



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

DEPARTAMENTO
DE INGENIERÍA
ELÉCTRICA

Recomendaciones para la especificación de aisladores compuestos en líneas HVDC mediante simulación computacional

Stefan Andrés Rojo Aguilera

Memoria para optar al título de:
Ingeniero Civil Electricista

Profesores guía:
Roger Schurch Brandt
Johny Montaña Chaparro

Agradecimientos

En primer lugar, quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mi padre, cuyo esfuerzo y sacrificio hicieron posible que pudiera costear mi estadía en Valparaíso. Sin su apoyo incondicional y su confianza en mí, este camino habría sido mucho más difícil.

A mi madre, quien siempre estuvo atenta a mi bienestar y me brindó su amor y respaldo en los momentos más desafiantes. Su preocupación constante y sus palabras de aliento fueron un pilar fundamental en este proceso.

También quiero agradecer a mi novia, quien fue una fuente inagotable de motivación. Su apoyo logró animarme en los momentos de duda.

Por último, a mis familiares, quienes siempre se preocuparon por mí y me brindaron su cariño incondicional. Sus palabras de aliento y su apoyo fueron una gran fuente de fortaleza a lo largo de este camino.

Resumen

El presente estudio se centra en la contaminación de los aisladores eléctricos y su impacto en la corriente de fuga y la tensión de ruptura. Se aplicó un enfoque metodológico que combina análisis experimental y simulaciones computacionales con COMSOL para evaluar la influencia de diferentes condiciones de contaminación en el rendimiento de los aisladores.

La fase experimental incluyó la aplicación de capas contaminantes mediante el método de capa sólida, seguida de pruebas de alta tensión en condiciones de humedad variables. Estas pruebas permitieron determinar la tensión de ruptura, el comportamiento de la corriente de fuga, la conductividad del medio contaminado y la permitividad del contaminante.

Las simulaciones computacionales abarcaron diferentes modelos de contaminación: homogénea, semi-homogénea y no homogénea con cambios abruptos o escalonados de conductividad. Los resultados mostraron variaciones significativas en la corriente de fuga según la distribución de la contaminación para un mismo valor de conductividad, resaltando la dificultad de simulación.

El análisis de los resultados experimentales evidenció una fuerte correlación entre la corriente de fuga y la tensión de ruptura, aunque con variaciones según el caso. En condiciones de contaminación salina, un aumento en la corriente de fuga indica una reducción notable en la tensión de ruptura. Sin embargo, en los casos E4 y E6, a niveles de humedad moderadamente bajos (menores al 95 % de HR), un incremento en la corriente de fuga no implica necesariamente una disminución significativa en la tensión de ruptura. La presencia de contaminantes con distintos niveles de conductividad complicó la modelación y puso de manifiesto la dificultad de obtener simulaciones fiables y precisas. Además, la presencia de contaminantes con distintos niveles de conductividad introdujo desafíos en la modelación, evidenciando la dificultad de lograr simulaciones confiables.

En conclusión, el estudio confirma que la contaminación tiene un impacto significativo en el rendimiento de los aisladores y que la modelación computacional, en su estado actual, no es completamente fiable para predecir con precisión su comportamiento. Se requiere una mayor consideración de los efectos de la contaminación no homogénea para mejorar la exactitud de los modelos. Por ello, se recomienda el desarrollo de experimentos reales y la implementación de métodos de monitoreo en tiempo real, con el objetivo de optimizar las estrategias de mantenimiento y mejorar la fiabilidad del desempeño de los aisladores en condiciones reales de operación.

Abstract

The present study focuses on the contamination of electrical insulators and its impact on leakage current and breakdown voltage. A methodological approach combining experimental analysis and computational simulations using COMSOL was applied to evaluate the influence of different contamination conditions on insulator performance.

The experimental phase included the application of contaminant layers using the solid layer method, followed by high-voltage tests under varying humidity conditions. These tests allowed for the determination of breakdown voltage, leakage current behavior, conductivity of the contaminated layer and contaminant permittivity.

Computational simulations covered different contamination models: homogeneous, semi-homogeneous, and non-homogeneous with abrupt or stepped conductivity changes. The results showed significant variations in leakage current depending on contamination distribution, highlighting the importance of accurate modeling in predicting insulator behavior.

The analysis of experimental results revealed a strong correlation between leakage current and breakdown voltage, with variations depending on specific cases. Under saline contamination conditions, an increase in leakage current leads to a significant reduction in breakdown voltage. However, in cases E4 and E6, at moderately low humidity levels (below 95 % RH), an increase in leakage current does not necessarily imply a significant reduction in breakdown voltage. Additionally, the presence of contaminants with varying conductivity levels posed challenges in modeling, emphasizing the difficulty of achieving precise and reliable simulations.

In conclusion, the study confirms that contamination significantly impacts insulator performance and that current computational modeling is not entirely reliable for accurately predicting insulator behavior. Greater consideration of non-homogeneous contamination effects is required to improve model accuracy. Therefore, the development of real-world experiments and the implementation of real-time monitoring methods are recommended to optimize maintenance strategies and enhance the reliability of insulator performance under real operating conditions.

Índice de Contenidos

1. Introducción	11
1.1. Importancia de los aisladores en líneas de transmisión	11
1.2. Corriente de fuga como indicador de contaminación	11
2. Marco Teórico	12
2.1. Fundamentos de los aisladores compuestos	12
2.2. Corriente de fuga en aisladores	12
2.3. La contaminación	13
2.4. Contaminación tipo A	13
2.5. Contaminación tipo B	13
2.6. Tipos de ambientes generales	14
2.7. Clases de severidad en la contaminación	14
3. Simulación computacional a través de COMSOL	16
3.1. Introducción a la simulación en COMSOL	16
3.2. Fundamentos de modelación	16
3.3. Proceso general de modelación	17
3.4. Inclusión de elementos de humedad y temperatura	18
4. Propuesta metodológica	20
4.1. Objeto bajo estudio	20
4.2. Diseño y desarrollo de un aislador compuesto en 3D	21
4.3. Caracterización de las propiedades de los materiales del aislador	21
4.3.1. Conductividad en el acero galvanizado	21
4.3.2. Conductividad en la goma de silicona	22
4.3.3. Conductividad en resina epóxica reforzada con fibra de vidrio	23
4.3.4. Determinación de conductividad en distintos contaminantes y su expresión matemática	23
4.4. Caracterización de contaminantes	24
4.5. Implementación en simulación	26
4.5.1. Geometría	26
4.5.2. Implementación de mallado	26
4.5.3. Inclusión de la contaminación homogénea en simulación	27
4.5.4. Inclusión de la contaminación semi-homogénea en simulación	27
4.5.5. Inclusión de la contaminación según caso experimental en simulación . . .	28
4.6. Metodología para la contaminación de aisladores	32
4.6.1. Aplicación de capa contaminante según el método de capa sólida	32
4.6.2. Aplicación de contaminantes para medición de resistividad y permitividad	33
4.7. Metodologías para la determinación de permitividades	33
4.8. Metodologías para ensayos de alta tensión	34

4.8.1. Humidificación de aisladores	34
4.8.2. Ensayo para la determinación de tensión de ruptura	34
4.8.3. Ensayo de corriente de fuga a distintos niveles de tensión y condición seca	35
4.8.4. Ensayo de corriente de fuga a distintos niveles de humedad	36
5. Resultados experimentales	38
5.1. Estimación de funciones de tensión de ruptura	38
5.2. Tensiones de ruptura en función de la humedad relativa	38
5.3. Corrientes de fuga en función de la humedad relativa	41
5.3.1. Extrapolación de datos y estimación de función de corriente de fuga en función de humedad relativa	41
5.3.2. Determinación de conductividades a partir de corriente de fuga	42
5.4. Permitividades relativas de los contaminantes	43
6. Resultados computacionales	45
6.1. Modelo de contaminación homogénea	45
6.2. Modelo de contaminación semi-homogénea	48
6.3. Modelo de contaminación no homogénea con cambio de conductividad abrupta	49
6.3.1. Primer caso de conductividad	50
6.3.2. Segundo caso de conductividad	51
6.3.3. Tercer caso de conductividad	52
6.3.4. Mediciones de corriente de fuga y campo eléctrico	53
6.4. Modelo de contaminación no homogénea con cambio escalonado de conductividad	54
6.4.1. Primer caso de conductividad	54
6.4.2. Segundo caso de conductividad	54
6.4.3. Comparativa de resultados	55
7. Análisis de resultados	57
7.1. Comparativa de resultados de corriente de fuga con resultado experimental	57
7.2. Relación entre corriente de fuga y tensión de ruptura experimental	58
8. Conclusiones	59
8.1. Conclusiones sobre la modelación del aislador en COMSOL	59
8.2. Conclusiones sobre la humidificación de los contaminantes	59
8.2.1. Modelo de humidificación	59
8.2.2. Hipótesis sobre la medición de conductividades muy bajas	60
8.3. Efecto de la permitividad en la simulación	61
8.4. Resultados en el contexto chileno	61
9. Recomendaciones de trabajo futuro	61

Índice de Tablas

1.	Ejemplos de ambientes típicos según la norma IEC 60815-1.	15
2.	Especificaciones de aislador de clase 15 [kV] extraídos de [8].	20
3.	Caracterización de materiales.	21
4.	Casos y Entornos de Contaminación	25
5.	Concentración de material soluble e insoluble.	32
6.	Comparativa de aumento de corrientes estimadas por cambio de humedad relativa.	42
7.	Parámetros para el cálculo de conductividad de contaminantes.	42
8.	Parámetros para ecuación de conductividad en contaminantes.	43
9.	Permitividades relativas del contaminante a utilizar para simulación.	44
10.	Resultado de simulación caso de contaminante homogéneo	45
11.	Resultado de simulación caso de contaminante semi-homogéneo	48
12.	Conductividades caso 1: contaminación no homogénea.	50
13.	Conductividades con cambio de contaminación no homogénea de forma abrupta - segundo caso.	51
14.	Conductividades por zona de contaminación tercer caso.	52
15.	Corriente de fuga según conductividades para caso inhomogéneo cambio de con- ductividad abrupto.	53
16.	Conductividades por zona de contaminación segundo caso.	54
17.	Conductividades por zona de contaminación segundo caso.	54
18.	Corrientes de fuga caso contaminación no homogénea cambio escalonado de con- ductividad.	55
19.	Comparativa de corrientes de fuga según diversos casos de contaminación.	57

Índice de Figuras

1.	Distintas partes del aislador compuesto.	12
2.	Clase de severidad para el contaminante tipo A.	14
3.	Pasos para la modelación en COMSOL.	17
4.	Esquema del efecto de los módulos adicionales sobre la conductividad.	18
5.	Esquema simplificado sobre la conductividad.	19
6.	Dimensiones de aislador extraído y modificado de [8].	20
7.	Diseño de aislador modelado para utilización en el estudio.	21
8.	Conductividad de la goma de silicona.	22
9.	Conductividad de la resina epóxica reforzada con fibra de vidrio.	23
10.	Trazado de la línea Kimal-Lo Aguirre [18].	25
11.	Volumen de control en simulación de COMSOL.	26
12.	Aislador dentro de volumen de control en simulación de COMSOL.	26
17.	Zoom de mallado de aislador unión aleta-núcleo.	26
18.	Más zoom de mallado de aislador unión aleta-núcleo.	26
13.	Mallado de volumen de control.	27
14.	Mallado de aislador.	27
19.	Capa de contaminante homogénea en aislador.	27
15.	Zoom de mallado de aislador.	28
16.	Zoom de mallado de aislador, otra vista.	28
20.	Capa de contaminante semi-homogénea en aislador.	28
21.	Procedimiento para la determinación de distribución de contaminación.	29
22.	Patrones de contaminación.	30
23.	Distribución de contaminante primera aleta.	31
24.	Distribución de contaminante segunda aleta.	31
25.	Distribución de contaminante tercera aleta.	31
26.	Distribución de contaminante cuarta aleta.	31
27.	Esquema de contaminación simple.	32
28.	Procedimiento para la obtención de contaminantes.	33
29.	Circuito y conexiones para medir corriente de fuga.	35
30.	Circuito y conexiones para medir corriente de fuga.	36
31.	Tensión de ruptura en función de HR caso aislador sin contaminación.	38
32.	Tensión de ruptura en función de HR caso entorno E4.	39
33.	Tensión de ruptura en función de HR caso entorno E6.	39
34.	Tensión de ruptura en función de HR caso entorno E7.	40
35.	Conjunto de tensiones de ruptura en función de HR según entorno.	40
36.	Corrientes de fuga medidos a tensión nominal.	41
37.	Comparativa de corrientes de fuga medidos y estimados a tensión nominal.	42
38.	Mediciones de permitividad entorno E4	43
39.	Promedio de permitividad entorno E4	43
40.	Mediciones de permitividad entorno E6	43
41.	Promedio de permitividad entorno E6	43

42.	Mediciones de permitividad entorno E7	44
43.	Promedio de permitividad entorno E7	44
44.	Comparativa de permitividades relativas según entorno de contaminación.	44
45.	Muestra de algunas configuraciones dentro de COMSOL.	45
46.	Áreas de evaluación para la corriente de fuga.	46
47.	Mediciones de campo eléctrico frontera contaminante-aire.	46
48.	Mediciones de campo eléctrico frontera falda-contaminante.	46
49.	Distribución de potencial a distintos niveles de contaminación.	47
50.	Gradiente de campo eléctrico en aislador en kV/cm.	47
51.	Distribución de potencial a distintos niveles de contaminación.	48
52.	Distribución de potencial a distintos niveles de contaminación.	49
53.	Gradiente de campo eléctrico en aislador en kV/cm.	49
54.	Distribución del campo eléctrico para diferentes rangos de visión para caso 1: contaminación no homogénea.	51
55.	Distribución del campo eléctrico para diferentes rangos de visión para caso 2: contaminación no homogénea.	52
56.	Distribución del campo eléctrico para diferentes rangos de visión para caso 2: contaminación no homogénea.	53
57.	Campo eléctrico para rango de visión 3 [kV/cm]	54
58.	Campo eléctrico para rango de visión 1 [kV/cm]	54
59.	Campo eléctrico para rango de visión 0.5 [kV/cm]	54
60.	Campo eléctrico para rango de visión 3 [kV/cm]	55
61.	Campo eléctrico para rango de visión 1 [kV/cm]	55
62.	Campo eléctrico para rango de visión 0.5 [kV/cm]	55
63.	Distribución de potencial a distintos niveles de contaminación.	55
64.	Distribución de potencial a distintos niveles de contaminación.	56
65.	Tensión de ruptura en función de la corriente de fuga.	58
66.	Hipótesis de comportamiento de conductividad en función de humedad relativa. .	60
67.	Fotografía de cámara de humedad.	63
68.	Fotografía de colocación de aislador dentro de camara de humedad.	64
69.	Dimensiones de cámara de humedad.	64
70.	Humidificador utilizado marca Xiaomi.	65
71.	Higrómetro con sonda de temperatura y humedad.	65

Objetivos

Objetivo general

- Implementar una simulación computacional para estudiar y modelar el comportamiento de variables eléctricas, como la corriente y la tensión, en un aislador sometido a DC bajo distintas condiciones de contaminación.

Objetivos específicos

- Realizar una modelación mediante software de elementos finitos de la geometría de un aislador compuesto y sus propiedades eléctricas obtenidas experimentalmente bajo excitación de corriente continua (DC), considerando distintos niveles de contaminación.
- Implementar efecto de la temperatura en la simulación computacional de aislador bajo contaminación.
- Validar el modelo de simulación implementado mediante una comparativa de los resultados de tensión de ruptura y corriente de fuga obtenidos con los datos experimentales.
- Realizar recomendaciones de especificación de aisladores para líneas HVDC en Chile a partir de los resultados obtenidos para distintos niveles de contaminación.

Motivación

En la actualidad una parte importante de la matriz energética chilena proviene de energías renovables no variables, existe una clara tendencia al aumento tanto en la capacidad como en la generación [1]. Este hecho añade una problemática extra, dado que los puntos de generación e inversión solar se encuentran en la zona norte de país y la gran parte del consumo se encuentra en la zona centro. Por ello, una solución factible es el transporte de dicha energía a través de líneas de transmisión HVDC, debido a que sus costos de inversión son más bajos y el nivel de pérdidas es menor en comparación con HVAC para distancias extremadamente largas [2].

Se espera que para el año 2025-2026 comience la construcción de la línea de transmisión HVDC Kimal-Lo Aguirre con una extensión de 1400 km [3]. Este hecho hace más relevante en el contexto nacional el estudio de los elementos necesarios que conformarían la línea de transmisión, entre ellos un elemento muy importante es el aislador eléctrico. Este elemento tiene la tarea de soportar mecánicamente y aislar el conductor de la línea de transmisión y por tanto de tierra.

1. Introducción

1.1. Importancia de los aisladores en líneas de transmisión

El aislador eléctrico es un componente esencial en las líneas de transmisión, cuyo propósito es tanto aislar el conductor de tierra como ofrecer un soporte mecánico al conductor. Este dispositivo está fabricado con materiales de conductividad extremadamente baja y alta rigidez dieléctrica, lo que garantiza que la corriente de fuga hacia tierra sea prácticamente nula. Existen diversos tipos de aisladores, los cuales varían según las necesidades específicas. Estos pueden clasificarse tanto por los materiales empleados en su fabricación como por su diseño estructural.

La importancia del aislador reside en su correcto funcionamiento, ya que una falla en este componente puede resultar altamente perjudicial para la operación del sistema, ocasionando tanto interrupciones significativas en el suministro eléctrico como daños en la infraestructura.

