



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE GUAYAQUIL

CARRERA DE ELECTRICIDAD

**ANÁLISIS DE LA SOPORTABILIDAD DEL AISLAMIENTO, EN LÍNEAS
AÉREAS DE DISTRIBUCIÓN FRENTE A DESCARGAS TIPO RAYO,
MEDIANTE CÓDIGOS PYTHON Y SIMULACIONES EN ATPDRAW**

Trabajo de titulación previo a la obtención del

Título de Ingeniero Eléctrico

AUTORES: Efraín Ezequiel Aymar Peña

Roy Anderson Diaz Totoy

TUTOR: Ing. Otto Washington Astudillo Astudillo, MEL

Guayaquil – Ecuador

2026

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Efraín Ezequiel Aymar Peña con documento de identificación N° 0959442815 y Roy Anderson Diaz Totoy con documento de identificación N° 0952735983 manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo y autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Guayaquil, 5 de febrero del año 2026

Atentamente;



Roy Anderson Diaz Totoy
CI: 0952735983



Efraín Ezequiel Aymar Peña
CI: 0959442815

CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACION DE LA UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA

Nosotros, Efraín Ezequiel Aymar Peña con número de identificación N° 0959442815 y Roy Anderson Diaz Totoy con número de identificación N° 0952735983, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de lo que somos autores del Proyecto Técnico: “ANÁLISIS DE LA SOPORTABILIDAD DEL AISLAMIENTO, EN LÍNEAS AÉREAS DE DISTRIBUCIÓN FRENTE A DESCARGAS TIPO RAYO, MEDIANTE CÓDIGOS PYTHON Y SIMULACIONES EN ATPDRAW”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de Ingeniero en Electricidad, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

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

Guayaquil, 5 de febrero del año 2026

Atentamente;



Roy Anderson Diaz Totoy
CI: 0952735983



Efraín Ezequiel Aymar Peña
CI: 0959442815

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Otto Washington Astudillo Astudillo con documento de identificación N° 0102054871 docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: “ANÁLISIS DE LA SOPORTABILIDAD DEL AISLAMIENTO, EN LÍNEAS AÉREAS DE DISTRIBUCIÓN FRENTE A DESCARGAS TIPO RAYO, MEDIANTE CÓDIGOS PYTHON Y SIMULACIONES EN ATPDRAW”, realizado por Efraín Ezequiel Aymar Peña con número de identificación N° 0959442815 y Roy Anderson Diaz Totoy con número de identificación N° 0952735983, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto Técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 29 de enero del año 2026

Atentamente;



Ing. Otto W. Astudillo Astudillo. MEL
CI: 0102054871

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de titulación a mi familia, que ha sido mi mayor apoyo a lo largo de toda mi formación académica. A mis padres, por su amor, paciencia y consejos constantes, y por enseñarme con su ejemplo a no rendirme ante las dificultades. A mi hermana mayor, por su apoyo y guía en cada etapa de mi vida, y a mi hermano menor, por ser una motivación constante para seguir adelante y dar siempre lo mejor de mí.

Este logro es también de ellos, ya que sin su respaldo y confianza nada de esto habría sido posible.

Efraín Ezequiel Aymar Peña

Dedico este trabajo de titulación a mis padres, quienes han sido el pilar fundamental en mi vida. A mi padre y a mi madre, por su esfuerzo diario, su apoyo incondicional y por creer en mí incluso en los momentos más difíciles. Gracias por brindarme las herramientas, los valores y la motivación necesarios para alcanzar esta meta.

Este logro es fruto de todo lo que me han enseñado y del respaldo que siempre me han dado a lo largo de mi camino académico y personal.

Roy Anderson Diaz Totoy

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por la vida, la salud y la fortaleza que me ha permitido culminar esta etapa tan importante de mi formación profesional. Su guía ha sido fundamental para enfrentar cada reto presentado a lo largo del camino universitario.

Expreso mi sincero agradecimiento a mi familia, en especial a mis padres, por su apoyo constante, su esfuerzo y sus palabras de aliento en cada momento. A mi hermana mayor y a mi hermano menor, por ser un respaldo permanente y una motivación para seguir adelante. Su confianza y acompañamiento han sido esenciales para alcanzar este logro.

De manera especial, agradezco al Ing. Otto Astudillo, tutor de este trabajo de titulación, por su orientación, paciencia y valiosos conocimientos aportados durante el desarrollo del proyecto, los cuales han contribuido significativamente a mi formación académica y profesional.

Efraín Ezequiel Aymar Peña

Agradezco a Dios por brindarme la vida, la salud y la fortaleza necesarias para culminar con éxito esta etapa de mi formación profesional, permitiéndome superar cada dificultad presentada durante el proceso académico.

Mi profundo agradecimiento a mis padres, por su esfuerzo, dedicación y apoyo incondicional a lo largo de toda mi carrera. Gracias por creer en mí, por sus consejos y por ser el principal pilar que me impulsó a alcanzar esta meta.

Un agradecimiento especial al Ing. Otto Astudillo, tutor de este trabajo de titulación, por su guía, acompañamiento y aportes técnicos durante el desarrollo del proyecto, los cuales fueron fundamentales para su correcta realización y para fortalecer mis conocimientos profesionales.

Roy Diaz Anderson Totoy

ÍNDICE GENERAL

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN.....	ii
CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACION DE LA UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA	iii
CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN.....	iv
DEDICATORIA.....	v
AGRADECIMIENTO.....	vi
ÍNDICE GENERAL.....	vii
INDICE DE FIGURAS	x
INDICE DE TABLAS.....	xi
RESUMEN.....	xii
ABSTRACT	xiii
ACRÓNIMOS	xiv
CAPITULO I.....	1
1.1. TITULO.....	1
1.2. ANTECEDENTES	1
1.3. INTRODUCCIÓN.....	2
1.4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
1.5. JUSTIFICACIÓN.....	4
1.6. ALCANCE	4
1.7. BENEFICIARIOS	5
1.8. OBJETIVOS.....	5
1.8.1. OBJETIVO GENERAL	5
1.8.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	6
CAPITULO II.....	7
2.1. FUNDAMENTO TEÓRICO	7
2.1.1. SOBRETENSIONES EN LÍNEAS AÉREAS DE DISTRIBUCIÓN.....	7
2.1.2. DESCARGAS ATMOSFÉRICAS Y SU INTERACCIÓN CON LÍNEAS AÉREAS.....	8
2.1.3. COORDINACIÓN DEL AISLAMIENTO.....	8
2.1.4. AISLADORES ELÉCTRICOS EN LÍNEAS AÉREAS	9
2.1.5. TIPOS DE AISLADORES UTILIZADOS EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN.....	11
2.1.5.1. AISLADORES DE PORCELANA	11
2.1.5.2. AISLADORES DE VIDRIO TEMPLADO	12
2.1.5.3. AISLADORES POLIMÉRICOS O COMPUESTOS	13

2.1.5.4.	CONFIGURACIÓN DE AISLADORES TIPO SUSPENSIÓN.....	14
2.1.6.	AISLAMIENTO EXTERNO EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE MEDIA TENSIÓN.....	14
2.1.7.	ESTRUCTURAS EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN AÉREA	15
2.1.8.	COMPORTAMIENTO DEL AISLAMIENTO EXTERNO FRENTE A IMPULSOS ATMOSFÉRICOS	17
2.1.8.1.	IONIZACIÓN DEL AIRE Y RUPTURA DIELECTRICA.....	17
2.1.8.2.	FORMACIÓN DEL LÍDER ELÉCTRICO.....	18
2.1.8.3.	DESARROLLO DEL ARCO SUPERFICIAL.....	18
2.1.9.	FLAMEO INTERNO Y FLAMEO EXTERNO	19
2.1.10.	RAZÓN POR LA CUAL EL FLAMEO OCURRE PRIMERO EN LA SUPERFICIE	19
2.1.11.	INFLUENCIA DE LOS FACTORES AMBIENTALES EN EL AISLAMIENTO	20
2.1.12.	FACTORES AMBIENTALES Y DE ALTITUD.....	20
2.1.12.1.	FACTOR DE CORRECCIÓN POR DENSIDAD RELATIVA DEL AIRE (KA).....	21
2.1.12.2.	FACTOR DE CORRECCIÓN POR LLUVIA (KLL).....	22
2.1.12.3.	FACTOR DE CORRECCIÓN POR HUMEDAD AMBIENTAL (KH)	22
2.1.12.4.	CONSIDERACIÓN DE LA ALTITUD	22
2.1.13.	PROPAGACIÓN DE ONDAS VIAJERAS EN LÍNEAS AÉREAS DE DISTRIBUCIÓN	23
2.1.14.	RELACIÓN ENTRE CORRIENTE DE RAYO Y SOBRETENSIÓN GENERADA.....	24
2.1.15.	IMPORTANCIA DE LAS ONDAS VIAJERAS EN LA COORDINACIÓN DEL AISLAMIENTO	25
2.1.16.	VOLTAJE CRÍTICO DE FLAMEO (CRITICAL FLASHOVER VOLTAGE – CFO).....	25
2.1.17.	CURVAS DE SOPORTABILIDAD DEL AISLAMIENTO.....	26
2.1.18.	IMPORTANCIA DEL MODELADO VOLTAJE-TIEMPO EN ESTUDIOS DE COORDINACIÓN DEL AISLAMIENTO	27
2.1.19.	PYTHON.....	27
2.1.20.	ATPDRAW	28
CAPITULO III	.....	30
3.1.	ANÁLISIS DEL AISLAMIENTO REQUERIDO	30
3.1.1.	FACTORES AMBIENTALES: AIRE, LLUVIA Y HUMEDAD	30
3.1.1.1.	FACTOR DE CORRECCIÓN POR DENSIDAD RELATIVA DEL AIRE (KA).....	30
3.1.1.2.	FACTOR DE CORRECCIÓN POR LLUVIA (KLL) Y HUMEDAD AMBIENTAL (KH)	31

3.1.1.3.	CONDICIONES ESTÁNDAR.....	31
3.1.2.	FACTORES DE CONTAMINACIÓN.....	32
3.1.3.	AISLAMIENTO PARA UNA LÍNEA AÉREA DE 13,8 KV.....	32
3.1.4.	DISTANCIA DE FUGA REQUERIDA.....	34
3.1.5.	SELECCIÓN DE AISLADOR.....	37
CAPITULO IV	.....	40
4.1.	ANÁLISIS DE CURVAS DE SOPORTABILIDAD DEL AISLAMIENTO FRENTE A DESCARGAS TIPO RAYO MEDIANTE CÓDIGOS PYTHON.....	40
4.2.	MODELO IEEE.....	41
4.3.	MODELO DE HILEMAN.....	43
4.4.	MODELO FÍSICO-EMPÍRICO BASADO EN EL CAMPO ELÉCTRICO CRÍTICO DEL AIRE.....	46
4.5.	COMPARACIÓN DE MODELOS DE CURVAS DE SOPORTABILIDAD PARA UNA CADENA DE TRES AISLADORES ANSI 52-1.....	50
4.6.	FLAMEO DE AISLADORES MEDIANTE PYTHON.....	53
4.7.	CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS Y ELÉCTRICAS DEL CONDUCTOR.....	54
4.8.	IMPEDANCIA CARACTERÍSTICA DEL CONDUCTOR (ZC).....	54
4.9.	MODELAMIENTO DE LA DESCARGA ATMOSFÉRICA.....	55
4.10.	VOLTAJE DE IMPACTO PRODUCIDO POR LA DESCARGA.....	56
4.11.	CONSTRUCCIÓN DEL FRENTE DE ONDA DEL VOLTAJE GENERADO POR EL RAYO.....	57
4.12.	VOLTAJE DE FLAMEO MEDIANTE PYTHON.....	60
4.12.1.	MODELO IEEE.....	60
4.12.3.	MODELO BASADO EN CAMPO ELÉCTRICO.....	63
CAPITULO V	.....	65
5.1.	SIMULACIÓN Y MODELAMIENTO EN ATPDRAW.....	65
5.1.1.	MODELO ELÉCTRICO EQUIVALENTE DEL AISLADOR.....	65
5.1.2.	CÁLCULO DE RESISTENCIA Y CAPACITANCIA DEL AISLADOR.....	66
5.1.3.	MODELO EN ATPDRAW PARA EL ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL AISLAMIENTO DE UNA LÍNEA DE 13,8 KV FRENTE A IMPULSOS TIPO RAYO.....	68
5.1.4.	MODELADO DE UN AISLADOR.....	69
CAPITULO VI	.....	76
6.1.	CONCLUSIONES.....	76
6.2.	RECOMENDACIONES.....	78
CAPITULO VII	.....	80
7.1.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	80

INDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1. DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	8
FIGURA 2.2. PARÁMETROS DE UN AISLADOR.....	9
FIGURA 2.3. AISLADORES EN SISTEMA ELÉCTRICO.....	10
FIGURA 2.4. AISLADORES DE PORCELANA	12
FIGURA 2.5. AISLADORES DE VIDRIO.....	13
FIGURA 2.6. AISLADORES POLIMÉRICOS	14
FIGURA 2.7. ESTRUCTURA EN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN.....	16
FIGURA 2.8. FORMACIÓN DE ARCO ELÉCTRICO	19
FIGURA 2.9. FLASHOVER DE AISLADOR.....	26
FIGURA 2.10. AJUSTE DE PARÁMETROS EN ATPDRAW	28
FIGURA 3.1. CADENA DE TRES AISLADORES	38
FIGURA 4.1. CURVA IEEE MEDIANTE PYTHON.....	42
FIGURA 4.2. CURVA HILEMAN MEDIANTE PYTHON	45
FIGURA 4.3. CURVA CAMPO ELÉCTRICO MEDIANTE PYTHON	49
FIGURA 4.4. COMPARACIÓN DE CURVAS DE SOPORTABILIDAD PARA 10 MSNM EN PYTHON	50
FIGURA 4.5. COMPARACIÓN DE CURVAS DE SOPORTABILIDAD PARA 2500 MSNM EN PYTHON	51
FIGURA 4.6. PLANTEAMIENTO DE ESCENARIO	53
FIGURA 4.7. VOLTAJE PRODUCIDO POR RAYO EN PYTHON	59
FIGURA 4.8. VOLTAJE DE FLAMEO POR RAYO EN PYTHON MODELO IEEE H1	60
FIGURA 4.9. VOLTAJE DE FLAMEO POR RAYO EN PYTHON MODELO IEEE H2	60
FIGURA 4.10. VOLTAJE DE FLAMEO POR RAYO EN PYTHON MODELO HILEMAN H1.....	61
FIGURA 4.11. VOLTAJE DE FLAMEO POR RAYO EN PYTHON MODELO HILEMAN H2.....	62
FIGURA 4.12. VOLTAJE DE FLAMEO POR RAYO EN PYTHON MODELO CAMP. ELEC. H1	63
FIGURA 4.13. VOLTAJE DE FLAMEO POR RAYO EN PYTHON MODELO CAMP. ELEC. H2.....	63
FIGURA 5.1. MODELO DE SIMULACIÓN EN ATPDRAW.....	68
FIGURA 5.2. MODELO INTERNO DEL AISLADOR EN ATPDRAW	69
FIGURA 5.3. CONFIGURACIÓN DE PARÁMETROS EN ATPDRAW	70
FIGURA 5.4. PROGRAMACIÓN DEL MODEL DE CONTROL DE ATPDRAW	71
FIGURA 5.5. CURVAS DE SOPORTABILIDAD DEL AISLADOR EN ATPDRAW .	72
FIGURA 5.6. FLAMEO DE AISLADOR EN ATPDRAW.....	74

INDICE DE TABLAS

TABLA 3.1. FACTORES AMBIENTALES FUENTE: AUTORES-----	31
TABLA 3.2. FACTORES DE CONTAMINACIÓN REFERENCIA: IEC TS 60815-2, IEEE 1313.2-1999 ADAPTACIÓN: AUTORES -----	32
TABLA 3.3. VALORES DE DISTANCIA DE FUGA CALCULADAS FUENTE: AUTORES-----	36
TABLA 3.4. AISLADORES TIPO DISCO DE PORCELANA FUENTE: CATÁLOGO DALIAN HIVOLT POWER SYSTEM CO., LTD. -----	37
TABLA 3.5. CANTIDAD DE DISCOS NECESARIOS FUENTE: AUTORES -----	38
TABLA 4.1. PARÁMETROS PARA MODELO BASADO EN CAMPO ELÉCTRICO FUENTE: AUTORES-----	48
TABLA 4.2. DATOS PARA CURVA DE VOLTAJE PRODUCIDA POR RAYO FUENTE: AUTORES-----	58
TABLA 5.1. VALORES DE RESISTENCIA Y CAPACITANCIA OBTENIDOS FUENTE: AUTORES-----	67

RESUMEN

Las sobretensiones de origen atmosférico constituyen una de las principales amenazas para el aislamiento externo de las líneas aéreas de distribución. El análisis de este fenómeno no se limita a la determinación de un valor puntual de flameo, sino que requiere el estudio del comportamiento del aislamiento frente a esfuerzos eléctricos de distinta magnitud y duración, lo cual se representa mediante curvas de soportabilidad voltaje–tiempo.

En este trabajo se realiza un análisis comparativo de diferentes modelos matemáticos utilizados para la obtención de curvas de soportabilidad del aislamiento externo en líneas aéreas de distribución. Dichos modelos, propuestos en referencias técnicas ampliamente utilizadas, permiten evaluar el desempeño del aislamiento frente a sobretensiones transitorias asociadas a descargas atmosféricas, considerando la influencia del tiempo de aplicación del esfuerzo eléctrico.

La metodología empleada combina el desarrollo de modelos analíticos y la implementación de herramientas computacionales. Las curvas de soportabilidad se obtienen y comparan mediante rutinas de programación en Python, mientras que el comportamiento transitorio de la línea ante la propagación de ondas viajeras se analiza mediante simulaciones electromagnéticas en ATPDraw. De forma complementaria, se evalúa el nivel de tensión correspondiente al inicio del flameo, sin que este constituya el objetivo principal del estudio.

Los resultados permiten identificar las diferencias y similitudes entre los modelos analizados, así como su impacto en la evaluación del desempeño del aislamiento. El análisis comparativo de las curvas de soportabilidad proporciona criterios técnicos útiles para estudios de coordinación del aislamiento en líneas aéreas de distribución.

Palabras clave: Sobretensiones atmosféricas; curvas de soportabilidad; aislamiento externo; líneas aéreas de distribución; ondas viajeras; coordinación del aislamiento.

ABSTRACT

Lightning-origin overvoltages represent a major threat to the external insulation of overhead distribution lines. The analysis of this phenomenon is not limited to the determination of a single flashover value, but rather requires the evaluation of the insulation behavior under electrical stresses of different magnitudes and durations, which is represented through voltage–time withstand curves.

This work presents a comparative analysis of different mathematical models used to obtain external insulation withstand curves for overhead distribution lines. These models, proposed in widely used technical references, allow the assessment of insulation performance under transient overvoltages associated with atmospheric discharges, taking into account the time-dependent nature of the electrical stress.

The adopted methodology combines analytical modeling and computational tools. The withstand curves are obtained and compared using Python-based routines, while the transient behavior of the line under traveling wave propagation is analyzed through electromagnetic transient simulations in ATPDraw. In addition, the voltage level corresponding to the initiation of flashover is evaluated as a complementary aspect, without being the main focus of the study.

The results enable the identification of differences and similarities among the analyzed models and their influence on insulation performance assessment. The comparative evaluation of voltage–time withstand curves provides useful technical criteria for insulation coordination studies in overhead distribution lines.

Keywords: Lightning overvoltages; withstand curves; external insulation; overhead distribution lines; traveling waves; insulation coordination.

ACRÓNIMOS

ANSI: Instituto Nacional Estadounidense de Normalización

IEEE: Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos.

IEC: Comisión Electrotécnica Internacional.

Vff. Max: Voltaje máximo fase-fase.

Nc.ff: Nivel de contaminación ambiental.

Nc.ff IEEE: Nivel de contaminación ambiental propuesto por IEEE.

Nc.ff IEC: Nivel de contaminación ambiental propuesto por IEC.

DESD: Densidad Equivalente de Depósito de Sal

Df: Distancia de fuga.

Df total req: Distancia de fuga total requerida.

Df Aplic: Distancia de fuga aplicada.

Ka: Factor de corrección por densidad relativa del aire.

Kll: Factor de corrección por lluvia.

KH: Factor de corrección por humedad ambiental.

Kamb: Factor de condiciones ambientales combinadas de ajuste.

MV: Mega Voltio

kV: Kilovoltio.

A: Amperios

us: Microsegundos

RC: Resistencia y capacitancia

F: Faradios

Ohm: Ohmios

Lc: Longitud de la cadena de aisladores (m).

h1, h2: Altitud referente a una ciudad (msnm)

msnm: Metros sobre el nivel del mar

I₀: Corriente pico de la descarga atmosférica

V_f: Voltaje de flameo

V_{imp}: Voltaje de impacto

CAPITULO I

1.1. TITULO

Análisis de la soportabilidad del aislamiento, en líneas aéreas de distribución frente a descargas tipo rayo, mediante códigos Python y simulaciones en ATPDraw

1.2. ANTECEDENTES

Las descargas atmosféricas generan sobretensiones transitorias de gran magnitud en líneas aéreas de distribución y transmisión, las cuales pueden propagarse a lo largo del sistema y comprometer el aislamiento externo de los conductores. Este tipo de sobretensiones se caracteriza por frentes de onda rápidos y elevados valores de tensión, capaces de provocar flameos y fallas en los aisladores si superan su capacidad dieléctrica [1], [2].

El análisis de los transitorios electromagnéticos permite evaluar la respuesta del sistema eléctrico ante estos eventos. En [1] se presenta el estudio de los parámetros asociados a transitorios en sistemas de potencia, lo que facilita la modelación del comportamiento de líneas y equipos frente a impulsos de origen atmosférico. De manera complementaria, en [2] se analiza la propagación de transitorios eléctricos en redes de potencia y su relación con la forma de onda del impulso y la probabilidad de flameo del aislamiento.

En sistemas de distribución eléctrica, el diseño del aislamiento debe considerar las condiciones reales de operación y la configuración de la red. En [3] se describen aspectos relacionados con líneas aéreas y su aislamiento, mientras que en [4] se establecen criterios para la coordinación del aislamiento, con el objetivo de asegurar que los niveles de soportabilidad sean compatibles con las sobretensiones esperadas por descargas atmosféricas.

El uso de herramientas de simulación se ha consolidado como una técnica clave para el estudio de estos fenómenos. En [5] se establecen las bases del análisis digital de transitorios electromagnéticos, permitiendo simular el comportamiento de redes eléctricas ante impulsos. Estudios más recientes han demostrado que, aun con medidas

de protección, las sobretensiones por descargas atmosféricas pueden alcanzar valores críticos para el aislamiento, resaltando la importancia de un análisis adecuado de la coordinación del aislamiento [6].

1.3. INTRODUCCIÓN

Las líneas aéreas de distribución y transmisión se encuentran expuestas de forma permanente a fenómenos atmosféricos, siendo las descargas eléctricas una de las principales causas de sobretensiones transitorias en los sistemas eléctricos de potencia. Estas sobretensiones pueden propagarse a lo largo de los conductores y generar esfuerzos dieléctricos elevados sobre el aislamiento, incrementando el riesgo de flameo y fallas que afectan la continuidad del servicio y la confiabilidad del sistema eléctrico.

El aislamiento externo cumple un papel fundamental en la protección de las líneas frente a este tipo de eventos, ya que debe soportar impulsos de alta magnitud y corta duración sin perder su capacidad dieléctrica. Sin embargo, el comportamiento del aislamiento frente a sobretensiones atmosféricas no depende únicamente del nivel de tensión, sino también de características como el frente de onda, el tiempo de duración del impulso y las condiciones del entorno. Por esta razón, resulta necesario analizar la respuesta del aislamiento bajo condiciones transitorias y no limitar el estudio a parámetros en régimen permanente.

En este contexto, las curvas de soportabilidad voltaje–tiempo se utilizan como una herramienta para representar el comportamiento del aislamiento frente a impulsos de sobretensión, permitiendo relacionar la magnitud del voltaje aplicado con el tiempo durante el cual actúa. Estas curvas facilitan la evaluación del riesgo de flameo y constituyen un elemento clave en los estudios de coordinación del aislamiento, especialmente cuando se analizan descargas de origen atmosférico.

El presente trabajo se centra en el análisis del comportamiento del aislamiento de líneas aéreas frente a sobretensiones por descargas atmosféricas, mediante el uso de modelos matemáticos y simulaciones digitales. A partir de estas herramientas, se busca evaluar la soportabilidad del aislamiento bajo distintos escenarios de impulso, aportando criterios

técnicos que contribuyan al diseño y evaluación de sistemas eléctricos más confiables frente a este tipo de fenómenos.

1.4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El análisis de la soportabilidad del aislamiento en líneas aéreas de electricidad ante descargas tipo rayo constituye un aspecto fundamental en la ingeniería eléctrica, ya que de ello depende la confiabilidad y continuidad del suministro de energía. Sin embargo, el estudio de estos fenómenos requiere del uso de herramientas computacionales especializadas, muchas de las cuales son de licencia comercial y representan un alto costo. Este costo elevado se convierte en una limitante para estudiantes, investigadores e ingenieros que no siempre pueden permitirse estas licencias, afectando directamente su capacidad para realizar estudios técnicos avanzados.

En la práctica tampoco hay muchas metodologías accesibles que guíen cómo usar herramientas de código abierto para el análisis de coordinación de aislamiento y la dificultad de evaluar de forma precisa la coordinación del aislamiento en líneas aéreas cuando se presentan descargas atmosféricas, siendo uno de los factores más frecuentes de falla en los sistemas eléctricos, cuando una descarga atmosférica impacta una línea de alta tensión, la sobretensión generada puede propagarse a lo largo de la línea y provocar interrupciones, así como producir daños directos en aisladores.

Por esta razón, se vuelve necesario desarrollar estrategias accesibles y metodologías alternativas que permitan analizar de manera confiable el comportamiento del aislamiento frente a descargas tipo rayo, sin depender de software de alto costo. Estas herramientas deberían facilitar el estudio técnico del fenómeno y fortalecer la formación práctica de futuros ingenieros.

1.5. JUSTIFICACIÓN

Es fundamental tener precisión en el estudio del nivel de aislamiento de los sistemas eléctricos para asegurar la correcta coordinación entre el aislamiento, las protecciones y los equipos de maniobra, lo que contribuye directamente en el desempeño del sistema y a la reducción de fallas por descargas atmosféricas.

El uso de herramientas abiertas como Python y ATPDraw permite analizar fenómenos transitorios sin depender de softwares con licencias comerciales de alto costo, permitiendo que más estudiantes e ingenieros puedan realizar estudios técnicos de manera independiente y con facilidad. Además, contar con herramientas accesibles facilita que el propio usuario pueda construir y ajustar sus modelos de simulación, lo que aporta una mayor comprensión del comportamiento del aislamiento frente a distintos escenarios. Este enfoque práctico no solo refuerza la parte teórica, sino que también permite desarrollar criterios más sólidos al momento de analizar, diseñar o verificar el desempeño de los sistemas eléctricos bajo condiciones reales de operación.

1.6. ALCANCE

El presente trabajo se enfoca en el análisis del comportamiento del aislamiento de líneas aéreas frente a sobretensiones de origen atmosférico, considerando escenarios de descargas tipo rayo y su efecto sobre la soportabilidad del aislamiento. El estudio se desarrolla a partir de modelos matemáticos y simulaciones digitales, con el fin de evaluar los niveles de tensión que se presentan durante eventos transitorios y compararlos con los límites de soportabilidad del aislamiento.

El análisis se limita a líneas aéreas de distribución, considerando configuraciones típicas y condiciones de operación representativas. Para la evaluación de las sobretensiones se emplean herramientas de simulación de transitorios electromagnéticos, sin incluir ensayos experimentales en laboratorio ni mediciones en campo.

Asimismo, el trabajo se centra en el estudio del aislamiento externo y su respuesta frente a impulsos de origen atmosférico, sin abordar en detalle aspectos mecánicos, térmicos o económicos de los componentes del sistema. Los resultados obtenidos se utilizan con fines de análisis técnico y comparación de curvas de soportabilidad, sin que se realice el

diseño detallado de sistemas de protección ni la implementación de soluciones constructivas específicas.

