2017.

[15] H. E. Rojas, A. S. Cruz y C. A. Cortes, «Characteristics of electric field waveforms produced by negative return strokes in Colombia and their comparison with other,» *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics,* vol. 227, 2022.

[16] . Keraunos, «Datos de rayos en Sabana de Bogotá,» 2022.

[17] V. Rudas, *Sobre rateo en subestaciones convencionales de alta tensión 115 kV,* 1996.

[18] G. Hilgarth, «Hochspannungstechnik,» *Hochspannungstechnik,* 1997.

[19] V. Cooray, «Basic Physics of Electrical Discharges,» de *An Introduction to Lightning*, Dordrecht, Springer Netherlands, 2015.

[20] IEEE, «Modeling of metal oxide surge arresters,» *IEEE Transactions on Power Delivery,* vol. 7, nº 1, pp. 302-309, 1992.

[21] RETIE, Reglamento técnico de instalaciones eléctricas, artículo 15.4, actualización 2014, publicación IIEEUN, p 85.

[22] E. Gómez, Subestaciones eléctricas, sobretensiones y coordinación del aislamiento, material de la clase, Universidad Nacional de Colombia, 2012.

[23] M. Cuzco Cusco, Estudio influencia de altitud en nivel de aislamiento 138 y 230 kV, Escuela Politécnica Nacional, Quito, febrero 2016

[24] C.T.A, Johnk, Teoría electromagnética campos y ondas, 12, ed. México D.F : Limusa, 2013