De los diversos aisladores del mercado, los aisladores compuestos han ganado preferencia por sus varias ventajas. En primer lugar, estos aisladores presentan un mejor rendimiento en entornos contaminados debido a sus propiedades hidrofóbicas, lo que disminuye la probabilidad de contaminación y, en consecuencia, reduce la frecuencia de limpieza [4]. Además, muestran una alta resistencia a la tracción y son considerablemente más livianos que los de porcelana, lo que disminuye la sobrecarga en las líneas de transmisión [5].

Actualmente, existe abundante información sobre el efecto de los contaminantes en aisladores AC. Sin embargo, en comparación con aisladores AC, el estudio de estos contaminantes en aisladores DC aún se encuentra en una etapa inicial. En [6], se destacan tres diferencias importantes entre los aisladores sometidos a excitación en DC en comparación con las AC.

- Los aisladores en DC atraen más contaminantes de manera más homogénea que los AC debido a su polaridad fija.
- La corriente continua produce un flujo constante de corriente que, en caso de producirse "flashovers", puede ser más difícil de extinguir.
- Las rupturas en DC ocurren a un nivel más bajo que las rupturas en AC.

1.2. Corriente de fuga como indicador de contaminación

Existen diversas variables medibles que podrían ser utilizadas como indicadores del nivel de contaminación en el aislador, siendo una de ellas la corriente de fuga. Esto se debe a la estrecha relación entre dicha corriente y el nivel de contaminación presente en el aislador. Altos niveles de corriente de fuga indican un rendimiento deficiente, lo que podría conducir a fallas como la ruptura dieléctrica o daños en el material aislante. De este modo, la medición y el comportamiento de la corriente de fuga podrían utilizarse como una advertencia temprana de la necesidad de mantenimiento del aislador.

2. Marco Teórico

2.1. Fundamentos de los aisladores compuestos

Uno de los tipos de aisladores compuestos más utilizados es el de goma de silicona con núcleo de resina epóxica reforzada con fibra de vidrio. Esto debido a sus excelentes propiedades hidrofóbicas y aislantes.

Un aislador compuesto se compone de tres partes principales, cada una fabricada con un tipo de material diferente. La Figura 1 muestra en de forma simple las distintas partes del aislador.

- Núcleo (Core rod): generalmente hecho de resina epóxica reforzada con fibra de vidrio. Elegido por su capacidad para soportar la carga mecánica de manera eficiente mientras aísla adecuadamente.
- Aletas y revestimiento (Shed & sheath): principalmente compuesto de goma de silicona, caucho de etileno-propileno, politetrafluoroetileno, resina epóxica alifática o plástico, ya que estos materiales ofrecen una mejor adhesión al núcleo en comparación con otros. Además, el diseño de las aletas garantiza una distancia de fuga adecuada y protege el núcleo al mismo tiempo. De los materiales nombrados, el más utilizado corresponde a la goma de silicona, cuyas ventajas incluyen buena estabilidad térmica, resistencia al ozono, a la radiación ionizante y a la exposición a campos eléctricos fuertes.
- Herrajes (Base connector): pertenecen a los extremos del aislador, se utilizan materiales conductores como acero galvanizado o aluminio para conectarse tanto a la línea como a la torre.

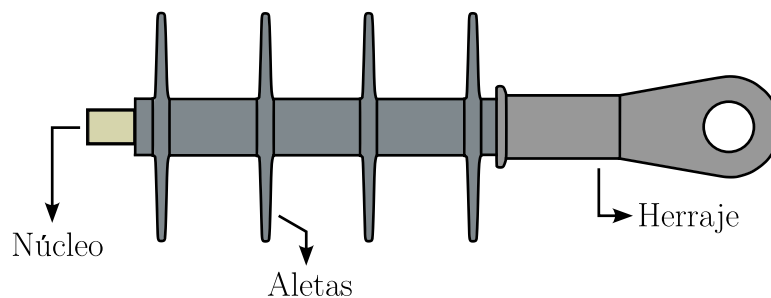


Figura 1: Distintas partes del aislador compuesto.

2.2. Corriente de fuga en aisladores

Cuando se mide la corriente DC desde los terminales del objeto de prueba, se pueden reconocer distintos componentes:

1. Corriente capacitiva: surge debido a la aplicación inicial de la tensión y a cualquier ripple u otras fluctuaciones impuestas.
2. Corriente de absorción dieléctrica: generada por el lento desplazamiento de cargas dentro del material aislante, la cual persiste durante períodos que pueden variar desde segundos hasta horas.

3. Corrientes de fuga: corresponde a la corriente continua en estado estacionario alcanzada una vez que las demás componentes han decaído a cero bajo un nivel de tensión constante.

Las corrientes de fuga se generan en la superficie de los aisladores y pueden variar en función de la longitud, el área, la tensión y la resistividad de dicha superficie. En un aislador, la longitud y el área permanecen prácticamente constantes debido a su diseño, por lo que la resistividad es el principal factor que puede causar variaciones en la corriente de fuga. La resistividad depende de la temperatura y la humedad entre otros, y distintos materiales reaccionan de manera diferente a estas variables. Los contaminantes típicos suelen provocar variaciones significativas en la resistividad, especialmente cuando hay exposición a la humedad.

2.3. La contaminación

La contaminación de los aisladores afecta sus propiedades debido a varios factores. Los contaminantes, como polvo, sal y otros agentes químicos, forman una capa conductora en la superficie del aislador. Esta capa reduce la resistencia eléctrica, facilitando el flujo de corrientes de fuga. En la norma IEC 60815-1 [11] se identifican dos tipos de contaminaciones que podrían llevar a una ruptura dieléctrica en un aislador.

2.4. Contaminación tipo A

Corresponde a una contaminación sólida con un componente no soluble que se deposita sobre la superficie aislante. El depósito se vuelve conductor una vez se humedece. Este tipo de contaminación puede ser mejor caracterizado por la medición de ESDD/NSDD.

Este tipo de contaminación se asocia a tierras interiores, tierras desérticas o zonas con contaminación industrial. De igual forma se puede asociar a zonas costeras donde se forman capas de sal seca que luego son humedecidas.

Se forman a partir de componentes solubles y no solubles.

- **Contaminantes solubles:** se trata de sales con alta y baja solubilidad, cuya medición se realiza a través de la densidad equivalente de depósito de sal (ESDD), expresada en $[\text{mg}/\text{cm}^2]$.
- **Contaminantes no solubles:** son elementos como la arena, polvo, arcilla, aceites, etc. Estos se miden en términos de la NSDD, expresados en $[\text{mg}/\text{cm}^2]$.

2.5. Contaminación tipo B

Ocurre cuando electrolitos líquidos se depositan en el aislante con muy poco o nada de componentes no solubles. Este tipo de contaminación se puede caracterizar mejor con mediciones de conductancia o corrientes de fuga.

Este tipo de contaminación se asocia a zonas costeras, donde el agua salada o la niebla conductora se depositan sobre la superficie del aislante. Además, también es posible asociar este tipo de contaminación a pulverización de cultivos, lluvia ácida y nieblas químicas.

2.6. Tipos de ambientes generales

En la norma IEC 60815-1 [11] se describen cinco tipos de ambientes. Los desérticos, costeros, industriales, de interior y de agricultura.

- Desértico: se asocia a una contaminación tipo A.
- Costero, industrial y de agricultura: se puede asociar tanto a contaminación del tipo A como B dependiendo del caso.
- Interior: tienen bajos niveles de contaminantes. No se identifica claramente el tipo de contaminante.

2.7. Clases de severidad en la contaminación

En la norma IEC 60815-1 [11] con propósitos de estandarización se describen cinco clases de severidad, estos corresponden a:

- Very light (muy ligero).
- Light (ligero).
- Medium (medio).
- Heavy (alta).
- Very heavy (muy alta).

Además, en la Figura 2 muestra una relación entre el ESDD y el NSDD para ver el grado de severidad

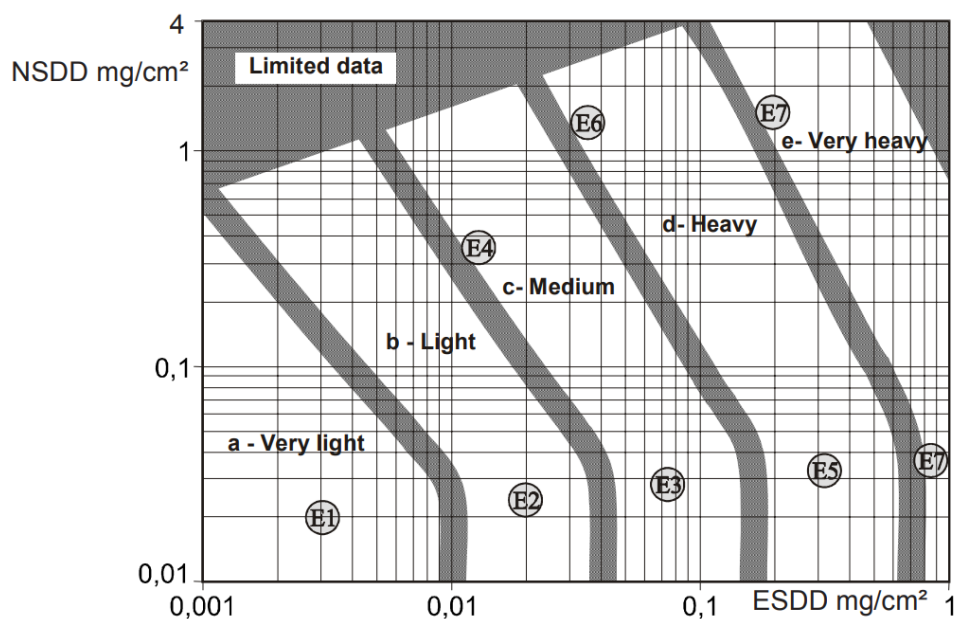


Figura 2: Clase de severidad para el contaminante tipo A.

En la Figura 2 se presentan ocho entornos diferentes que, según la norma, pueden describirse como se indica en la Tabla 1.

Tabla 1: Ejemplos de ambientes típicos según la norma IEC 60815-1.

Ejemplo	Descripción de ambientes típicos
E1	>50 km del mar, desierto o tierra seca abierta >10 km de fuentes de contaminación hechas por el hombre^b Dentro de una distancia más corta que la mencionada arriba de fuentes de contaminación, pero: ■ viento predominante no directamente de estas fuentes de contaminación. ■ y/o con lavado regular de lluvia mensual
E2	10-50 km^a del mar, desierto o tierra seca abierta 5-10 km de fuentes de contaminación hechas por el hombre^b Dentro de una distancia más corta que E1 de fuentes de contaminación, pero: ■ viento predominante no directamente de estas fuentes de contaminación ■ y/o con lavado regular de lluvia mensual
E3	3-10 km^c del mar, desierto o tierra seca abierta 1-5 km de fuentes de contaminación hechas por el hombre^b Dentro de una distancia más corta que la mencionada arriba de fuentes de contaminación, pero: ■ viento predominante no directamente de estas fuentes de contaminación ■ y/o con lavado regular de lluvia mensual
E4	Más lejos de las fuentes de contaminación que lo mencionado en E3, pero: ■ niebla densa (o llovizna) a menudo ocurre después de una larga temporada de acumulación de contaminación seca (varias semanas o meses) ■ y/o lluvia intensa de alta conductividad ■ y/o hay un nivel alto de NSDD, entre 5 y 10 veces el ESDD
E5	Dentro de 3 km^c del mar, desierto o tierra seca abierta Dentro de 1 km de fuentes de contaminación hechas por el hombre^b
E6	A mayor distancia de las fuentes de contaminación que lo mencionado en E5, pero: ■ niebla densa (o llovizna) a menudo ocurre después de una larga temporada de acumulación de contaminación seca (varias semanas o meses) ■ y/o hay un nivel alto de NSDD, entre 5 y 10 veces el ESDD
E7	Dentro de la misma distancia de las fuentes de contaminación especificadas para "áreas pesadas" y: ■ directamente sujeto a la niebla salina o rociado de mar ■ o directamente sujeto a contaminantes con alta conductividad, o polvo de cemento con alta densidad, y con mojado frecuente por niebla o llovizna ■ áreas desérticas con rápida acumulación de arena y sal, y condensación regular
	^a Durante una tormenta, el nivel de ESDD a esa distancia del mar puede ser mucho más alto. ^b La presencia de una gran ciudad influirá en una distancia mayor, es decir, la distancia especificada para mar, desierto y tierra árida. ^c Dependiendo de la topografía de la zona costera y la intensidad del viento.

3. Simulación computacional a través de COMSOL

COMSOL Multiphysics es un software de simulación basado en el método de elementos finitos, ampliamente utilizado en ingeniería para modelar y analizar fenómenos físicos complejos. En este estudio, se emplea para evaluar el comportamiento eléctrico de un aislador compuesto bajo condiciones de contaminación en corriente continua (DC).

3.1. Introducción a la simulación en COMSOL

COMSOL permite la simulación de múltiples fenómenos físicos, integrando ecuaciones diferenciales que rigen el comportamiento de los materiales y su interacción con el entorno. Su capacidad de acoplar dominios físicos como la electrostática o la transferencia de calor.

3.2. Fundamentos de modelación

El análisis de campo eléctrico en un aislador compuesto requiere resolver la ecuación de continuidad de la corriente (1), la ley de Ohm generalizada (2) y la relación entre campo eléctrico y potencial (3). A su vez, para la determinación de la corriente de fuga, se utiliza la expresión (4). Estas ecuaciones pueden expresarse como:

$$\nabla \cdot J(x, y, z) = Q_{j,v} \longrightarrow \nabla \cdot J(x, y, z) = 0 \quad (1)$$

$$J(x, y, z) = \sigma E(x, y, z) + J_e(x, y, z) \longrightarrow J(x, y, z) = \sigma E(x, y, z) \quad (2)$$

$$E(x, y, z) = -\nabla V(x, y, z) \quad (3)$$

$$I = \int_S J(x, y, z) dS \quad (4)$$

donde:

- J es la densidad de corriente [A/m²],
- J_e es la densidad de corriente producida por una fuente externa [A/m²], por defecto es 0.
- $Q_{j,v}$ es la capa de fuente de corriente [A/m³], por defecto es 0,
- V es el potencial eléctrico [V],
- E es el campo eléctrico [V/m],
- σ es la conductividad eléctrica del material [S/m].
- I es la corriente eléctrica [A] que pasa a través de la superficie S .

La ecuación gobernante en un modelo lineal y estacionario de corrientes eléctricas en régimen DC es:

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla V) = 0 \quad (5)$$

y, asumiendo que la conductividad σ es constante, se simplifica a:

$$\sigma \nabla^2 V = 0. \quad (6)$$

Con condiciones de contorno de potencial fijo, la solución para el potencial V y, en consecuencia, para el campo eléctrico se determina únicamente por la geometría del dominio y las condiciones de frontera impuestas. Esto significa que la distribución del campo eléctrico permanece invariante al variar el valor numérico de σ ; lo que sí varía es la densidad de corriente como se puede observar en (2). En otras palabras, a menos que la conductividad presente una variación espacial o dependa de otra variable acoplada (por ejemplo, la temperatura, que a su vez depende de la corriente o del espacio), el sistema exhibe un comportamiento lineal e idealizado. Bajo estas condiciones, no se generan gradientes locales intensos en el campo eléctrico que pudieran inducir concentraciones de campo capaces de desencadenar fenómenos como descargas parciales o rupturas dieléctricas. Otro punto importante es como COMSOL resuelve numericamente estas ecuaciones. La resolución se obtiene mediante discretización del dominio en una malla de elementos finitos, esta discretización que se realiza sobre los triángulos o tetraedros, al interior de cada elemento se aproxima la solución mediante funciones de forma, para el caso de este estudio se utiliza discretización cuadrática, permitiendo obtener la distribución del campo eléctrico y la corriente de fuga. La discretización puede ser por una función lineal, cuadrática, cúbica, cuártica, quíntica. Cuanto mayor es el grado del polinomio, se pueden esperar mejores aproximaciones, sin embargo, los tiempos de computo se hacen mucho mayores. La ventaja de una discretización cuadrática es que puede capturar mejor los cambios en el campo eléctrico cerca de los bordes o discontinuidades, corresponde a una buena opción si se desea tener mejor precisión sin tener tiempos de computo muy elevados.

3.3. Proceso general de modelación

La modelación en COMSOL sigue una secuencia de pasos como la mostrada en la Figura 3, que se describen a continuación:



Figura 3: Pasos para la modelación en COMSOL.

1. **Definición de la geometría:** Se modela la estructura del aislador en 2D o 3D, ya sea directamente en COMSOL o importando desde software CAD como SolidWorks o Fusion 360.
2. **Asignación de materiales:** Se definen propiedades eléctricas como la permitividad relativa y la conductividad eléctrica para cada material del aislador y su entorno.
3. **Configuración de condiciones de frontera:** Se establecen los valores de tensión en los electrodos, la referencia de tierra y otras restricciones necesarias para la simulación.
4. **Generación del enmallado:** Se discretiza el dominio en elementos finitos, ajustando la densidad de la malla para optimizar precisión y tiempo de cómputo.
5. **Cálculo y postprocesamiento:** Se resuelven las ecuaciones diferenciales y se visualizan los resultados mediante gráficos de campo eléctrico, distribuciones de potencial y mapas de corriente de fuga.

Este procedimiento permite obtener resultados sobre la distribución del campo eléctrico y de potencial en distintas condiciones de geometría y propiedades eléctricas. En la siguiente sección se detallará la implementación específica de la simulación aplicada en este estudio.