1.7. BENEFICIARIOS

Los beneficiarios del presente trabajo técnico se dividen en dos:

- La Universidad Politécnica Salesiana, al contar con un trabajo de titulación que fortalece la formación académica en el área de sistemas eléctricos de potencia, particularmente en el estudio del comportamiento del aislamiento eléctrico y la aplicación de herramientas computacionales como Python y ATPDraw para el análisis técnico. Este trabajo puede servir como material de referencia para futuros estudiantes en temas relacionados con sobretensiones y coordinación de aislamiento.
- Ingenieros y estudiantes del área eléctrica, quienes pueden utilizar el análisis comparativo entre los modelos IEEE, Hileman y basado en campo eléctrico como una guía para comprender las diferencias conceptuales y prácticas entre formulaciones empíricas y físicas. Asimismo, la validación de resultados mediante ATPDraw contribuye a reforzar la confiabilidad de los análisis realizados en entornos de simulación académica y profesional.

1.8. OBJETIVOS

1.8.1. OBJETIVO GENERAL

Analizar la capacidad de soportar esfuerzos eléctricos en los aisladores de líneas de distribución ante descargas atmosféricas, mediante simulaciones en ATPDraw y el desarrollo de códigos en Python, para evaluar el comportamiento del voltaje de flameo (flashover) verificando la validez de una metodología accesible y precisa.

1.8.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Modelar el aislador correspondiente a una línea aérea de distribución, tomando en cuenta sus propiedades geométricas y eléctricas para representar adecuadamente su comportamiento real.
- Simular la respuesta del aislador frente a descargas atmosféricas mediante el desarrollo de rutinas en Python que permitan analizar el efecto del impulso eléctrico sobre su aislamiento.
- Ejecutar la simulación del mismo fenómeno en el entorno ATPDraw con el fin de reproducir el efecto de las descargas tipo rayo y observar la respuesta dieléctrica del sistema.
- Comparar los resultados obtenidos de ambas simulaciones para evaluar la concordancia de los métodos y validar la confiabilidad del modelo desarrollado.

CAPITULO II

2.1. FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1.1. SOBRETENSIONES EN LÍNEAS AÉREAS DE DISTRIBUCIÓN

Las líneas aéreas de distribución eléctrica se encuentran expuestas a distintos tipos de sobretensiones transitorias que pueden afectar el desempeño del sistema de aislamiento y la continuidad del servicio. Entre estas, las sobretensiones de origen atmosférico son una de las principales causas de interrupciones en redes de distribución, debido a los elevados niveles de tensión inducidos y a los rápidos frentes de onda asociados a las descargas eléctricas naturales [7].

Las sobretensiones se definen como incrementos temporales del voltaje que superan el valor nominal de operación del sistema. En redes de distribución, estas pueden clasificarse en sobretensiones temporales, sobretensiones de maniobra y sobretensiones atmosféricas. En [8] se describen las características generales de estas sobretensiones y su influencia sobre los equipos y el aislamiento de los sistemas eléctricos, considerando tanto condiciones normales como anormales de operación.

Las sobretensiones temporales se presentan principalmente durante fallas a tierra o desequilibrios del sistema y tienen una duración relativamente prolongada. Por su parte, las sobretensiones de maniobra se originan por la operación de interruptores, reconectadores o seccionadores, presentando frentes más rápidos que las temporales, aunque con menores valores de pico que las atmosféricas.

Las sobretensiones atmosféricas constituyen la sollicitación más severa para el aislamiento externo de las líneas aéreas de distribución. Estas se caracterizan por tiempos de frente muy cortos y elevados valores de tensión, capaces de provocar el flameo del aislamiento si no se dispone de niveles adecuados de protección. En redes de distribución, que operan a menores niveles de tensión y presentan configuraciones más compactas, la probabilidad de flameo es mayor, por lo que el análisis del comportamiento del aislamiento frente a impulsos tipo rayo resulta fundamental para evaluar la confiabilidad del sistema [9].

2.1.2. DESCARGAS ATMOSFÉRICAS Y SU INTERACCIÓN CON LÍNEAS AÉREAS

El fenómeno conocido como descarga atmosférica es esencialmente una falla en el aislamiento del aire. Esta falla se da cuando el aire, que normalmente aísla a dos cuerpos con cargas opuestas, ya no puede contener la tensión, dando lugar a una corriente eléctrica de alto impacto (impulsiva) [10]. En sus primeras etapas, el aire actúa como aislante entre las cargas positivas y negativas de la nube y entre la nube y el suelo, reflejando el destello de rayo como se muestra en la figura 2.1.

En el contexto de líneas aéreas, representan una de las principales fuentes de sobretensiones capaces de superar la capacidad dieléctrica del sistema eléctrico, provocando interrupciones, daños y flameo en aisladores. Su comportamiento es rápido, de gran energía y difícil de predecir, lo que obliga a caracterizar adecuadamente su corriente y forma de onda.



Figura 2.1. Descargas atmosféricas

Fuente: Tomado de la página web Swiss Re Corporate Solutions [11].

2.1.3. COORDINACIÓN DEL AISLAMIENTO

La coordinación del aislamiento consiste en determinar niveles dieléctricos adecuados para que los equipos y líneas soporten las sobretensiones que puedan presentarse, tanto en operación normal como durante eventos extremos como descargas atmosféricas. Como se muestra en la figura 2.2, involucra el estudio de datos y parámetros de los aisladores

para determinar una buena gestión.

La gestión o coordinación aislante consiste, de forma más precisa, en establecer la magnitud del aislamiento necesaria para garantizar un nivel de fiabilidad predeterminado sin que los costos se eleven en exceso. En otras palabras, se busca alcanzar una incidencia o índice de fallos sensato [12].

La coordinación del aislamiento en sistemas eléctricos también considera la seguridad humana como un punto clave. Esto abarca la protección tanto del público como del personal de servicio. Por lo tanto, durante el diseño y operación, es imprescindible asegurarse de que los equipos e instalaciones se configuren bajo los estándares más estrictos de seguridad [13].

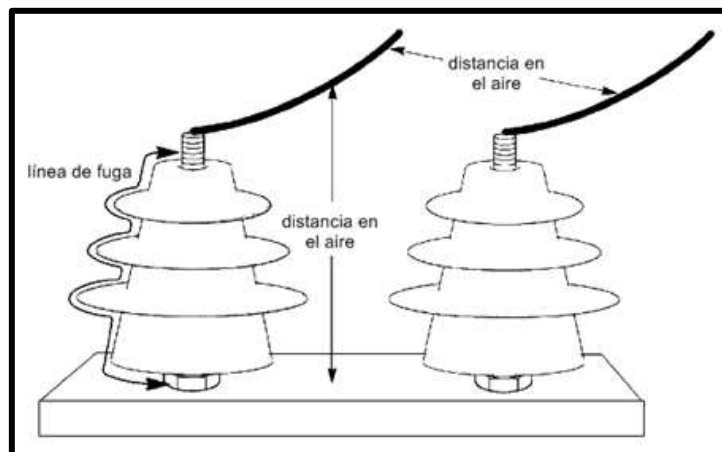


Figura 2.2. Parámetros de un aislador

Fuente: Tomado de la página web IMSE Ingeniería [14].

2.1.4. AISLADORES ELÉCTRICOS EN LÍNEAS AÉREAS

El aislador es un equipo importante y esencial en las líneas aéreas de transmisión y distribución. Se emplea en sistemas de energía al aire libre, por lo que los factores ambientales influyen considerablemente en su funcionamiento [15].

Los aisladores deben combinar resistencia mecánica, resistencia dieléctrica, durabilidad, y comportamiento fiable frente a descargas tipo rayo. Su desempeño influye directamente en la continuidad del servicio, ya que un fallo por flameo (flashover) puede producir una interrupción, un cortocircuito o daños en los equipos.

En [16] se menciona que los parámetros relacionados con la forma geométrica influyen en el comportamiento de los aisladores ante la contaminación, donde la distancia de fuga desempeña un papel fundamental. Agregar una mayor distancia de fuga es uno de los medios más eficaces para mejorar el rendimiento de los aisladores en las líneas de tensión.

Los materiales más utilizados en distribución son la porcelana, el vidrio templado y los poliméricos (silicona). Cada uno presenta ventajas específicas: la porcelana brinda estabilidad mecánica, el vidrio ofrece facilidad para revisar su estado, y los polímeros destacan por su capacidad para repeler el agua y menor peso. En condiciones de contaminación, los aisladores poliméricos suelen presentar mejor desempeño, pero su envejecimiento por radiación UV y descargas parciales debe ser considerado con mayor detalle.

En líneas de distribución es común emplear aisladores tipo suspensión de porcelana, como se ve en la figura 2.3, debido a su rigidez dieléctrica estable, resistencia mecánica y buen comportamiento frente a esfuerzos ambientales. Un ejemplo representativo es el aislador ANSI 52-1, utilizado como referencia en diversos estudios porque corresponde a un diseño estándar ampliamente usado en niveles de tensión de distribución.



Figura 2.3. Aisladores en sistema eléctrico

Fuente: Tomado de la página web SectorElectricidad [17].

2.1.5. TIPOS DE AISLADORES UTILIZADOS EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN

Los aisladores eléctricos cumplen una función fundamental en los sistemas de distribución de energía eléctrica, ya que proporcionan soporte mecánico a los conductores y garantizan el aislamiento eléctrico entre las partes energizadas y las estructuras conectadas a tierra. La correcta selección del tipo de aislador influye directamente en la confiabilidad del sistema, especialmente frente a solicitaciones transitorias como las descargas atmosféricas y las condiciones ambientales adversas [18].

De acuerdo con el material de fabricación y su configuración mecánica, los aisladores utilizados en líneas aéreas de distribución pueden clasificarse principalmente en aisladores de porcelana, vidrio templado y materiales poliméricos. Cada uno de estos tipos presenta características particulares en términos de comportamiento eléctrico, resistencia mecánica y desempeño frente a la contaminación, lo que condiciona su aplicación en distintos niveles de tensión y entornos de operación [19].

2.1.5.1. AISLADORES DE PORCELANA

Los aisladores de porcelana han sido ampliamente utilizados en sistemas de distribución y transmisión debido a su elevada resistencia mecánica, estabilidad térmica y comportamiento dieléctrico confiable. La estructura cerámica vitrificada de la porcelana proporciona una superficie relativamente lisa, como se ve en la figura 2.4, lo que contribuye a limitar la acumulación de contaminantes bajo condiciones ambientales normales [20].

Desde el punto de vista eléctrico, los aisladores de porcelana presentan un comportamiento predecible frente a sobretensiones de frecuencia industrial y de impulso tipo rayo, por lo que son utilizados con frecuencia como referencia en estudios de coordinación del aislamiento. No obstante, en ambientes con contaminación severa y alta humedad, la formación de películas conductoras sobre su superficie puede favorecer el desarrollo del arco superficial y el flameo del aislamiento [21].



Figura 2.4. Aisladores de porcelana

Fuente: Tomado de la página web Tronco Electric [22].

2.1.5.2. AISLADORES DE VIDRIO TEMPLADO

Los aisladores de vidrio templado se caracterizan por su alta resistencia mecánica y por la facilidad para identificar daños visibles, ya que la rotura del vidrio resulta evidente. Su comportamiento eléctrico es similar al de los aisladores de porcelana, presentando una adecuada rigidez dieléctrica y una respuesta estable frente a impulsos atmosféricos [23].

No obstante, una de sus principales limitaciones es la tendencia a acumular contaminantes en determinadas condiciones ambientales, lo que puede afectar su desempeño en zonas con altos niveles de polución o humedad.

Estos aisladores poseen una superficie lisa, como en la figura 2.5, que favorece el escurrimiento natural del agua durante eventos de lluvia, lo que puede contribuir a reducir la formación de trayectorias conductivas superficiales. Sin embargo, en determinadas condiciones ambientales pueden presentar acumulación de contaminantes, lo que afecta su desempeño en zonas con altos niveles de polución o humedad. En líneas aéreas, su uso es común en sistemas de media y alta tensión debido a su buen comportamiento mecánico y eléctrico [24].



Figura 2.5. Aisladores de vidrio

Fuente: Tomado de la página web Structuralia [25].

2.1.5.3. AISLADORES POLIMÉRICOS O COMPUESTOS

Los aisladores poliméricos, fabricados generalmente con un núcleo de fibra de vidrio y un recubrimiento externo de silicona, se han convertido en una alternativa ampliamente utilizada en sistemas eléctricos modernos. Su bajo peso y facilidad de instalación representan una ventaja significativa frente a los aisladores cerámicos, especialmente en líneas aéreas de distribución y transmisión [26].

En ambientes con altos niveles de contaminación, los aisladores poliméricos suelen mostrar un mejor comportamiento frente al flameo superficial en comparación con los aisladores cerámicos, ya que su superficie mantiene propiedades hidrofóbicas incluso en presencia de humedad. Sin embargo, su desempeño a largo plazo puede verse influenciado por procesos de envejecimiento, exposición prolongada a radiación ultravioleta y la acción de descargas parciales, factores que pueden degradar gradualmente el material. Por esta razón, su aplicación debe evaluarse considerando las condiciones ambientales y los requerimientos de confiabilidad del sistema.

En la figura 2.6 se presenta un ejemplo de aislador polimérico empleado en líneas aéreas de distribución y transmisión.



Figura 2.6. Aisladores poliméricos

Fuente: Tomado de la página web Holley EPSAC [27].

2.1.5.4. CONFIGURACIÓN DE AISLADORES TIPO SUSPENSIÓN

En sistemas de distribución, los aisladores tipo suspensión se emplean formando cadenas de uno o más discos, dependiendo del nivel de aislamiento requerido. Esta configuración permite ajustar la distancia de fuga y la distancia de arco de acuerdo con las exigencias eléctricas y ambientales del sistema.

El uso de cadenas de aisladores, como en el caso del aislador ANSI 52-1, facilita la adaptación del diseño a diferentes niveles de sobretensión y constituye una práctica común en estudios de coordinación del aislamiento, especialmente cuando se analizan fenómenos de flameo bajo impulsos tipo rayo.

2.1.6. AISLAMIENTO EXTERNO EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE MEDIA TENSIÓN

El aislamiento externo constituye uno de los elementos fundamentales en los sistemas eléctricos de distribución, ya que es el encargado de garantizar la separación eléctrica entre los conductores energizados y las estructuras puestas a tierra. En redes de media tensión, como las de 13,8 kV, el desempeño del aislamiento influye directamente en la confiabilidad del sistema, la continuidad del servicio y la seguridad de las instalaciones.

A diferencia del aislamiento interno, el aislamiento externo está expuesto de manera permanente a las condiciones ambientales, tales como la humedad, la contaminación, la lluvia, la radiación solar y las variaciones de presión atmosférica. Estas condiciones modifican el comportamiento dieléctrico del aire y de la superficie del aislador, lo que puede dar lugar a fenómenos de descarga eléctrica superficial o flameo, especialmente durante la ocurrencia de sobretensiones [28].

En líneas aéreas de distribución, los aisladores cumplen la función de soportar mecánicamente el conductor y, al mismo tiempo, proporcionar el nivel de aislamiento requerido frente a las distintas sollicitaciones eléctricas que se presentan durante la operación normal y bajo condiciones transitorias. Por esta razón, su selección no se basa únicamente en el nivel de tensión nominal, sino también en el análisis de los diferentes tipos de sobretensión que pueden afectar al sistema

2.1.7. ESTRUCTURAS EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN AÉREA

Las estructuras en los sistemas de distribución aérea cumplen un papel fundamental tanto desde el punto de vista mecánico como eléctrico. Su función principal es soportar los conductores, mantener las distancias de seguridad entre fases y con respecto a tierra, y garantizar la correcta ubicación de los aisladores que conforman el sistema de aislamiento externo.

En redes de distribución de media tensión, como las de 13,8 kV, las estructuras suelen estar constituidas por postes de hormigón, madera o acero, siendo los postes de hormigón los más utilizados debido a su elevada resistencia mecánica, durabilidad y bajo mantenimiento. Estas estructuras permiten la instalación de aisladores tipo suspensión o tipo pin, dependiendo de la configuración de la línea como se observa en la figura 2.7.



Figura 2.7. Estructura en sistema de distribución

Fuente: Tomado de la página web JOCA [29].

Desde el punto de vista eléctrico, la estructura influye directamente en el comportamiento del aislamiento, ya que define la altura efectiva del conductor respecto al suelo, la geometría del sistema y la ubicación del aislador. En el análisis de sobretensiones de origen atmosférico, la altura del poste constituye un parámetro clave, debido a que determina la exposición de la línea a descargas directas o inducidas.

Desde el punto de vista eléctrico, la estructura influye directamente en el comportamiento del aislamiento, ya que define la altura efectiva del conductor respecto al suelo, la geometría del sistema y la ubicación del aislador. En el análisis de sobretensiones de origen atmosférico, la altura del poste constituye un parámetro clave, debido a que determina el nivel de exposición de la línea a descargas directas o inducidas y condiciona las distancias de arco hacia tierra [3].

Generalmente, los postes de distribución presentan alturas nominales del orden de 12 m. Sin embargo, una porción de esta longitud, típicamente alrededor de 2 m, se encuentra empotrada en el suelo para garantizar la estabilidad mecánica de la estructura. En consecuencia, la altura efectiva eléctrica considerada en los estudios de aislamiento y sobretensiones es del orden de 10 m, ya que la sección empotrada no participa en los fenómenos eléctricos asociados a las descargas atmosféricas.

La correcta selección de la altura de la estructura y del tipo de aislador permite asegurar distancias adecuadas para evitar flameos hacia tierra y minimizar el riesgo de

interrupciones del servicio. Asimismo, la geometría de la estructura influye en la distribución del campo eléctrico alrededor del aislador, afectando el proceso de ionización del aire y la formación del arco superficial durante la ocurrencia de sobretensiones impulsivas.

Por lo tanto, un análisis del aislamiento externo no puede desligarse del estudio de las estructuras que conforman el sistema de distribución, ya que ambos elementos actúan de manera conjunta para garantizar la seguridad, confiabilidad y continuidad del suministro eléctrico.

2.1.8. COMPORTAMIENTO DEL AISLAMIENTO EXTERNO FRENTE A IMPULSOS ATMOSFÉRICOS

El aislamiento externo, representado principalmente por cadenas de aisladores, presenta un comportamiento dependiente tanto del nivel de tensión aplicada como del tiempo de duración del impulso. A diferencia del aislamiento interno, el proceso de ruptura del aislamiento externo está fuertemente influenciado por el medio circundante, especialmente el aire.

Durante la aplicación de un impulso atmosférico, el campo eléctrico generado puede provocar la ionización progresiva del aire, dando lugar al desarrollo de descargas parciales que, al alcanzar un nivel crítico, conducen al fenómeno de flameo. Este proceso no ocurre instantáneamente, sino que depende de la magnitud del voltaje y de la forma de la onda aplicada, lo que da origen al concepto de curvas voltaje-tiempo o curvas de soportabilidad del aislamiento [30].

2.1.8.1. IONIZACIÓN DEL AIRE Y RUPTURA DIELECTRICA

En condiciones normales, el aire actúa como un excelente aislante eléctrico. Sin embargo, cuando el campo eléctrico supera un valor crítico, las moléculas de aire comienzan a ionizarse, liberando electrones libres y generando iones positivos. Este proceso incrementa la conductividad del aire y reduce progresivamente su rigidez dieléctrica.

La ionización del aire no ocurre de manera instantánea ni uniforme. Inicialmente se

forman pequeñas descargas locales denominadas descargas corona, las cuales intensifican el campo eléctrico en regiones específicas, particularmente cerca de bordes, irregularidades geométricas y superficies contaminadas del aislador [31].

2.1.8.2. FORMACIÓN DEL LÍDER ELÉCTRICO

A medida que el campo eléctrico continúa incrementándose, las regiones ionizadas se conectan formando un canal parcialmente conductor conocido como líder. El líder es una descarga eléctrica precursora del arco completo y constituye una fase intermedia entre la ionización inicial y el flameo total.

En impulsos tipo rayo, el líder se desarrolla rápidamente a lo largo de la superficie del aislador o del espacio de aire adyacente, avanzando en dirección al electrodo opuesto.

2.1.8.3. DESARROLLO DEL ARCO SUPERFICIAL

Una vez que el líder conecta los extremos energizados, se establece un canal altamente conductor por el cual circula una corriente intensa, dando lugar al arco eléctrico como se ve en la figura 2.8. En aisladores externos, este arco se desarrolla generalmente sobre la superficie del aislador, siguiendo el camino de menor resistencia eléctrica.

El arco superficial está fuertemente influenciado por:

- La distancia de fuga del aislador
- La presencia de contaminación y humedad
- La geometría del perfil del aislador
- La distribución del campo eléctrico

Este tipo de descarga provoca una caída abrupta del voltaje soportado por el aislamiento y puede generar interrupciones del servicio o daños en los equipos.



Figura 2.8. Formación de arco eléctrico

Fuente: Tomado de la página web J Harlen Blog [32].

2.1.9. FLAMEO INTERNO Y FLAMEO EXTERNO

Es importante distinguir entre flameo interno y flameo externo, ya que ambos responden a mecanismos físicos diferentes:

- Flameo interno: ocurre dentro de un medio sólido o líquido (por ejemplo, dentro de un transformador). Está asociado a defectos internos, descargas parciales y envejecimiento del material.
- Flameo externo: ocurre en el aire, generalmente sobre la superficie del aislador. Está gobernado por fenómenos de ionización, formación de líderes y desarrollo del arco.

En líneas aéreas de distribución, el flameo externo es el mecanismo predominante de falla del aislamiento frente a descargas atmosféricas.

2.1.10. RAZÓN POR LA CUAL EL FLAMEO OCURRE PRIMERO EN LA SUPERFICIE

El flameo tiende a iniciarse en la superficie del aislador y no en el volumen del material debido a varias razones físicas:

1. Menor rigidez dieléctrica del aire en comparación con materiales sólidos como la porcelana.
2. Concentración del campo eléctrico en la superficie del aislador, especialmente en

presencia de contaminación o humedad.

3. Trayectoria preferencial a lo largo de la distancia de fuga, donde el camino eléctrico efectivo es mayor pero el medio es más susceptible a la ionización.

4. Efectos de borde y geometría, que intensifican localmente el campo eléctrico.

Por estas razones, antes de que el aislamiento sólido falle, el aire circundante entra en régimen de descarga, produciéndose el flameo externo.

2.1.11. INFLUENCIA DE LOS FACTORES AMBIENTALES EN EL AISLAMIENTO

El desempeño del aislamiento externo no depende únicamente de sus características geométricas y materiales, sino también de las condiciones ambientales en las que opera. Factores como la densidad del aire, la humedad, la contaminación superficial y la altitud influyen directamente en la rigidez dieléctrica del aislamiento.

En particular, la disminución de la densidad del aire con la altitud reduce el voltaje necesario para iniciar procesos de ionización, lo que incrementa la probabilidad de flameo ante la presencia de sobretensiones. Por esta razón, los modelos de soportabilidad del aislamiento incorporan factores de corrección que permiten ajustar los valores teóricos a las condiciones reales del sitio de instalación.

2.1.12. FACTORES AMBIENTALES Y DE ALTITUD

La altitud y el entorno ambiental modifican las propiedades dieléctricas del aire, reduciendo su rigidez con la disminución de la presión atmosférica. En regiones elevadas, el voltaje de flameo tiende a ser menor, lo que implica un mayor riesgo de flameo.

Los aisladores que operan bajo diversas condiciones adversas, como la presencia de agua, niebla, rocío y otros contaminantes, se ven afectados por estos factores, generando una intensificación del campo eléctrico que conduce a la actividad de flameo de aisladores [33].

Los factores ambientales permiten ajustar la tensión crítica de flameo (TCF) de un aislador con el fin de representar de forma más realista las condiciones de operación de una línea aérea. Los valores proporcionados por los fabricantes se encuentran referidos a condiciones atmosféricas estándar; por lo tanto, en estudios específicos es necesario aplicar factores de corrección adecuados al entorno de análisis.

En estudios referentes al aislamiento como en [34], el factor ambiental total puede expresarse como:

$$K_{amb} = K_a * K_{ll} * K_H$$

Donde:

K_{amb} : Factor de condiciones ambientales combinadas de ajuste.

K_a : Factor de corrección por densidad relativa del aire

K_{ll} : Factor de corrección por lluvia

K_H : Factor de corrección por humedad

2.1.12.1. FACTOR DE CORRECCIÓN POR DENSIDAD RELATIVA DEL AIRE (KA)

Este factor tiene como objetivo corregir la variación de la rigidez dieléctrica del aire debida principalmente a la altitud sobre el nivel del mar. A medida que la altitud aumenta, la densidad del aire disminuye, lo que reduce su capacidad de aislamiento eléctrico y facilita la ocurrencia del flameo.

Este factor es especialmente relevante en el análisis de sobretensiones de origen atmosférico, ya que el proceso de ionización del aire juega un papel determinante durante la propagación de la descarga. Por esta razón, K_a es el principal factor de corrección considerado en estudios de impacto directo de rayo y coordinación de aislamiento frente a sobretensiones rápidas.

2.1.12.2. FACTOR DE CORRECCIÓN POR LLUVIA (KLL)

El factor Kll toma en cuenta el efecto de la precipitación sobre el aislamiento, particularmente cuando la lluvia moja la superficie del aislador y modifica la distribución del campo eléctrico. Bajo estas condiciones, el riesgo de flameo puede incrementarse debido a la reducción de la distancia efectiva de aislamiento.

Este factor es utilizado principalmente en estudios que analizan el comportamiento del aislamiento bajo condiciones climáticas adversas, tales como lluvia intensa o combinaciones de lluvia y contaminación. En análisis específicos de sobretensiones por rayo, donde el evento ocurre en un intervalo muy corto de tiempo, la influencia directa de la lluvia suele despreciarse.

2.1.12.3. FACTOR DE CORRECCIÓN POR HUMEDAD AMBIENTAL (KH)

El factor KH representa la influencia de la humedad presente en el ambiente sobre el desempeño del aislamiento. Niveles elevados de humedad pueden favorecer la formación de películas conductoras sobre la superficie del aislador, reduciendo su resistencia al flameo superficial.

Este factor cobra importancia en análisis asociados a condiciones ambientales sostenidas, como operación en régimen, evaluación del aislamiento en zonas húmedas o estudios de confiabilidad a largo plazo. En el caso de fenómenos transitorios de muy corta duración, como las descargas atmosféricas, su efecto suele considerarse secundario.

2.1.12.4. CONSIDERACIÓN DE LA ALTITUD

La altitud sobre el nivel del mar afecta directamente la rigidez dieléctrica del aire debido a la disminución de la presión atmosférica. Ambas normas reconocen este fenómeno, pero lo abordan de manera diferente.

La IEC introduce factores de corrección bien definidos para la altitud, aplicables principalmente a tensiones de frecuencia industrial y de maniobra. Estos factores se calculan en función de la densidad relativa del aire y permiten ajustar el nivel de aislamiento requerido de forma gradual y continua conforme aumenta la altitud.

La IEEE también contempla la corrección por altitud, pero su aplicación es más directa y generalmente se limita a ciertos rangos de tensión. En el caso de sobretensiones de impulso tipo rayo, la IEEE suele considerar condiciones estándar hasta altitudes moderadas, lo que simplifica el análisis en aplicaciones de distribución.

2.1.13. PROPAGACIÓN DE ONDAS VIAJERAS EN LÍNEAS AÉREAS DE DISTRIBUCIÓN

Cuando una descarga atmosférica impacta directamente sobre un conductor de una línea aérea, o cuando se produce una descarga cercana al trazado de la línea, se genera una perturbación electromagnética de muy corta duración y elevada magnitud. Esta perturbación no se propaga instantáneamente a lo largo del sistema, sino que lo hace en forma de onda viajera, desplazándose a lo largo del conductor con una velocidad cercana a la de la luz.

Las ondas viajeras constituyen el mecanismo físico fundamental mediante el cual los sobrevoltajes transitorios se desplazan a través de líneas de transmisión y distribución. Su estudio resulta indispensable para comprender el comportamiento del aislamiento externo frente a descargas tipo rayo, especialmente en redes aéreas de media tensión, donde los niveles de aislamiento son comparativamente menores que en sistemas de alta tensión.

En el instante del impacto del rayo, la corriente asociada a la descarga se inyecta en el conductor, generando simultáneamente una onda de corriente y una onda de tensión que se propagan en ambos sentidos de la línea. La relación entre estas magnitudes depende de las características geométricas y eléctricas del conductor, y se encuentra gobernada por la impedancia característica de la línea.

Desde el punto de vista físico, la línea aérea puede modelarse como un medio distribuido, en el cual la energía electromagnética se desplaza a lo largo del conductor sin que exista, en un primer instante, influencia directa de las cargas conectadas en los extremos. Por esta razón, durante los primeros microsegundos posteriores a la descarga, el comportamiento del sistema está dominado casi exclusivamente por los parámetros propios de la línea.

Este fenómeno explica por qué, en estudios de sobretensiones atmosféricas, resulta

común analizar el aislamiento considerando intervalos de tiempo del orden de microsegundos, y por qué los modelos empleados en herramientas de simulación electromagnética transitoria representan explícitamente la propagación de ondas a lo largo de los conductores [2].

2.1.14. RELACIÓN ENTRE CORRIENTE DE RAYO Y SOBRETENSIÓN GENERADA

La magnitud del sobrevoltaje inducido sobre el conductor depende directamente de la corriente del rayo y de la impedancia característica de la línea. En un modelo simplificado, el valor inicial de la sobretensión generada puede aproximarse mediante la relación:

$$V_{imp} = \frac{Z_c \cdot I_p}{2}$$

Donde:

- V_{imp} : Es la sobretensión producida por la descarga.
- Z_c : Es la impedancia característica de la línea.
- I_p : Es la corriente asociada a la descarga atmosférica.

Esta relación constituye la base para la evaluación del esfuerzo dieléctrico al que se ve sometido el aislamiento inmediatamente después del impacto del rayo, y permite vincular los parámetros eléctricos de la línea con las características de la descarga atmosférica.

En el caso de líneas aéreas de distribución, los valores típicos de impedancia característica se encuentran en el rango de 300 a 500 Ω , lo que implica que corrientes de rayo de varios kiloamperios pueden generar sobretensiones del orden de cientos de kilovoltios, ampliamente superiores a los niveles nominales de operación del sistema.

2.1.15. IMPORTANCIA DE LAS ONDAS VIAJERAS EN LA COORDINACIÓN DEL AISLAMIENTO

El análisis basado en ondas viajeras permite evaluar si el aislamiento externo es capaz de soportar las sobretensiones transitorias sin que se produzca el flameo. En este contexto, resulta fundamental comparar la sobretensión generada por la descarga atmosférica con los niveles normalizados de aislamiento, tales como el Basic Insulation Level (BIL) y el Critical Flashover Voltage (CFO).

Asimismo, este enfoque justifica el uso de curvas voltaje–tiempo, las cuales representan la capacidad del aislamiento para soportar esfuerzos eléctricos de distinta duración y constituyen una herramienta clave en la coordinación del aislamiento frente a fenómenos transitorios de origen atmosférico [1].

2.1.16. VOLTAJE CRÍTICO DE FLAMEO (CRITICAL FLASHOVER VOLTAGE – CFO)

El voltaje crítico de flameo o flashover de aisladores exteriores causada por la contaminación o fenómenos transitorios, es una falla fundamental que compromete gravemente la operación segura y confiable de los sistemas de transmisión y distribución de energía [35].

La tensión de flameo por contaminación de los aisladores puede verse afectada por muchos factores, como la severidad de la contaminación, el tipo y el perfil del aislador, la presión atmosférica, la temperatura, etc. Esta tensión supera la capacidad del aislador, provocando daños en él como se ve en la figura 2.9.

En la práctica, el voltaje de flameo no se obtiene únicamente mediante ensayos; también existen varias fórmulas y modelos que permiten estimarlo según las condiciones del aislador y del entorno. Algunos de estos modelos se enfocan en la relación entre el voltaje de flameo y el tiempo de frente del impulso, lo que ayuda a caracterizar el comportamiento del aislador frente a sobretensiones rápidas, como las generadas por un rayo.

Otros modelos consideran factores como la contaminación, la humedad o parámetros

relacionados con el aislador, como información sobre el diseño, las propiedades del material, la conductividad, el espesor, entre otros factores. Se han realizado numerosas investigaciones para predecir el voltaje de flameo tanto en aisladores cerámicos como no cerámicos. También se han utilizado modelos de regresión y de simulación para la predicción del arco eléctrico a partir de la información de resistencia superficial. Asimismo, se han empleado armónicos para construir un modelo de predicción del arco eléctrico [36].

En general, cada aproximación busca capturar un aspecto particular del fenómeno, por lo que es común utilizar más de un modelo para obtener una estimación más realista del desempeño del aislador frente a descargas atmosféricas.



Figura 2.9. Flashover de aislador

Fuente: Tomado de la página web Volcanoes [37].

2.1.17. CURVAS DE SOPORTABILIDAD DEL AISLAMIENTO

Las curvas de soportabilidad del aislamiento representan la relación entre el nivel de tensión aplicado y el tiempo durante el cual el aislamiento es capaz de soportarla sin que se produzca el flameo. Estas curvas permiten describir el comportamiento del aislamiento frente a sobretensiones transitorias, considerando que la probabilidad de falla no depende únicamente del valor máximo de la tensión, sino también de la duración del esfuerzo eléctrico.

En el caso de líneas aéreas, las curvas de soportabilidad se obtienen a partir de modelos empíricos y expresiones matemáticas desarrolladas a partir de ensayos experimentales, y

han sido adoptadas por normas y referencias técnicas ampliamente utilizadas en estudios de coordinación del aislamiento. Dichas curvas constituyen una herramienta esencial para evaluar el desempeño del aislamiento frente a impulsos de maniobra y descargas atmosféricas [2].

2.1.18. IMPORTANCIA DEL MODELADO VOLTAJE–TIEMPO EN ESTUDIOS DE COORDINACIÓN DEL AISLAMIENTO

El análisis voltaje–tiempo constituye una herramienta fundamental en los estudios de coordinación del aislamiento, ya que permite evaluar de manera conjunta la severidad de las sobretensiones y la capacidad del aislamiento para soportarlas. Mediante la comparación entre la forma de onda del impulso aplicado y la curva de soportabilidad del aislamiento, es posible identificar las condiciones bajo las cuales se produce el flameo.

Este enfoque resulta especialmente útil para el análisis de sobretensiones atmosféricas, debido a la naturaleza transitoria y no uniforme de estos fenómenos. El uso de modelos matemáticos voltaje–tiempo reconocidos por normas internacionales permite obtener resultados consistentes y comparables, facilitando la evaluación del desempeño del aislamiento y la toma de decisiones en el diseño del sistema.

2.1.19. PYTHON

Python es un lenguaje de programación de propósito general que se caracteriza por ser fácil de leer, flexible y con una gran cantidad de herramientas científicas. Aunque empezó como un lenguaje pensado para automatizar tareas sencillas, hoy es una plataforma completa para ingeniería, análisis de datos, simulación y modelado.

Es sencillo, gratuito y de código abierto. Además, es muy potente y cuenta con una comunidad activa que contribuye con numerosos módulos, paquetes y bibliotecas, capaces de resolver una amplia gama de problemas en diversas disciplinas [38].

Hoy se ha convertido en una plataforma completa para ingeniería, análisis de datos, simulación y modelado. Una de las razones por las que se usa tanto en el área técnica es por su amplia variedad de bibliotecas, como NumPy, SciPy, Pandas o Matplotlib, que

permiten desde cálculos numéricos hasta visualización de señales eléctricas o implementación de ecuaciones diferenciales.

2.1.20. ATPDRAW

ATPDraw es un preprocesador de la versión ATP del Programa de Transitorios Electromagnéticos (EMTP) para sistemas operativos Windows. ATPDraw forma parte de EMTP [39]. El software destaca por sus numerosas ventajas y su amplio campo de aplicación. Permite a las empresas de distribución eléctrica elaborar planes, realizar mantenimiento, implementar mejoras en la red de distribución, llevar a cabo operaciones y automatización. Al ser un software libre, ATPDraw ha ganado gran popularidad. Su sitio web oficial de descarga ya ha superado los 655 000 accesos [40].

ATPDraw facilita la configuración de parámetros como se muestra en la figura 2.10, que, en un archivo texto, serían complejos de ajustar manualmente. Por ejemplo, seleccionar el modelo de línea o la geometría de una línea aérea, definir la forma de onda de la descarga o ajustar los tiempos de disparo. El software genera automáticamente el archivo de entrada (.ATP) a partir del diagrama diseñado por el usuario, lo que reduce errores de sintaxis y acelera el desarrollo de cada escenario de simulación.



Figura 2.10. Ajuste de parámetros en ATPDraw

Fuente: Tomado de la página web ATPDraw [41].

Desde el punto de vista de la ingeniería eléctrica, ATPDraw constituye una herramienta fundamental para el análisis de fenómenos transitorios electromagnéticos que ocurren en

sistemas de potencia. Entre estos fenómenos se incluyen las sobretensiones producidas por descargas atmosféricas, las maniobras de conmutación, los cortocircuitos y las oscilaciones transitorias de tensión y corriente, los cuales pueden comprometer la integridad del aislamiento y la continuidad del servicio eléctrico.

En estudios de aislamiento externo, ATPDraw permite modelar de forma detallada el comportamiento del sistema ante impulsos tipo rayo, representando tanto la fuente de la sobretensión como los elementos que intervienen en su propagación, tales como líneas aéreas, estructuras, aisladores y elementos de puesta a tierra. Esto posibilita evaluar la tensión aplicada sobre el aislador y compararla con su capacidad de soportabilidad, permitiendo identificar condiciones de flameo o margen de seguridad.

CAPITULO III

3.1. ANÁLISIS DEL AISLAMIENTO REQUERIDO

3.1.1. FACTORES AMBIENTALES: AIRE, LLUVIA Y HUMEDAD

3.1.1.1. FACTOR DE CORRECCIÓN POR DENSIDAD RELATIVA DEL AIRE (KA)

Este factor indica el impacto de la altitud sobre el nivel del mar, incorporando el efecto de la presión atmosférica y la temperatura ambiente en el lugar donde opera la línea. En [34] se puede distinguir La ecuación para determinar este factor, siendo la siguiente:

$$Ka = (1.02) * e^{\frac{-m(h-1000)}{8150}}$$

Donde:

e : Número de Euler = 2,71828

Para impulsos tipo rayo, $m = 1$

h : Altitud (msnm)

Condición especial:

- Para $h < 1000$ msnm $\rightarrow Ka = 1$

Se utilizarán como referencia dos ciudades del Ecuador con condiciones ambientales distintas. Por un lado, se considera la ciudad de Guayaquil, ubicada a aproximadamente 10 msnm, representativa de una zona costera. Por otro lado, se analiza la ciudad de Cuenca, situada a cerca de 2500 msnm, representativa de una región de altura, con el fin de comparar el comportamiento del aislamiento bajo diferentes condiciones de altitud.

Para $h = 10$ msnm:

$$Ka = (1.02) * e^{\frac{-1(10-1000)}{8150}} = 1$$

Para $h = 2500$ msnm:

$$K_a = (1.02) * e^{\frac{-1(2500-1000)}{8150}} = 0.8486$$

3.1.1.2. FACTOR DE CORRECCIÓN POR LLUVIA (KLL) Y HUMEDAD AMBIENTAL (KH)

En el desarrollo del análisis de sobretensiones por descargas atmosféricas, los factores de corrección por humedad ambiental y por lluvia se consideran unitarios, es decir, $K_{ll} = 1$ y $K_H = 1$. Dado el carácter transitorio y de corta duración de este tipo de sobretensiones, la influencia de la humedad y la precipitación sobre el proceso de flameo instantáneo resulta poco significativa, por lo que el ajuste ambiental se limita al factor de densidad relativa del aire.

3.1.1.3. CONDICIONES ESTÁNDAR

Las condiciones atmosféricas estándar representan un escenario de referencia en el cual no se evalúa la influencia de factores ambientales sobre el comportamiento del aislamiento. En consecuencia, no se aplican correcciones por densidad del aire, humedad o lluvia, adoptándose valores unitarios para todos los factores de corrección ambiental, lo que en este caso puede ser igual a los valores de $h < 1000$ msnm en cuanto al análisis de descargas atmosféricas.

Resumen de resultados de factores ambientales

H msnm	Ka	Kll	KH
10	1	1	1
2500	0.8486	1	1

Tabla 3.1. Factores ambientales

Fuente: Autores

Para $h_1 = 10$ msnm prácticamente se mantiene como estándar y no implicaría un cambio en las curvas de soportabilidad, mientras que para $h_2 = 2500$ msnm si habría un cambio, dado que si factor de K_a es distinto de uno.

3.1.2. FACTORES DE CONTAMINACIÓN

El factor de contaminación ambiental hace referencia a la cantidad de impurezas presentes en el ambiente donde opera una línea de transmisión. Estas impurezas se cuantifican mediante un indicador denominado densidad equivalente de sal depositada (DESD), expresado en mg/cm².

Las normas IEC e IEEE definen cuatro niveles de contaminación, estableciendo una relación entre el nivel de DESD y la distancia mínima por kV que debe tener un aislador para evitar el efecto de flashover superficial.

Nivel de contaminación	Dist. mín/fuga (mm/kV)		Cloruro de sodio – DESD (mg/cm ²)	
	IEC	IEEE	IEC	IEEE
Ligera	16	27.7	0.03 a 0.06	0.03 a 0.06
Media	20	34.6	0.10 a 0.20	0.06 a 0.10
Fuerte	25	43.3	0.30 a 0.40	> a 0.10
Muy fuerte	31	53.7		

Tabla 3.2. Factores de contaminación

Referencia: IEC TS 60815-2, IEEE 1313.2-1999 **Adaptación:** Autores

3.1.3. AISLAMIENTO PARA UNA LÍNEA AÉREA DE 13,8 KV

El nivel de aislamiento de una estructura empleada en líneas de distribución, en este caso para un sistema de 13,8 kV, depende directamente del tipo de aisladores seleccionados. Estos deben asegurar que no exista circulación de corriente desde el conductor de fase hacia tierra, por lo que deben ser capaces de soportar diferentes niveles de tensión que se presentan durante la operación del sistema.

Entre los voltajes que los aisladores deben resistir se encuentran:

- El voltaje nominal de operación
- Los sobrevoltajes de frecuencia industrial en condiciones secas
- Los sobrevoltajes de frecuencia industrial en condiciones húmedas
- Los sobrevoltajes producidos por maniobras, tanto en seco como en húmedo

-Los sobrevoltajes ocasionados por descargas atmosféricas

Los fabricantes proporcionan esta información a través de sus catálogos técnicos, donde se detallan las características eléctricas y mecánicas de los aisladores. De estas características, se seleccionan aquellas que resultan necesarias para el desarrollo del presente análisis.

- Tipo y Clase (Normativa)
- Voltaje máximo de operación nominal
- Tipo de material (porcelana - vidrio - polímero)
- Altura del aislador (Spacing)
- Diámetro del aislador
- Distancia de arco
- Distancia de fuga (Creepage)
- Flameo de baja frecuencia: Seco (Dry) – Húmedo (Wet)
- Flameo crítico al impulso: Rayos positivos – Rayos negativos

Para garantizar un desempeño adecuado del aislamiento en una línea de 13,8 kV, es fundamental considerar las características físicas del aislador, entre las cuales destaca la distancia de fuga. Este parámetro representa la longitud del camino superficial entre los puntos energizados y tierra, y cumple un papel clave importante para prevenir el flameo o flashover de aisladores, especialmente en presencia de contaminación ambiental y humedad.

Una distancia de fuga adecuada permite mejorar el comportamiento del aislamiento externo, disminuyendo la probabilidad de descargas superficiales y contribuyendo a la confiabilidad de la línea. Por esta razón, su correcta selección resulta indispensable como punto de partida en el análisis del aislamiento, ya que influye directamente en la capacidad del aislador para operar de forma segura bajo condiciones de servicio reales.

3.1.4. DISTANCIA DE FUGA REQUERIDA

La distancia de fuga requerida para un nivel de tensión de 13,8 kV corresponde a la longitud superficial mínima del aislador necesaria para prevenir la ocurrencia de flameos causados por la presencia de contaminación ambiental.

Para determinar la distancia de fuga mínima del aislamiento en una línea a 13,8 kV, las normas IEC e IEEE recomiendan ecuaciones para hallar la distancia necesaria, las cuales consideran las condiciones ambientales y el nivel de contaminación del entorno para garantizar un desempeño adecuado del sistema de aislamiento.

Norma: IEEE - STD 1313.2 - 1999

$$Df \text{ total req.} = \frac{V_{ff.max} * N_{c. ff}}{\sqrt{3} * K_a}$$

Donde:

Df total req: Distancia de fuga total requerida (mm)

Vff. Max: Voltaje máximo fase-fase

Nc.ff: Nivel de contaminación ambiental (IEEE)

Ka: Factor de densidad relativa del aire

Norma: - IEC - 60071.2-2018

$$Df \text{ total req.} = \frac{V_{ff.max} * N_{c. ff}}{\sqrt{K_a}}$$

Donde:

Df total req: Distancia de fuga total requerida (mm)

Vff. Max = Voltaje máximo fase-fase

Nc.ff = Nivel de contaminación ambiental (IEC)

K_a = Factor de corrección por densidad relativa del aire

Para una línea de 13.8 KV, la IEEE establece un voltaje máximo de 15 KV. Para Guayaquil con $h_1 = 10$ msnm, y Cuenca con $h_2 = 2500$ msnm se utilizará como referencia un nivel de contaminación fuerte, establecido por cada norma.

Nc.ff IEEE = 43.3 mm/kV (Alto).

Nc.ff IEC = 25 mm/kV (Alto).

Distancia de fuga total requerida – Norma IEEE:

Para $h = 10$ msnm:

$$Df. total req = \frac{15 KV * 43.3 mm/kV}{\sqrt{3} * 1} = 375 mm$$

Para $h = 2500$ msnm:

$$Df. total req = \frac{15 KV * 43.3 mm/kV}{\sqrt{3} * 0.8486} = 407 mm$$

Distancia de fuga total requerida – Norma IEC:

Para $h = 10$ msnm:

$$Df. total req = \frac{15 KV * 25 mm/kV}{\sqrt{1}} = 375 mm$$

Para $h = 2500$ msnm:

$$Df. total req = \frac{15 KV * 25 mm/kV}{\sqrt{0.8486}} = 407 mm$$

De acuerdo a las ecuaciones, para una línea de 13.8 KV, se requieren los siguientes valores de distancia de fuga como mínimo para una buena operación:

Para $h = 10$ msnm: 375 mm

Para $h = 2500$ msnm: 407 mm

Con el fin de incorporar un margen de seguridad en el diseño del aislamiento, se aplica un incremento del 10 % sobre la distancia de fuga requerida. Este margen adicional permite compensar posibles variaciones en las condiciones reales de operación que no siempre pueden ser representadas con exactitud en el cálculo teórico, tales como tolerancias de fabricación, envejecimiento del aislador, contaminación superficial y efectos ambientales locales.

De esta manera, la distancia de fuga aplicada garantiza un nivel de protección más conservador y confiable, especialmente ante condiciones transitorias asociadas a descargas atmosféricas.

$D_f \text{ Aplic (h = 10 msnm)} = 1.10 * D_f, \text{ requerida}$

$D_f \text{ Aplic (h = 10 msnm)} = 1.10 * 375 = 412.5 \text{ mm}$

$D_f \text{ Aplic (h = 2500 msnm)} = 1.10 * D_f, \text{ requerida}$

$D_f \text{ Aplic (h = 2500 msnm)} = 1.10 * 407 = 447.7 \text{ mm}$

Resumen de distancia de fuga calculada

Nivel de contaminación: Fuerte			
H (msnm)	Distancia de fuga requerida (mm)		Distancia de fuga aplicada (mm)
	IEC	IEEE	
10	375	375	412.5
2500	407	407	447.7

Tabla 3.3. Valores de distancia de fuga calculadas

Fuente: Autores

3.1.5. SELECCIÓN DE AISLADOR

Con base en la información proporcionada por catálogos técnicos normalizados, se selecciona el tipo de aislador que mejor se ajusta a los requerimientos del estudio. En la Tabla 4 se presentan las principales características geométricas y eléctricas de los aisladores considerados.

Clase	Unidad	52-1	52-2	52-2	52-3	52-3
Altura (h)	mm	140	146	146	146	146
Diámetro (d)	mm	160	200	200	255	255
Distancia de fuga	mm	178	210	210	292	432
Flameo de baja frecuencia – Seco	kV	60	65	65	80	80
Flameo de baja frecuencia – Húmedo	kV	30	35	35	50	50
Flameo crítico al impulso – Positivo	kV	100	115	115	125	125
Flameo crítico al impulso – Negativo	kV	100	115	115	130	130
Normativa	ANSI C29.2					

Tabla 3.4. Aisladores tipo disco de porcelana
Fuente: Catálogo Dalian Hivolt Power System Co., Ltd.

Para una línea de 13.8 KV, se utiliza un aislador de suspensión tipo disco ANSI 52-1 de porcelana, comúnmente usado en líneas de distribución.

Distancia de fuga aislador = 178 mm

Norma IEEE: Df Aplicada / Df Aislador

Para h = 10 msnm

Número de discos = $412.5 \text{ mm} / 178 \text{ mm} = 2.31$

Para h = 2500 msnm

Número de discos = $447.7 \text{ mm} / 178 \text{ mm} = 2.51$

Resumen de cantidad de discos:

Aislador ANSI 52-1	
H (msnm)	Número de discos
10	3
2500	3

Tabla 3.5. Cantidad de discos necesarios

Fuente: Autores

En base a la ecuación recomendada por la norma IEEE, se establece para ambas altitudes una cantidad de 3 discos con un nivel de contaminación alto, por lo tanto, se forma una cadena de 3 discos de aisladores ANSI 52-1.

3.1.6. CADENA DE 3 AISLADORES TIPO DISCO ANSI 52-1

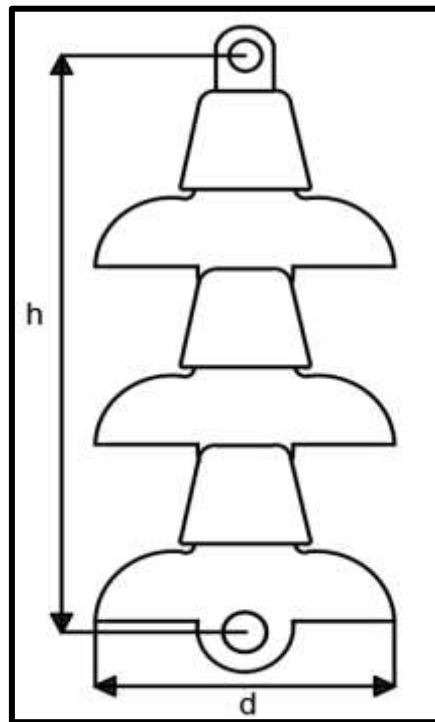


Figura 3.1. Cadena de tres aisladores

Referencia: Catálogo Dalian Hivolt Power System Co., Ltd.**Adaptación:** Autores

Las características que presenta una cadena de 3 aisladores ANSI 52-1, como en la figura 3.1, son las siguientes:

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

Distancia de fuga = 360 mm

Diámetro del aislador (d) = 160 mm

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

Altura del aislador (h) = 420 mm - 0,42 m

Material: Porcelana

Resistividad = 7×10^{12} (Ohm * m)

Permitividad relativa = 6

Flameo de baja frecuencia:

- Seco (Dry): 175
- Húmedo (Wet): 80

Flameo crítico al impulso

- Rayos positivo (+): 300
- Rayos negativo (-): 275

CAPITULO IV

4.1. ANÁLISIS DE CURVAS DE SOPORTABILIDAD DEL AISLAMIENTO FRENTE A DESCARGAS TIPO RAYO MEDIANTE CÓDIGOS PYTHON

Una vez definido el nivel de aislamiento requerido desde el punto de vista geométrico y ambiental, el siguiente paso consiste en evaluar su comportamiento frente a sobretensiones de origen atmosférico. Las descargas tipo rayo se caracterizan por presentar elevados niveles de tensión y tiempos de actuación extremadamente reducidos, por lo que su análisis no puede limitarse a un valor único de tensión crítica. En su lugar, resulta necesario considerar la relación entre el nivel de voltaje aplicado y el tiempo durante el cual actúa la sobretensión.

Para este propósito se emplean las denominadas curvas de soportabilidad voltaje–tiempo, las cuales permiten representar, de forma gráfica y analítica, la capacidad del aislamiento para soportar impulsos de rayo y con ello precisar si ocurrirá flameo en aisladores. Estas curvas constituyen una herramienta fundamental en el estudio del aislamiento externo, ya que permiten evaluar el desempeño del sistema en el rango de tiempos característico de las descargas atmosféricas y facilitan la comparación entre distintos criterios de diseño.

En el presente capítulo se presentan y comparan diversas expresiones matemáticas utilizadas para la obtención de curvas de soportabilidad, las cuales han sido propuestas tanto en la literatura técnica especializada como en normas de referencia ampliamente aceptadas. En particular, se analizan el modelo recomendado por el IEEE, el modelo empírico propuesto por Hileman y un modelo físico–empírico basado en el campo eléctrico crítico del aire.

La comparación entre estas formulaciones se realiza mediante su implementación en códigos desarrollados en Python, lo que permite evaluar de manera sistemática el grado de severidad y el comportamiento relativo de cada modelo bajo condiciones equivalentes. Este enfoque facilita la identificación de diferencias en los niveles de voltaje de flameo estimados y proporciona una base técnica para su posterior análisis e interpretación.

4.2. MODELO IEEE

El modelo propuesto por la IEEE describe de manera empírica la relación existente entre el voltaje de flameo y el tiempo en el cual se produce la descarga externa sobre un aislador o una cadena de aisladores, cuando estos son sometidos a sobretensiones de origen atmosférico. Esta formulación fue desarrollada a partir de resultados experimentales obtenidos en ensayos de laboratorio y en configuraciones representativas de líneas aéreas, lo que le otorga un carácter práctico para su aplicación en estudios de coordinación de aislamiento.

Una de las principales características de este modelo es que permite estimar el comportamiento del aislamiento frente a impulsos tipo rayo sin requerir parámetros específicos del material del aislador, basándose principalmente en la longitud efectiva de la cadena y en la dependencia temporal del fenómeno. Por esta razón, el modelo IEEE es ampliamente utilizado como referencia inicial en el análisis del desempeño dieléctrico de aisladores exteriores, especialmente en sistemas de distribución y transmisión aérea como se ve en [42], mediante la siguiente expresión:

$$V_f = \left(400 + \frac{710}{t^{0.75}} \right) * Lc$$

Donde:

Vf: Voltaje de flameo correspondiente al tiempo t (kV).

Lc: Longitud de la cadena de aisladores (m).

t: Tiempo (μ s).

Para un disco ANSI 52-1:

$$Lc = 0.14 \text{ (m)}$$

Para una cadena de 3 discos ANSI 52-1:

$$Lc = 0.42 \text{ (m)}$$

Para h1: 10 msnm

$K_a = 1$

$$V_f = \left(400 + \frac{710}{t^{0.75}}\right) * 0.42 * 1$$

Para h2: 2500 msnm

$K_a = 0.8486$

$$V_f = \left(400 + \frac{710}{t^{0.75}}\right) * 0.42 * 0.8486$$

Alcance y limitaciones

Este modelo no considera explícitamente el material del aislador ni factores ambientales, por lo que se utiliza principalmente como una herramienta de referencia o comparación preliminar en estudios de coordinación de aislamiento.

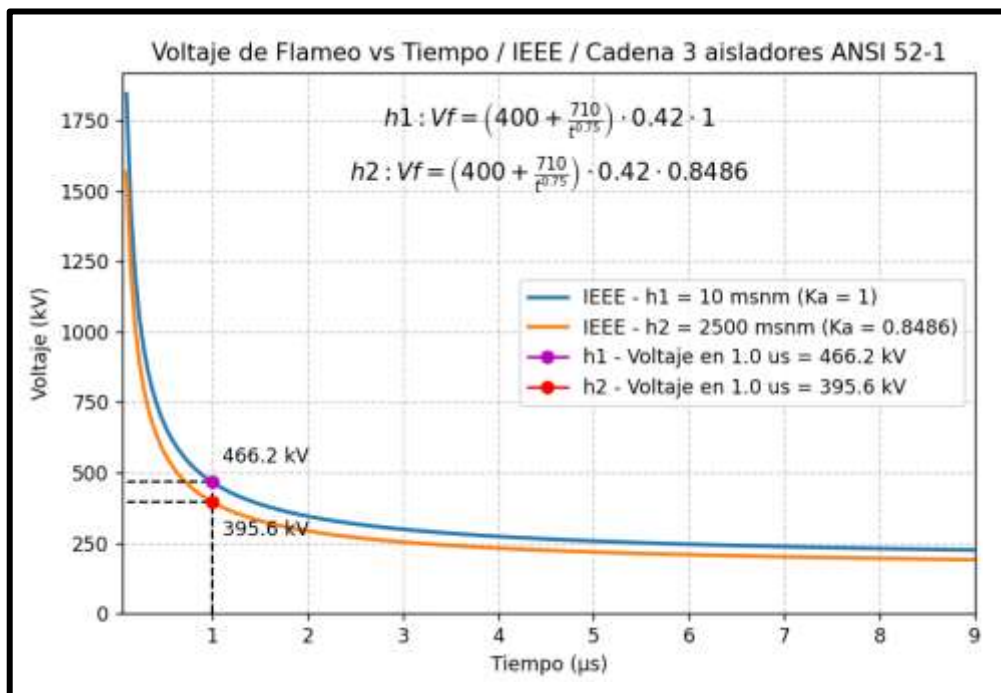


Figura 4.1. Curva IEEE mediante Python

Fuente: Autores

En la figura 4.1. se muestra la curva voltaje–tiempo obtenido a partir del modelo propuesto por el IEEE para una cadena de tres aisladores tipo ANSI 52-1, evaluada tanto bajo condiciones estándar como considerando la corrección por factores ambientales. Se observa que el voltaje presenta una tendencia decreciente conforme aumenta el tiempo de aplicación del impulso, lo cual pone de manifiesto la relación inversa existente entre el nivel de tensión y la duración del esfuerzo dieléctrico aplicado al aislamiento.