3.4. Inclusión de elementos de humedad y temperatura

En COMSOL, la influencia de la temperatura se puede incorporar mediante la multifísica de calentamiento electromagnético acoplado con el módulo de calentamiento por efecto Joule. De manera similar, el efecto de la humedad se modela utilizando los módulos de transporte de humedad en medios libres y porosos o el transporte de especies diluidas en medios porosos. En ambos casos, la conductividad se ve afectada por estos fenómenos, variando en función de los modelos implementados. En la Figura 4, se presenta un esquema que muestra como interaccionan los módulos:

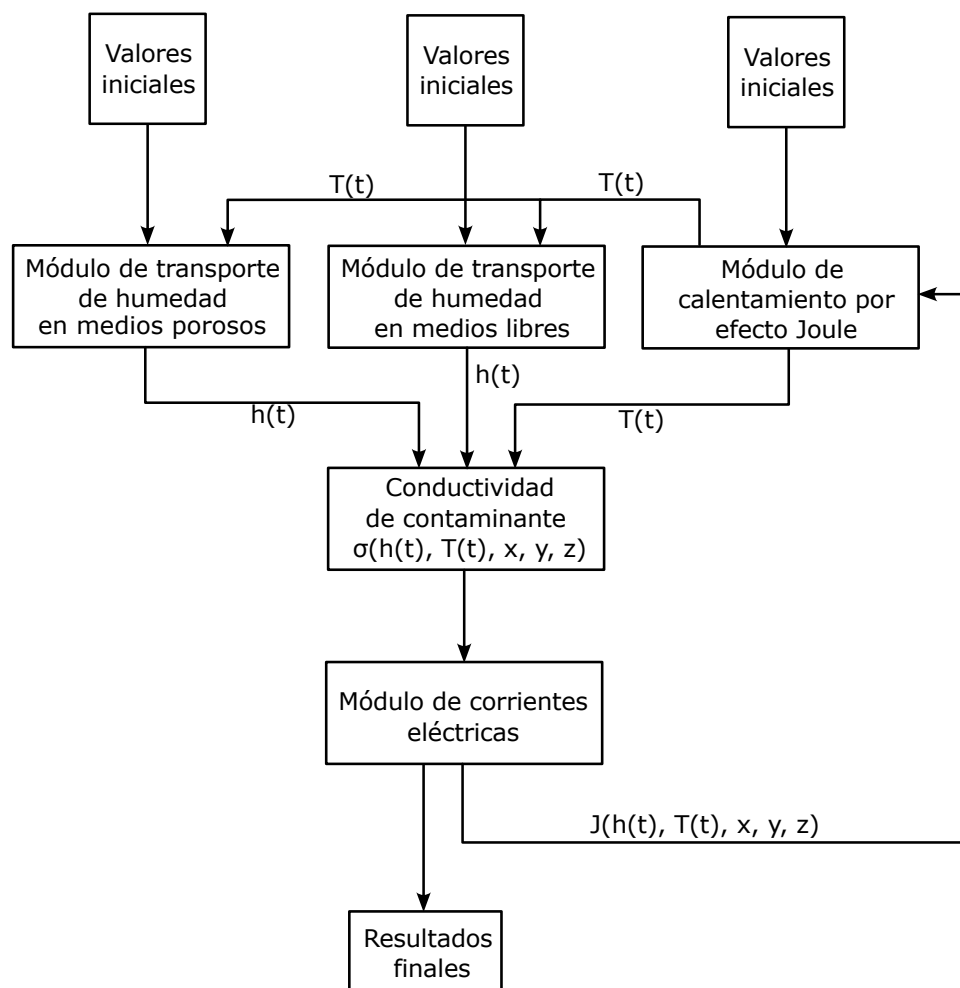


Figura 4: Esquema del efecto de los módulos adicionales sobre la conductividad.

La Figura 4 muestra como la incorporación de módulos adicionales influye en la conductividad, ya sea en modelos transitorios o estacionarios, donde cada variación se refleja en esta propiedad. Sin embargo, esta integración presenta dos desafíos principales: un aumento significativo en los tiempos de resolución y la necesidad de parámetros difíciles de determinar.

En el contexto de esta memoria, estudiar las dinámicas del sistema podrían ofrecer información

sobre el comportamiento del fenómeno. Sin embargo, su fidelidad a la realidad es incierta debido a la imposibilidad de realizar mediciones directas en este caso. No obstante, los valores finales obtenidos en cada dinámica, podrían aplicarse directamente en la conductividad. Por ello, es viable realizar el estudio mediante la evaluación de distintos valores de entrada en la conductividad, sin necesidad de modelar la evolución temporal del sistema. El nuevo esquema queda reducido al de la Figura 5.

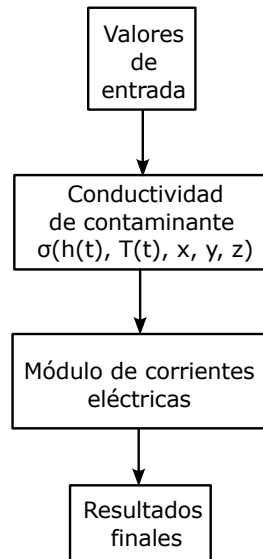


Figura 5: Esquema simplificado sobre la conductividad.

4. Propuesta metodológica

En el siguiente capítulo se detalla la propuesta tanto computacional como experimental para determinar algún indicador del estado de la contaminación en los aisladores a través de la corriente de fuga. Para ello se tienen los siguientes pasos:

- Diseño y desarrollo de un aislador compuesto en 3D.
- Caracterización de las propiedades de los materiales que conforman al aislador.
- Caracterización de los contaminantes.
- Inclusión de la contaminación en simulación.
- Aplicación de capa contaminante sobre aislador.
- Medición de las conductividades y permitividades de los diversos entornos de contaminación.
- Ensayos de tensión de ruptura en función del nivel de humedad.
- Ensayos de corriente de fuga para distintos niveles de tensión, contaminación y humedad.

4.1. Objeto bajo estudio

Para el estudio, se modela y utiliza un aislador compuesto de goma de silicona, clase 15 kV, fabricado por SILPAK. En la Tabla 2 y Figura 6 se detallan sus especificaciones de diseño según el fabricante.

Tabla 2: Especificaciones de aislador de clase 15 [kV] extraídos de [8].

Modelo	A	B	C	D	E	F	G	H
AS-15-4SD	320	89	40	21.7	3	18	13.5	Mínimo 17.3

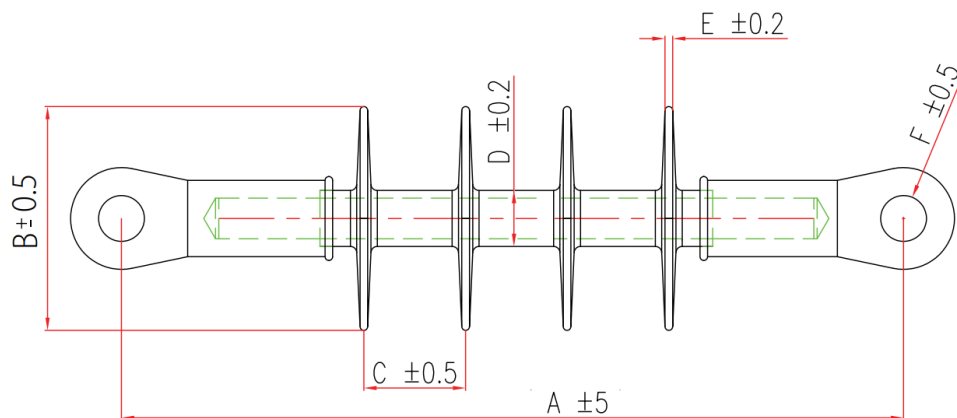


Figura 6: Dimensiones de aislador extraído y modificado de [8].

El fabricante indicó que el núcleo estaba compuesto de resina epóxica reforzada con fibra de vidrio, el revestimiento y las aletas de goma de silicona, y los herrajes de acero galvanizado en caliente.

4.2. Diseño y desarrollo de un aislador compuesto en 3D

Debido a que algunas especificaciones diferían ligeramente de las proporcionadas por el fabricante, se realizaron mediciones directas del aislador físico y se ajustaron ciertos parámetros. El diseño 3D del aislador se realizó en Fusion 360, garantizando que los ajustes fueran compatibles con las mediciones obtenidas. En la Figura 7 se muestran dos cortes del aislador con sus respectivas medidas.

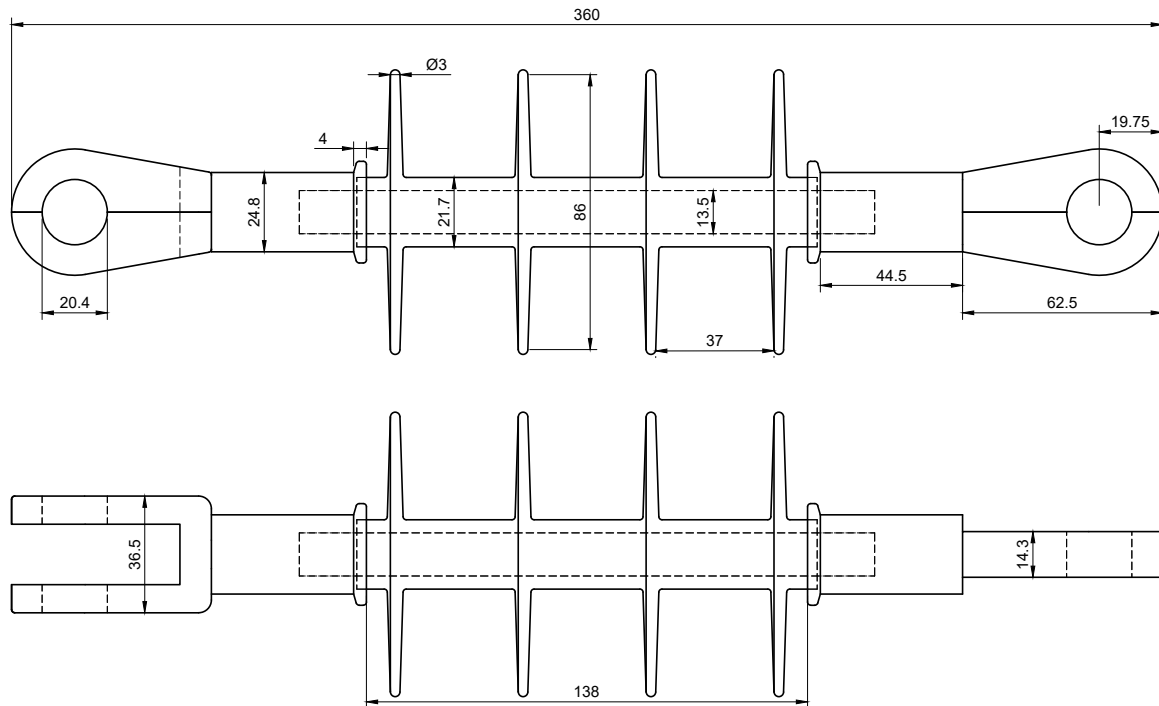


Figura 7: Diseño de aislador modelado para utilización en el estudio.

4.3. Caracterización de las propiedades de los materiales del aislador

La caracterización de las propiedades eléctricas de los materiales se realizará en función de la permitividad y la resistividad. Algunos valores típicos corresponden a los de la Tabla 3.

Tabla 3: Caracterización de materiales.

Material	Permitividad	Conductividad [S/m]	Referencia conductividad	Referencia permitividad
Goma de silicona	3	-	-	[13]
Resina epóxica reforzada con fibra de vidrio	4.8	-	-	[22] & [21]
Acero forjado galvanizado	1	5.88E6	[14]	-

4.3.1. Conductividad en el acero galvanizado

Si bien el acero tiene definida una conductividad, esta puede variar con la temperatura. La norma ASTM B193-20 [9] proporciona la ecuación que permite estimar cómo varía la conductividad de

un conductor en función de la temperatura:

$$R_T = \frac{R_t}{1 + \alpha_T(t - T)} \rightarrow \frac{\rho_{vT}}{A/L} = \frac{\rho_{vt}}{(1 + \alpha_T(t - T))A/L} \rightarrow \sigma_{vT}(T) = \sigma_{vt}(1 + \alpha_T(t - T)) \quad (7)$$

Cada elemento corresponde a:

- R_T : resistencia a la temperatura de referencia T.
- R_t : resistencia medida a la temperatura t.
- α_T : coeficiente de temperatura.
- ρ_{vT} : resistividad volumétrica a la temperatura de referencia T.
- ρ_{vt} : resistividad volumétrica a la temperatura medida t.
- A : área de sección transversal.
- L : longitud de medición.

4.3.2. Conductividad en la goma de silicona

La conductividad de la goma de silicona también varía con la temperatura, como lo muestra el fabricante Shin-Etsu en [10], donde se describe el comportamiento del material bajo diferentes condiciones térmicas. En la Figura 8 se muestra el comportamiento.

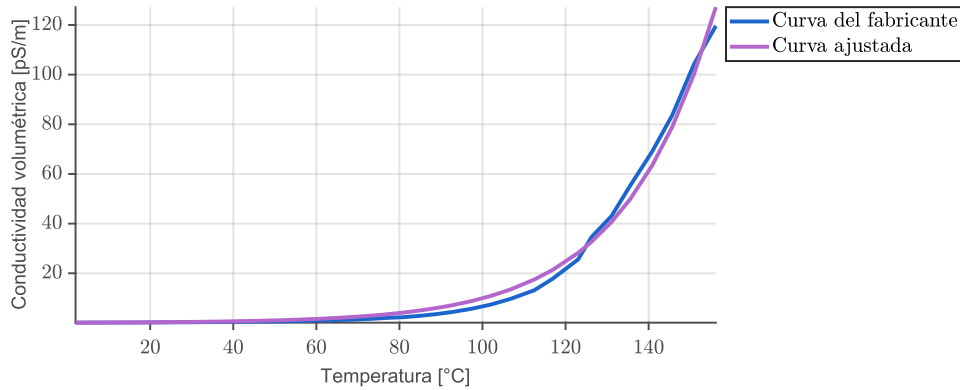


Figura 8: Conductividad de la goma de silicona.

Para la elaboración de la curva, se extrajeron los puntos del gráfico titulado “Correlation between temperature and the volume resistivity of various rubbers” de [10], el cual presentaba la resistividad en $T\Omega \cdot m$ en función de la temperatura C . Luego, estos datos fueron procesados aplicando la operación inversa (para convertir resistividad en conductividad) y realizando la conversión de unidades pertinente, de modo que finalmente se obtuvo la conductividad en pS/m en función de la temperatura ($^{\circ}C$).

Además, ajuste de la curva produce un coeficiente de determinación de 0.992. El comportamiento en el tramo analizado se describe mediante una función exponencial de primer orden, expresada a continuación en pS/m para la conductividad y en $^{\circ}C$ para la temperatura:

$$\sigma_{vT}(T) = 0,1059 \cdot e^{0,0454 \cdot T} \quad (8)$$

4.3.3. Conductividad en resina epóxica reforzada con fibra de vidrio

La conductividad eléctrica de la resina epóxica reforzada con fibra de vidrio (GFRP) depende de la temperatura. En [17], se presenta una curva que muestra esta variación en grados Kelvin, abarcando aproximadamente el rango de 50 a 300 K. Para facilitar el análisis, se adaptaron los datos a grados Celsius y se extrapoló la curva hasta 50 °C, lo que proporciona un rango adecuado para el contexto de la Línea Kimal-Lo Aguirre. La relación obtenida se ilustra en la Figura 9.

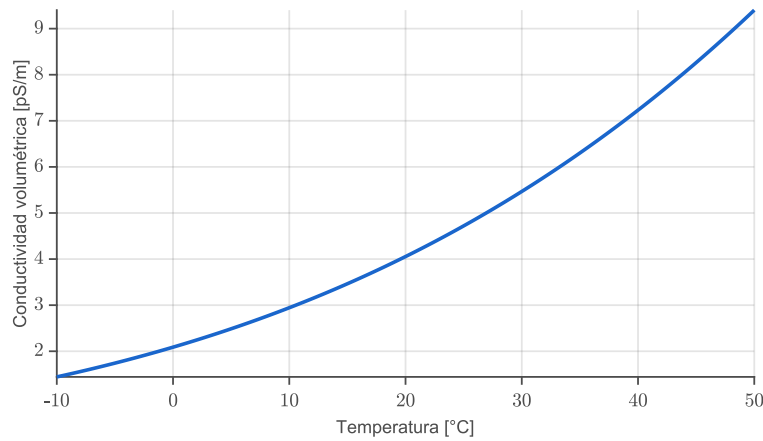


Figura 9: Conductividad de la resina epóxica reforzada con fibra de vidrio.

La curva sigue una tendencia exponencial a medida que aumenta la temperatura, cuya expresión se presenta a continuación en pS/m:

$$\sigma_{vT}(T) = 3,47 \cdot 10^4 \cdot e^{\frac{-2653}{T+273}} \quad (9)$$

4.3.4. Determinación de conductividad en distintos contaminantes y su expresión matemática

Para determinar la conductividad del contaminante, se seguirá la norma IEC 60507 [19], la cual define un factor de forma F determinado mediante la siguiente expresión:

$$F = \int_0^L \frac{dl}{p(l)} \quad (10)$$

donde:

- L : distancia de fuga total del aislador.
- $p(l)$: perímetro del aislador en función de la longitud, dado por $p(l) = 2\pi r(l)$.

Aquí, $r(l)$ representa la variación del radio del aislador a lo largo de la distancia de fuga.