Adicionalmente, la curva que incorpora la corrección ambiental exhibe valores de voltaje de flameo inferiores en comparación con la curva correspondiente a condiciones estándar. Este comportamiento refleja la disminución de la rigidez dieléctrica del aislamiento asociada a las condiciones reales del sitio de estudio, tales como la altitud y el entorno atmosférico. En este sentido, el modelo IEEE permite representar de manera clara la influencia de las condiciones ambientales sobre la capacidad de soportabilidad del aislamiento frente a sobretensiones de origen atmosférico.

4.3. MODELO DE HILEMAN

El modelo propuesto por Hileman establece una relación empírica entre el voltaje de flameo y el tiempo en el cual se produce la descarga, tomando como parámetro fundamental el voltaje crítico de flameo al 50 % bajo impulso atmosférico positivo, denotado como U50. Este parámetro representa el nivel de tensión para el cual existe una probabilidad del 50 % de ocurrencia del flameo o flashover del aislador, y se obtiene generalmente a partir de ensayos experimentales normalizados.

A diferencia de otros modelos puramente empíricos, la formulación de Hileman permite incorporar directamente información experimental previa correspondiente al aislador o a la cadena de aisladores analizada, lo que proporciona una estimación más representativa del nivel absoluto de soportabilidad del aislamiento. En consecuencia, este modelo resulta especialmente útil para estudios comparativos y evaluaciones técnicas donde se dispone de datos de ensayo como se refleja en [43], ya que facilita una aproximación realista del comportamiento del aislamiento frente a impulsos atmosféricos y se ve reflejada en la siguiente ecuación:

$$V_f = U50 \left(0.58 + \frac{1.39}{\sqrt{t}} \right)$$

Donde:

V(t): Voltaje de flameo en función del tiempo (kV).

U50%: Voltaje de flameo al 50 % de probabilidad bajo impulso atmosférico positivo 1.2/50 μ s (kV).

t: Tiempo al flameo (μ s).

El valor de U50 se toma de los datos normalizados reportados en la norma ANSI C29.1 para cadenas de aisladores tipo cap-and-pin ANSI 52-1. Estos valores se obtienen a partir de ensayos de impulso atmosférico realizados bajo condiciones controladas y de acuerdo con procedimientos estandarizados, por lo que representan el nivel medio de flameo del aislamiento. Dado que no se dispone de ensayos experimentales propios, el uso de esta información publicada resulta adecuado y coherente con la práctica habitual en estudios de soportabilidad de aislamiento, tiene $U50 = 300$ kV.

Para h1: 10 msnm

$K_a = 1$

$$V_f = 300 \left(0.58 + \frac{1.39}{\sqrt{t}} \right) * 1$$

Para h2: 2500 msnm

$K_a = 0.8486$

$$V_f = 300 \left(0.58 + \frac{1.39}{\sqrt{t}} \right) * 0.8486$$

Alcance y limitaciones

El modelo requiere un valor confiable de U50, el cual puede obtenerse mediante ensayos de laboratorio o a partir de valores típicos reportados en la literatura técnica. En ausencia de ensayos propios, su uso es aceptable siempre que se justifique la procedencia del valor adoptado.

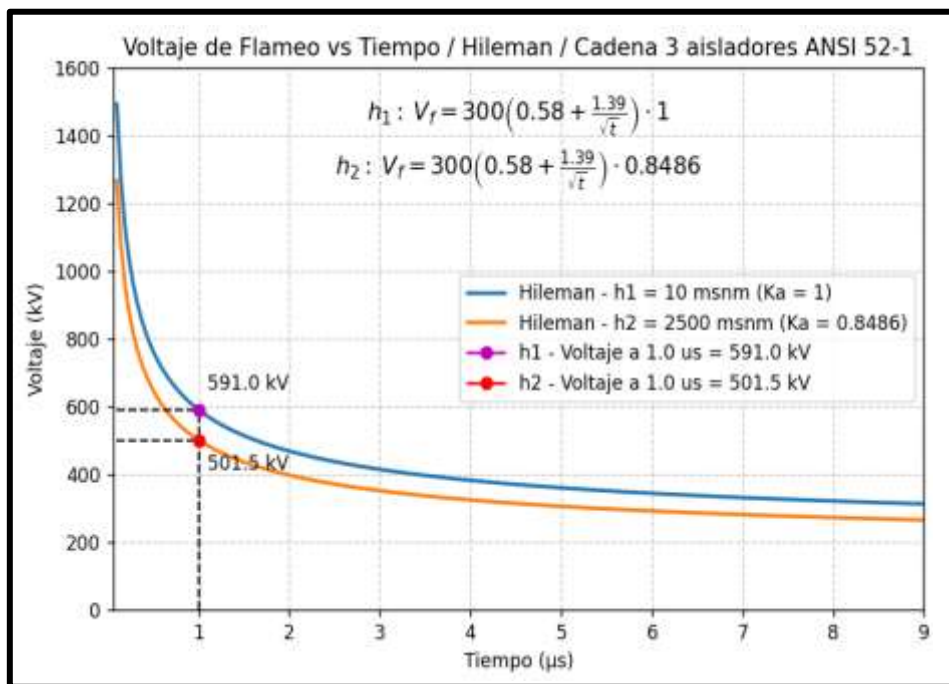


Figura 4.2. Curva Hileman mediante Python

Fuente: Autores

La figura 4.2. muestra la curva de soportabilidad obtenida a partir del modelo de Hileman, el cual incorpora el parámetro U₅₀ como referencia del nivel medio de flameo del aislamiento. Se aprecia una tendencia similar a la observada en el modelo IEEE, donde el voltaje crítico disminuye conforme el tiempo de actuación del impulso se incrementa.

La diferencia entre la curva estándar y la curva corregida por factores ambientales pone en evidencia el efecto de las condiciones reales de operación, las cuales reducen el margen efectivo de aislamiento disponible frente a impulsos atmosféricos. Este comportamiento refleja la sensibilidad del modelo de Hileman a las condiciones del entorno, al depender directamente de un valor experimental de flameo.

En este sentido, el modelo proporciona una representación coherente y realista del desempeño del aislamiento, ya que combina información empírica del aislador con la

influencia del tiempo de aplicación de la sobretensión, lo que lo convierte en una herramienta útil para evaluar la severidad de los impulsos tipo rayo en estudios de coordinación del aislamiento.

4.4. MODELO FÍSICO-EMPÍRICO BASADO EN EL CAMPO ELÉCTRICO CRÍTICO DEL AIRE

Este modelo describe el flameo del aislamiento externo a partir de un criterio físico asociado al comportamiento dieléctrico del aire, siendo utilizado en una variedad de estudios como en [44]. La hipótesis principal establece que la descarga disruptiva se inicia cuando el campo eléctrico promedio a lo largo del entrehierro alcanza un valor crítico suficiente para dar inicio y sostener el proceso de ionización del aire, h .

A diferencia de los modelos puramente empíricos, esta formulación incorpora parámetros con un significado físico claramente definido, lo que permite relacionar el voltaje de flameo con la distancia efectiva del arco y con el tiempo de aplicación del impulso. De esta manera, el modelo logra representar la dependencia del fenómeno frente a impulsos de distinta duración, reflejando el comportamiento observado experimentalmente tanto para impulsos rápidos como para impulsos de mayor frente temporal.

$$V_f = E_0 \left(a + \frac{b}{t^n} \right) L$$

Donde:

V_f : Voltaje de flameo en función del tiempo del impulso (kV).

E_0 : Campo eléctrico crítico del aire bajo condiciones de referencia (kV/m)

L : Longitud total de la cadena de aisladores (m).

a, b, n : Coeficientes empíricos ajustados experimentalmente.

Valores típicos utilizados en estudios similares son:

$E_0 = 400 - 500$ (kV/m).

$a = 0.8 - 1.3$

$$b = 0.3 - 1.5$$

$$n = 0.3 - 0.8$$

El valor del campo eléctrico crítico del aire E_0 se adopta igual a 450 kV/m, correspondiente a condiciones atmosféricas estándar y ampliamente utilizado en la literatura para el análisis de descargas en aire. Este valor representa una propiedad física del medio dieléctrico y se asocia al umbral promedio a partir del cual el aire inicia el proceso de ionización.

En este estudio, dicho valor se emplea tanto para condiciones cercanas al nivel del mar como para ubicaciones de mayor altitud, manteniéndose constante como parámetro de referencia. El efecto de la altitud sobre la rigidez dieléctrica del aire se incorpora de manera independiente mediante el factor de densidad relativa del aire, lo que permite considerar adecuadamente las condiciones reales del sitio sin alterar el significado físico asociado al campo eléctrico crítico.

Los coeficientes a , b y n del modelo físico–empírico no representan propiedades del aire, sino parámetros ajustables asociados al comportamiento del aislamiento externo.

El coeficiente a se fija en 1.2 con el objetivo de representar el nivel base del voltaje de flameo para impulsos aplicados de forma relativamente lenta. Este valor permite incorporar, de manera implícita, los efectos de la no uniformidad del campo eléctrico a lo largo de la cadena de aisladores, así como la influencia de los herrajes y la geometría propia de una cadena de suspensión tipo disco. De esta forma, el modelo refleja un comportamiento más cercano al observado en cadenas reales, sin alterar el significado físico del campo crítico del aire.

El coeficiente b se adopta igual a 0.9 para representar el incremento del voltaje de flameo requerido ante impulsos de corta duración. Este valor se considera adecuado para una cadena de tres aisladores de suspensión, donde el proceso de ionización del aire se ve influenciado por frentes de onda rápidos y por la presencia de regiones de campo intensificado. La elección de este coeficiente permite reproducir de forma razonable la mayor exigencia dieléctrica observada experimentalmente en este tipo de configuraciones frente a impulsos atmosféricos rápidos.

Finalmente, el exponente n se establece en 0.5, valor que representa una sensibilidad temporal intermedia del voltaje de flameo frente al tiempo de aplicación del impulso. Esta elección permite obtener una curva voltaje–tiempo con una pendiente coherente con el comportamiento reportado en la literatura para aislamiento externo en aire y facilita la comparación del modelo con formulaciones empíricas ampliamente utilizadas, como las propuestas por IEEE y Hileman.

Resumen de parámetros para ecuación basada en campo eléctrico:

Parámetros Modelo basado en campo eléctrico			
E₀	a	B	n
450	1.2	0.9	0.5

Tabla 4.1. Parámetros para modelo basado en campo eléctrico

Fuente: Autores

Para h1: 10 msnm

$K_a = 1$

$$V_f = 450 \left(1.2 + \frac{0.9}{t^{0.5}} \right) * 0.42 * K_a$$

$$V_f = 450 \left(1.2 + \frac{0.9}{t^{0.5}} \right) * 0.42 * 1$$

Para h2: 2500 msnm

$K_a = 0.8486$

$$V_f = 450 \left(1.2 + \frac{0.9}{t^{0.5}} \right) * 0.42 * K_a$$

$$V_f = 450 \left(1.2 + \frac{0.9}{t^{0.5}} \right) * 0.42 * 0.8486$$

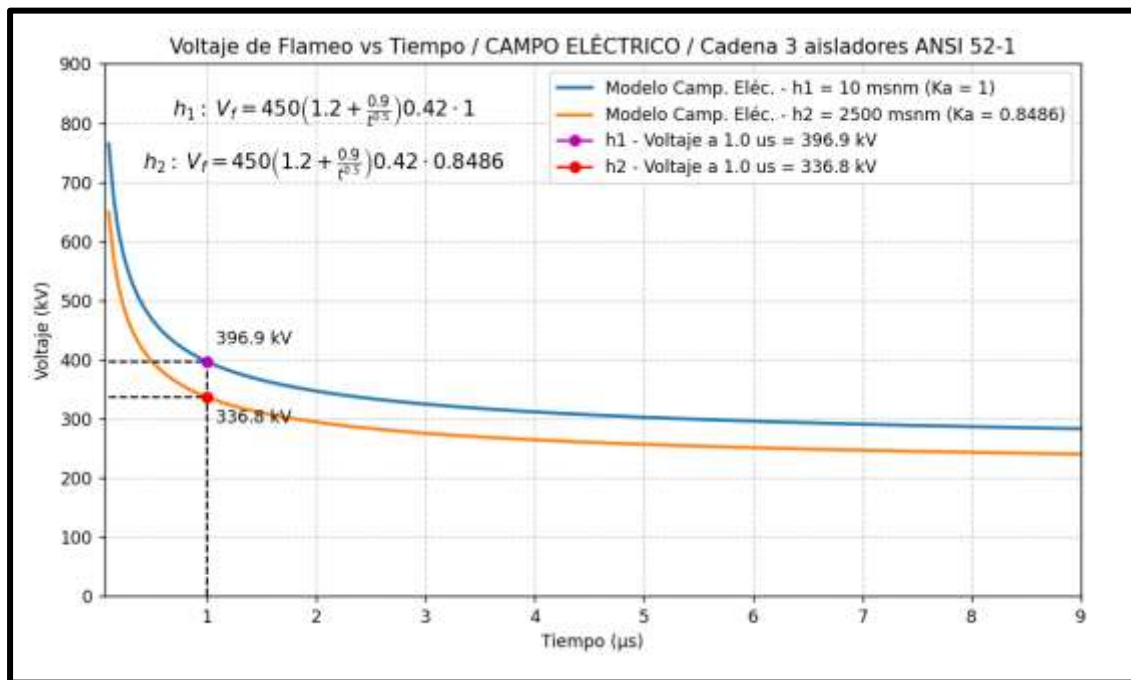


Figura 4.3. Curva campo eléctrico mediante Python

Fuente: Autores

En la figura 4.3. se presenta la curva voltaje–tiempo correspondiente al modelo físico–empírico basado en el campo eléctrico crítico del aire. A diferencia de los modelos puramente empíricos, esta formulación permite relacionar el voltaje de flameo con parámetros de naturaleza física directamente asociados al proceso de ionización del aire, lo que otorga al modelo una base conceptual más sólida.

La forma de la curva evidencia una disminución progresiva del voltaje crítico a medida que aumenta el tiempo de aplicación del impulso, lo que indica que impulsos de mayor duración requieren menores niveles de tensión para iniciar el flameo del aislamiento. Este comportamiento concuerda con el fenómeno físico de desarrollo gradual del proceso de ionización y formación del arco en el aire.

Asimismo, la comparación entre la curva obtenida bajo condiciones estándar y la curva corregida por factores ambientales pone de manifiesto la reducción de la rigidez dieléctrica del aislamiento cuando se consideran las condiciones reales de operación. Este resultado confirma la capacidad del modelo físico–empírico para representar de manera consistente el comportamiento del aislamiento externo frente a sobretensiones de origen atmosférico, complementando adecuadamente los modelos empíricos analizados previamente.

4.5. COMPARACIÓN DE MODELOS DE CURVAS DE SOPORTABILIDAD PARA UNA CADENA DE TRES AISLADORES ANSI 52-1

Para $h_1 = 10$ msnm

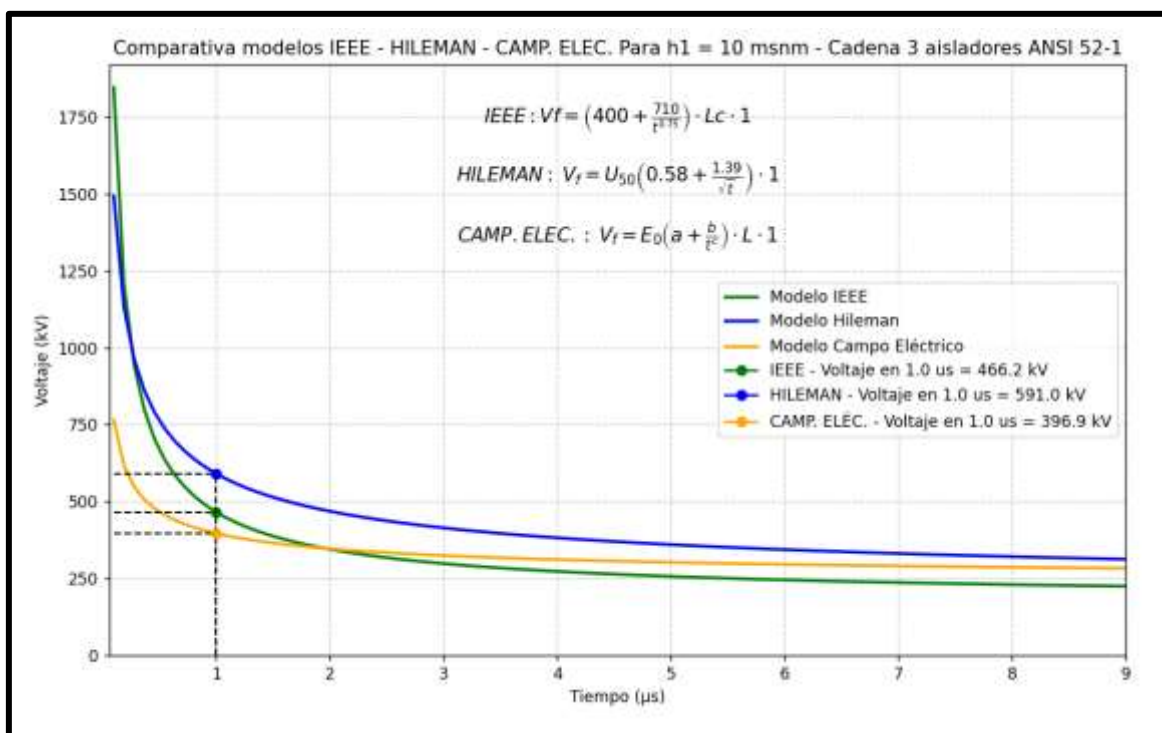


Figura 4.4. Comparación de curvas de soportabilidad para 10 msnm en Python

Fuente: Autores

En la figura 4.4. se comparan las curvas de soportabilidad obtenidas a partir de los modelos IEEE, Hileman y del modelo físico-empírico basado en el campo eléctrico del aire, para una cadena de tres aisladores ANSI 52-1 bajo condiciones atmosféricas estándar. Al tratarse de una altitud inferior a 1000 msnm, el factor de densidad relativa del aire se considera unitario, por lo que no se introduce corrección por altitud.

En el rango de tiempos cortos, característico de los impulsos tipo rayo, se observa una separación clara entre los modelos. El modelo de Hileman presenta los mayores niveles de voltaje de soportabilidad, seguido por el modelo IEEE, mientras que el modelo basado en el campo eléctrico del aire predice los valores más bajos. Esta diferencia es especialmente marcada para tiempos cercanos a 1 μ s, lo que evidencia la distinta severidad con la que cada formulación evalúa el comportamiento del aislamiento frente a impulsos rápidos.

En el punto de referencia ubicado en 1 μ s, el modelo IEEE alcanza un voltaje aproximado de 466.2 kV, el modelo de Hileman alrededor de 591.0 kV y el modelo de campo eléctrico cerca de 396.9 kV. Estos resultados muestran que, para un mismo tiempo de aplicación del impulso, el modelo de Hileman resulta considerablemente más permisivo, mientras que el modelo físico-empírico conduce a una evaluación más conservadora del aislamiento.

A medida que el tiempo aumenta, las curvas IEEE y del modelo de campo eléctrico tienden a acercarse progresivamente, reduciendo la diferencia entre ambas. Sin embargo, el modelo de Hileman mantiene valores de soportabilidad significativamente superiores a lo largo de todo el intervalo de tiempo analizado, sin llegar a aproximarse a los otros dos modelos. Esto indica que las diferencias entre formulaciones no se limitan únicamente al frente del impulso, sino que persisten incluso para tiempos mayores.

Para $h_2 = 2500$ msnm

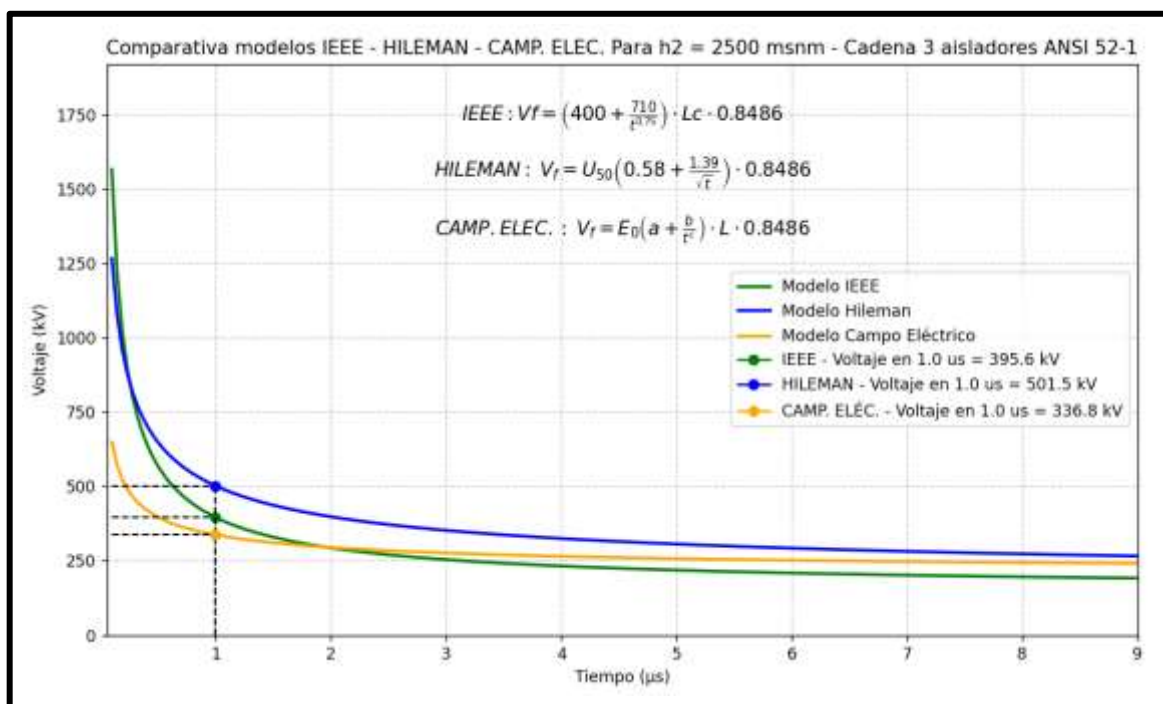


Figura 4.5. Comparación de curvas de soportabilidad para 2500 msnm en Python

Fuente: Autores

En la figura 4.5. se presenta la misma comparación entre los modelos de IEEE, Hileman y del modelo físico-empírico basado en el campo eléctrico del aire, considerando una altitud de 2500 msnm., condición que implica una menor densidad del aire y la aplicación de un factor de corrección por altitud $K_a=0.8486$. Bajo estas condiciones, todas las curvas experimentan una reducción general en los niveles de voltaje de soportabilidad, manteniendo, no obstante, su forma característica y la relación relativa entre modelos.

De manera similar a lo observado bajo condiciones estándar, en el rango de tiempos cortos, característico de los impulsos tipo rayo, se aprecia una separación marcada entre las curvas obtenidas mediante las distintas formulaciones. El modelo de Hileman continúa presentando los mayores valores de voltaje de soportabilidad, seguido por el modelo IEEE, mientras que el modelo basado en el campo eléctrico del aire mantiene los valores más bajos. Esta tendencia se conserva a lo largo de todo el intervalo de tiempo analizado, evidenciando la consistencia del comportamiento relativo entre modelos.

En el punto de referencia ubicado en $1 \mu s$, los niveles de voltaje de soportabilidad se reducen respecto al caso correspondiente a condiciones cercanas al nivel del mar, alcanzando aproximadamente 395.6 kV para el modelo IEEE, 501.5 kV para el modelo de Hileman y 336.8 kV para el modelo basado en el campo eléctrico. Esta reducción resulta coherente con el efecto esperado de la altitud sobre la rigidez dieléctrica del aire y confirma que el factor K_a actúa esencialmente como un factor de escala sobre las curvas voltaje-tiempo, sin modificar su forma ni la jerarquía entre los modelos.

Para tiempos de aplicación del impulso mayores, se observa nuevamente que las curvas correspondientes a los modelos IEEE y de campo eléctrico tienden a aproximarse progresivamente, mientras que el modelo de Hileman permanece claramente separado, manteniendo niveles de soportabilidad superiores. Este comportamiento indica que, aun bajo condiciones de menor densidad del aire, la influencia de la altitud no altera de manera sustancial la relación comparativa entre las distintas formulaciones, sino que afecta principalmente el nivel absoluto del voltaje de flameo.

4.6. FLAMEO DE AISLADORES MEDIANTE PYTHON

A partir de las curvas de soportabilidad del aislamiento es posible determinar el instante y el nivel de tensión a partir de los cuales una sobretensión de origen atmosférico supera la capacidad dieléctrica del aislador y da lugar al fenómeno de flameo. Con el fin de ilustrar este comportamiento de manera práctica, se plantea un escenario representativo en el cual una forma de onda impulsiva, asociada a una descarga tipo rayo, es comparada directamente con la curva voltaje–tiempo del aislamiento. Este enfoque permite visualizar de forma clara la interacción entre la sobretensión aplicada y la capacidad de soportabilidad del aislamiento, facilitando la identificación de condiciones críticas de operación.

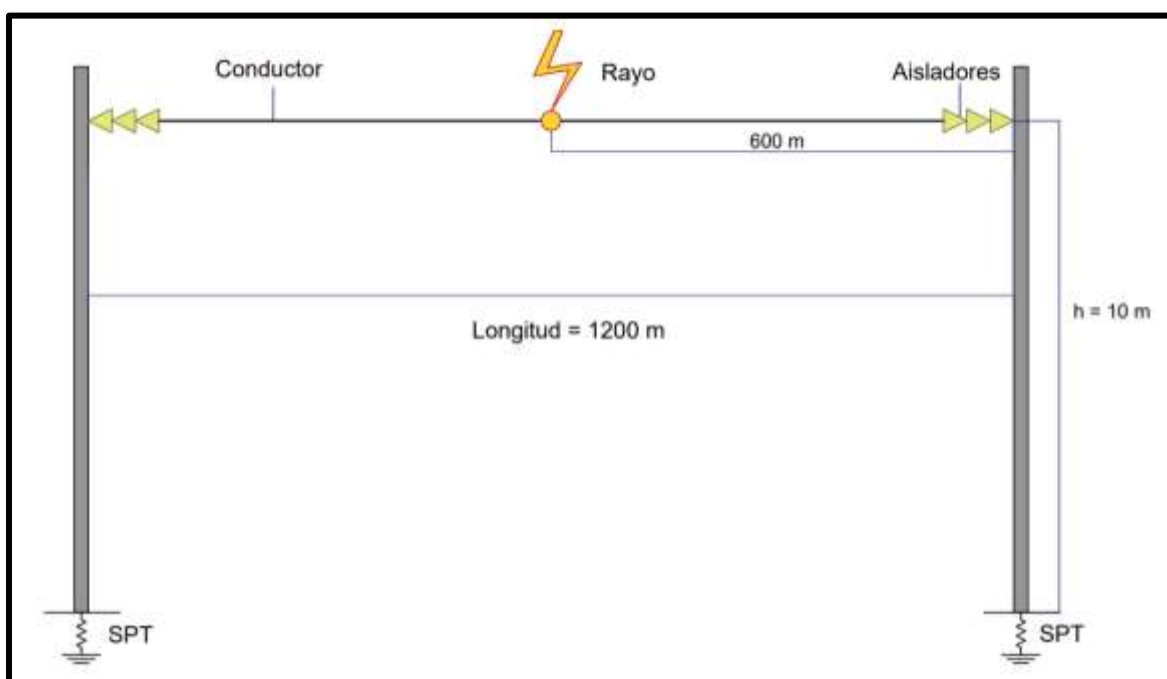


Figura 4.6. Planteamiento de escenario

Fuente: Autores

La figura 4.6. presenta el esquema general del escenario de simulación empleado en ATPDraw, en el cual se representa la disposición de los postes, el conductor de fase, la cadena de aisladores y el punto de aplicación de la descarga atmosférica. El caso de estudio corresponde a una línea aérea de distribución de 13,8 kV, modelada mediante un conductor desnudo suspendido a una altura promedio de 10 m sobre el nivel del suelo.

Esta altura considera un poste típico de 12 m, de los cuales aproximadamente 2 m se encuentran empotrados, resultando en una altura efectiva coherente con las prácticas de diseño en sistemas de distribución.

La configuración adoptada es representativa de redes reales de distribución y permite analizar de forma adecuada el comportamiento del aislamiento frente a sobretensiones de origen atmosférico.

4.7. CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS Y ELÉCTRICAS DEL CONDUCTOR

El conductor de la línea aérea se modela como un conductor desnudo, suspendido a una altura promedio de 10 m sobre el nivel del suelo. Este valor corresponde a una altura típicamente empleada en líneas aéreas de distribución, especialmente en zonas urbanas y suburbanas, donde los postes utilizados presentan alturas comprendidas generalmente entre 9 y 12 m. Al considerar la porción empotrada del poste, la altura adoptada resulta representativa de una configuración real de operación.

El radio del conductor se adopta igual a 11 mm, valor característico de conductores comúnmente utilizados en sistemas de distribución de media tensión. Este parámetro no busca representar un conductor específico, sino definir una geometría realista que permita evaluar de forma adecuada la propagación de ondas viajeras y el comportamiento de las sobretensiones generadas por descargas atmosféricas.

La selección de estos valores permite modelar un escenario típico de operación, evitando configuraciones extremas y garantizando que los resultados obtenidos sean representativos de las condiciones reales presentes en líneas aéreas de distribución.

4.8. IMPEDANCIA CARACTERÍSTICA DEL CONDUCTOR (ZC)

Para el análisis de las sobretensiones producidas por descargas atmosféricas, la línea aérea se modela como un medio de propagación de ondas viajeras, en el cual las perturbaciones electromagnéticas se desplazan a lo largo del conductor con una velocidad cercana a la de la luz. En este contexto, la línea puede caracterizarse mediante su impedancia característica, parámetro fundamental que define la relación entre el voltaje y la corriente asociados a la onda viajera generada por el impacto del rayo.

La impedancia característica resulta especialmente relevante en el estudio de descargas atmosféricas, ya que determina el nivel de sobretensión inducida en el punto de impacto a partir de la corriente de la descarga. En términos físicos, para un frente de onda incidente, el voltaje inicial generado sobre la línea es proporcional al producto entre la corriente del rayo y la impedancia característica del conductor, lo que permite estimar la severidad del esfuerzo dieléctrico aplicado al aislamiento.

En el caso de líneas aéreas con un solo conductor sobre el suelo, la impedancia característica puede estimarse mediante la siguiente expresión:

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

Donde:

Z_c = Impedancia característica del conductor (Ohm).

h : Altura del conductor sobre el suelo (m).

r : Radio del conductor (mm).

Sustituyendo los valores respectivos para el escenario de estudio, se obtiene una impedancia característica aproximada de:

$$Z_c = 60 * \ln\left(\frac{2000 * 10(m)}{11(mm)}\right)$$

$$Z_c = 450 \text{ Ohm}$$

Este valor es consistente con los rangos reportados en la literatura técnica para líneas aéreas de distribución y se utiliza en la simulación para representar adecuadamente la propagación de la sobretensión generada por la descarga atmosférica.

4.9. MODELAMIENTO DE LA DESCARGA ATMOSFÉRICA

En el modelo del escenario analizado se asume que el impacto de la descarga atmosférica ocurre en el punto medio del vano comprendido entre dos apoyos consecutivos. Considerando un vano de 1200 m, el punto de incidencia del rayo se ubica a 600 m de

cada poste, lo que permite estudiar la propagación de la sobretensión de manera simétrica a lo largo del conductor hacia ambos extremos de la línea.

Para la simulación se adopta una forma de onda de corriente tipo 8/20 μs , ampliamente empleada en estudios de sobretensiones debido a que representa adecuadamente las características típicas de una descarga atmosférica, con un frente de subida rápido y una cola de decaimiento pronunciada.

La corriente pico de la descarga se fija en 6667 A, valor representativo de descargas de intensidad moderada. Este nivel resulta suficiente para generar sobretensiones significativas sobre la línea, sin recurrir a condiciones extremas poco probables, permitiendo así evaluar el comportamiento del aislamiento bajo un escenario realista y conservador para sistemas de distribución.

La onda de corriente generada en el punto de impacto se propaga a lo largo del conductor hacia ambos apoyos con una velocidad aproximada de 300 m/ μs , valor cercano a la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas en líneas aéreas, lo que resulta coherente con los modelos clásicos de ondas viajeras.

4.10. VOLTAJE DE IMPACTO PRODUCIDO POR LA DESCARGA

El impacto de una descarga atmosférica directa sobre el conductor genera una sobretensión inicial de gran magnitud, la cual se propaga a lo largo de la línea en ambos sentidos a partir del punto de incidencia. Esta sobretensión constituye la condición inicial del fenómeno de ondas viajeras y representa el esfuerzo dieléctrico más severo aplicado al aislamiento en los primeros instantes posteriores al impacto.

El valor del voltaje inducido en el punto de descarga depende directamente de la impedancia característica de la línea y de la magnitud de la corriente del rayo. Desde el punto de vista físico, la descarga atmosférica puede modelarse como una fuente de corriente que inyecta energía en la línea, generando una onda de tensión cuya amplitud es proporcional a la impedancia del medio de propagación.

Bajo estas consideraciones, el voltaje de impacto en el punto de descarga puede estimarse mediante la siguiente expresión:

$$V_{imp} = \frac{Z_c * I_0}{2}$$

Donde:

V_{imp} : Voltaje de impacto (KV)

Z_c : Impedancia característica del conductor (Ohm).

I_0 : Corriente pico del rayo (A).

Sustituyendo los valores obtenidos, se obtiene un voltaje de impacto aproximado de:

$$V_{imp} = \frac{450 \text{ Ohm} * 6667 \text{ A}}{2}$$

$$V_{imp} = 1500 \text{ KV} = 1.5 \text{ MV}$$

Este valor representa la sobretensión máxima inicial a la que se ve sometido el aislamiento y constituye la base para evaluar la posibilidad de flameo en la cadena de aisladores.

4.11. CONSTRUCCIÓN DEL FRENTE DE ONDA DEL VOLTAJE GENERADO POR EL RAYO

El frente de onda representa la variación temporal del voltaje de impacto producido por una descarga atmosférica y aplicado al aislador. Esta porción inicial del impulso tipo rayo se caracteriza por un incremento abrupto del voltaje desde valores cercanos a cero hasta un nivel máximo en un intervalo de tiempo muy reducido, siendo responsable del mayor esfuerzo dieléctrico sobre el aislamiento externo.

En los estudios de coordinación del aislamiento, el frente del impulso se considera particularmente relevante, ya que la probabilidad de flameo aumenta significativamente durante los primeros microsegundos posteriores al impacto. Por esta razón, el análisis del comportamiento del aislamiento se centra en la pendiente inicial del voltaje aplicado, más que en su valor máximo sostenido.

Con el objetivo de simplificar el análisis y facilitar la comparación con las curvas voltaje–tiempo del aislamiento, el frente de onda del impulso atmosférico suele aproximarse

mediante una relación lineal entre el voltaje y el tiempo. Esta aproximación es ampliamente aceptada en la literatura técnica y permite representar de forma adecuada el crecimiento inicial del esfuerzo dieléctrico aplicado al aislador, mediante la siguiente expresión:

$$V = b + m t$$

$$m = \frac{V_{imp}}{t_{frente.onda}}$$

$$b = -m \cdot t_{vuelo}$$

$$t_{vuelo} = \frac{d}{v}$$

Donde:

V_{imp} : Voltaje de impacto (kV).

$t_{frente.onda}$: Tiempo del frente de onda del impulso (us).

t_{vuelo} : Tiempo de vuelo de la descarga (us).

d : distancia del punto de impacto del rayo a la estructura (m).

v : velocidad de propagación de la descarga (m/us).

Resumen de datos para ecuación X:

V_{imp} [kV]	t_{frente.onda} [us]	d (distancia) [m]	v (velocidad de propagación) [m/us]
1500	8	600	300

Tabla 4.2. Datos para curva de voltaje producida por rayo

Fuente: Autores

$$t_{vuelo} = \frac{600 \text{ m}}{300 \text{ m/us}} = 2$$

$$m = \frac{1500 \text{ kV}}{8 \text{ } \mu\text{s}} = 187.5$$

$$b = -187.5 \cdot 2 = -375$$

$$V = -375 + 187.5 t$$

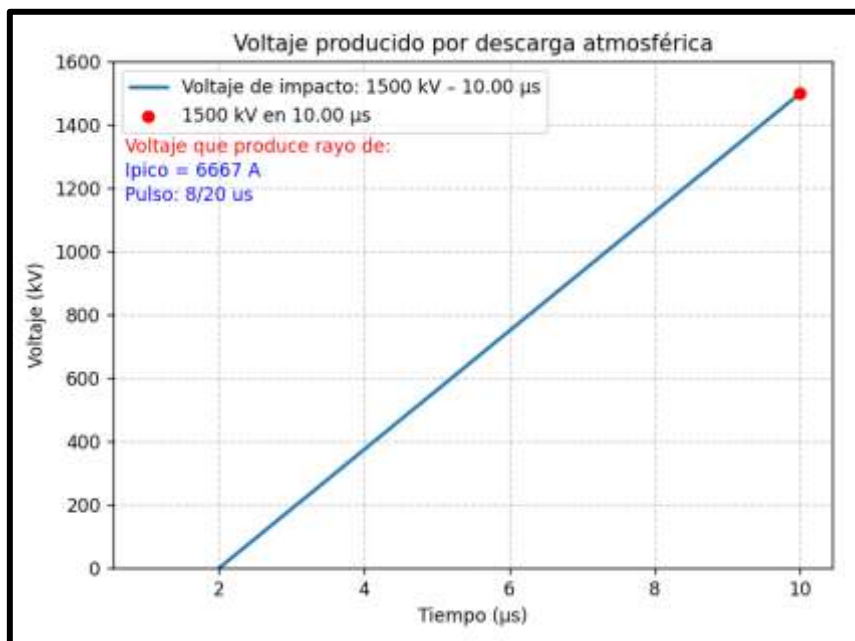


Figura 4.7. Voltaje producido por rayo en Python

Fuente: Autores

En la figura 4.7. se presenta la forma de onda del voltaje generado por una descarga atmosférica aplicada al conductor. Esta señal se construye considerando inicialmente el tiempo de vuelo de la onda, el cual se calcula en $2 \mu\text{s}$ a partir de la distancia recorrida por la perturbación y la velocidad de propagación de la onda viajera en la línea. Dicho instante representa el momento en el que la sobretensión alcanza el punto de análisis.

A partir de este tiempo, el voltaje se modela mediante una relación lineal entre voltaje y tiempo, asociada al frente del impulso atmosférico. El incremento del voltaje está determinado por un frente de onda de $8 \mu\text{s}$ y un valor pico de 1500 kV , lo que permite representar de forma simplificada y consistente la pendiente inicial del impulso tipo rayo.

De esta manera, la ecuación obtenida permite graficar la evolución temporal del voltaje inducido por la descarga atmosférica, desde su llegada al punto de impacto hasta alcanzar su valor máximo.

4.12. VOLTAJE DE FLAMEO MEDIANTE PYTHON

4.12.1. MODELO IEEE

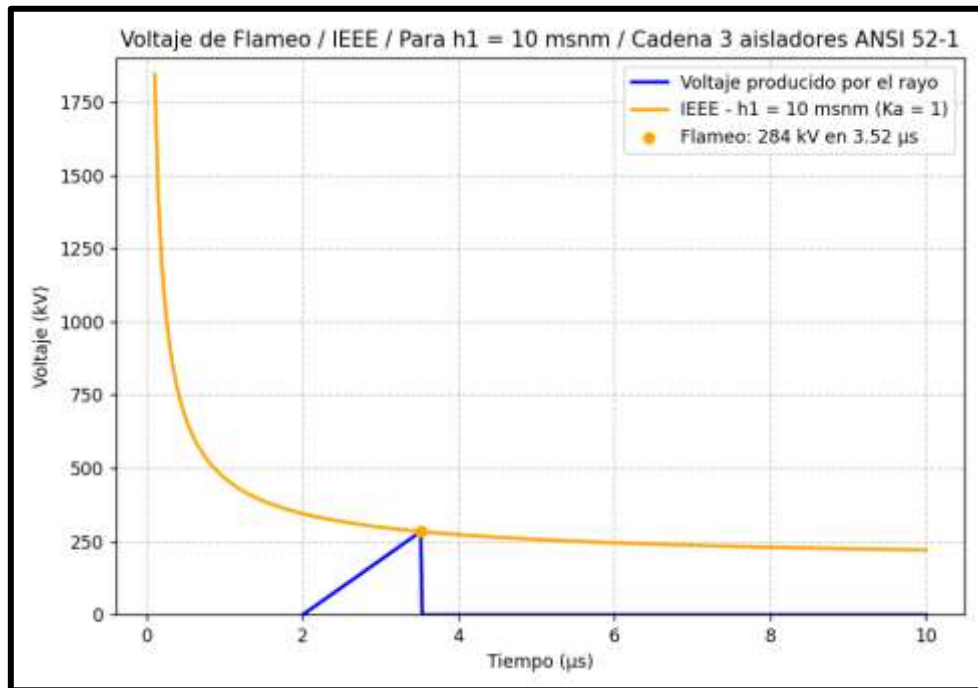


Figura 4.8. Voltaje de flameo por rayo en Python modelo IEEE h1

Fuente: Autores

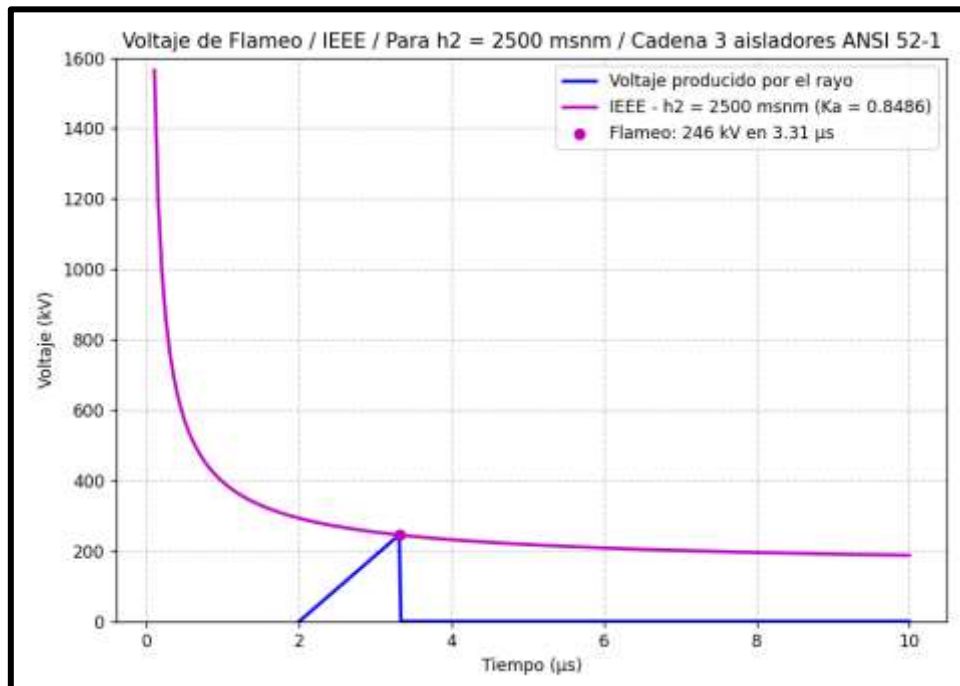


Figura 4.9. Voltaje de flameo por rayo en Python modelo IEEE h2

Fuente: Autores

Las gráficas correspondientes al modelo IEEE, mostradas en las figuras 4.8 y 4.9, representan el comportamiento del voltaje de flameo ante una descarga atmosférica considerando la interacción directa entre el impulso aplicado y la curva de soportabilidad del aislamiento. En este caso, el voltaje del rayo se incrementa progresivamente hasta alcanzar el punto de intersección con la curva IEEE, instante en el cual se produce el flameo del aislador y el colapso abrupto del voltaje, lo que indica la pérdida total de la capacidad dieléctrica del aislador.

Para tiempos cortos del frente de onda, el modelo exige niveles elevados de tensión para que se inicie el flameo, lo cual concuerda con el comportamiento físico del aire, donde los procesos de ionización requieren mayores esfuerzos eléctricos en intervalos de tiempo reducidos. A medida que el tiempo aumenta, el voltaje crítico disminuye, facilitando la ocurrencia del flameo para valores más bajos de tensión aplicada.

Al comparar los resultados para $h_1 = 10$ msnm y $h_2 = 2500$ msnm, se observa que el flameo ocurre a menores niveles de voltaje en el caso de mayor altitud. Esta diferencia se atribuye a la reducción de la densidad del aire, que disminuye la rigidez dieléctrica y favorece el desarrollo del arco eléctrico.

4.12.2. MODELO HILEMAN

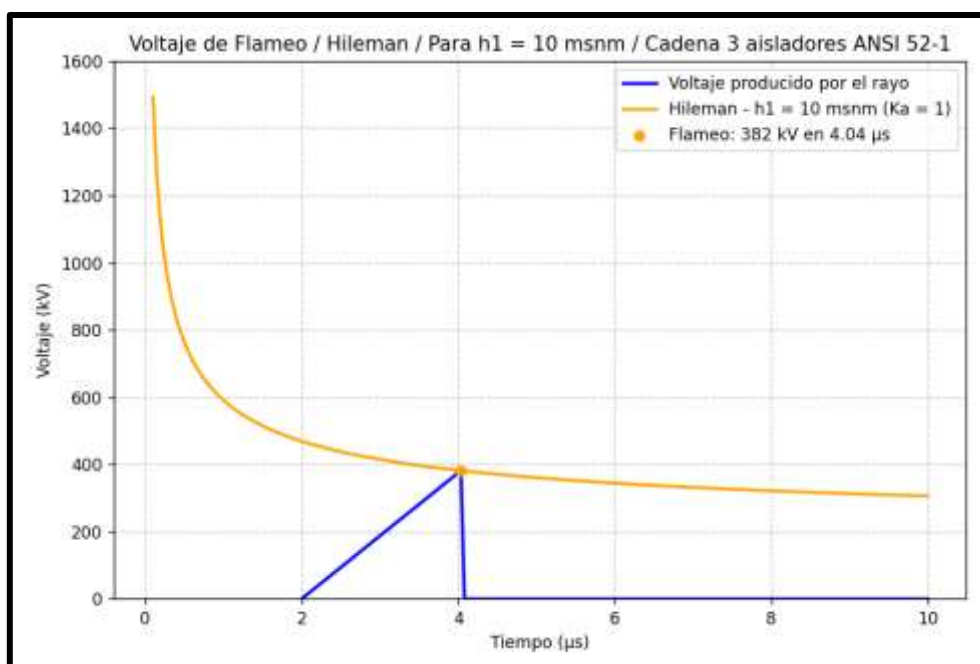


Figura 4.10. Voltaje de flameo por rayo en Python modelo Hileman h_1

Fuente: Autores

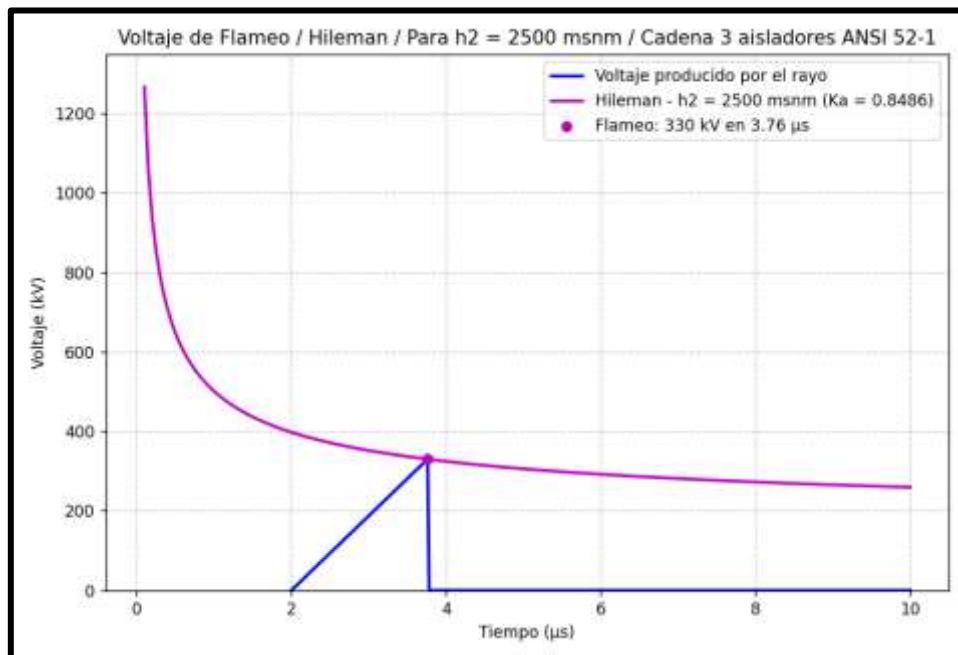


Figura 4.11. Voltaje de flameo por rayo en Python modelo Hileman h2

Fuente: Autores

Las figuras 4.10 y 4.11 muestran los resultados obtenidos mediante el modelo de Hileman, donde el voltaje del rayo aumenta hasta intersectar la curva de soportabilidad definida por la formulación empírica basada en el parámetro U50. En el punto de intersección se produce el flameo del aislamiento, evidenciado por la caída inmediata del voltaje, lo que representa el colapso dieléctrico de la cadena de aisladores.

En comparación con el modelo IEEE, las curvas de Hileman presentan una variación más suave del voltaje de flameo con respecto al tiempo del impulso, lo que se traduce en una menor sensibilidad a los tiempos muy cortos del frente de onda. Este comportamiento refleja la naturaleza empírica del modelo, el cual promedia el desempeño del aislamiento bajo diferentes condiciones experimentales.

La comparación entre las altitudes $h1 = 10$ msnm y $h2 = 2500$ msnm confirma una reducción del voltaje de flameo a mayor altitud; sin embargo, esta diferencia resulta menos pronunciada que en el modelo IEEE. Esto indica que el modelo de Hileman atenúa parcialmente el efecto de la densidad del aire, lo que conduce a resultados ligeramente menos conservadores. Aun así, el modelo proporciona una estimación razonable del comportamiento del aislamiento cuando se dispone de valores confiables de U50 para el tipo de aislador analizado.

4.12.3. MODELO BASADO EN CAMPO ELÉCTRICO

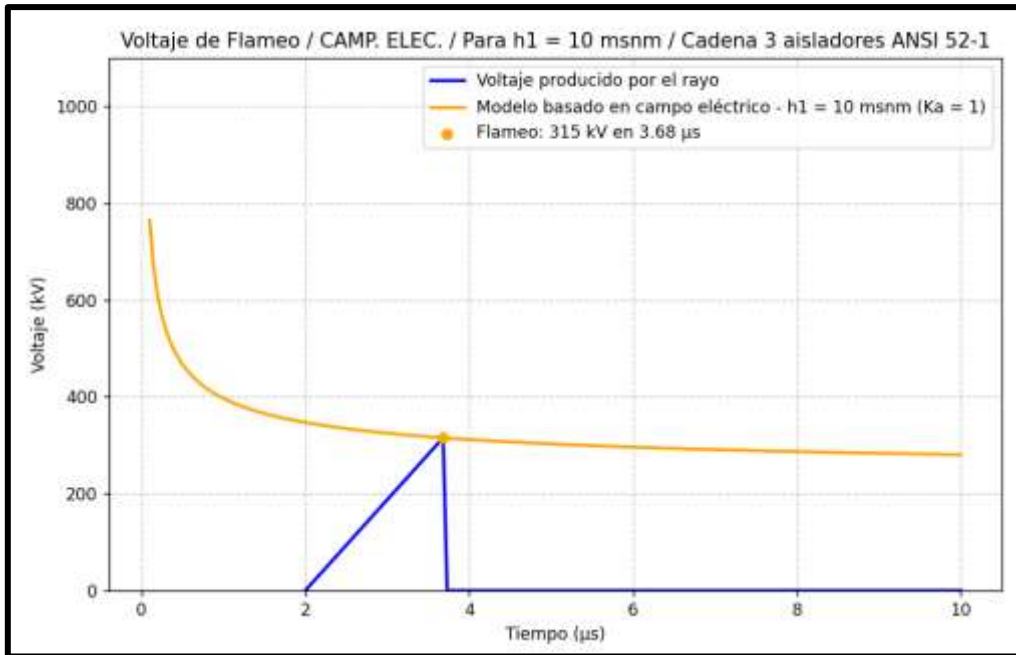


Figura 4.12. Voltaje de flamao por rayo en Python modelo Camp. Elec. $h1$

Fuente: Autores

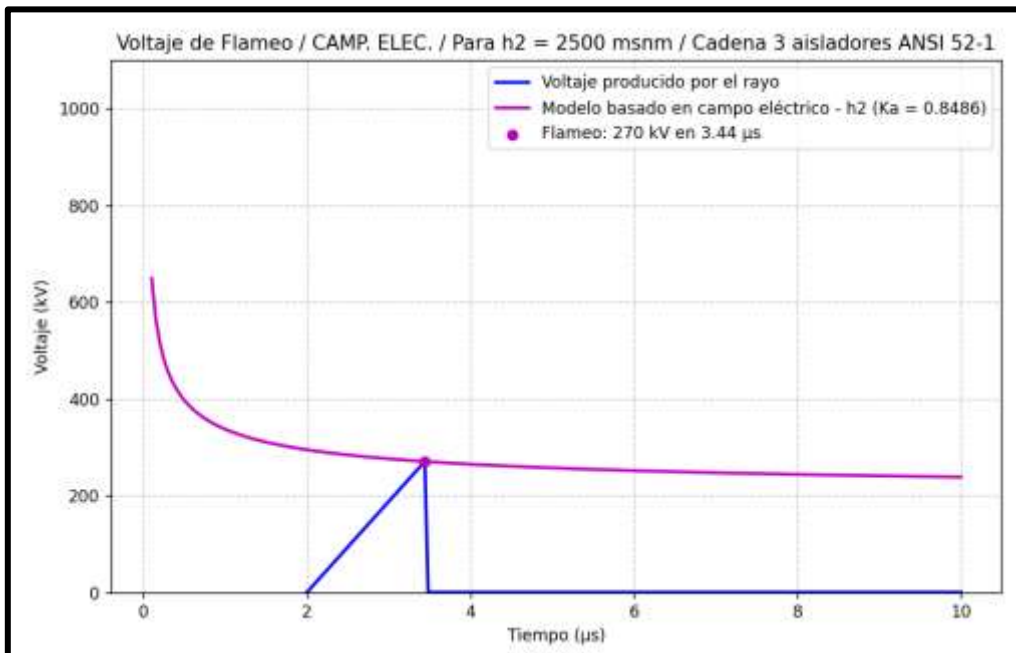


Figura 4.13. Voltaje de flamao por rayo en Python modelo Camp. Elec. $H2$

Fuente: Autores

El modelo basado en el campo eléctrico presenta un comportamiento diferenciado respecto a los modelos empíricos, al encontrarse directamente vinculado con las condiciones físicas que determinan el inicio del flameo. En este caso, el criterio de falla del aislamiento se establece cuando el campo eléctrico promedio a lo largo del entrehierro alcanza un valor crítico capaz de iniciar el proceso de ionización del aire.

Las figuras 4.12 y 4.13 presentan el comportamiento del voltaje de flameo obtenido mediante el modelo basado en campo eléctrico, en el cual el criterio de falla se establece cuando el campo eléctrico promedio a lo largo de la cadena alcanza un valor crítico. En este enfoque, el voltaje del rayo se incrementa hasta que se cumple dicha condición, momento en el cual se produce el flameo y el consecuente colapso del voltaje aplicado.

Las curvas obtenidas muestran una transición más gradual del voltaje de flameo en función del tiempo del impulso, lo que permite una interpretación directa del fenómeno desde un punto de vista físico. A diferencia de los modelos puramente empíricos, este enfoque relaciona explícitamente la longitud efectiva del arco, el tiempo de aplicación del esfuerzo dieléctrico y las propiedades del medio.