De acuerdo con [20], la conductancia se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$G = \frac{I_f}{V_c} F \quad (11)$$

Finalmente, considerando la superficie del aislador y la distancia de fuga, la conductividad se calcula como:

$$\sigma = G \cdot \frac{L}{A} \quad (12)$$

Dado que en realidad esta conductividad depende de la temperatura la norma IEC 60507-2014 [19] describe la conductividad en función de la temperatura de un contaminante como:

$$\sigma_{vT}(T) = \sigma_{\theta} [1 - b(\theta - T)] \quad (13)$$

Sin embargo, dado que la conductividad también depende de la humedad, σ_{θ} es una función de H , lo que resulta en:

$$\sigma_{vT}(T, H) = \sigma_{\theta}(H) [1 - b(\theta - T)] \quad (14)$$

Donde:

- θ : temperatura de la solución en °C.
- $\sigma_{\theta}(H)$: conductividad medida a temperatura θ y humedad relativa H .
- b : factor dependiente de la temperatura θ de la solución, obtenido mediante la norma IEC 60507-2014 [19] y resultando en la siguiente ecuación:

$$b = -3,2 \cdot 10^{-8} \theta^3 + 1,032 \cdot 10^{-5} \theta^2 - 8,272 \cdot 10^{-4} \theta + 3,544 \cdot 10^{-2} \quad (15)$$

- H : humedad relativa a la que está expuesto el contaminante.
- T : temperatura a la cual se desea corregir la conductividad.

4.4. Caracterización de contaminantes

A lo largo del trazado de la futura línea HVDC Kimal-Lo Aguirre, se encuentran diversos tipos de contaminantes y climas que deben ser estudiados. El trazado de la Figura 10 se obtiene a partir del análisis de impacto ambiental descrito en [18].

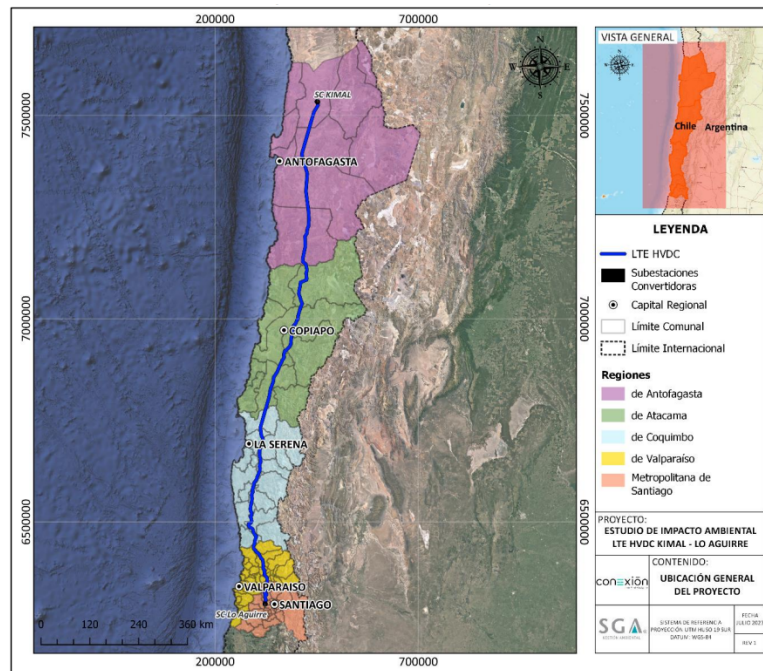


Figura 10: Trazado de la línea Kimal-Lo Aguirre [18].

En particular se seleccionan los entornos E4, E6 y E7. Esto según las siguientes ubicaciones:

- **Región de Coquimbo:** zonas costeras cercanas a La Serena, donde la "camanchaca" y lluvias ocasionales tras periodos secos generan condiciones de contaminación media con humedad conductiva (E4).
- **Región de Atacama:** sectores interiores cercanos a Copiapó, donde la acumulación de polvo seco (NSDD alto) debido al desierto y la presencia ocasional de niebla costera crean un ambiente típico de transición con contaminación severa no soluble (E6).
- **Región de Antofagasta:** áreas desérticas cercanas a salares, caracterizadas por la alta acumulación de sal y arena junto con condensación ocasional, propias de un entorno extremadamente severo (E7s).

A partir de los tres casos, se hace un breve resumen de los entornos en la Tabla 4 en base a la norma IEC 60815-1. Cada entorno representa un punto de la Figura 2. Los entornos E7s y E7c

Tabla 4: Casos y Entornos de Contaminación

Caso	Descripción	Entorno
C1	Región de Coquimbo	E4
C2	Región de Atacama	E6
C3	Región de Antofagasta	E7s

corresponden al entorno E7, con ambiente salino y ambiente de caolín, respectivamente.

4.5. Implementación en simulación

4.5.1. Geometría

Debido a que cada material o elemento de la simulación debe ser definido en COMSOL, el aire circundante al aislador también, es por eso que se debe simular el aislador dentro de un volumen de control. Tal como se muestra en la Figura 11 y 12.

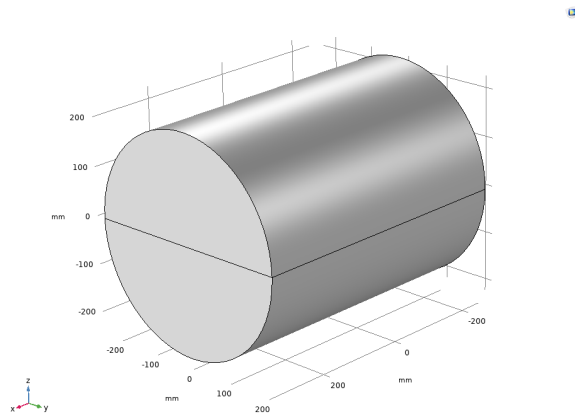


Figura 11: Volumen de control en simulación de COMSOL.

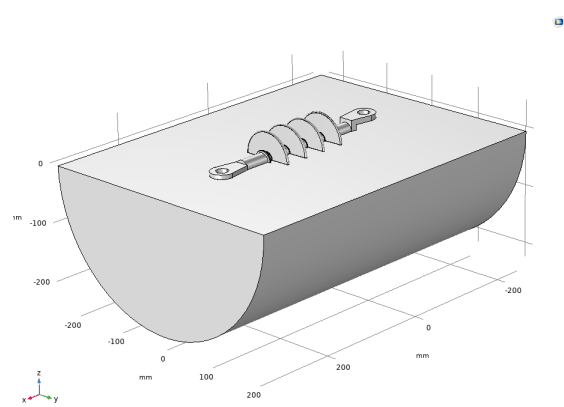


Figura 12: Aislador dentro de volumen de control en simulación de COMSOL.

Se estableció un volumen que deja un espacio alrededor del aislador de al menos el doble del ancho del aislador para evitar interferencias en la simulación debido a las condiciones de borde. Dichas dimensiones corresponden a 400 mm de diámetro por 500 mm de largo.

4.5.2. Implementación de mallado

Debido a la compleja geometría, no fue posible reducir el número de triángulos en el mallado de forma muy notoria. Por ello, se implementó un ajuste inteligente muy fino, que consistió en refinar la malla en las zonas donde se esperaba alta concentración de campo y hacerla más gruesa en aquellas de menor concentración. El mallado utilizado se ilustra en las Figuras 13 a 18.

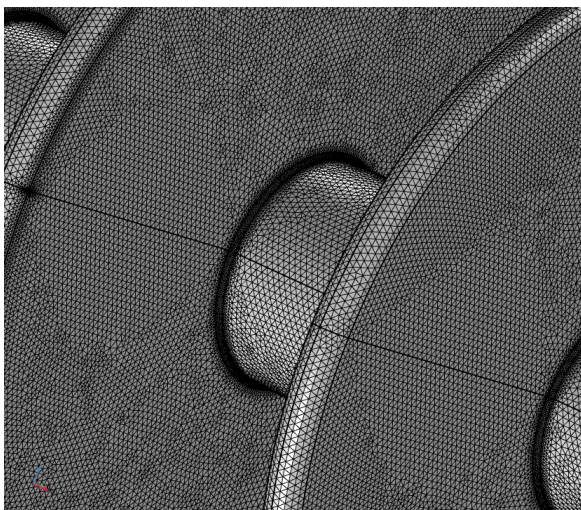


Figura 17: Zoom de mallado de aislador unión aleta-núcleo.

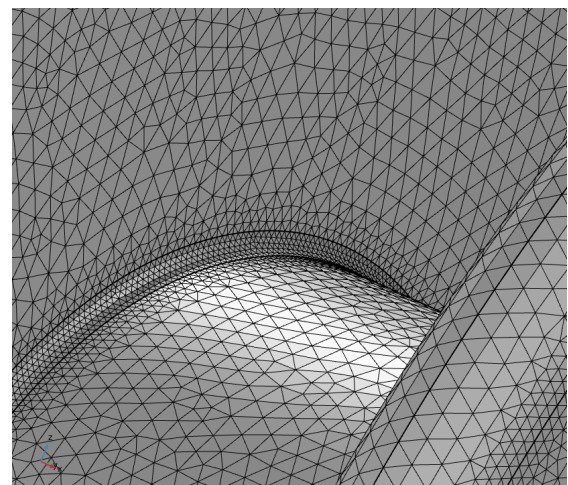


Figura 18: Más zoom de mallado de aislador unión aleta-núcleo.

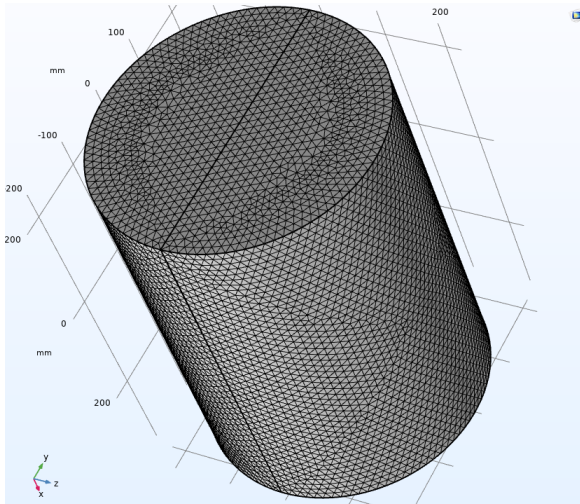


Figura 13: Mallado de volumen de control.

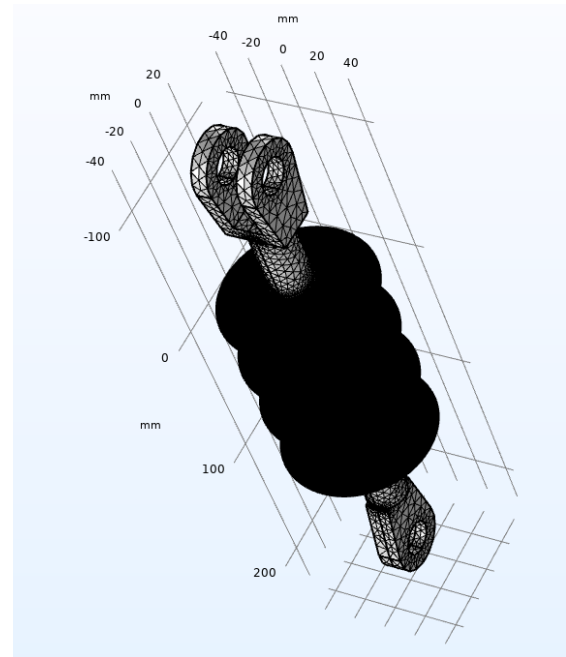


Figura 14: Mallado de aislador.

4.5.3. Inclusión de la contaminación homogénea en simulación

Como se muestra en la Figura 19, inicialmente la capa de contaminante se modelará de manera uniforme sobre el recubrimiento y las aletas de goma de silicona.

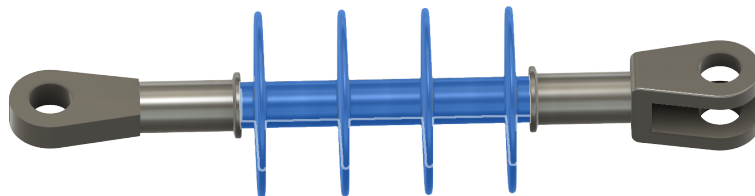


Figura 19: Capa de contaminante homogénea en aislador.

La capa de contaminante modelará tanto contaminantes secos como aquellos con un nivel de humedad. Para ello, se verificarán las conductividades de los contaminantes a distintos niveles de humedad, utilizando estos valores como datos de entrada para el software COMSOL.

4.5.4. Inclusión de la contaminación semi-homogénea en simulación

En la Figura 20, se modela el caso donde el contaminante está depositado en la superficie de las aletas del aislador.

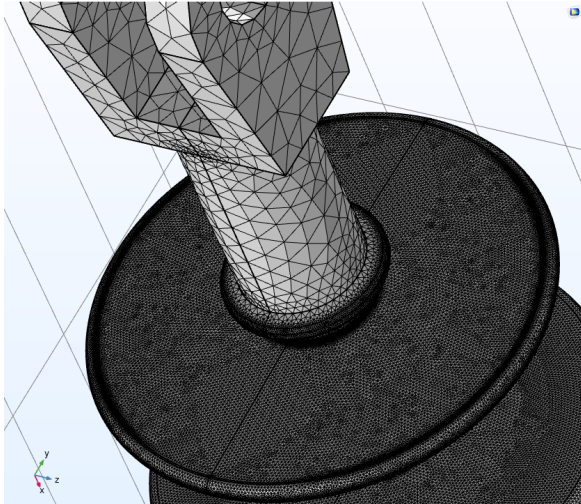


Figura 15: Zoom de mallado de aislador.

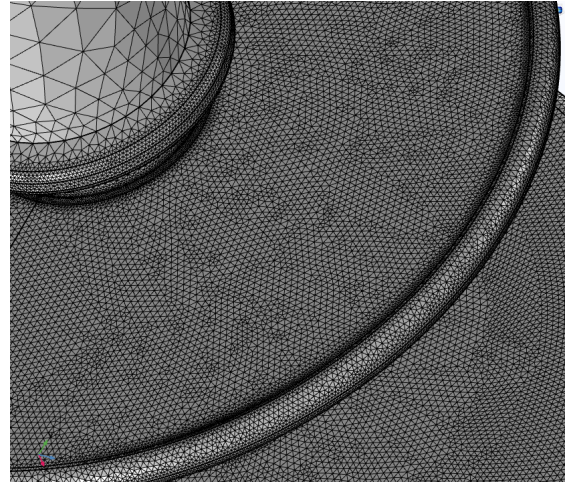


Figura 16: Zoom de mallado de aislador, otra vista.

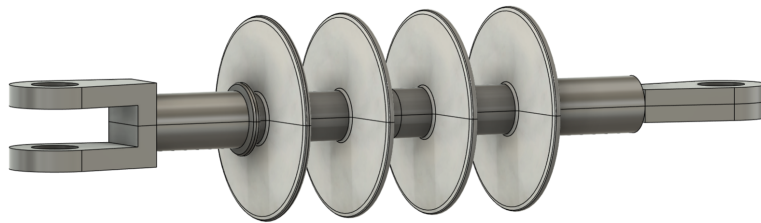


Figura 20: Capa de contaminante semi-homogénea en aislador.

4.5.5. Inclusión de la contaminación según caso experimental en simulación

Posteriormente se simulará el caso donde la contaminación del aislador no es homogénea y está esparcida de forma estocástica sobre la superficie del aislador, siguiendo la siguiente metodología para la simulación de la distribución.

- A partir de la imagen de un aislador contaminado, se elimina el fondo y las partes no relevantes. Luego, mediante un aumento de contraste, se vectoriza la imagen utilizando Inkscape. Este proceso se ilustra en la Figura 21.

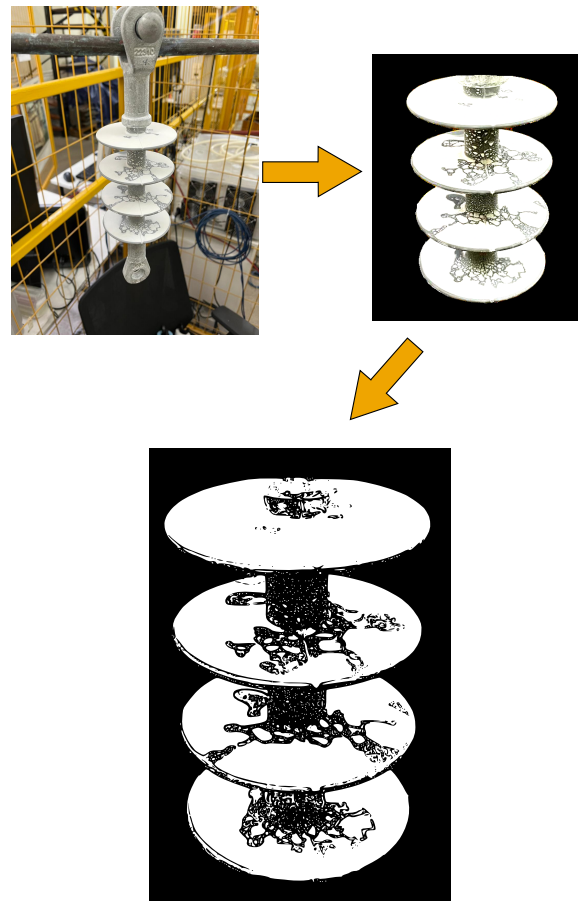


Figura 21: Procedimiento para la determinación de distribución de contaminación.