Al comparar los resultados correspondientes a $h_1 = 10$ msnm y $h_2 = 2500$ msnm, se observa nuevamente una disminución del voltaje de flameo a mayor altitud, manteniendo una separación relativamente uniforme entre ambas curvas a lo largo del rango de tiempos analizado. Esto indica que la corrección por densidad del aire actúa como un factor de escala sobre el campo eléctrico crítico. Este modelo resulta especialmente útil cuando se busca una mayor comprensión física del proceso de flameo, complementando adecuadamente los resultados obtenidos con los modelos IEEE y Hileman.

CAPITULO V

5.1. SIMULACIÓN Y MODELAMIENTO EN ATPDRAW

5.1.1. MODELO ELÉCTRICO EQUIVALENTE DEL AISLADOR

Para el análisis del comportamiento del aislamiento frente a sobretensiones impulsivas, el aislador no se modela como un elemento físico, sino mediante un modelo eléctrico equivalente, capaz de reproducir su respuesta dieléctrica ante variaciones rápidas de tensión.

Par este caso, el aislador se representa mediante un circuito equivalente compuesto por una resistencia (R) y una capacitancia (C), conectadas entre el conductor de fase y tierra. Este enfoque es ampliamente utilizado en estudios de transitorios electromagnéticos y permite capturar los principales fenómenos asociados al aislamiento externo

La capacitancia del aislador representa la capacidad del sistema aislante para almacenar carga eléctrica y está directamente relacionada con su geometría y con la distribución del campo eléctrico. Este parámetro resulta especialmente relevante en el análisis de impulsos atmosféricos, ya que influye en la forma de onda de la sobretensión aplicada y en la velocidad de variación del voltaje.

La resistencia del aislador modela la conducción superficial que puede presentarse debido a factores ambientales como la humedad, la contaminación y la presencia de películas conductoras sobre la superficie del aislador. Este elemento permite introducir pérdidas y amortiguamiento en la simulación, reproduciendo de manera más realista el comportamiento del aislamiento bajo condiciones no ideales.

El uso de un modelo RC equivalente permite evaluar la respuesta transitoria del aislador frente a descargas atmosféricas, estableciendo una relación directa entre los parámetros eléctricos del modelo y las condiciones físicas reales de operación del sistema.

5.1.2. CÁLCULO DE RESISTENCIA Y CAPACITANCIA DEL AISLADOR

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

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

Donde:

ρ : Resistividad eléctrica del material (Ohm*m):

- Porcelana: 7×10^{12}
- Polímero: 1×10^{16}

ϵ_r : Permitividad relativa del material:

- Porcelana: 6
- Polímero: 2.2

Df: Distancia de fuga (m).

r: Radio geométrico de aislador (m).

Para el análisis se toma como base los valores referentes a la porcelana, obteniendo los siguientes resultados de resistencia y capacitancia para una cadena de 3 discos en una altura de 10 msnm y 2500 msnm:

Para h = 10msnm

Df aplicada (3 discos): 412.5 mm = 0.4125 m

Diámetro aislador ANSI 52-1: 160 mm

Radio aislador ANSI 52-1: 80 mm = 0.080 m

$$R = \left(\frac{7 \times 10^{12}}{2 * \pi * 0.4125} \right) * \ln \left(\frac{2 * 0.4125}{0.080} \right)$$

$$R = 6.84 \times 10^{12} \text{ Ohm}$$

$$C = \left(\frac{6 * 0.4125}{2 * \ln \left(2 * \frac{0.4125}{0.080} \right)} \right) * \left(\frac{1 \times 10^{-9}}{9} \right)$$

$$C = 5.53 \times 10^{-11} \text{ F}$$

Para h = 2500 msnm

Df aplicada (3 discos): mm = 0.4477m

Diámetro aislador ANSI 52-1: 160 mm

Radio aislador ANSI 52-1: 80 mm = 0.080 m

$$R = \left(\frac{7 \times 10^{12}}{2 * \pi * 0.4477} \right) * \ln \left(\frac{2 * 0.4477}{0.080} \right)$$

$$R = 6.010 \times 10^{12} \text{ Ohm}$$

$$C = \left(\frac{6 * 0.4477}{2 * \ln \left(2 * \frac{0.4477}{0.080} \right)} \right) * \left(\frac{1 \times 10^{-9}}{9} \right)$$

$$C = 6.179 \times 10^{-11} \text{ F}$$

Resumen de valores:

H msnm	Resistencia del aislador	Capacitancia del aislador
10	$6.84 \times 10^{12} \text{ Ohm}$	$5.53 \times 10^{-11} \text{ F}$
2500	$6.010 \times 10^{12} \text{ Ohm}$	$6.179 \times 10^{-11} \text{ F}$

Tabla 5.1. Valores de resistencia y capacitancia obtenidos

Fuente: Autores

5.1.3. MODELO EN ATPDRAW PARA EL ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL AISLAMIENTO DE UNA LÍNEA DE 13,8 KV FRENTE A IMPULSOS TIPO RAYO

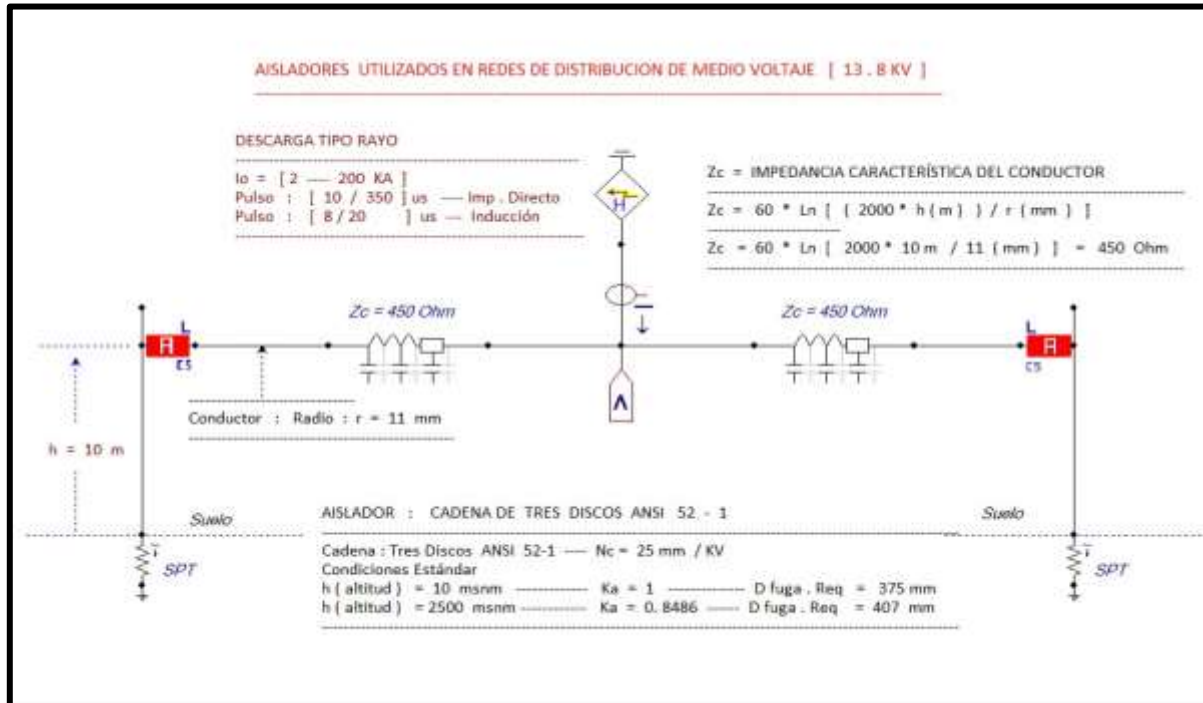


Figura 5.1. Modelo de simulación en ATPDRAW

Fuente: Autores

La figura 5.1 presenta el esquema de simulación empleado para el análisis del comportamiento del aislamiento de una línea aérea de distribución de 13,8 kV ante sobretensiones producidas por descargas atmosféricas, utilizando el entorno ATPDraw. El modelo representa una situación típica de una línea aérea soportada por postes, con un punto de impacto de rayo y una cadena de 3 discos del aislador ANSI 52-1 tipo suspensión.

Para esta simulación se usan los mismos datos que el primer escenario propuesto, al igual los valores de corriente del rayo, valor de Z_c , V_{imp} , entre otros.

5.1.4. MODELADO DE UN AISLADOR

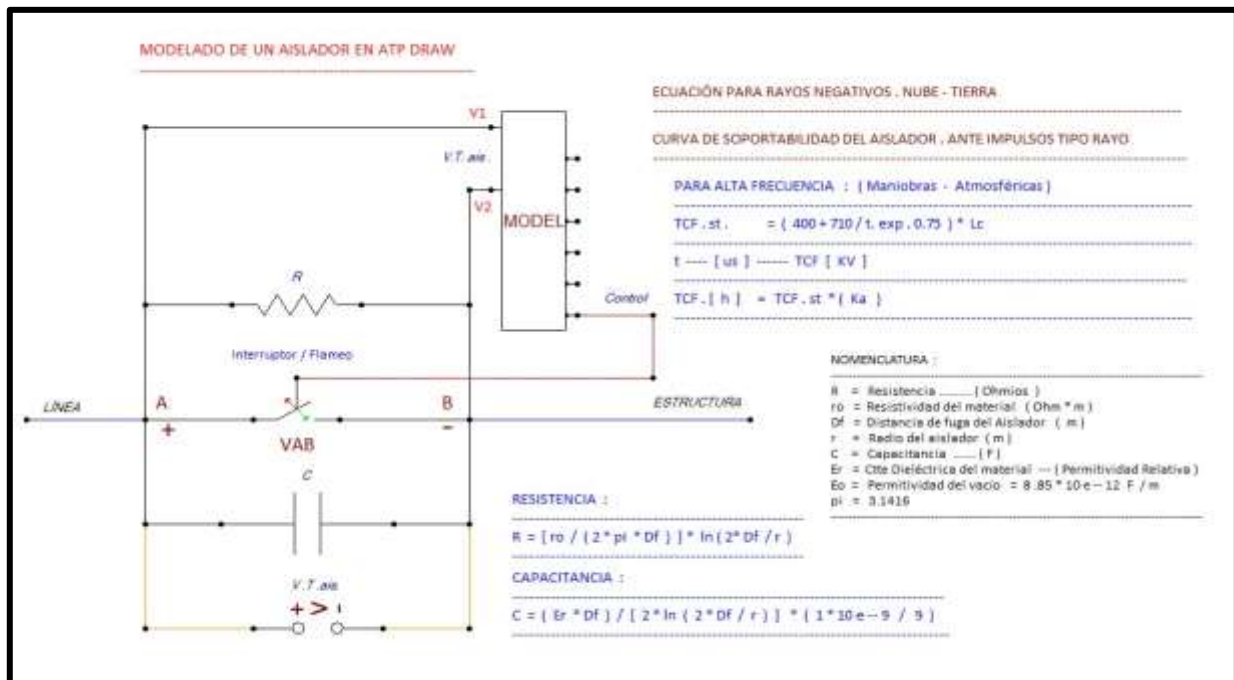


Figura 5.2. Modelo interno del aislador en ATPDRAW

Fuente: Autores

La figura 5.2 ilustra el modelo eléctrico equivalente del aislador tipo cadena utilizado en la simulación. El aislador se representa mediante un circuito compuesto por una resistencia y una capacitancia, las cuales modelan el comportamiento resistivo superficial y el efecto capacitivo del aislamiento externo, respectivamente.

El modelo incorpora un interruptor controlado que simula el fenómeno de flamao. Dicho interruptor permanece abierto mientras el voltaje aplicado al aislador se mantiene por debajo del nivel crítico de soportabilidad y se cierra cuando se produce la descarga disruptiva.

El bloque de control asociado al interruptor evalúa continuamente la relación entre el voltaje aplicado y la curva de soportabilidad definida por el modelo matemático, permitiendo reproducir el comportamiento dinámico del aislamiento ante impulsos tipo rayo.

Este enfoque permite representar de manera simplificada, la transición entre el estado aislante y el estado conductivo del aislador durante eventos de sobretensión atmosférica.

5.1.5. CONFIGURACIÓN DE PARÁMETROS

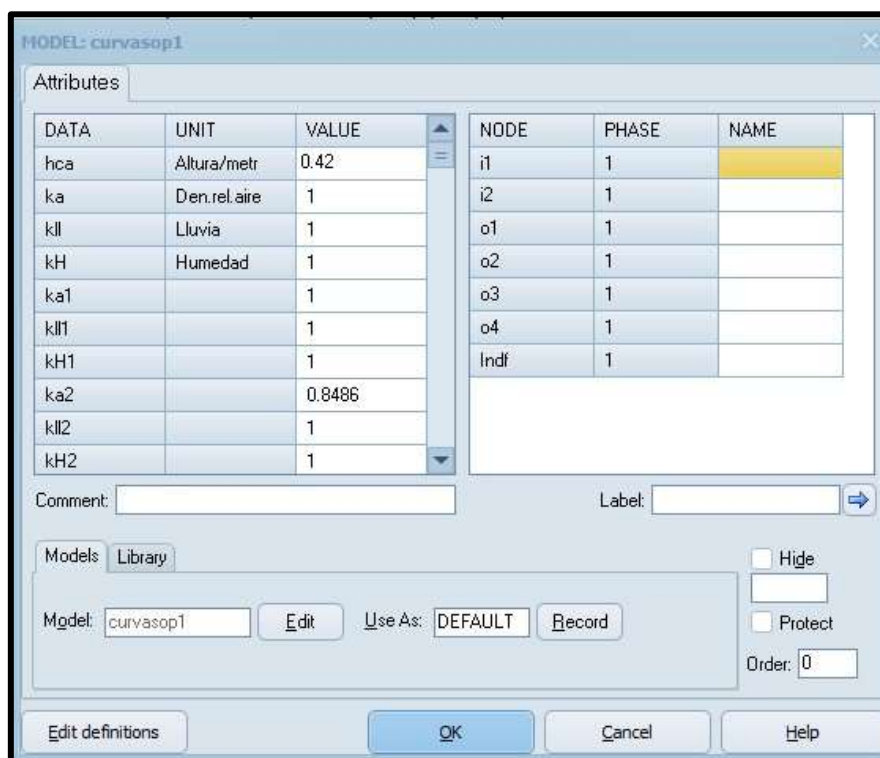


Figura 5.3. Configuración de parámetros en ATPDRAW

Fuente: Autores

La figura 5.3 muestra la configuración de parámetros del modelo de soportabilidad del aislador implementado en ATPDraw. En esta sección se ingresan las variables físicas y ambientales que caracterizan el comportamiento del aislamiento externo.

Entre los parámetros definidos se encuentra la longitud de la cadena de aisladores, correspondiente a una cadena de tres discos tipo ANSI 52-1, así como los factores de corrección asociados a la densidad del aire, lluvia y humedad.

Para el análisis de impulsos tipo rayo bajo condiciones estándar, los factores ambientales se consideran unitarios, de acuerdo con las recomendaciones normativas. No obstante, el modelo permite modificar estos parámetros para evaluar el efecto de la altitud sobre la soportabilidad del aislamiento, particularmente en escenarios de mayor elevación sobre el nivel del mar.

Esta parametrización brinda flexibilidad al modelo, permitiendo analizar diferentes condiciones de instalación sin alterar la estructura matemática del bloque de cálculo.

5.1.6. PROGRAMACIÓN DEL MODELO DE CONTROL

```

DATA hca, ka, k11, kH, ka1, k111, kH1, ka2, k112, kH2
--hca : altura de cada aislador
--ka:Correccion por Densidad relativa del aire
--k11: correccion por lluvia
--kH: Correccion por humedad
INPUT i1,i2 -- i1,i2:lectura del voltaje en los terminales del aislador
OUTPUT o1,o2,o3,o4,Indf -- salidas del model
VAR o1,o2,o3,o4,tf,Indf,Lc -- variables
) INIT
  o1:=0-- Voltaje en los terminales del aislador
  o2:=0-- Curva de soportabilidad del ais. --- Cond. Est. ---- Kamb = 1
  o3:=0-- Curva de soportabilidad del ais. -- h = 10 msnm -- Kamb = 0.6532
  o4:=0-- Curva de soportabilidad del aisl. -- h = 2500 msnm -- Kamb = 0.6081
  tf:=0
  Indf:=0; -- señal de control , interrupto abierto , no flamea
ENDINIT
) EXEC
  o1:=abs(i1-i2)
  tf:= tf + timestep
  o2:=(((400+(710/(tf/1e-6)**0.75))*hca)*1000)*(ka*k11*kH)*1
  o3:=(((400+(710/(tf/1e-6)**0.75))*hca)*1000)*(ka1*k111*kH1)*1
  o4:=(((400+(710/(tf/1e-6)**0.75))*hca)*1000)*(ka2*k112*kH2)*1
) IF (o1>o2)or(Indf=1 )
  THEN
  Indf:=1 --Interruptor cerrado , flamea
  ELSE
  Indf:=0 -- Interruptor abierto , no flamea
ENDIF
ENDEXEC
ENDMODEL

```

Figura 5.4. Programación del Model de control de ATPDRAW

Fuente: Autores

La figura 5.4 presenta el código de implementación del modelo de soportabilidad del aislador empleado en ATPDraw. En este bloque se definen las variables de entrada, salida e inicialización necesarias para evaluar el comportamiento del aislamiento frente a impulsos tipo rayo. El modelo recibe como entradas los voltajes instantáneos en los terminales del aislador, a partir de los cuales se calcula el voltaje aplicado efectivo. De forma paralela, se construyen las curvas de soportabilidad del aislamiento en función del tiempo, basadas en la expresión recomendada por la norma IEEE para impulsos de alta frecuencia. El código incluye la evaluación de distintos escenarios de operación, tales como condiciones estándar y condiciones a diferentes alturas, mediante la incorporación

de factores de corrección por densidad del aire. Estas curvas son comparadas en tiempo real con el voltaje aplicado al aislador.

Cuando el voltaje instantáneo supera el valor definido por la curva de soportabilidad, el modelo activa una señal de control que representa la ocurrencia del flameo, simulando el colapso del aislamiento externo. En caso contrario, el aislamiento se considera íntegro y el interruptor asociado permanece abierto.

5.1.7. CURVA DE SOPORTABILIDAD DEL AISLADOR ANTE IMPULSOS DE VOLTAJE TIPO RAYO

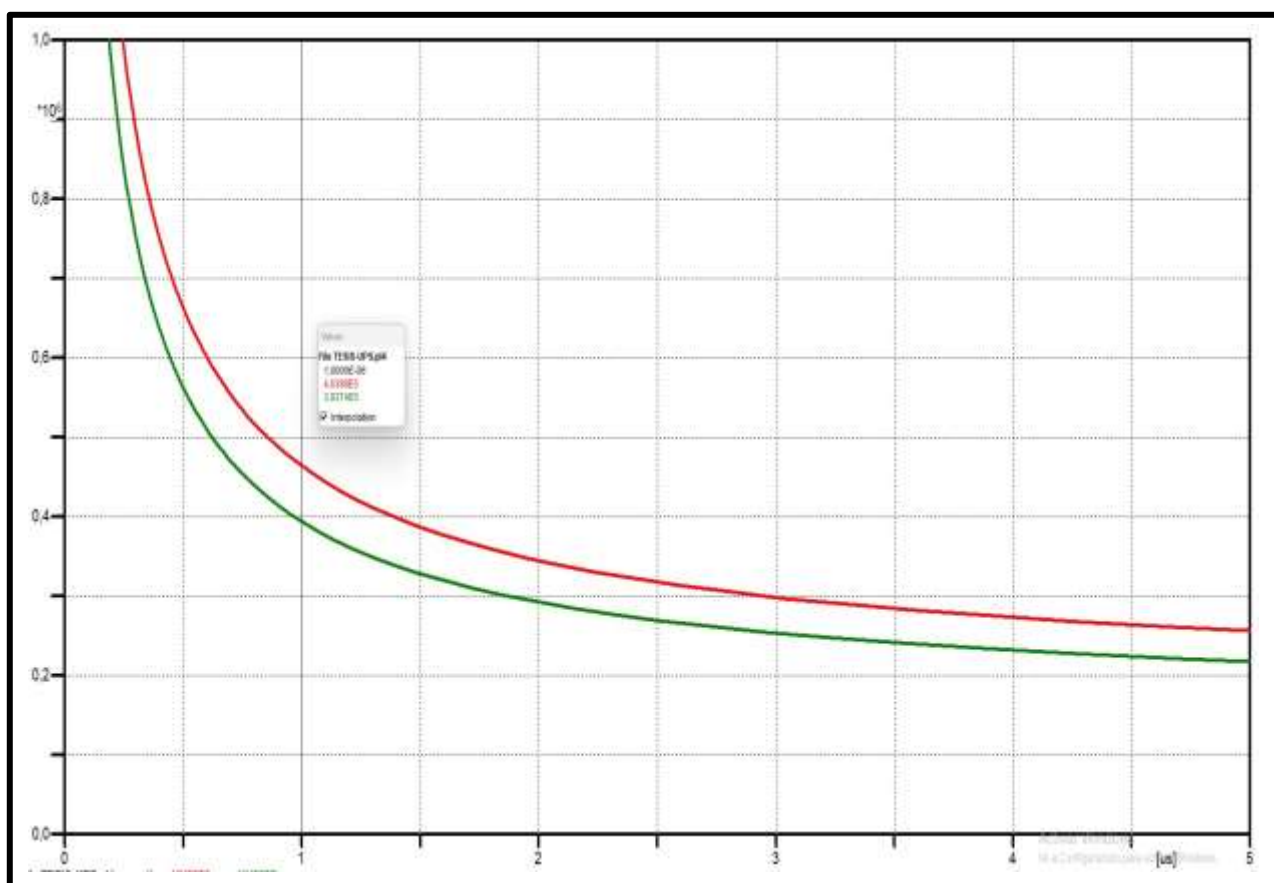


Figura 5.5. Curvas de soportabilidad del aislador en ATPDRAW

Fuente: Autores

La figura 5.5 presenta las curvas de soportabilidad del aislamiento en función del tiempo, obtenidas a partir de la simulación en ATPDraw para una cadena de aisladores ANSI 52-1 utilizada en una red de distribución de 13,8 kV. En la gráfica se observan dos curvas

decrecientes, las cuales representan el comportamiento del aislamiento frente a sobretensiones impulsivas de diferente severidad temporal.

El eje horizontal corresponde al tiempo de aplicación del impulso, expresado en microsegundos (μs), mientras que el eje vertical representa el nivel de tensión soportada por el aislamiento, normalizada en función de la condición de análisis. La forma hiperbólica de ambas curvas evidencia la relación inversa entre el tiempo de duración del impulso y el nivel de tensión que el aislamiento es capaz de soportar sin que ocurra el flameo.

Se observa que, para tiempos muy cortos asociados a impulsos rápidos, el aislamiento soporta niveles de tensión significativamente más elevados. Este comportamiento es característico de los impulsos tipo rayo, donde el frente abrupto del impulso limita el desarrollo completo de procesos ionizantes en el aire circundante al aislador. A medida que el tiempo del impulso aumenta, la tensión soportable disminuye progresivamente, debido a que el campo eléctrico se mantiene aplicado durante un intervalo suficiente para facilitar la iniciación y propagación de descargas eléctricas.

La diferencia entre ambas curvas indica la influencia de las condiciones de evaluación del aislamiento, las cuales pueden estar asociadas a factores como el número de discos de la cadena, el tipo de impulso considerado o la condición de aplicación del modelo. En todos los casos, la tendencia decreciente confirma que el aislamiento resulta más exigido frente a impulsos de mayor duración, condición que se aproxima al comportamiento observado en sobretensiones de maniobra.

Desde el punto de vista de coordinación del aislamiento, esta representación Voltaje–Tiempo permite verificar que los niveles de sobretensión generados por descargas atmosféricas se mantienen por debajo de la curva de soportabilidad del aislamiento seleccionado. En consecuencia, se garantiza que la cadena de aisladores ANSI 52-1 presenta un desempeño adecuado frente a impulsos tipo rayo, reduciendo la probabilidad de flameo y contribuyendo a la confiabilidad del sistema de distribución de 13,8 kV.

5.1.8. FLAMEO DEL AISLADOR EN CONDICIONES $H = 10$ MSNM

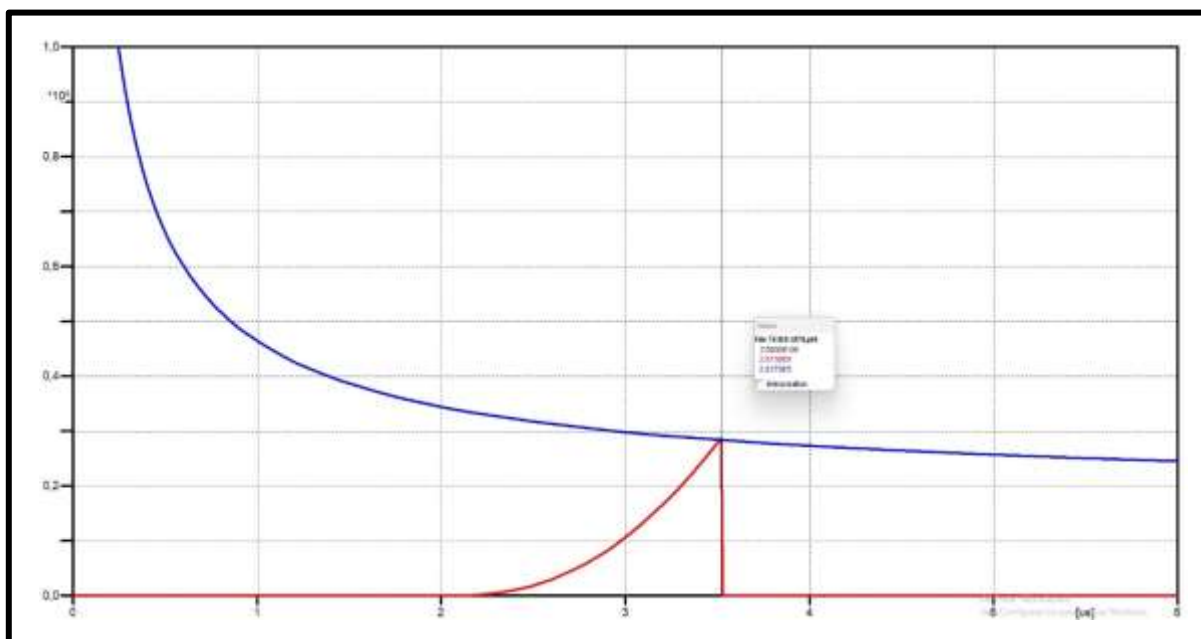


Figura 5.6. Flameo de aislador en ATPDRAW

Fuente: Autores

La figura 5.6 muestra el comportamiento del aislamiento de la cadena de aisladores ANSI 52-1 ante una sobretensión impulsiva tipo rayo, simulada en ATPDraw bajo condiciones estándar de altitud ($h = 10$ msnm). En la gráfica se representan simultáneamente la curva de soportabilidad del aislamiento y la tensión aplicada durante el evento impulsivo.

La curva verde corresponde a la característica Voltaje–Tiempo del aislamiento, la cual define el nivel máximo de tensión que la cadena de aisladores puede soportar sin que se produzca el flameo para cada valor de tiempo. Esta curva presenta una tendencia decreciente, lo que indica que, a medida que el tiempo de aplicación del impulso aumenta, la capacidad dieléctrica efectiva del aislamiento se reduce.

La curva roja representa la tensión aplicada al aislador durante el evento de descarga atmosférica. Inicialmente, el valor de la tensión aplicada se mantiene por debajo de la curva de soportabilidad, por lo que el aislamiento opera dentro de una condición segura. Sin embargo, conforme avanza el tiempo, la tensión aplicada incrementa hasta intersectar la curva de soportabilidad.

El punto de intersección entre ambas curvas marca el instante crítico en el cual la tensión aplicada iguala la capacidad dieléctrica del aislamiento. A partir de este punto, se produce el flameo del aislador, evidenciado en la simulación por la caída abrupta de la tensión aplicada, característica del establecimiento del arco eléctrico entre el conductor y tierra.

Dado que la simulación se realiza a una altitud cercana al nivel del mar ($h = 10$ msnm), se consideran condiciones atmosféricas estándar, para las cuales el factor de corrección por altitud es $K_a = 1$. En este escenario, el flameo observado se atribuye exclusivamente a la severidad del impulso aplicado y a las características propias del aislador, sin influencia adicional de la reducción de rigidez dieléctrica del aire por efecto de la altitud.

Este resultado confirma que la metodología de evaluación mediante curvas Voltaje–Tiempo permite identificar con precisión el punto de flameo del aislamiento, validando el uso de ATPDraw como herramienta adecuada para el análisis del desempeño dieléctrico de aisladores frente a descargas atmosféricas en redes de distribución de 13,8 kV.

CAPITULO VI

6.1. CONCLUSIONES

El análisis comparativo de las curvas de soportabilidad obtenidas mediante los modelos IEEE, Hileman y el modelo basado en campo eléctrico evidencia discrepancias claras en los valores de tensión crítica de flameo (TCF), particularmente en tiempos cortos del frente de onda, como el caso de 1 μ s. Estas diferencias no son aleatorias ni producto de errores de modelación, sino que responden directamente a los supuestos físicos y empíricos que sustentan cada formulación.

El modelo IEEE se basa en una relación empírica voltaje–tiempo ajustada a ensayos normalizados de cadenas de aisladores, incorporando explícitamente el efecto del tiempo del frente mediante una dependencia no lineal con el exponente $t^{-0.75}$. Esta formulación prioriza la severidad de los impulsos rápidos, por lo que tiende a penalizar más los tiempos cortos, resultando en valores de TCF intermedios. En consecuencia, el modelo IEEE ofrece un enfoque conservador, especialmente adecuado para estudios de coordinación de aislamiento en sistemas de distribución.

Por su parte, el modelo de Hileman también tiene un origen empírico, pero su formulación suaviza la dependencia temporal del frente del impulso, al estar basada en ajustes estadísticos derivados de pruebas experimentales de impulso tipo rayo. Esto provoca que, para tiempos muy cortos como 1 μ s, el modelo estime valores de TCF más elevados. En términos físicos, este comportamiento implica que el modelo asume una mayor capacidad del aislamiento para soportar impulsos rápidos antes de que se inicie el proceso de ionización del aire, lo que explica por qué presenta los valores más altos de tensión de flameo en la comparación.

En contraste, el modelo basado en campo eléctrico crítico se fundamenta directamente en el fenómeno físico que origina el flameo: la superación del campo eléctrico crítico del aire en la vecindad del aislador. A diferencia de los modelos empíricos, este enfoque no depende únicamente de ajustes experimentales globales, sino que relaciona explícitamente la geometría del sistema, la longitud de la cadena y las condiciones ambientales con el nivel de campo eléctrico alcanzado. Como resultado, este modelo predice valores de TCF más bajos y una transición más gradual del voltaje con el tiempo, especialmente en impulsos rápidos, lo que explica por qué es el más conservador a 1 μ s.

La discrepancia observada en los valores de TCF a 1 μ s se debe, por tanto, a que cada modelo representa un mecanismo dominante distinto del proceso de flameo:

- El modelo IEEE enfatiza la severidad temporal del impulso
- El modelo Hileman prioriza el ajuste estadístico experimental
- El modelo de campo eléctrico describe directamente la condición física de ruptura del aire.

Lejos de ser una debilidad, esta diferencia fortalece el análisis, ya que permite evaluar el comportamiento del aislamiento desde enfoques complementarios.

Adicionalmente, la comparación de las curvas obtenidas en Python con los resultados del escenario de simulación desarrollado en ATPDraw permitió validar la coherencia del modelo computacional. ATPDraw es una herramienta ampliamente reconocida y utilizada a nivel internacional por ingenieros electricistas para el estudio de transitorios electromagnéticos, por lo que la concordancia entre las sobretensiones simuladas y los niveles de soportabilidad calculados respalda la validez de los resultados obtenidos. Esta correlación confirma que las curvas generadas en Python representan adecuadamente el comportamiento real del sistema frente a descargas atmosféricas.

En conjunto, los resultados demuestran que el uso combinado de modelos analíticos, simulación computacional y herramientas especializadas como ATPDraw constituye una metodología robusta y confiable para el análisis de sobretensiones y la coordinación de aislamiento en líneas aéreas de distribución, particularmente en condiciones de alta altitud como el caso de estudio analizado.

El análisis desarrollado para la altitud de 2500 msnm es igualmente válido para el caso de 10 msnm, ya que las diferencias observadas entre las curvas de soportabilidad no dependen de la altitud en sí, sino de la naturaleza física y empírica de cada modelo. La variación de la altitud actúa únicamente como un factor de corrección asociado a la densidad del aire, el cual escala los valores de tensión de flameo sin modificar la forma de las curvas ni la relación entre los modelos. En consecuencia, a nivel del mar se obtienen valores de TCF más elevados, pero se mantiene la misma tendencia comparativa: el modelo de Hileman presenta los mayores valores, el modelo IEEE ofrece un comportamiento conservador intermedio y el modelo basado en campo eléctrico resulta el más restrictivo, especialmente para tiempos cortos del frente de onda.

6.2. RECOMENDACIONES

- Se recomienda que trabajos futuros profundicen en el análisis de sobretensiones atmosféricas mediante el uso de modelos dinámicos más avanzados, que permitan representar de forma integral el comportamiento transitorio del aislamiento. En el presente estudio se emplearon aproximaciones lineales para el frente de onda y modelos empíricos de soportabilidad, los cuales son adecuados para estudios de coordinación de aislamiento y comparación normativa; sin embargo, la implementación de formulaciones basadas en ecuaciones diferenciales o métodos integrales permitiría describir con mayor precisión la evolución temporal del campo eléctrico y el proceso de flameo, especialmente para frentes de onda no lineales y fenómenos altamente transitorios.
- Se recomienda ampliar el análisis incorporando una mayor variedad de formas de onda de corriente de rayo, distintas al impulso tipo 8/20 μs , tales como ondas de frente más abrupto o colas de mayor duración. Esto permitiría evaluar la sensibilidad del aislamiento frente a diferentes escenarios atmosféricos y mejorar la comprensión del comportamiento del voltaje de flameo ante condiciones más severas o menos frecuentes.
- Se sugiere extender el estudio a diferentes configuraciones de cadenas de aisladores, considerando variaciones en el número de discos, geometría, materiales y niveles de contaminación superficial. De esta manera, se podría analizar la influencia directa de estos parámetros sobre la rigidez dieléctrica y la distancia de fuga requerida, fortaleciendo los criterios de selección del aislamiento para líneas aéreas en distintas condiciones ambientales.
- Se recomienda incluir el efecto de otros factores ambientales, tales como la contaminación, la humedad relativa y la presencia de lluvia, mediante factores de corrección adicionales o modelos específicos. La incorporación de estos parámetros permitiría una evaluación más realista del desempeño del aislamiento en condiciones de operación reales, particularmente en zonas con climas severos o altos niveles de polución.
- Se sugiere complementar el análisis computacional realizado en Python con simulaciones adicionales en herramientas especializadas de transitorios electromagnéticos, como ATPDraw, incorporando modelos más detallados de la línea y del sistema de puesta a tierra. Dado que ATPDraw es ampliamente

utilizado y validado a nivel internacional por ingenieros del sector eléctrico, esta comparación fortalece la confiabilidad de los resultados obtenidos y permite validar los modelos analíticos empleados.

- Finalmente, se sugiere utilizar el código desarrollado en Python como una herramienta base para la automatización de estudios de coordinación de aislamiento, ampliándolo para incluir análisis paramétricos, variación automática de altitudes y generación de curvas comparativas. Esto facilitaría su aplicación en estudios de diseño y evaluación de líneas de transmisión y distribución en diferentes escenarios geográficos.

CAPITULO VII

7.1. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. Martinez, *Power System Transients*. 2010. Accessed: Jan. 26, 2026. [Online]. Available: https://referenceglobe.com/CollegeLibrary/library_books/20180126065127Power%20System%20Transients%20Parameter%20Determination%20By%20Juan%20A%20Martinez%20Velasco.pdf
- [2] A. Greenwood, *Electrical Transients in Power Systems*. New York, 1991. Accessed: Jan. 26, 2026. [Online]. Available: <https://web.nit.ac.ir/~shahabi.m/M.Sc%20and%20PhD%20materials/Power%20System%20Transient%20Analysis%20Course/Books/Electrical%20Transients%20in%20Power%20Systems%20by%20GreenWood.pdf>
- [3] Gönen. Turan, *Electric Power Distribution Engineering*. 2014. Accessed: Jan. 26, 2026. [Online]. Available: https://api.pageplace.de/preview/DT0400.9781482207057_A35203368/preview-9781482207057_A35203368.pdf
- [4] A. Hileman, “Insulation Coordination for Power Systems.” Accessed: Jan. 26, 2026. [Online]. Available: <https://ieeexplore-ieee-org.ecups.idm.oclc.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=785802>
- [5] H. DOMMEL, “Digital Computer Solution of Electromagnetic Transients in Single-and Multiphase Networks.” Accessed: Jan. 26, 2026. [Online]. Available: <https://ieeexplore-ieee-org.ecups.idm.oclc.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4073845>
- [6] R. Tarko, J. Gajdzica, W. Nowak, and W. Szpyra, “Study of the Lightning Overvoltage Protection Effectiveness of High Voltage Mixed Overhead Cable Power Lines,” *Energies* 2021, Vol. 14, Page 2329, vol. 14, no. 8, p. 2329, Apr. 2021, doi: 10.3390/EN14082329.
- [7] A. Borghetti, C. Nucci, M. Paolone, and F. Napolitano, “Transient Recovery Voltages in Vacuum Circuit Breakers Generated by the Interruption of Inrush Currents of Large Motors,” Dec. 2014, Accessed: Jan. 26, 2026. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/265201889_Transient_Recovery_Voltages_in_Vacuum_Circuit_Breakers_Generated_by_the_Interruption_of_Inrush_Currents_of_Large_Motors
- [8] IEC 60071-2, “IEC 60071-2:2023 | IEC.” Accessed: Jan. 26, 2026. [Online]. Available: <https://webstore.iec.ch/en/publication/64145>
- [9] R. Dugan, M. McGranaghan, S. Santoso, and H. Wayne Beaty, *Electrical Power Systems Quality, Third Edition*, 3rd ed. New York, 2012. Accessed: Jan. 26, 2026. [Online]. Available:

- <https://books.google.com.au/books?id=h1iBVtbSeI0C&printsec=copyright#v=onepage&q&f=false>
- [10] M. M. Aquino, A. A. Marquez, J. P. Silva, and R. J. Cabral, “Análisis De Fallas Por Descargas Atmosféricas En Redes De Distribución 13.2 kv,” *JIDeTEV*, no. 13, pp. 1–1, 2024, Accessed: Nov. 15, 2025. [Online]. Available: <https://autoresjidetev.fio.unam.edu.ar/index.php/jidetev/article/view/260>
- [11] “Descargas Atmosféricas – Preparación y Protección | Swiss Re.” Accessed: Nov. 18, 2025. [Online]. Available: <https://corporatesolutions.swissre.com/mexico-seguros/conocimiento/ingenieria-de-riesgos/guia-de-preparacion-y-proteccion-descargas-atmosfericas.html>
- [12] M. Carrión, F. Jiménez, R. Merino, J. Carrión, and A. Vega, “Coordinación de aislamiento en redes eléctricas de media tensión,” Feb. 2022, Accessed: Nov. 15, 2025. [Online]. Available: <https://www.redalyc.org/journal/3291/329170676008/html/>
- [13] N. N. Granda Alulima and B. J. Paguay Sari, “Desarrollo de una guía para coordinación de aislamiento en sistemas de distribución, basada en la normativa IEC 60071-2 e IEEE C62.82.1,” pp. 1–1, May 2024, Accessed: Nov. 13, 2025. [Online]. Available: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/27919>
- [14] “Ingeniería de Máquinas y Sistemas Eléctricos: Coordinación del aislamiento en una instalación eléctrica industrial.” Accessed: Nov. 18, 2025. [Online]. Available: <https://imseingenieria.blogspot.com/2019/09/coordinacion-del-aislamiento-en-una.html>
- [15] M. Faramarzi Palangar, M. Mirzaie, and A. Mahmoudi, “Improved flashover mathematical model of polluted insulators: A dynamic analysis of the electric arc parameters,” *Electric Power Systems Research*, vol. 179, p. 106083, Feb. 2020, doi: 10.1016/J.EPSR.2019.106083.
- [16] B. Dong, Y. Ge, B. Wu, and X. Jiang, “Modified model of AC flashover voltages of contaminated insulators with various shapes,” *Electric Power Systems Research*, vol. 218, p. 109188, May 2023, doi: 10.1016/J.EPSR.2023.109188.
- [17] “Tipos y material de los aisladores en líneas eléctricas - Sector Electricidad | Profesionales en Ingeniería Eléctrica.” Accessed: Nov. 18, 2025. [Online]. Available: <https://www.sectorelectricidad.com/34724/tipos-y-material-de-los-aisladores-en-lineas-electricas/>
- [18] IEEE Std C62.82.1™-2010, “C62.82.1-2010 - IEEE Standard for Insulation Coordination--Definitions, Principles, and Rules.” Accessed: Jan. 26, 2026. [Online]. Available: <https://ieeexplore-ieee-org.ecups.idm.oclc.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5754137>
- [19] IEC, “IEC 60383-1,” 2023, Accessed: Jan. 26, 2026. [Online]. Available: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/100824/0707432c74ed4eeeb7f0c8e1924c9339/IEC-60383-1-2023.pdf>
- [20] J. S. T. . Looms, *Insulators for High Voltages*. Londres: Peter Peregrinus on behalf of the Institution of Electrical Engineers, 2006.

- [21] WG Cigré, “Cigré WG C4.303 Guide for the selection of insulators with respect to contamination conditions Topics.” Accessed: Jan. 26, 2026. [Online]. Available: http://www.elettrotecnica.unina.it/files/lupo/upload/Cigre_WG_C4303_0.pdf
- [22] “TIPOS DE AISLADORES DE PORCELANA EN SISTEMAS DE POTENCIA.” Accessed: Jan. 26, 2026. [Online]. Available: <http://es.sytroncoelectric.com/news/types-of-porcelain-insulators-in-power-systems>
- [23] IEC, “IEC 60433.” Accessed: Jan. 26, 2026. [Online]. Available: https://webstore.iec.ch/en/iec_catalog/product/preview/?id=L3B1Yi9wZGYvcHJldmllldy9pbmZvX2llyzYwNDMze2Vkcnc4wfwIucGRm
- [24] V. Barbosa, G. Lira, E. Costa, G. Galdino, and A. Oliveira, “Estimation of the Pollution Critical Level on the Surface of Glass Insulators Based on Leakage Current,” Apr. 2024, Accessed: Jan. 26, 2026. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=10413629>
- [25] “Aisladores en líneas eléctricas: tipos y materiales clave.” Accessed: Jan. 26, 2026. [Online]. Available: <https://blog.structuralia.com/aisladores-en-lineas-electricas-materiales-tipos-y-caracteristicas-principales>
- [26] IEEE, “IEEE Guide for Application of Composite Insulators,” May 2002, Accessed: Jan. 26, 2026. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1000474>
- [27] “Aisladores Poliméricos: Conductores Industriales - Electrical Projects S.A.C.” Accessed: Jan. 26, 2026. [Online]. Available: <https://www.holley-epsac.com/aisladores-polimericos-conductores-industriales/>
- [28] IEC, “IEC Technical Specification 60815-1,” 2025, Accessed: Jan. 26, 2026. [Online]. Available: <https://webstore.iec.ch/en/publication/61046>
- [29] Dd, “¿Qué es un poste de electricidad?: Explorando los postes de energía eléctrica y su papel en la navegación - JOCA.” Accessed: Jan. 26, 2026. [Online]. Available: <https://joca-cable.com/es/blog/what-is-a-powerpole/>
- [30] IEC, “IEC 60071-1 INTERNATIONAL STANDARD,” 2019, Accessed: Jan. 26, 2026. [Online]. Available: <https://webstore.iec.ch/en/publication/59657>
- [31] F. Rizk and A. Rezazada, “Modeling of altitude effects on AC flashover of polluted high voltage insulators.” Accessed: Jan. 26, 2026. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=584384>
- [32] M. Ross, “Keeping the Blue Dragon in its Cage - J Harlen Blog.” Accessed: Jan. 26, 2026. [Online]. Available: https://www.jharlen.com/blog/2020/05/19/keeping-the-blue-dragon-in-its-cage/?srsltid=AfmBOopLzKG_fgrITKPZA7eSyD3V7SNdKYY3H3KlKtw5_jfT1SO3J8D4
- [33] M. Batalovic, M. Matoruga, H. Zildzo, and S. Smaka, “Analyzing the Root Cause for Insulator Failure through Investigating the Insulator Performance under Environmental Stresses,” *CIEES 2024 - IEEE International Conference on*

- Communications, Information, Electronic and Energy Systems*, p. 7, Dec. 2024, doi: 10.1109/CIEES62939.2024.10811222.
- [34] IEC, “IEC 60071-2: Insulation Co-ordination – Application Guidelines,” p. 188, 2023, Accessed: Jan. 27, 2026. [Online]. Available: https://studylib.net/doc/27831731/iec-60071-2-2023-en-?utm_source=chatgpt.com
- [35] A. A. Salem, K. Y. Lau, Z. Abdul-Malek, S. A. Al-Gailani, and C. W. Tan, “Flashover voltage of porcelain insulator under various pollution distributions: Experiment and modeling,” *Electric Power Systems Research*, vol. 208, p. 107867, Jul. 2022, doi: 10.1016/J.EPSR.2022.107867.
- [36] L. Cui and M. Ramesh, “Prediction of flashover voltage using electric field measurement on clean and polluted insulators,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 116, p. 105574, Mar. 2020, doi: 10.1016/J.IJEPES.2019.105574.
- [37] “Impacts & Mitigation - Insulator Flashover.” Accessed: Nov. 18, 2025. [Online]. Available: https://volcanoes.usgs.gov/volcanic_ash/insulator_flashover.html
- [38] C. Wang and I. A. Fulton, “A Brief Introduction of Python to Freshman Engineering Students Using Multimedia Applications,” Oct. 2020. Accessed: Nov. 18, 2025. [Online]. Available: <https://ieeexplore-ieee-org.ecups.idm.oclc.org/document/9273894>
- [39] Feranita, M. L. A. Jefri, and F. Murdiya, “The Effect of Lightning Characteristics on the Occurrence of Back Flashover on a 150 kV Transmission Line Using ATPDraw,” *Proceedings of the International Conference on Electrical Engineering and Informatics*, vol. 2022-October, p. 5, Dec. 2022, doi: 10.1109/ICONEEI55709.2022.9972247.
- [40] N. F. T. Dos Santos, G. A. Santos, F. A. Kharaghani, S. C. L. Freitas, and J. C. Da Silva, “Simulation tutorial in ATPdraw software - IEEE 4 nodes test feeder - Part 1,” *2020 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition - Latin America, T and D LA 2020*, Sep. 2020, doi: 10.1109/TDLA47668.2020.9326094.
- [41] “ATPDraw Home.” Accessed: Nov. 18, 2025. [Online]. Available: <https://www.atpdraw.net/>
- [42] J. L. Reis, J. G. Rolim, and A. B. Fernandes, “Insulation Coordination for Lightning Transients Based on Energy Spectral Density,” p. 7, Accessed: Jan. 27, 2026. [Online]. Available: https://www.ipstconf.org/papers/Proc_IPST2013/13IPST116.pdf
- [43] S. He *et al.*, “Intelligent prediction of 110kV insulator lightning flashover criteria based on random forest,” *Electric Power Systems Research*, vol. 232, p. 110423, Jul. 2024, doi: 10.1016/J.EPSR.2024.110423.
- [44] D. Filipović-Grčić, B. Filipović-Grčić, and I. Uglešić, “Lightning Critical Flashover Voltage of High Voltage Insulators: Laboratory Measurements and Calculations,” p. 8, Mar. 2012, Accessed: Jan. 31, 2026. [Online]. Available:

https://www.researchgate.net/publication/260187773_Lightning_Critical_Flashover_Voltage_of_High_Voltage_Insulators_Laboratory_Measurements_and_Calculations

7.2. ANEXOS

Anexo 1. Código Python de la figura 4.1

```

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# Parámetros
Lc = 0.42      # Longitud de cadena en metros
Kah1 = 1      # Densidad relativa del aire para h1
Kah2 = 0.8486 # Densidad relativa del aire para h2

# --- Marcado del valor en t ---
t_mark = 1 # microsegundo exacto

t = np.linspace(0.1, 9, 200) # tiempo microsegundos

# Curva de soportabilidad IEEE - Estándar
Vf_std = (400 + (710 / (t ** 0.75))) * Lc

# Curva de soportabilidad IEEE - h1 = 10 msnm
Vf_h1 = Vf_std * Kah1

# Curva de soportabilidad IEEE - h2 = 2500 msnm
Vf_h2 = Vf_std * Kah2

# --- Voltaje en t_mark ---
Vf_std_1us = (400 + (710 / (t_mark ** 0.75))) * Lc
Vf_h1_us = Vf_std_1us * Kah1
Vf_h2_us = Vf_std_1us * Kah2

# Gráfica
plt.plot(t, Vf_h1, linewidth=2, label='IEEE - h1 = 10 msnm (Ka = 1)')
plt.plot(t, Vf_h2, linewidth=2, label='IEEE - h2 = 2500 msnm (Ka =
0.8486)')

plt.text(0.5, 0.9,
        r'$h1: Vf = \left(400 + \frac{710}{t^{0.75}}\right)\cdot 0.42$
\cdot 1$',
        transform=plt.gca().transAxes,
        fontsize=12,
        ha='center')

plt.text(0.5, 0.8,
        r'$h2: Vf = \left(400 + \frac{710}{t^{0.75}}\right)\cdot 0.42$
\cdot 0.8486$',
        transform=plt.gca().transAxes,
        fontsize=12,
        ha='center')

```

```

plt.annotate(f'{Vf_h1_us:.1f} kV',
            (t_mark, Vf_h1_us),
            textcoords="offset points",
            xytext=(5,10),
            ha='left')

plt.annotate(f'{Vf_h2_us:.1f} kV',
            (t_mark, Vf_h2_us),
            textcoords="offset points",
            xytext=(5,-17),
            ha='left')

# --- Líneas de intersección h1 ---
plt.vlines(x=t_mark, ymin=0, ymax=Vf_h1_us,
          linestyle='dashed', linewidth=1.2,color="black")

plt.hlines(y=Vf_h1_us, xmin=0.1, xmax=t_mark,
          linestyle='dashed', linewidth=1.2, color="black")

# --- Punto de intersección h1 ---
plt.plot(t_mark, Vf_h1_us, marker='o',color='m',label='h1 - Voltaje en '
f'{t_mark:.1f} us = ' f'{Vf_h1_us:.1f} kV')

# --- Líneas de intersección h2 ---
plt.vlines(x=t_mark, ymin=0, ymax=Vf_h2_us,
          linestyle='dashed', linewidth=1.2,color="black")

plt.hlines(y=Vf_h2_us, xmin=0.1, xmax=t_mark,
          linestyle='dashed', linewidth=1.2, color="black")

# --- Punto de intersección h2 ---
plt.plot(t_mark, Vf_h2_us, marker='o',color='r',label='h2 - Voltaje en '
f'{t_mark:.1f} us = ' f'{Vf_h2_us:.1f} kV')

plt.title('Voltaje de Flameo vs Tiempo / IEEE / Cadena 3 aisladores ANSI
52-1')
plt.xlabel('Tiempo ( $\mu$ s)')
plt.ylabel('Voltaje (kV)')
plt.grid(True, which='both', linestyle='--', alpha=0.7)
plt.legend()
plt.xlim(0.06,9)
plt.ylim(0,1920)
plt.tight_layout()
plt.show()

```

Anexo 2. Código Python de la figura 4.2

```

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# Parámetros
U50 = 300      # U50 para cadena de 3 discos ANSI 52-1 (kV)
Kah1 = 1       # Densidad relativa del aire para h1
Kah2 = 0.8486  # Densidad relativa del aire para h2

# --- Marcado del valor en t ---
t_mark = 1     # microsegundo exacto

t = np.linspace(0.1, 9, 200) # tiempo microsegundos

# Curva de soportabilidad Hileman - Estándar
Vf_std = U50 * (0.58 + 1.39/np.sqrt(t))

# Curva de soportabilidad Hileman - h1 = 10 msnm
Vf_h1 = Vf_std * Kah1

# Curva de soportabilidad Hileman - h2 = 2500 msnm
Vf_h2 = Vf_std * Kah2

# --- Voltaje en t_mark ---
Vf_std_1us = U50 * (0.58 + 1.39/np.sqrt(t_mark))
Vf_h1_us = Vf_std_1us * Kah1
Vf_h2_us = Vf_std_1us * Kah2

# Gráfica
plt.plot(t, Vf_h1, linewidth=2, label='Hileman - h1 = 10 msnm (Ka = 1)')
plt.plot(t, Vf_h2, linewidth=2, label='Hileman - h2 = 2500 msnm (Ka =
0.8486)')

plt.text(0.5, 0.9,
        r'$h_1:\; V_f = 300\left(0.58 + \right.\left.\frac{1.39}{\sqrt{t}}\right)\cdot 1$',
        transform=plt.gca().transAxes,
        fontsize=12,
        ha='center')

plt.text(0.5, 0.8,
        r'$h_2:\; V_f = 300\left(0.58 + \right.\left.\frac{1.39}{\sqrt{t}}\right)\cdot 0.8486$',
        transform=plt.gca().transAxes,
        fontsize=12,
        ha='center')

```

```

plt.annotate(f'{Vf_h1_us:.1f} kV',
             (t_mark, Vf_h1_us),
             textcoords="offset points",
             xytext=(5,10),
             ha='left')

plt.annotate(f'{Vf_h2_us:.1f} kV',
             (t_mark, Vf_h2_us),
             textcoords="offset points",
             xytext=(5,-15),
             ha='left')

# --- Líneas de intersección h1 ---
plt.vlines(x=t_mark, ymin=0, ymax=Vf_h1_us,
           linestyle='dashed', linewidth=1.2,color="black")

plt.hlines(y=Vf_h1_us, xmin=0.1, xmax=t_mark,
           linestyle='dashed', linewidth=1.2, color="black")

# --- Punto de intersección h1 ---
plt.plot(t_mark, Vf_h1_us, marker='o',color='m',label='h1 - Voltaje a '
f'{t_mark:.1f} us = ' f'{Vf_h1_us:.1f} kV')

# --- Líneas de intersección h2 ---
plt.vlines(x=t_mark, ymin=0, ymax=Vf_h2_us,
           linestyle='dashed', linewidth=1.2,color="black")

plt.hlines(y=Vf_h2_us, xmin=0.1, xmax=t_mark,
           linestyle='dashed', linewidth=1.2, color="black")

# --- Punto de intersección h2 ---
plt.plot(t_mark, Vf_h2_us, marker='o',color='r',label='h2 - Voltaje a '
f'{t_mark:.1f} us = ' f'{Vf_h2_us:.1f} kV')

plt.title('Voltaje de Flameo vs Tiempo / Hileman / Cadena 3 aisladores
ANSI 52-1')
plt.xlabel('Tiempo ( $\mu$ s)')
plt.ylabel('Voltaje (kV)')
plt.grid(True, which='both', linestyle='--', alpha=0.7)
plt.legend()
plt.xlim(0.06,9)
plt.ylim(0,1600)
plt.tight_layout()
plt.show()

```

Anexo 3. Código Python de la figura 4.3

```

import numpy as np

import matplotlib.pyplot as plt
# Parámetros
E0 = 450      # kV/m
a = 1.2
b = 0.9
n = 0.5
L = 0.42     # Longitud de cadena en metros

Kah1 = 1      # Densidad relativa del aire para h1
Kah2 = 0.8486 # Densidad relativa del aire para h2

# --- Marcado del valor en t ---
t_mark = 1 # microsegundo exacto

t = np.linspace(0.1, 9, 200) # tiempo microsegundos

# Curva de soportabilidad basado en campo eléctrico - Estándar
Vf_std = E0 * (a + b / (t ** n)) * L

# Curva de soportabilidad basado en campo eléctrico - h1 = 10 msnm
Vf_h1 = Vf_std * Kah1

# Curva de soportabilidad basado en campo eléctrico - h2 = 2500 msnm
Vf_h2 = Vf_std * Kah2

# --- Voltaje en t_mark ---
Vf_std_1us = E0 * (a + b / (t_mark ** n)) * L
Vf_h1_us = Vf_std_1us * Kah1
Vf_h2_us = Vf_std_1us * Kah2

# Gráfica
plt.plot(t, Vf_h1, linewidth=2, label='Modelo Camp. Eléc. - h1 = 10 msnm
(Ka = 1)')
plt.plot(t, Vf_h2, linewidth=2, label='Modelo Camp. Eléc. - h2 = 2500
msnm (Ka = 0.8486)')

plt.text(0.225, 0.9,
         r'$h_1: \; V_f = 450 \left( 1.2 + \right. $
         \frac{0.9}{t^{0.5}} \left. \right) 0.42 \cdot 1$',
         transform=plt.gca().transAxes,
         fontsize=12,
         ha='center')

plt.text(0.225, 0.8,