- Con la imagen vectorizada, se ajusta la perspectiva y, mediante el uso de inteligencia artificial, específicamente Stable Diffusion, se reconstruye la sección eliminada debido al cambio de perspectiva. Para ello, la IA fue entrenada con múltiples imágenes de aisladores contaminados, lo que le permitió identificar patrones y completar las partes faltantes con mayor precisión. El resultado se muestra en Figura 22

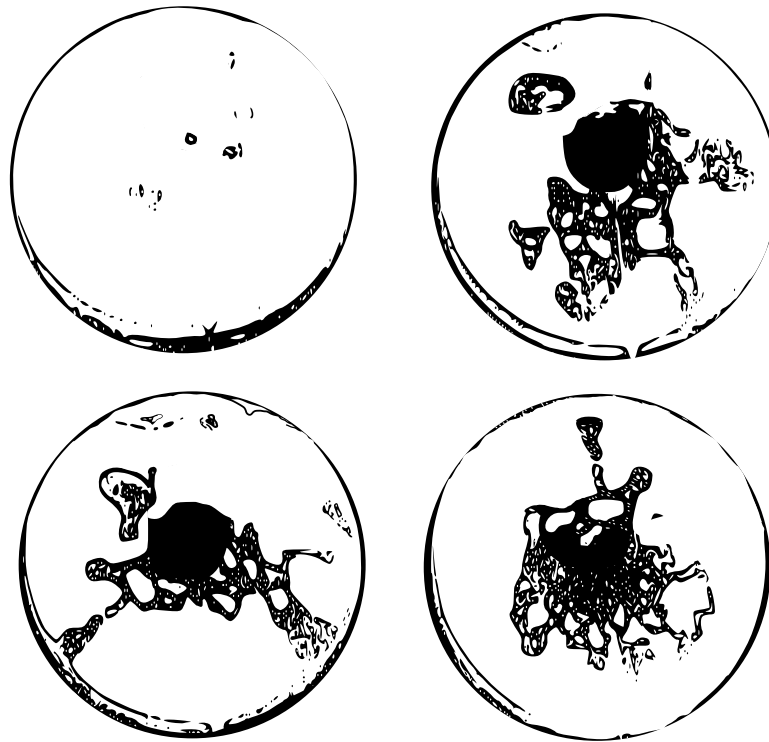


Figura 22: Patrones de contaminación.

- Una vez obtenidas las muestras vectorizadas, se crea un script con el fin de asignar valores de conductividad a las zonas contaminadas (zonas en blanco) y valores muy bajos de conductividad a zonas en negro. A continuación, se detallan las etapas principales:
 1. Se carga el archivo de imagen y, en caso de ser necesario, se convierte a escala de grises. Así, se simplifica el procesamiento posterior.
 2. Se aplica un umbral a través de los códigos RGB para distinguir los píxeles que se consideran contaminados de los que no lo están. De este modo, cada píxel queda marcado como contaminado o no contaminado.
 3. Cada punto de la imagen se traduce a un valor numérico que indica su nivel de conductividad. En las zonas contaminadas, este valor es mayor; en las zonas limpias, es muy bajo.
 4. Para que la matriz refleje la posición real en el disco, se define un diámetro conocido y se ubica el centro en coordenadas (Z_c, Y_c) . De este modo, cada píxel de la imagen se asocia con un punto específico en el espacio. Cabe destacar que dicho centro de coordenadas corresponde al modelado en COMSOL según la geometría del aislador.
 5. El script genera una figura donde se observa la conductividad en cada punto del disco. El eje horizontal corresponde a Z y el eje vertical a Y . Esto permite apreciar de forma clara la región contaminada.
 6. Luego, se guardan las coordenadas (Y, Z) y el valor de conductividad correspondiente en un archivo de texto. Esto para que posteriormente COMSOL pueda leer el archivo.
 7. Finalmente, se repite el script por cada aleta que tiene el aislador para determinar la distribución correspondiente.

De esta forma, es posible contar con un método sistemático para convertir una imagen en blanco y negro en un conjunto de datos que describe la presencia y magnitud de la contaminación en la aleta del aislador.

- Para el caso a estudiar se tienen las siguientes distribuciones en forma gráfica, las cuales para la presentación presentan una conductividad de $1\text{E-}5$ [S/m]. Ver Figura 23 a la 26.

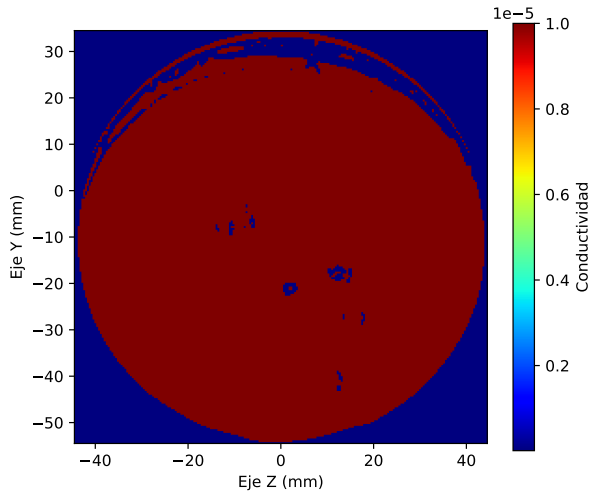


Figura 23: Distribución de contaminante primera aleta.

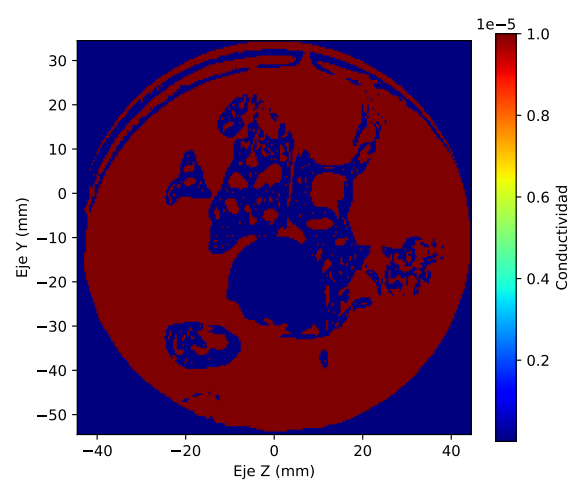


Figura 24: Distribución de contaminante segunda aleta.

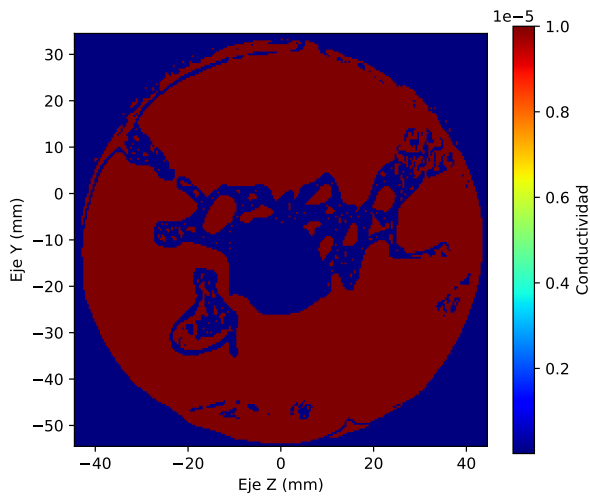


Figura 25: Distribución de contaminante tercera aleta.

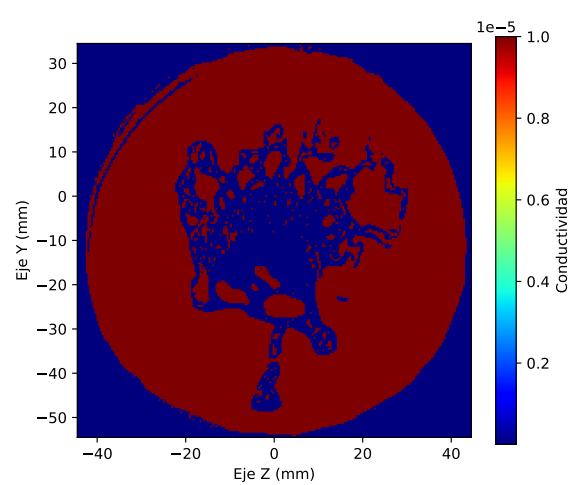


Figura 26: Distribución de contaminante cuarta aleta.

- Finalmente, dado que en la distribución de contaminante se presenta un nivel conductividad, dicho valor puede a su vez, depender de otras variables como la humedad, temperatura, etc.

4.6. Metodología para la contaminación de aisladores

4.6.1. Aplicación de capa contaminante según el método de capa sólida

El procedimiento se basa en una contaminación tipo A. Los contaminantes contienen sales y materiales inertes en la superficie del aislador. El grado de contaminación en la prueba es definido por la densidad de depósito de sal (SDD), esta se expresa en mg de sal por cm^2 de la superficie de prueba. Se recomienda utilizar esta prueba para aisladores con un máximo de 600 kV e inferiores.

Tabla 5: Concentración de material soluble e insoluble.

Entorno	Concentración de sal g/l	Concentración de Caolín g/l	ESDD mg/cm^2	NSDD mg/cm^2	ESDD/ NSDD
E4	1	10	0.016	0.130	0.120
E6	1.2	30	0.024	1.481	0.016
E7s	80	2	0.861	0.032	26.91

Este procedimiento se basa en la memoria de titulación de Marco Illanes [16]. Los pasos a seguir para la aplicación de la capa contaminante son los siguientes:

1. **Limpieza de los aisladores:** Se realiza una limpieza exhaustiva de los aisladores empleando agua potable, conforme a las especificaciones de la norma IEC 61245.
2. **Preparación de la mezcla:** Se preparan las concentraciones de sal y caolín correspondientes a cada entorno para un total de 20 litros de agua. Estas se encuentran en la Tabla 5.
3. **Purgado del sistema de aspersión:** Se prepara el sistema de contaminación por aspersión purgando la bomba y cañerías sin el aislador. Para ello, se utiliza aproximadamente 5 litros de agua limpia.
4. **Colocación del aislador:** El aislador de prueba se coloca en suspensión dentro de la cámara de aspersión, utilizando guantes para evitar contaminación directa.
5. **Aspersión de la mezcla:** La bomba de agua se conecta al recipiente que contiene la mezcla. Mientras se agita, se activa el sistema de aspersión, empleando al menos 20 litros de la mezcla previamente preparada. En la Figura 27

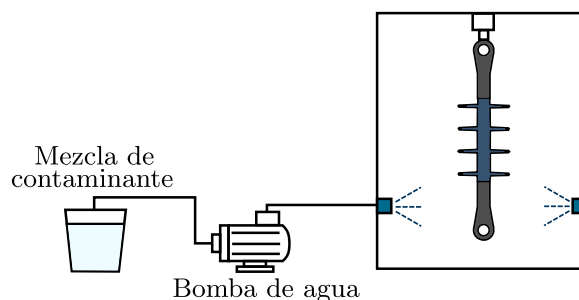


Figura 27: Esquema de contaminación simple.

6. **Secado del aislador:** Tras finalizar el proceso de contaminación, se deja secar el aislador durante al menos una hora. Luego, se retira de la cámara en posición vertical y se transporta a una zona de secado protegida de contaminantes, donde se deja secar por un mínimo de 24 horas.

4.6.2. Aplicación de contaminantes para medición de resistividad y permitividad

Este ensayo tiene como objetivo obtener muestras representativas de distintos entornos de contaminación para la medición de la conductividad volumétrica y la permitividad relativa. Los pasos a seguir son los siguientes:

1. **Colocación de la placa circular:** En la cabina de aspersión, se suspende una placa circular con dimensiones equivalentes a las de la falda de un aislador, asegurándose de que quede lo más nivelado posible para garantizar una distribución uniforme del contaminante.
2. **Procedimiento de contaminación:** Se repiten los pasos descritos en la Sección 4.6.1 hasta el paso 5, siguiendo las mismas condiciones de preparación y aplicación del contaminante.
3. **Extracción del contaminante:** Una vez completado el proceso, y con la placa aún suspendida, se coloca un recipiente debajo de esta. Utilizando agua destilada, se lava cuidadosamente la superficie de la placa, desplazando el contaminante hacia el recipiente recolector, que debe contar con bordes adecuados para evitar pérdidas. Esto se observa en la Figura 28.
4. **Secado de la muestra contaminante:** El recipiente con la muestra contaminante se transfiere a una zona libre de contaminación para su secado, el cual puede realizarse al aire libre o en un horno, según las posibilidades.

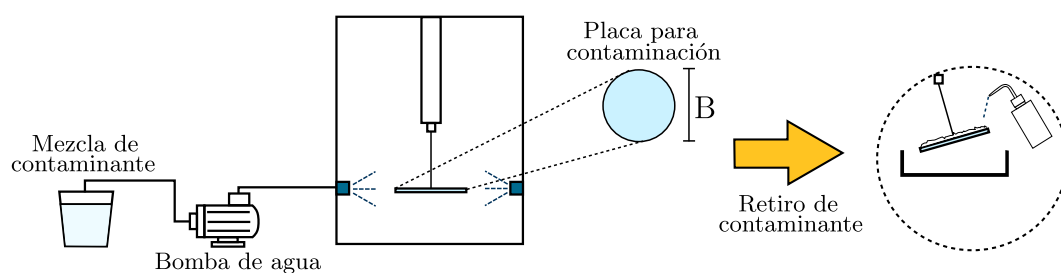


Figura 28: Procedimiento para la obtención de contaminantes.

4.7. Metodologías para la determinación de permitividades

1. Se coloca el material bajo prueba entre las dos placas de un condensador de placas paralelas.
2. Se usa un medidor de capacitancias o puente de impedancia para medir la capacitancia C a una frecuencia dada.
3. Se registra el valor de la capacitancia medida C (en Faradios).

4. Se mide el área de las placas A (en metros cuadrados) y la distancia entre las placas d (en metros).
5. Se aplica la fórmula para calcular la permitividad relativa ε_r :

$$\varepsilon_r = \frac{Cd}{\varepsilon_0 A}$$

donde $\varepsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ es la permitividad del vacío.

6. Se ajusta la frecuencia del medidor y repite la medición de capacitancia a diferentes frecuencias. Se registra las capacitancias correspondientes a cada frecuencia.
7. Para cada frecuencia medida, se repite el cálculo de ε_r usando los mismos valores de A y d , pero la capacitancia medida a cada frecuencia.
8. Se realiza un gráfico de ε_r en función de la frecuencia para observar cómo varía la permitividad.

4.8. Metodologías para ensayos de alta tensión

4.8.1. Humidificación de aisladores

El siguiente procedimiento se lleva a cabo para realizar pruebas de humedad. Sin embargo, se advierte que la precisión de la medición es mayor cuanto más cercana esté la humedad relativa al 100 %, ya que la variación en el tiempo es menor.

1. **Posicionamiento del aislador:** El aislador se coloca dentro de la cámara de niebla, asegurándose de sellarla herméticamente.
2. **Incremento de la humedad:** Se utiliza un humidificador ultrasónico comercial para aumentar la humedad relativa dentro de la cámara.
3. **Monitoreo de la humedad:** La humedad relativa al interior de la cámara se monitorea (solo casos donde no haya ruptura dieléctrica) en tiempo real mediante un higrómetro de sonda para garantizar precisión.
4. **Preparación para las pruebas:** Cuando la humedad relativa alcanza aproximadamente el valor requerido, se apaga humidificador, se energiza el aislador y se realiza medición requerida.
5. **Pruebas en distintos niveles de humedad:** Este procedimiento se repite para distintos niveles de humedad relativa.

4.8.2. Ensayo para la determinación de tensión de ruptura

Este ensayo tiene como objetivo determinar las tensiones de ruptura en diferentes entornos, tanto en condiciones secas como húmedas. Este ensayo estará fundamentado en las directrices generales establecidas por la norma IEC 60060-1:2010.

1. **Pruebas en condiciones secas y húmedas:** Primero, se deberán realizar las pruebas con los aisladores en condiciones secas. Luego se lleva la cámara a un valor de humedad relativa conocida y se repiten los pasos.
2. **Conexión de la fuente de alimentación:** Se conecta la fuente de alimentación de corriente continua (DC) polaridad negativa al aislador dentro de su cámara de humedad, independientemente de si se desean realizar pruebas secas o húmedas, como se ilustra en la Figura 29.

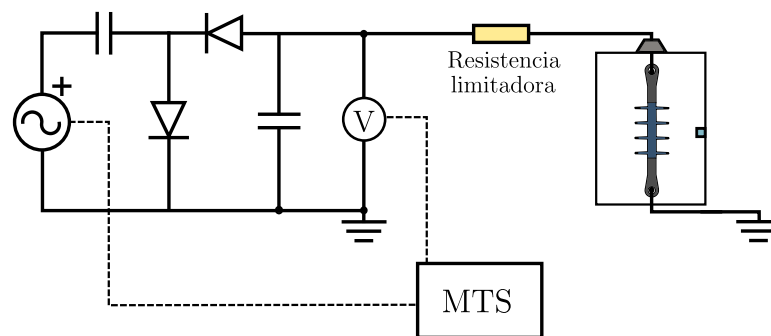


Figura 29: Circuito y conexiones para medir corriente de fuga.

3. **Resistencia limitadora de corriente:** En serie con el aislador, se conecta una resistencia limitadora de corriente con el propósito de reducir la corriente de cortocircuito para cuando ocurra ruptura dieléctrica.
4. **Aumento de tensión:** Se energiza el sistema y se incrementa la tensión de forma continua y controlada hasta que ocurra ruptura dieléctrica.
5. **Registro de datos:** Se anota el valor de tensión justo antes de la ruptura, además de la humedad relativa y la temperatura del entorno.
6. **Reducción de tensión tras ruptura:** Cuando ocurra la ruptura, se reduce rápidamente la tensión al valor nominal del aislador y se espera un minuto antes de continuar.
7. **Repetición de pruebas:** Este procedimiento se repite hasta obtener al menos 5 mediciones.

4.8.3. Ensayo de corriente de fuga a distintos niveles de tensión y condición seca

En esta sección se describirá la metodología utilizada para ensayar aisladores poliméricos en diversos niveles de contaminación, incluyendo condiciones de entorno limpio. Los ensayos se llevarán a cabo tanto en ambientes secos como húmedos. Estos ensayos estarán fundamentados en las directrices generales establecidas por la norma IEC 60060-1:2010.

1. **Pruebas en condiciones secas y húmedas:** Las pruebas deben iniciarse con los aisladores en condiciones secas. Una vez completadas estas, se procederá a realizar las pruebas en condiciones húmedas, asegurando que ambas etapas se ejecuten de manera independiente.