```

```

        r'$h_2:\; V_f = 450\left(1.2 + \frac{0.9}{t^{0.5}}\right)0.42\cdot 0.8486$',
        transform=plt.gca().transAxes,
        fontsize=12,
        ha='center')

plt.annotate(f'{Vf_h1_us:.1f} kV',
            (t_mark, Vf_h1_us),
            textcoords="offset points",
            xytext=(5,10),
            ha='left')

plt.annotate(f'{Vf_h2_us:.1f} kV',
            (t_mark, Vf_h2_us),
            textcoords="offset points",
            xytext=(5,-15),
            ha='left')

# --- Líneas de intersección h1 ---
plt.vlines(x=t_mark, ymin=0, ymax=Vf_h1_us,
           linestyle='dashed', linewidth=1.2,color="black")

plt.hlines(y=Vf_h1_us, xmin=0.1, xmax=t_mark,
           linestyle='dashed', linewidth=1.2, color="black")

# --- Punto de intersección h1 ---
plt.plot(t_mark, Vf_h1_us, marker='o',color='m',label='h1 - Voltaje a '
f'{t_mark:.1f} us = ' f'{Vf_h1_us:.1f} kV')

# --- Líneas de intersección h2 ---
plt.vlines(x=t_mark, ymin=0, ymax=Vf_h2_us,
           linestyle='dashed', linewidth=1.2,color="black")

plt.hlines(y=Vf_h2_us, xmin=0.1, xmax=t_mark,
           linestyle='dashed', linewidth=1.2, color="black")

# --- Punto de intersección h2 ---
plt.plot(t_mark, Vf_h2_us, marker='o',color='r',label='h2 - Voltaje a '
f'{t_mark:.1f} us = ' f'{Vf_h2_us:.1f} kV')
plt.title('Voltaje de Flameo vs Tiempo / CAMPO ELÉCTRICO / Cadena 3
aisladores ANSI 52-1')
plt.xlabel('Tiempo (μs)')
plt.ylabel('Voltaje (kV)')
plt.grid(True, which='both', linestyle='--', alpha=0.7)
plt.legend()
plt.xlim(0.06,9)
plt.ylim(0,900)
plt.tight_layout()
plt.show()

```

Anexo 4. Código Python de la figura 4.4

```

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# Parámetros IEEE
Lc = 0.42      # Longitud de cadena en metros
Kah1 = 1      # Densidad relativa del aire para h1

# Parámetros HILEMAN
U50 = 300     # U50 para cadena de 3 discos ANSI 52-1 (kV)
Kah1 = 1     # Densidad relativa del aire para h1

# Parámetros CAMP. ELEC.
E0 = 450     # kV/m
a = 1.2
b = 0.9
n = 0.5
L = 0.42     # Longitud de cadena en metros

# --- Marcado del valor en t ---
t_mark = 1   # microsegundo exacto

t = np.linspace(0.1, 9, 100) # tiempo microsegundos

# Curva de soportabilidad IEEE - Estándar
Vf_stdIEEE = (400 + (710 / (t ** 0.75))) * Lc
# Curva de soportabilidad IEEE - h1 = 10 msnm
Vf_h1IEEE = Vf_stdIEEE * Kah1

# Curva de soportabilidad Hileman - Estándar
Vf_stdHILEMAN = U50 * (0.58 + 1.39/np.sqrt(t))
# Curva de soportabilidad Hileman - h1 = 10 msnm
Vf_h1HILEMAN = Vf_stdHILEMAN * Kah1

# Curva de soportabilidad basado en campo eléctrico - Estándar
Vf_stdCE = E0 * (a + b / (t ** n)) * L
# Curva de soportabilidad basado en campo eléctrico - h1 = 10 msnm
Vf_h1CE = Vf_stdCE * Kah1

# --- Voltaje en t_mark --- IEEE
Vf_std_1usIEEE = (400 + (710 / (t_mark ** 0.75))) * Lc
Vf_h1_usIEEE = Vf_std_1usIEEE * Kah1

# --- Voltaje en t_mark --- HILEMAN
Vf_std_1usHILEMAN = U50 * (0.58 + 1.39/np.sqrt(t_mark))

```

```

Vf_h1_usHILEMAN = Vf_std_1usHILEMAN * Kah1

# --- Voltaje en t_mark --- CAMP. ELEC.
Vf_std_1usCE = E0 * (a + b / (t_mark ** n)) * L
Vf_h1_usCE = Vf_std_1usCE * Kah1

# Gráfica
plt.plot(t, Vf_h1IEEE, linewidth=2, label='Modelo IEEE', color="g")
plt.plot(t, Vf_h1HILEMAN, linewidth=2, label='Modelo Hileman', color="b")
plt.plot(t, Vf_h1CE, linewidth=2, label='Modelo Campo Eléctrico',
color="orange")

plt.text(0.5, 0.9,
         r'$IEEE: V_f = \left(400 + \frac{710}{t^{0.75}}\right)\cdot Lc$'
         \cdot 1$',
         transform=plt.gca().transAxes,
         fontsize=12,
         ha='center')

plt.text(0.5, 0.8,
         r'$HILEMAN: V_f = U_{50}\left(0.58 + \frac{1.39}{\sqrt{t}}\right)\cdot 1$',
         transform=plt.gca().transAxes,
         fontsize=12,
         ha='center')

plt.text(0.5, 0.7,
         r'$CAMP. ELEC.: V_f = E_0\left(a + \frac{b}{t^c}\right)\cdot L$'
         \cdot 1$',
         transform=plt.gca().transAxes,
         fontsize=12,
         ha='center')

# --- Líneas de intersección h1 --- IEEE
plt.vlines(x=t_mark, ymin=0, ymax=Vf_h1_usIEEE,
           linestyle='dashed', linewidth=1.2,color="black")

plt.hlines(y=Vf_h1_usIEEE, xmin=0.1, xmax=t_mark,
           linestyle='dashed', linewidth=1.2, color="black")

# --- Punto de intersección h1 ---
plt.plot(t_mark, Vf_h1_usIEEE, marker='o',color='g',label='IEEE - Voltaje
en ' f'{t_mark:.1f} us = ' f'{Vf_h1_usIEEE:.1f} kV')

# --- Líneas de intersección h1 --- HILEMAN
plt.vlines(x=t_mark, ymin=0, ymax=Vf_h1_usHILEMAN,
           linestyle='dashed', linewidth=1.2,color="black")

```

```

plt.hlines(y=Vf_h1_usHILEMAN, xmin=0.1, xmax=t_mark,
           linestyle='dashed', linewidth=1.2, color="black")

# --- Punto de intersección h1 ---
plt.plot(t_mark, Vf_h1_usHILEMAN, marker='o',color='b',label='HILEMAN -
Voltaje en ' f'{t_mark:.1f} us = ' f'{Vf_h1_usHILEMAN:.1f} kV')

# --- Líneas de intersección h1 --- CAMP. ELÉC.
plt.vlines(x=t_mark, ymin=0, ymax=Vf_h1_usCE,
           linestyle='dashed', linewidth=1.2,color="black")

plt.hlines(y=Vf_h1_usCE, xmin=0.1, xmax=t_mark,
           linestyle='dashed', linewidth=1.2, color="black")

# --- Punto de intersección h1 ---
plt.plot(t_mark, Vf_h1_usCE, marker='o',color='orange',label='CAMP. ELÉC.
- Voltaje en ' f'{t_mark:.1f} us = ' f'{Vf_h1_usCE:.1f} kV')

plt.title('Comparativa modelos IEEE - HILEMAN - CAMP. ELEC. Para h1 = 10
msnm - Cadena 3 aisladores ANSI 52-1')
plt.xlabel('Tiempo ( $\mu$ s)')
plt.ylabel('Voltaje (kV)')
plt.grid(True, which='both', linestyle='--', alpha=0.7)
plt.legend()
plt.xlim(0.06,9)
plt.ylim(0,1920)
plt.tight_layout()
plt.show()

```

Anexo 5. Código Python de la figura 4.5

```

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# Parámetros IEEE
Lc = 0.42      # Longitud de cadena en metros
Kah2 = 0.8486 # Densidad relativa del aire para h1

# Parámetros HILEMAN
U50 = 300      # U50 para cadena de 3 discos ANSI 52-1 (kV)

# Parámetros CAMP. ELEC.
E0 = 450      # kV/m
a = 1.2
b = 0.9
n = 0.5

```

```

L = 0.42      # Longitud de cadena en metros

# --- Marcado del valor en t ---
t_mark = 1   # microsegundo exacto

t = np.linspace(0.1, 9, 200) # tiempo microsegundos

# Curva de soportabilidad IEEE - Estándar
Vf_stdIEEE = (400 + (710 / (t ** 0.75))) * Lc
# Curva de soportabilidad IEEE - h1 = 10 msnm
Vf_h2IEEE = Vf_stdIEEE * Kah2

# Curva de soportabilidad Hileman - Estándar
Vf_stdHILEMAN = U50 * (0.58 + 1.39/np.sqrt(t))
# Curva de soportabilidad Hileman - h1 = 10 msnm
Vf_h2HILEMAN = Vf_stdHILEMAN * Kah2

# Curva de soportabilidad basado en campo eléctrico - Estándar
Vf_stdCE = E0 * (a + b / (t ** n)) * L
# Curva de soportabilidad basado en campo eléctrico - h1 = 10 msnm
Vf_h2CE = Vf_stdCE * Kah2

# --- Voltaje en t_mark --- IEEE
Vf_std_1usIEEE = (400 + (710 / (t_mark ** 0.75))) * Lc
Vf_h2_usIEEE = Vf_std_1usIEEE * Kah2

# --- Voltaje en t_mark --- HILEMAN
Vf_std_1usHILEMAN = U50 * (0.58 + 1.39/np.sqrt(t_mark))
Vf_h2_usHILEMAN = Vf_std_1usHILEMAN * Kah2

# --- Voltaje en t_mark --- CAMP. ELEC.
Vf_std_1usCE = E0 * (a + b / (t_mark ** n)) * L
Vf_h2_usCE = Vf_std_1usCE * Kah2

# Gráfica
plt.plot(t, Vf_h2IEEE, linewidth=2, label='Modelo IEEE',color='g',)
plt.plot(t, Vf_h2HILEMAN, linewidth=2, label='Modelo Hileman',color='b',)
plt.plot(t, Vf_h2CE, linewidth=2, label='Modelo Campo
Eléctrico',color='orange',)

plt.text(0.5, 0.9,
        r'$IEEE: Vf = \left(400 + \frac{710}{t^{0.75}}\right)\cdot Lc$
\cdot 0.8486$',
        transform=plt.gca().transAxes,
        fontsize=12,
        ha='center')

plt.text(0.5, 0.8,

```

```

        r'$HILEMAN:\; V_f = U_{50}\left(0.58 + \frac{1.39}{\sqrt{t}}\right)\cdot 0.8486$',
        transform=plt.gca().transAxes,
        fontsize=12,
        ha='center')

plt.text(0.5, 0.7,
        r'$CAMP. ELEC.:\; V_f = E_0\left(a + \frac{b}{t^c}\right)\cdot L \cdot 0.8486$',
        transform=plt.gca().transAxes,
        fontsize=12,
        ha='center')

# --- Líneas de intersección h2 --- IEEE
plt.vlines(x=t_mark, ymin=0, ymax=Vf_h2_usIEEE,
           linestyle='dashed', linewidth=1.2,color="black")

plt.hlines(y=Vf_h2_usIEEE, xmin=0.1, xmax=t_mark,
           linestyle='dashed', linewidth=1.2, color="black")

# --- Punto de intersección h2 ---
plt.plot(t_mark, Vf_h2_usIEEE, marker='o',color='g',label='IEEE - Voltaje en ' f'{t_mark:.1f} us = ' f'{Vf_h2_usIEEE:.1f} kV')

# --- Líneas de intersección h2 --- HILEMAN
plt.vlines(x=t_mark, ymin=0, ymax=Vf_h2_usHILEMAN,
           linestyle='dashed', linewidth=1.2,color="black")

plt.hlines(y=Vf_h2_usHILEMAN, xmin=0.1, xmax=t_mark,
           linestyle='dashed', linewidth=1.2, color="black")

# --- Punto de intersección h2 ---
plt.plot(t_mark, Vf_h2_usHILEMAN, marker='o',color='b',label='HILEMAN - Voltaje en ' f'{t_mark:.1f} us = ' f'{Vf_h2_usHILEMAN:.1f} kV')

# --- Líneas de intersección h2 --- CAMP. ELÉC.
plt.vlines(x=t_mark, ymin=0, ymax=Vf_h2_usCE,
           linestyle='dashed', linewidth=1.2,color="black")

plt.hlines(y=Vf_h2_usCE, xmin=0.1, xmax=t_mark,
           linestyle='dashed', linewidth=1.2, color="black")

# --- Punto de intersección h2 ---
plt.plot(t_mark, Vf_h2_usCE, marker='o',color='orange',label='CAMP. ELÉC. - Voltaje en ' f'{t_mark:.1f} us = ' f'{Vf_h2_usCE:.1f} kV')

plt.title('Comparativa modelos IEEE - HILEMAN - CAMP. ELEC. Para h2 = 2500 msnm - Cadena 3 aisladores ANSI 52-1')
plt.xlabel('Tiempo ( $\mu$ s)')

```

```

plt.ylabel('Voltaje (kV)')
plt.grid(True, which='both', linestyle='--', alpha=0.7)
plt.legend()
plt.xlim(0.06,9)
plt.ylim(0,1920)
plt.tight_layout()
plt.show()

```

Anexo 6. Código Python de la figura 4.6

```

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

Vimp = 1500    # KV
m = Vimp/8
tv = 2        # us

b = -m * tv

tp = (Vimp - b) / m

t = np.linspace(1, tp, 200) # tiempo de 1 a 100 microsegundos

# Voltaje producido por rayo
V = b + m * t

# Gráfica
plt.plot(t, V, linewidth=2,
         label=f'Voltaje de impacto: {Vimp} kV - {tp:.2f} µs')

plt.scatter(tp, Vimp, color='red', zorder=5,
           label=f'{Vimp} kV en {tp:.2f} µs')

plt.text(0.7, 1300,
        'Voltaje que produce rayo de:',
        color='r',
        fontsize=10,
        verticalalignment='bottom')
plt.text(0.7, 1225,
        'Ipico = 6667 A',
        color='b',
        fontsize=10,
        verticalalignment='bottom')
plt.text(0.7, 1150,
        'Pulso: 8/20 us',
        color='b',
        fontsize=10,

```

```

        verticalalignment='bottom')

plt.title('Voltaje producido por descarga atmosférica')
plt.xlabel('Tiempo (μs)')
plt.ylabel('Voltaje (kV)')
plt.grid(True, which='both', linestyle='--', alpha=0.7)
plt.legend()
plt.ylim(0,Vimp+100)
plt.tight_layout()
plt.show()

```

Anexo 7. Código Python de la figura 4.7

```

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# Parámetros IEEE
Lc = 0.42      # longitud de cadena en metros
Kah1 = 1

# Parámetros del voltaje del rayo
Vimp = 1500    # kV
m = Vimp / 8
tv = 2        # μs

b = -m * tv

t = np.linspace(0.1, 10, 200) # tiempo de 1 a 10 microsegundos

# Voltaje producido por el rayo
V_rayo = b + m * t

# Curva de soportabilidad - IEEE - Estándar
Vf_std = (400 + (710 / (t ** 0.75))) * Lc
# Curva de soportabilidad - IEEE - Ka = 1
Vf_Kah1 = Vf_std * Kah1

# Flameo (intersección)
def interseccion_precisa(t, V1, V2):
    diff = V1 - V2
    i = np.where(np.diff(np.sign(diff)))[0][0]

    t1, t2 = t[i], t[i + 1]
    d1, d2 = diff[i], diff[i + 1]

    t_int = t1 - d1 * (t2 - t1) / (d2 - d1)
    V_int = np.interp(t_int, t, V1)

```

```

    return t_int, V_int

t_std, V_std = interseccion_precisa(t, V_rayo, Vf_std)

#Punto exacto de flameo
t_mod = np.sort(np.append(t, t_std))

V_rayo_mod = b + m * t_mod
V_rayo_flash = np.where(t_mod <= t_std, V_rayo_mod, 0)

# Gráfica
plt.plot(t_mod, V_rayo_flash, linewidth=2, color="blue",
         label=f'Voltaje producido por el rayo')

plt.plot(t, Vf_std, linewidth=2, color='orange',
         label='IEEE - h1 = 10 msnm (Ka = 1)')

plt.scatter(t_std, V_std, zorder=7, color='orange',
           label=f'Flameo: {V_std:.0f} kV en {t_std:.2f} µs')

plt.title('Voltaje de Flameo / IEEE / Para h1 = 10 msnm / Cadena 3
aisladores ANSI 52-1')
plt.xlabel('Tiempo (µs)')
plt.ylabel('Voltaje (kV)')
plt.grid(True, which='both', linestyle='--', alpha=0.7)
plt.legend()
plt.ylim(0, 1900)
plt.tight_layout()
plt.show()

```

Anexo 8. Código Python de la figura 4.7

```

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# Parámetros IEEE
Lc = 0.42      # longitud de cadena en metros
Kah2 = 0.8486

# Parámetros del voltaje del rayo
Vimp = 1500    # kV
m = Vimp / 8
tv = 2         # µs

b = -m * tv

t = np.linspace(0.1, 10, 200) # tiempo de 1 a 10 microsegundos

```

```

# Voltaje producido por el rayo
V_rayo = b + m * t

# Curva de soportabilidad - IEEE - Estándar
Vf_std = (400 + (710 / (t ** 0.75))) * Lc
# Curva de soportabilidad - IEEE - Ka = 0.8486
Vf_Kah2 = Vf_std * Kah2

# Flameo (intersección)
def interseccion_precisa(t, V1, V2):
    diff = V1 - V2
    i = np.where(np.diff(np.sign(diff)))[0][0]

    t1, t2 = t[i], t[i + 1]
    d1, d2 = diff[i], diff[i + 1]

    t_int = t1 - d1 * (t2 - t1) / (d2 - d1)
    V_int = np.interp(t_int, t, V1)

    return t_int, V_int

t_ka, V_ka = interseccion_precisa(t, V_rayo, Vf_Kah2)

#Punto exacto de flameo
t_mod = np.sort(np.append(t, t_ka))

V_rayo_mod = b + m * t_mod
V_rayo_flash = np.where(t_mod <= t_ka, V_rayo_mod, 0)

# Gráfica
plt.plot(t_mod, V_rayo_flash, linewidth=2, color="blue",
         label='Voltaje producido por el rayo')

plt.plot(t, Vf_Kah2, linewidth=2, color='m',
         label='IEEE - h2 = 2500 msnm (Ka = 0.8486)')

plt.scatter(t_ka, V_ka, zorder=7, color='m',
            label=f'Flameo: {V_ka:.0f} kV en {t_ka:.2f} μs')

plt.title('Voltaje de Flameo / IEEE / Para h2 = 2500 msnm / Cadena 3
aisladores ANSI 52-1')
plt.xlabel('Tiempo (μs)')
plt.ylabel('Voltaje (kV)')
plt.grid(True, which='both', linestyle='--', alpha=0.7)
plt.legend()
plt.ylim(0, 1600)
plt.tight_layout()
plt.show()

```

Anexo 9. Código Python de la figura 4.8

```

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# Parámetros Hileman
U50 = 300      # kV - cadena 3 discos ANSI 52-1
Kah1 = 1

# Parámetros del voltaje del rayo
Vimp = 1500    # kV
m = Vimp / 8
tv = 2         # μs

b = -m * tv

t = np.linspace(0.1, 10, 200) # tiempo de 1 a 10 microsegundos

# Voltaje producido por el rayo
V_rayo = b + m * t

# Curva de soportabilidad - Hileman - Estándar
Vf_std = U50 * (0.58 + 1.39 / np.sqrt(t))
# Curva de soportabilidad - Hileman - Ka = 1
Vf_Kah1 = Vf_std * Kah1

# Flameo (intersección)
def interseccion_precisa(t, V1, V2):
    diff = V1 - V2
    i = np.where(np.diff(np.sign(diff)))[0][0]

    t1, t2 = t[i], t[i + 1]
    d1, d2 = diff[i], diff[i + 1]

    t_int = t1 - d1 * (t2 - t1) / (d2 - d1)
    V_int = np.interp(t_int, t, V1)

    return t_int, V_int

t_std, V_std = interseccion_precisa(t, V_rayo, Vf_std)

#Punto exacto de flameo
t_mod = np.sort(np.append(t, t_std))

V_rayo_mod = b + m * t_mod
V_rayo_flash = np.where(t_mod <= t_std, V_rayo_mod, 0)

# Gráfica
plt.plot(t_mod, V_rayo_flash, linewidth=2, color="blue",

```

```

        label='Voltaje producido por el rayo')

plt.plot(t, Vf_std, linewidth=2, color='orange',
         label='Hileman - h1 = 10 msnm (Ka = 1)')

plt.scatter(t_std, V_std, zorder=7, color='orange',
           label=f'Flameo: {V_std:.0f} kV en {t_std:.2f} μs')

plt.title('Voltaje de Flameo / Hileman / Para h1 = 10 msnm / Cadena 3
aisladores ANSI 52-1')
plt.xlabel('Tiempo (μs)')
plt.ylabel('Voltaje (kV)')
plt.grid(True, which='both', linestyle='--', alpha=0.7)
plt.legend()
plt.ylim(0, 1600)
plt.tight_layout()
plt.show()

```

Anexo 10. Código Python de la figura 4.9

```

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# Parámetros Hileman
U50 = 300      # kV - cadena 3 discos ANSI 52-1
Kah2 = 0.8486

# Parámetros del voltaje del rayo
Vimp = 1500    # kV
m = Vimp / 8
tv = 2         # μs

b = -m * tv

t = np.linspace(0.1, 10, 200) # tiempo de 1 a 10 microsegundos

# Voltaje producido por el rayo
V_rayo = b + m * t

# Curva de soportabilidad - Hileman - Estándar
Vf_std = U50 * (0.58 + 1.39 / np.sqrt(t))
# Curva de soportabilidad - Hileman - Ka = 0.8486
Vf_Kah2 = Vf_std * Kah2

# Flameo (intersección)
def interseccion_precisa(t, V1, V2):
    diff = V1 - V2

```

```

i = np.where(np.diff(np.sign(diff)))[0][0]

t1, t2 = t[i], t[i + 1]
d1, d2 = diff[i], diff[i + 1]

t_int = t1 - d1 * (t2 - t1) / (d2 - d1)
V_int = np.interp(t_int, t, V1)

return t_int, V_int

t_ka, V_ka = interseccion_precisa(t, V_rayo, Vf_Kah2)

#Punto exacto de flameo
t_mod = np.sort(np.append(t, t_ka))

V_rayo_mod = b + m * t_mod
V_rayo_flash = np.where(t_mod <= t_ka, V_rayo_mod, 0)

# Gráfica
plt.plot(t_mod, V_rayo_flash, linewidth=2, color="blue",
         label='Voltaje producido por el rayo')

plt.plot(t, Vf_Kah2, linewidth=2, color='m',
         label='Hileman - h2 = 2500 msnm (Ka = 0.8486)')

plt.scatter(t_ka, V_ka, zorder=7, color='m',
            label=f'Flameo: {V_ka:.0f} kV en {t_ka:.2f} µs')

plt.title('Voltaje de Flameo / Hileman / Para h2 = 2500 msnm / Cadena 3
aisladores ANSI 52-1')
plt.xlabel('Tiempo (µs)')
plt.ylabel('Voltaje (kV)')
plt.grid(True, which='both', linestyle='--', alpha=0.7)
plt.legend()
plt.ylim(0, 1350)
plt.tight_layout()
plt.show()

```

Anexo 11. Código Python de la figura 4.10

```

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# Parámetros
E0 = 450      # kV/m
a = 1.2
b = 0.9

```

```

n = 0.5
L = 0.42      # longitud de la cadena (m) - 3 discos ANSI 52-1

Kah1 = 1

# Parámetros Voltaje
Vimp = 1500   # KV
m = Vimp/8
tv = 2        # us

br = -m * tv

t = np.linspace(0.1, 10, 200) # tiempo de 1 a 10 microsegundos

# Voltaje producido por el rayo
V_rayo = br + m * t

# Curva de soportabilidad basado en campo eléctrico - Estándar
Vf_std = E0 * (a + b / (t ** n)) * L
# Curva de soportabilidad basado en campo eléctrico - Ka = 1
Vf_Kah1 = Vf_std * Kah1

# Flameo (intersección)
def interseccion_precisa(t, V1, V2):
    diff = V1 - V2
    i = np.where(np.diff(np.sign(diff)))[0][0]

    t1, t2 = t[i], t[i+1]
    d1, d2 = diff[i], diff[i+1]

    # interpolación lineal
    t_int = t1 - d1 * (t2 - t1) / (d2 - d1)
    V_int = np.interp(t_int, t, V1)

    return t_int, V_int

t_std, V_std = interseccion_precisa(t, V_rayo, Vf_std)

#Punto exacto de flameo
t_mod = np.sort(np.append(t, t_std))

V_rayo_mod = br + m * t_mod
V_rayo_flash = np.where(t_mod <= t_std, V_rayo_mod, 0)

# Gráfica
plt.plot(t_mod, V_rayo_flash, linewidth=2, color="blue",
         label='Voltaje producido por el rayo')

```

```

plt.plot(t, Vf_std, linewidth=2, color='orange', label='Modelo basado en
campo eléctrico - h1 = 10 msnm (Ka = 1)')

plt.scatter(t_std, V_std, zorder=7, color='orange',
            label=f'Flameo: {V_std:.0f} kV en {t_std:.2f} μs')

plt.title('Voltaje de Flameo / CAMP. ELEC. / Para h1 = 10 msnm / Cadena 3
aisladores ANSI 52-1')
plt.xlabel('Tiempo (μs)')
plt.ylabel('Voltaje (kV)')
plt.grid(True, which='both', linestyle='--', alpha=0.7)
plt.legend()
plt.ylim(0,1100)
plt.tight_layout()
plt.show()

```

Anexo 12. Código Python de la figura 4.11

```

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# Parámetros
E0 = 450      # kV/m
a = 1.2
b = 0.9
n = 0.5
L = 0.42     # longitud de la cadena (m) - 3 discos ANSI 52-1

Kah2 = 0.8486

# Parámetros Voltaje
Vimp = 1500  # KV
m = Vimp/8
tv = 2      # us

br = -m * tv

t = np.linspace(0.1, 10, 200) # tiempo de 1 a 10 microsegundos

# Voltaje producido por el rayo
V_rayo = br + m * t

# Curva de soportabilidad basado en campo eléctrico - Estándar
Vf_std = E0 * (a + b / (t ** n)) * L
# Curva de soportabilidad basado en campo eléctrico - Ka = 0.8486
Vf_Kah2 = Vf_std * Kah2

```

```

# Flameo (intersección)
def interseccion_precisa(t, V1, V2):
    diff = V1 - V2
    i = np.where(np.diff(np.sign(diff)))[0][0]

    t1, t2 = t[i], t[i+1]
    d1, d2 = diff[i], diff[i+1]

    # interpolación lineal
    t_int = t1 - d1 * (t2 - t1) / (d2 - d1)
    V_int = np.interp(t_int, t, V1)

    return t_int, V_int

t_ka, V_ka = interseccion_precisa(t, V_rayo, Vf_Kah2)

#Punto exacto de flameo
t_mod = np.sort(np.append(t, t_ka))

V_rayo_mod = br + m * t_mod
V_rayo_flash = np.where(t_mod <= t_ka, V_rayo_mod, 0)

# Gráfica
plt.plot(t_mod, V_rayo_flash, linewidth=2, color="blue",
         label='Voltaje producido por el rayo')

plt.plot(t, Vf_Kah2, linewidth=2, color='m', label='Modelo basado en
campo eléctrico - h2 (Ka = 0.8486)')

plt.scatter(t_ka, V_ka, zorder=7, color='m',
           label=f'Flameo: {V_ka:.0f} kV en {t_ka:.2f} μs')

plt.title('Voltaje de Flameo / CAMP. ELEC. / Para h2 = 2500 msnm / Cadena
3 aisladores ANSI 52-1')
plt.xlabel('Tiempo (μs)')
plt.ylabel('Voltaje (kV)')
plt.grid(True, which='both', linestyle='--', alpha=0.7)
plt.legend()
plt.ylim(0,1100)
plt.tight_layout()
plt.show()

```