2. **Conexión de la fuente de alimentación:** Se conecta la fuente de alimentación de corriente continua (DC) en polaridad negativa al aislador dentro de su cámara de humedad, independientemente de si se realizan pruebas en condiciones secas o húmedas, tal como se ilustra en la Figura 30.

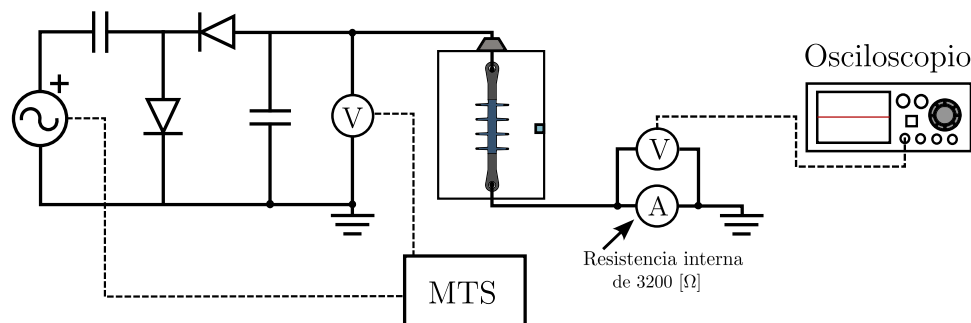


Figura 30: Circuito y conexiones para medir corriente de fuga.

3. **Medición de corriente:** En serie con el aislador, se coloca un amperímetro de rango fijo con una resistencia interna de 3200 Ω. La tensión medida a través de esta resistencia se reescala para calcular la corriente, que se visualiza en el osciloscopio. Cabe destacar que, debido a que la resistencia de aislamiento del sistema es del orden de cientos de GΩ, la influencia de la resistencia interna del amperímetro en la corriente de fuga es despreciable.
4. **Registro de datos iniciales:** Antes de energizar el aislador, se registran los valores de humedad relativa y temperatura en las condiciones iniciales de ensayo.
5. **Energización del aislador:** El aislador se energiza de manera controlada hasta alcanzar su tensión nominal, asegurando la estabilidad y seguridad durante el proceso.
6. **Medición de corriente de fuga:** Se realizan mediciones sucesivas de la corriente de fuga a tensiones incrementales, aproximadamente hasta el 60 % de la tensión de ruptura. Las mediciones se efectúan en pasos de 10 kV. Por ejemplo, para un aislador de clase 15 kV con una tensión de ruptura de 140 kV, las tensiones de ensayo corresponde a 15, 20, 30,..., 90 kV.
7. **Repetición mínima de ensayos:** Después de completar las mediciones del punto 6, la tensión se reduce al mínimo y se espera un intervalo de 30 segundos antes de reiniciar el ensayo. Este procedimiento debe repetirse un total de al menos 10 veces para garantizar la consistencia de los resultados. Al finalizar, se mide nuevamente la humedad relativa y la temperatura.
8. **Repetición bajo condiciones de contaminación:** Finalmente, el sistema se desenergiza y el ensayo se repite para cada una de las condiciones de contaminación especificadas, siguiendo el mismo procedimiento descrito.

4.8.4. Ensayo de corriente de fuga a distintos niveles de humedad

Estos ensayos tienen como objetivo analizar cómo varía la corriente de fuga a medida que cambia la humedad relativa. Para ello, se llevará a cabo el siguiente procedimiento:

1. **Configuración del sistema de energización:** Se configura el sistema de energización según lo mostrado en la Figura 30.
2. **Colocación del higrómetro:** Se coloca la sonda del higrómetro dentro de la cámara de humedad. El higrómetro se configura para realizar mediciones en intervalos de 10 segundos, y de forma simultánea, se activa un cronómetro.
3. **Sistema de humidificación:** Se conecta y enciende el sistema de humidificación a un caudal constante.
4. **Energización y medición de la corriente de fuga:** Se enciende el sistema de medición de tensión (MTS) y se ajusta la tensión al valor nominal. A partir de este momento, se registran mediciones de la corriente de fuga en intervalos de 10 segundos.
5. **Registro y análisis de datos:** Las mediciones se realizan durante un período mínimo de 15 minutos. Una vez finalizadas, se cruzan los datos de humedad relativa y temperatura con las mediciones de corriente de fuga, tomando como referencia los tiempos registrados.

5. Resultados experimentales

5.1. Estimación de funciones de tensión de ruptura

Las funciones de la Figura 31 a la 35, se determinaron utilizando el módulo de -Curve fitter- de MatLab a partir de los puntos medidos.

5.2. Tensiones de ruptura en función de la humedad relativa

De la Figura 31 a la 34, se presenta tanto los datos medidos de forma experimental como su función estimada. A su vez, en la Figura 35 se presenta una comparativa de las curvas aproximadas para cada entorno. Se puede apreciar que el caso del aislador sin contaminación reduce su tensión de ruptura cuando varía la humedad relativa del ambiente. Sin embargo, se observa que a diferencia de los casos de contaminación, el comportamiento tiende a ser lineal y decrece un 32 % cuando la humedad relativa del ambiente es entorno al 100 %. Esto se puede deber a que el aire húmedo tiene una menor tensión de ruptura que el aire seco porque las moléculas de agua facilitan la ionización del aire, reduciendo la energía necesaria para iniciar una descarga.

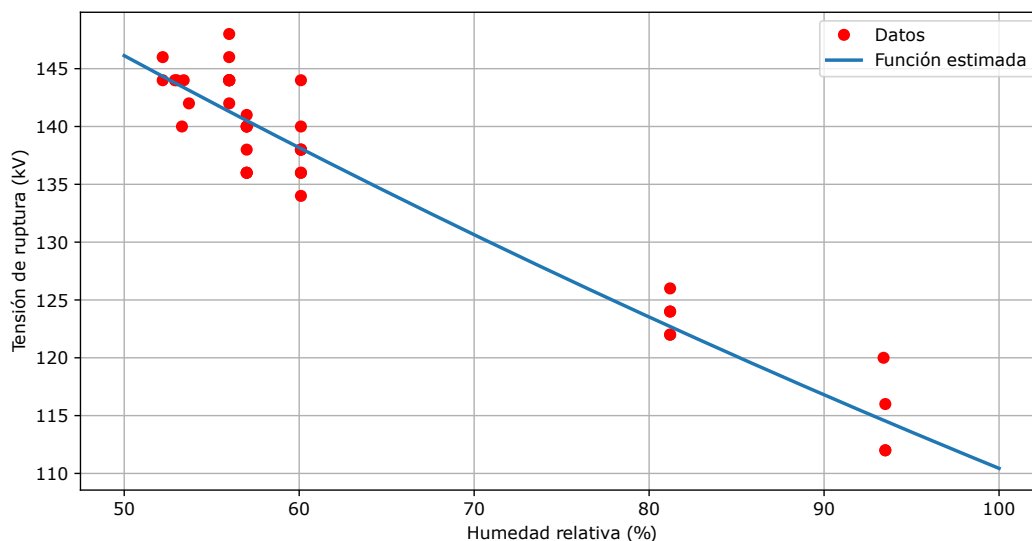


Figura 31: Tensión de ruptura en función de HR caso aislador sin contaminación.

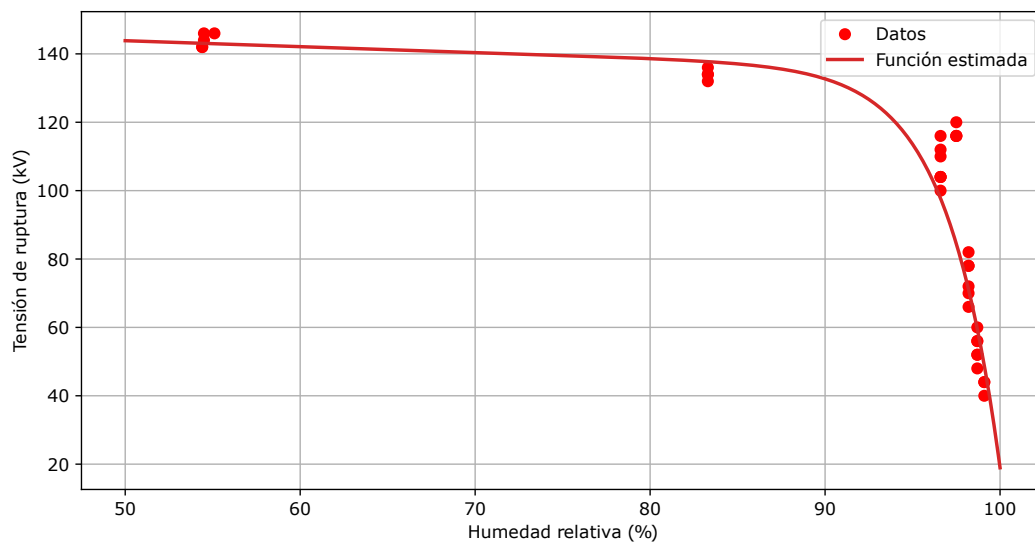


Figura 32: Tensión de ruptura en función de HR caso entorno E4.

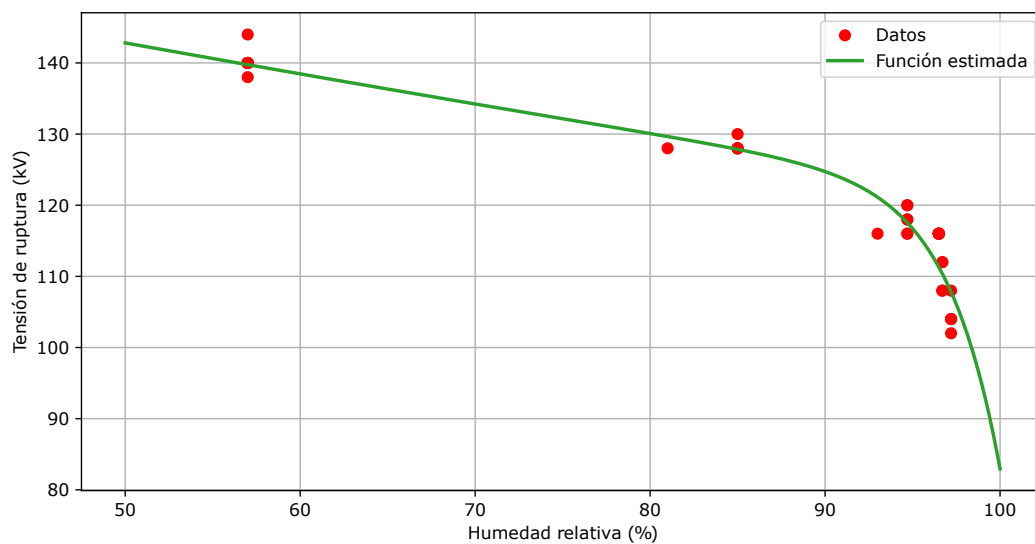


Figura 33: Tensión de ruptura en función de HR caso entorno E6.

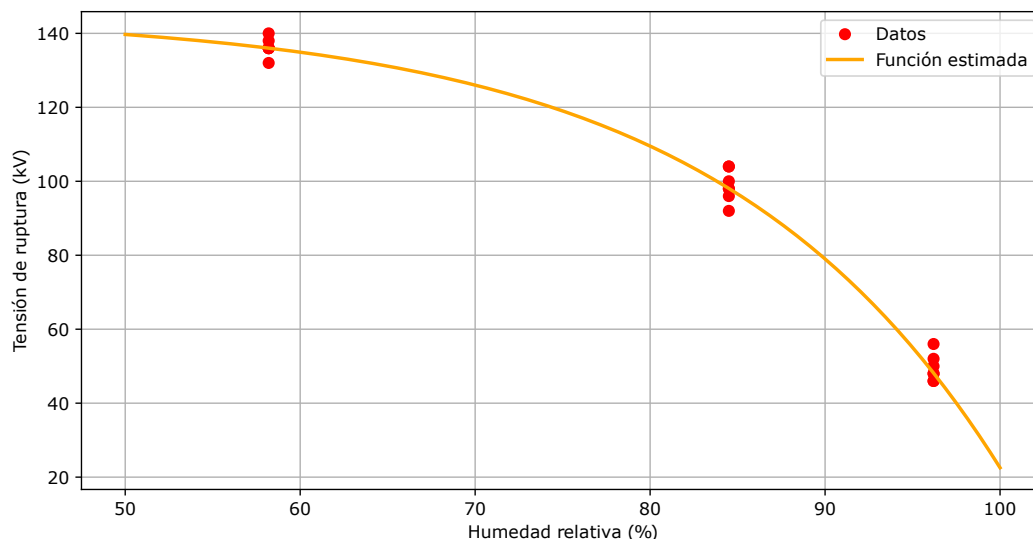


Figura 34: Tensión de ruptura en función de HR caso entorno E7.

En la Figura 35 se observa que, a medida que aumenta la concentración del contaminante, las tensiones de ruptura disminuyen. En particular, el entorno con mayor concentración salina (E7) presenta, desde el inicio de la prueba, una tensión de ruptura más baja en comparación con los demás entornos. En estos últimos, la tensión de ruptura se mantiene elevada hasta alcanzar niveles de humedad relativa muy altos, con puntos críticos en torno al 95-96 %. Esto indica que, durante gran parte del tiempo, estos contaminantes no representan un riesgo significativo. Sin embargo, cuando la humedad relativa se acerca a su valor máximo, su efecto se intensifica considerablemente, aumentando la probabilidad de ruptura dieléctrica y la ocurrencia casi segura de descargas parciales.

En el caso de E7, incluso con valores de humedad relativa moderados, es posible que se produzcan descargas parciales. Estas pueden acelerar el deterioro del material aislante y favorecer la formación de caminos de banda seca, lo que compromete aún más el desempeño del aislamiento.

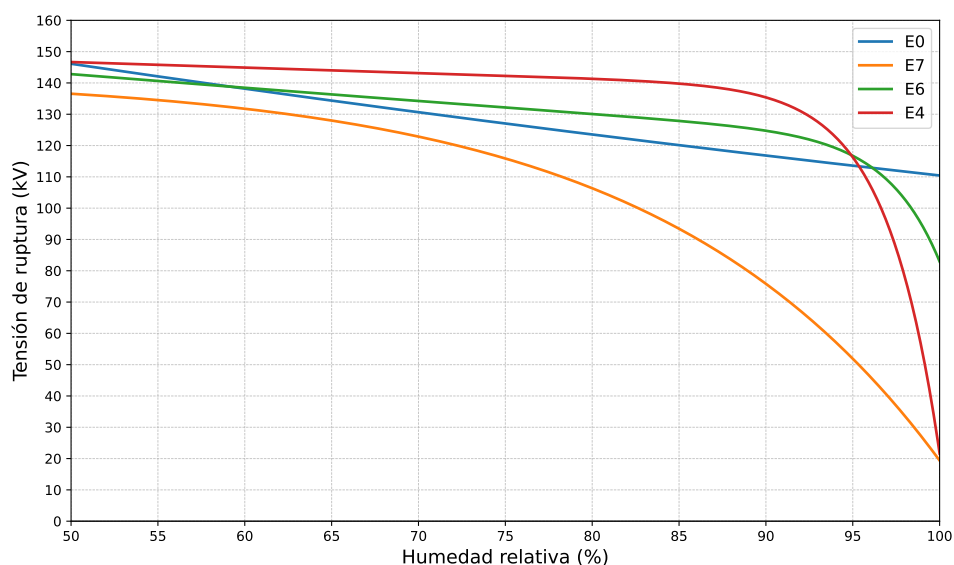


Figura 35: Conjunto de tensiones de ruptura en función de HR según entorno.

En particular, los entornos E4 y E7 alcanzan tensiones de ruptura apenas superiores a la tensión de operación del aislador, que es de 15 kV. El entorno E4 llega a aproximadamente 23 kV para condición de HR 100 %, lo que representa un 53 % más que la tensión de operación nominal, mientras que el entorno E7 alcanza los 20 kV, superando en solo un 33 % la tensión nominal. Esto último convierte a E7 en un caso extremadamente severo, ya que su margen de seguridad es considerablemente menor, aumentando el riesgo de fallas dieléctricas y descargas parciales en condiciones de alta humedad. Por su parte, el caso E4 no se queda atrás, mostrando un comportamiento muy cercano al del entorno E7. Sin embargo, la caída abrupta en la tensión de ruptura observada para E4 resulta poco comprendida, ya que presenta una concentración salina bastante similar a la del entorno E6. El caso E6 no tiene un efecto muy severo sobre la tensión de ruptura, pues aun se mantiene cercano a 5.5 veces la tensión nominal de operación.

5.3. Corrientes de fuga en función de la humedad relativa

5.3.1. Extrapolación de datos y estimación de función de corriente de fuga en función de humedad relativa

Las corrientes de fuga en función de la humedad relativa se muestran en las Figuras 36 y 37.

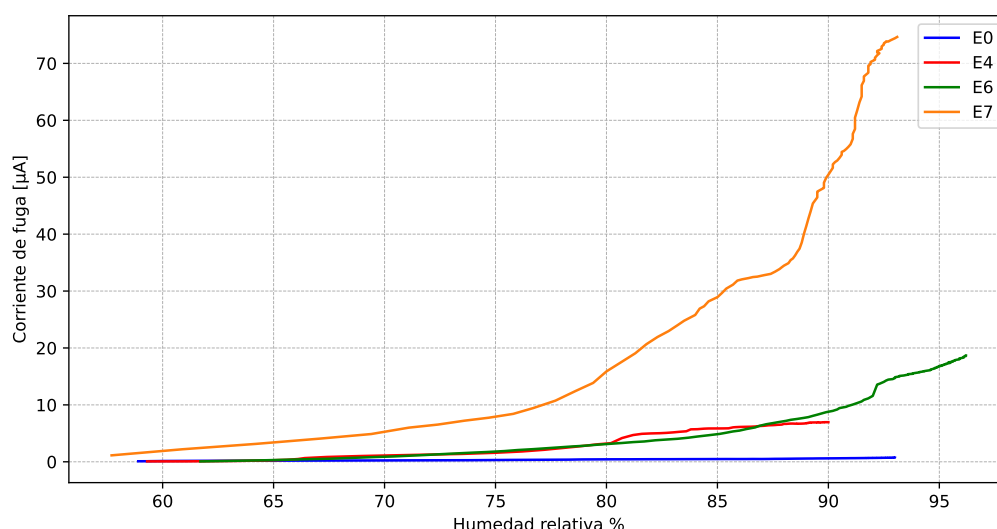


Figura 36: Corrientes de fuga medidos a tensión nominal.

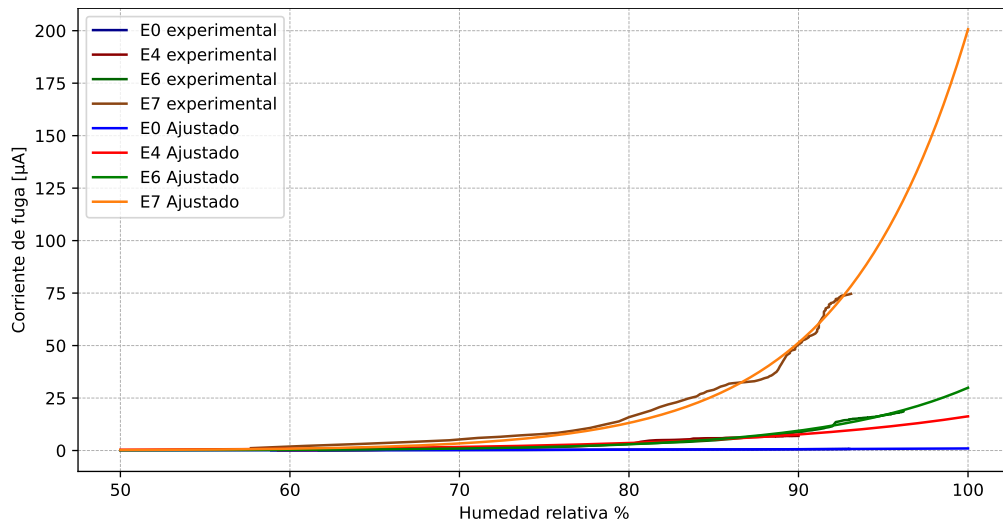


Figura 37: Comparativa de corrientes de fuga medidos y estimados a tensión nominal.

La Figuras 36 y 37 muestran que aun cuando la humedad relativa del ambiente aumentó al máximo, la corriente de fuga no cambió significativamente su valor en el caso E0 (caso limpio) en comparación con los casos contaminados. Una comparativa se puede ver en la Tabla 6.

Tabla 6: Comparativa de aumento de corrientes estimadas por cambio de humedad relativa.

Entorno	$\frac{I(HR=100\%)}{I(HR=50\%)}$	$\frac{I(HR=50\%)}{I_{E0}(HR=50\%)}$	$\frac{I(HR=100\%)}{I_{E0}(HR=100\%)}$
E0	5.5845	-	-
E4	44.0357	9.6939	62.1779
E6	323.7592	2.9551	114.1507
E7	911.4165	7.8124	766.0241

Se observa que para el caso salino, la corriente puede aumentar hasta tres ordenes de magnitud, mientras que para el caso limpio, esta no logra aumentar ni siquiera un orden de magnitud.

5.3.2. Determinación de conductividades a partir de corriente de fuga

Según el procedimiento de la sección 4.3.4, se determinó los parámetros y estos se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7: Parámetros para el cálculo de conductividad de contaminantes.

F	$V_c[V]$	L [mm]	A [mm ²]	L/A [1/m]
1.916	15000	396	57405	6.897

En la Tabla 8, se presentan las funciones que modelan el comportamiento del contaminante en función de la humedad relativa y temperatura ambiental. Un análisis rápido muestra que los valores obtenidos son mucho más bajos, por ejemplo en comparación con los que se muestran en [23], donde se indica que una contaminación ligera, media y severa, equivalen a las soluciones de 11.5mS/cm, 30mS/cm y 160mS/cm, respectivamente.

Tabla 8: Parámetros para ecuación de conductividad en contaminantes.

Entorno	θ_{min} [°C]	θ_{max} [°C]	$\bar{\theta}$ [°C]	b	$\sigma_{vT}(T, H)$ [$\mu S/m$]
E4	21.1	21.4	21.25	0.01808	$7,399 \cdot 10^{-6} \cdot e^{0,0757 \cdot H} [1 - 0,01808(21,25 - T)]$
E6	21.2	22.8	22	0.01747	$2,513 \cdot 10^{-7} \cdot e^{0,1156 \cdot H} [1 - 0,01747(22 - T)]$
E7	21	21.7	21.35	0.01800	$2,128 \cdot 10^{-7} \cdot e^{0,1363 \cdot H} [1 - 0,018(21,35 - T)]$

5.4. Permitividades relativas de los contaminantes

Las permitividades relativas determinadas de los contaminantes segun el procedimiento 4.7 se observan entre la Figura 38 y la 44.

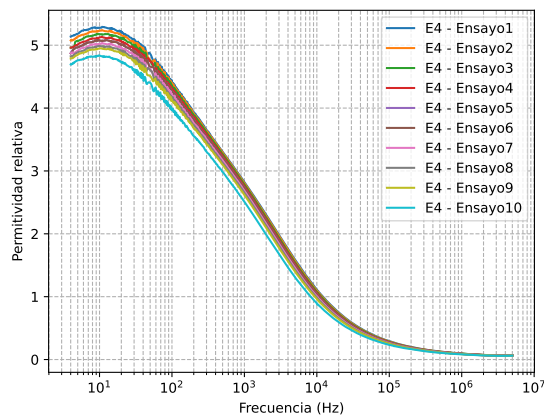


Figura 38: Mediciones de permitividad entorno E4

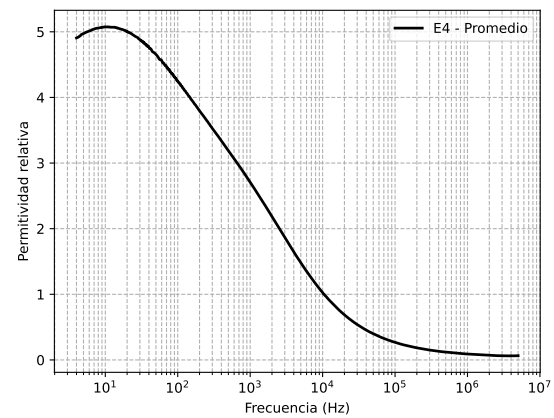


Figura 39: Promedio de permitividad entorno E4

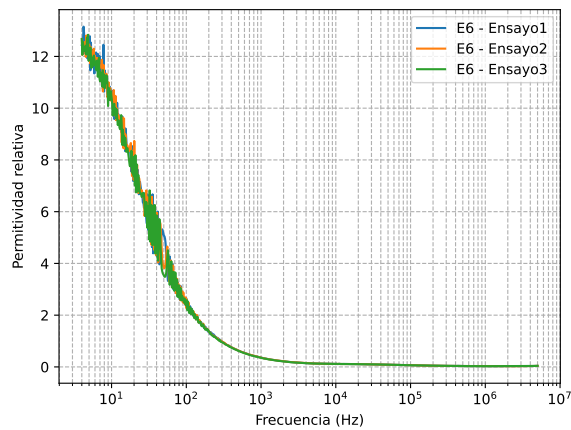


Figura 40: Mediciones de permitividad entorno E6

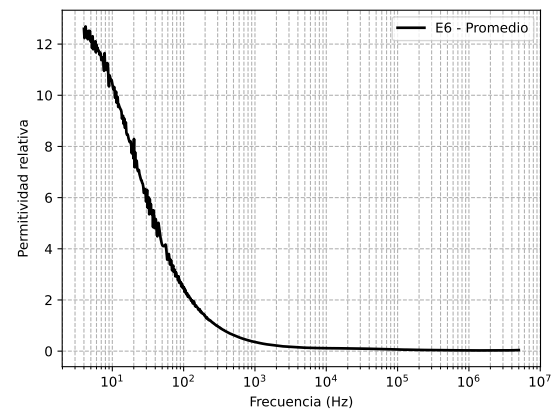


Figura 41: Promedio de permitividad entorno E6

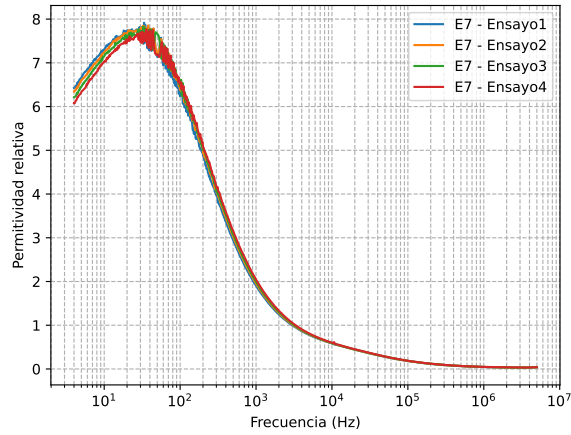


Figura 42: Mediciones de permitividad entorno E7

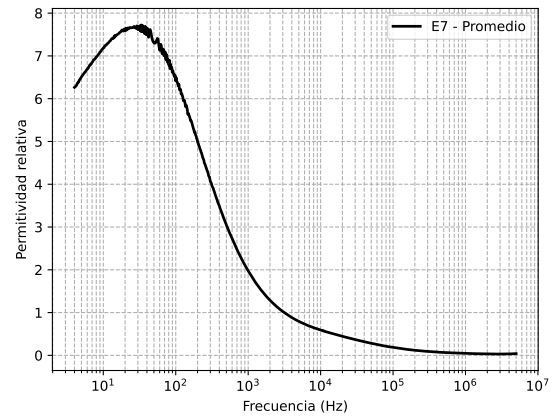


Figura 43: Promedio de permitividad entorno E7

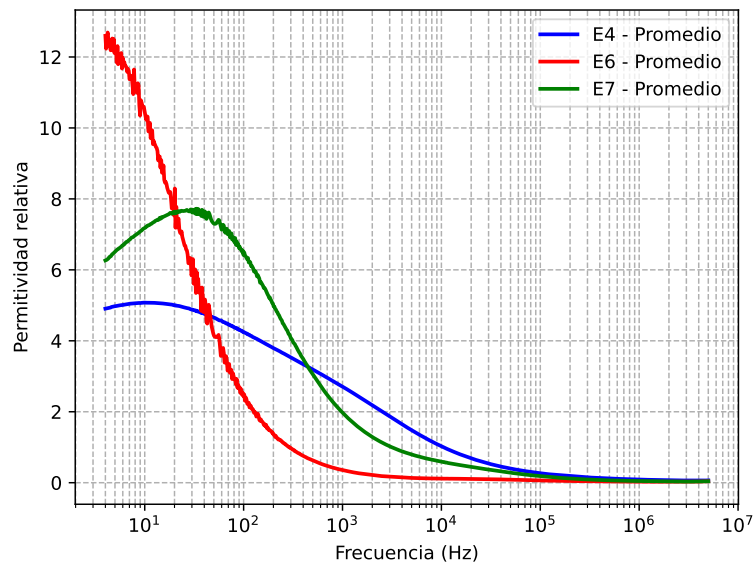


Figura 44: Comparativa de permitividades relativas según entorno de contaminación.

La permitividad relativa con la frecuencia más pequeña medida corresponde a 4 [Hz]. Se tomará dicho valor como referencia para el estudio en corriente continua.

Tabla 9: Permitividades relativas del contaminante a utilizar para simulación.

Entorno de contaminación	ε_r
E4	4.90
E6	6.26
E7	12.60

6. Resultados computacionales

6.1. Modelo de contaminación homogénea

El primer modelo realizado corresponde al caso donde la contaminación es idealizada, esto quiere decir, esparcida de manera homogénea sobre la superficie del aislador, y a su vez, la conductividad es dependiente de la humedad que se considera constante en el espacio por simplicidad. Una imagen donde se observan las configuraciones directamente desde COMSOL, se puede observar en la Figura 45. De esta forma los resultados de campo ante distintos niveles de humedad y por consiguiente distinta conductividad del contaminante, se pueden ver numericamente en la Tabla 10. En dicha Tabla se presenta la corriente de fuga evaluada en distintas áreas con parámetro de entrada la conductividad del contaminante, según lo máximo alcanzado por el entorno E7.

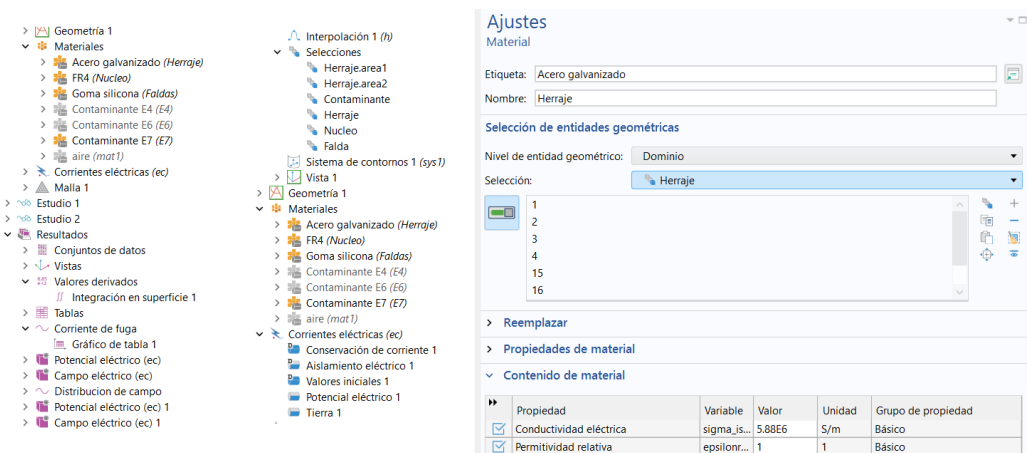


Figura 45: Muestra de algunas configuraciones dentro de COMSOL.

Tabla 10: Resultado de simulación caso de contaminante homogéneo

Área total	Corriente de fuga [μA]		$\sigma [S/m]$	$E_{max} [kV/cm]$
	Área interna	Área contaminante		
0.20657	$1,41 \times 10^{-5}$	0.20656	1×10^{-7}	6.909
2.0654	$1,41 \times 10^{-5}$	2.0654	1×10^{-6}	6.880
206.63	$1,41 \times 10^{-5}$	206.63	1×10^{-4}	6.871

En la Tabla 10 se presentan los valores del área total, área interna y área contaminante, los cuales corresponden a la corriente de fuga que atraviesa cada sección. EL Área total corresponde a la suma del área interna con la contaminante, estas últimas se muestran en la Figura 46.

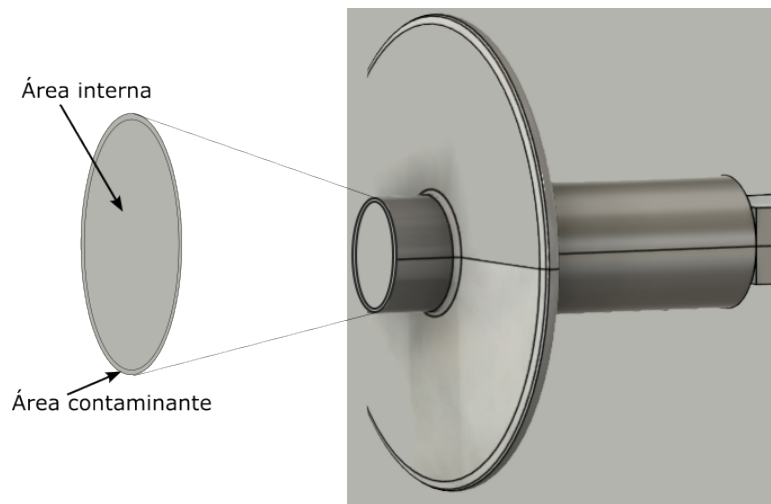


Figura 46: Áreas de evaluación para la corriente de fuga.

Los resultados indican que la corriente fluye predominantemente por la superficie del aislador, específicamente sobre la zona contaminada. Esto valida el método empleado para determinar la conductividad del contaminante, ya que demuestra que la corriente que atraviesa el núcleo y la falda del aislador puede considerarse despreciable.

Asimismo, se observa que, cuando el contaminante es homogéneo, el campo eléctrico no depende de la conductividad. En consecuencia, en estos casos, la corriente de fuga no puede utilizarse como un indicador confiable de la proximidad del aislador a sufrir descargas parciales o totales. A su vez, en la Figura 47 y 48 se muestra la distribución de campo entre herrajes. Según lo observado, ante un caso homogéneo de contaminación, la corriente de fuga asociada a una conductividad, no explica la formación de descargas parciales ni totales. Dado que no produce variación en el campo eléctrico.

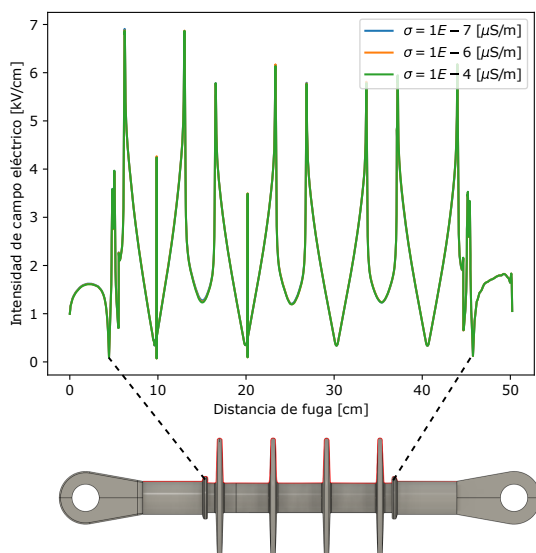


Figura 47: Mediciones de campo eléctrico frontera contaminante-aire.

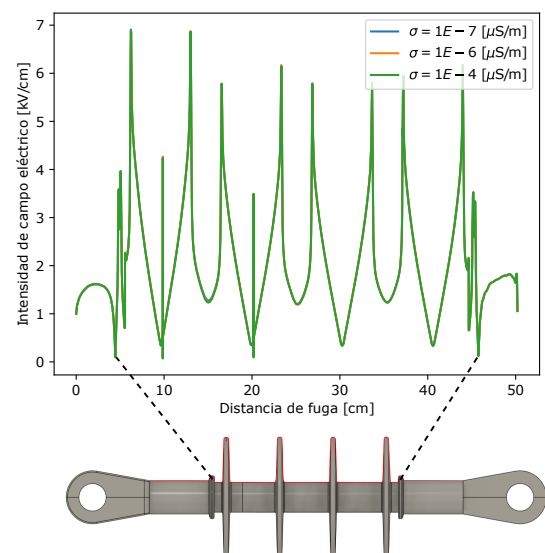


Figura 48: Mediciones de campo eléctrico frontera falda-contaminante.

En la Figura 49 se presenta la distribución de potencial a lo largo de la superficie del contaminante. Se observa que la distribución de potencial tampoco se ve afectada por la conductividad

en el caso de contaminante homogéneo.

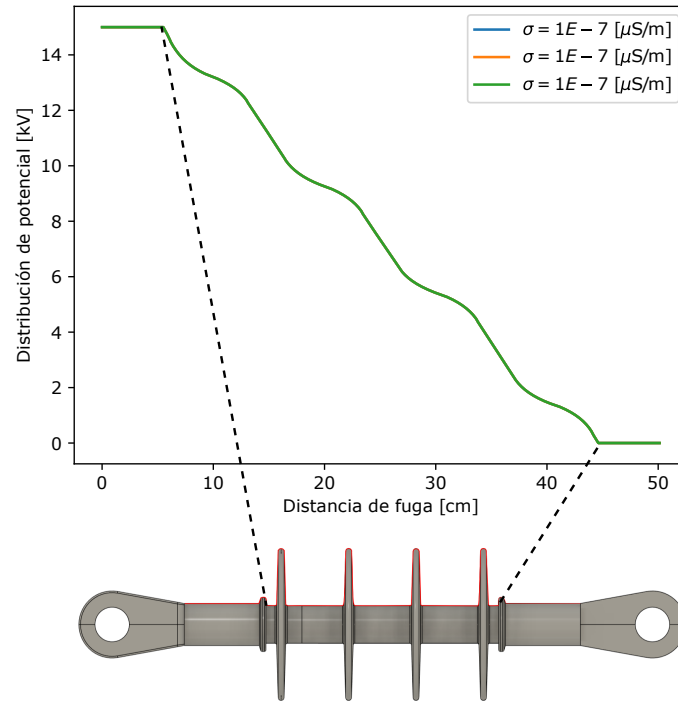


Figura 49: Distribución de potencial a distintos niveles de contaminación.

En la Figura 50 se muestra la distribución del campo eléctrico, observándose que las áreas con mayor concentración de campo se localizan en las esquinas y en los puntos de unión entre el núcleo y las aletas.

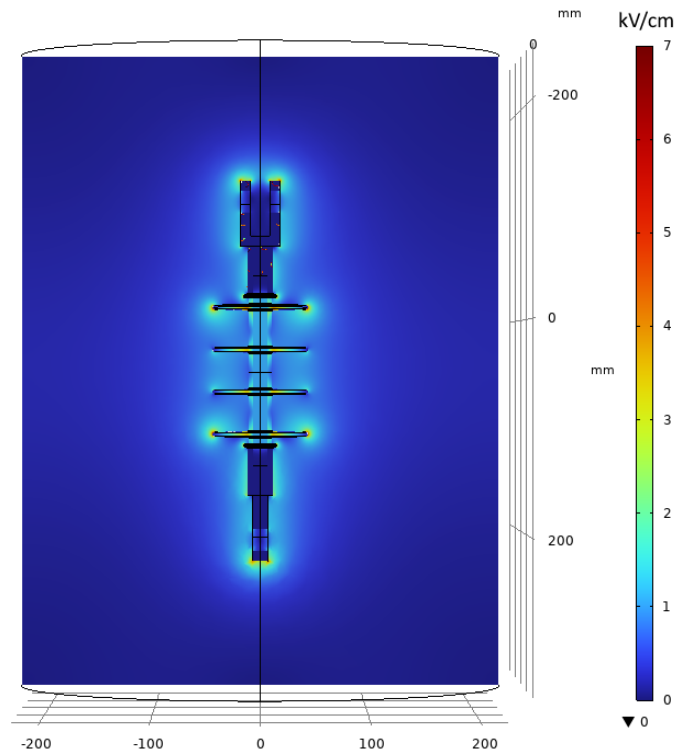


Figura 50: Gradiente de campo eléctrico en aislador en kV/cm.

6.2. Modelo de contaminación semi-homogénea

El segundo modelo corresponde al caso de contaminación semi-homogénea, es decir, esparcida de manera homogénea solo sobre la parte superior de la superficie del aislador (dejando la inferior de forma limpia), con una conductividad dependiente de la humedad, la cual se considera constante en el espacio. Los resultados del campo, ante diferentes niveles de humedad y, por lo tanto, de conductividad del contaminante, se presentan numéricamente en la Tabla 11.

Tabla 11: Resultado de simulación caso de contaminante semi-homogeneo

corriente de fuga [uA]	$\sigma[S/m]$	$E_{max}[kV/cm]$
$4,34 \times 10^{-6}$	1×10^{-7}	11.090
$1,48 \times 10^{-5}$	1×10^{-4}	11.090

En la Tabla 11 se observa que, a pesar de una variación de tres órdenes de magnitud en la conductividad del contaminante, no se produce un efecto en el campo eléctrico máximo. Esto demuestra que, en este caso, el campo eléctrico no puede estimarse en función de la corriente de fuga. Y por consiguiente, no puede indicar que tan cerca se puede encontrar el aislador de descargas parciales o bien, rupturas dieléctricas.

En la Figura 51 se muestra la distribución de campo eléctrico entre los herrajes. Se puede concluir que tampoco la variación de conductividad produce un efecto en el campo eléctrico.

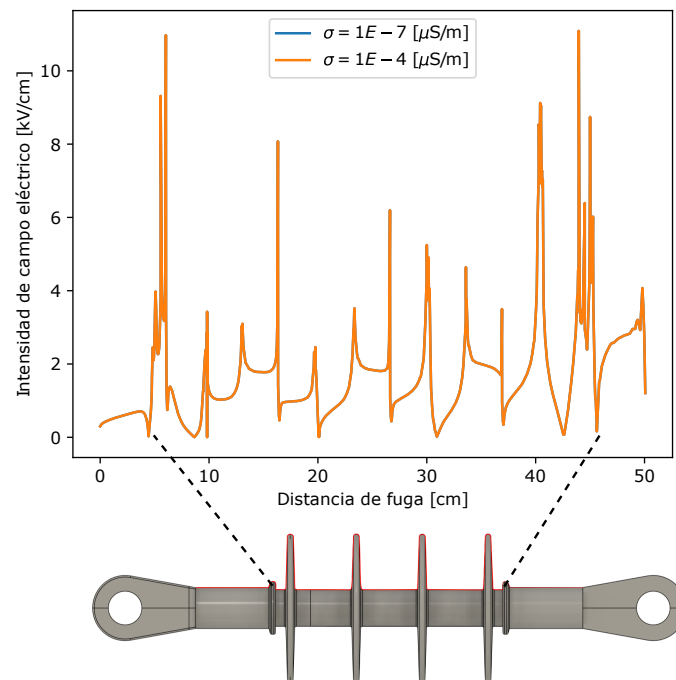


Figura 51: Distribución de potencial a distintos niveles de contaminación.

En la Figura 52 se presenta la distribución de potencial a lo largo de la superficie del contaminante. En comparación con el caso homogéneo, se observa que el potencial cae abruptamente en las aletas. Sin embargo, la conductividad no genera cambios en la distribución del potencial.

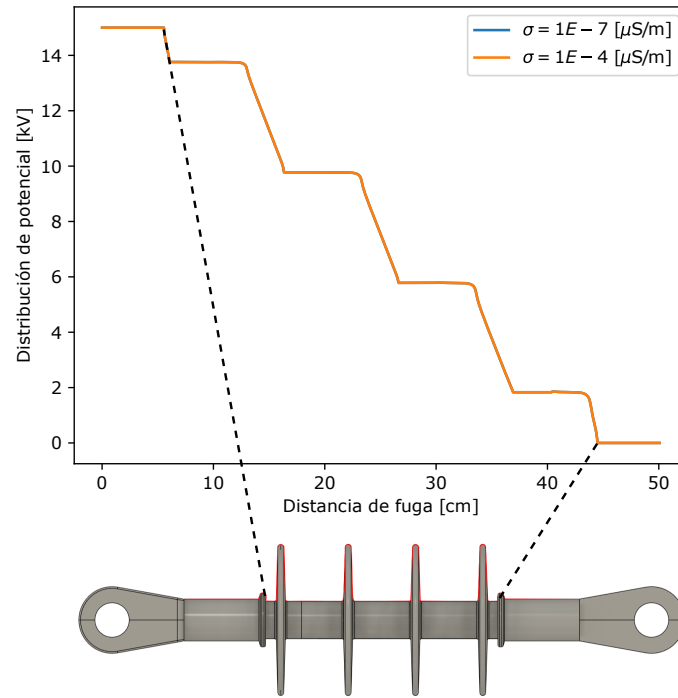


Figura 52: Distribución de potencial a distintos niveles de contaminación.

En la Figura 53 se presenta de forma gráfica el campo eléctrico.

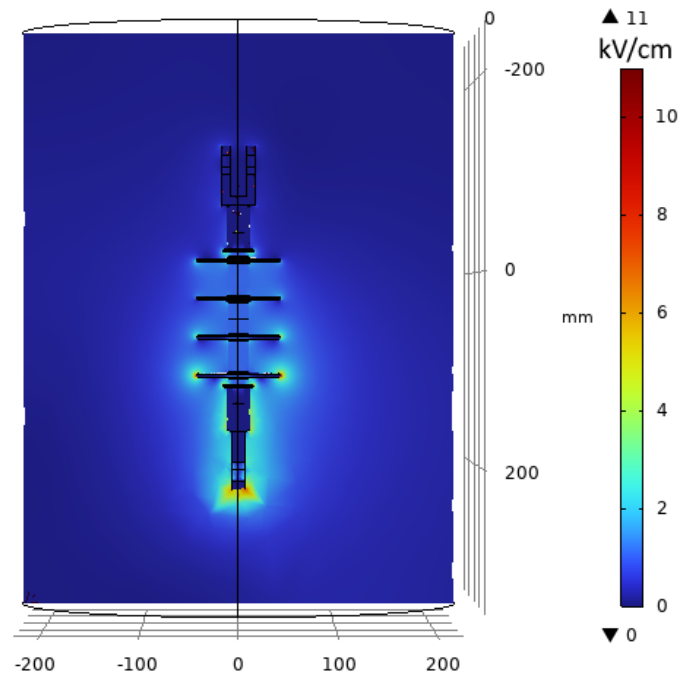


Figura 53: Gradiente de campo eléctrico en aislador en kV/cm.

6.3. Modelo de contaminación no homogénea con cambio de conductividad abrupta

El tercer modelo corresponde al caso en que se representa una distribución no homogénea de contaminante, basada en el entorno de contaminación E7.

6.3.1. Primer caso de conductividad

Este caso corresponde cuando la zonas de contaminación tienen las conductividades de la Tabla 12. Este modelo no presenta transiciones graduales entre las regiones de conductividad. Los saltos bruscos de valor pueden provocar inestabilidad en los resolvedores integrados de COMSOL. Por ello, se debe procurar que las matrices, como las de conductividad en función de x,y,z , estén bien condicionadas. Decimos que una matriz es bien condicionada cuando pequeños cambios o errores en los datos (por ejemplo, errores de redondeo) provocan solo pequeños cambios en la solución de un problema relacionado con esa matriz, como un sistema de ecuaciones lineales $Ax=b$.

Tabla 12: Conductividades caso 1: contaminación no homogénea.

Conductividad zona contaminada [S/m]	Conductividad zona no contaminada [S/m]
1×10^{-5}	1×10^{-8}

Dada la inhomogeneidad del contaminante sobre la superficie del aislador no existe un unico gráfico de la distribución de potencial o bien, campo eléctrico que describa todos los casos. Es por eso que se presentará la Figura 54 que muestra, las concentraciones de campo a medida se disminuye el rango de visión de valores. Se observa primeramente que se obtienen valores irreales en el campo eléctrico, esto probablemente debido a los cambios de conductividad abruptos que hay entre zonas contaminadas y no. Sin embargo, se puede observar a medida que se reduce el rango de visión, el campo eléctrico se va concentrando en las zonas de transición limpio/contaminado, lo que indica que las zonas inhomogéneas son las que generan las descargas parciales en la superficie del aislador.

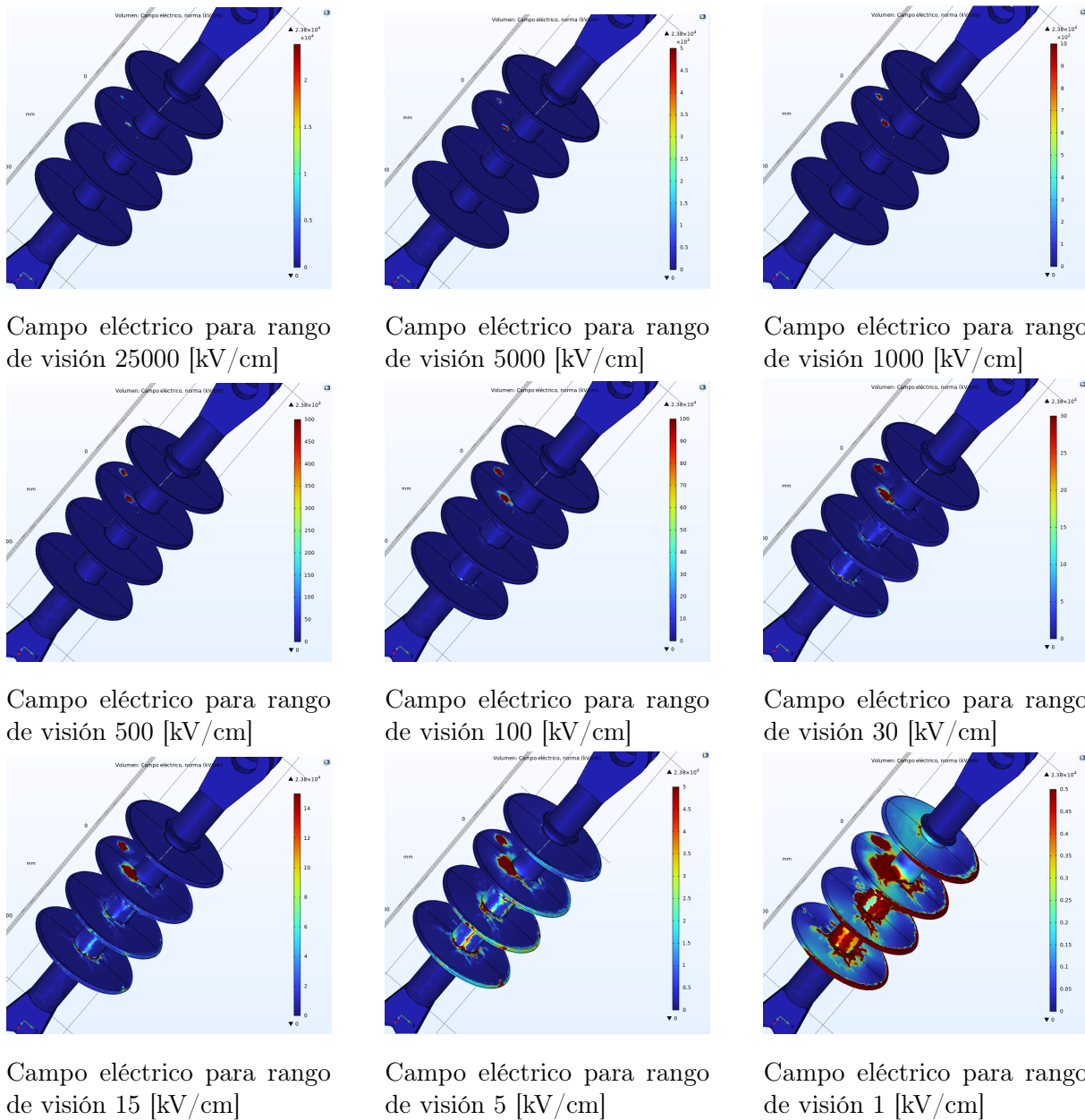


Figura 54: Distribución del campo eléctrico para diferentes rangos de visión para caso 1: contaminación no homogénea.

6.3.2. Segundo caso de conductividad

Se decide simular un segundo caso para observar si es que el cambio en la conductividad produce cambios en la distribución de campo notorios, cuando la conductividad es inhomogénea. Este caso corresponde cuando la zonas de contaminación tienen las conductividades de la Tabla 13. Y la representación de las concentraciones de campo de la Figura 55.

Tabla 13: Conductividades con cambio de contaminación no homogénea de forma abrupta - segundo caso.

Conductividad zona contaminada [S/m]	Conductividad zona no contaminada [S/m]
1×10^{-6}	1×10^{-9}

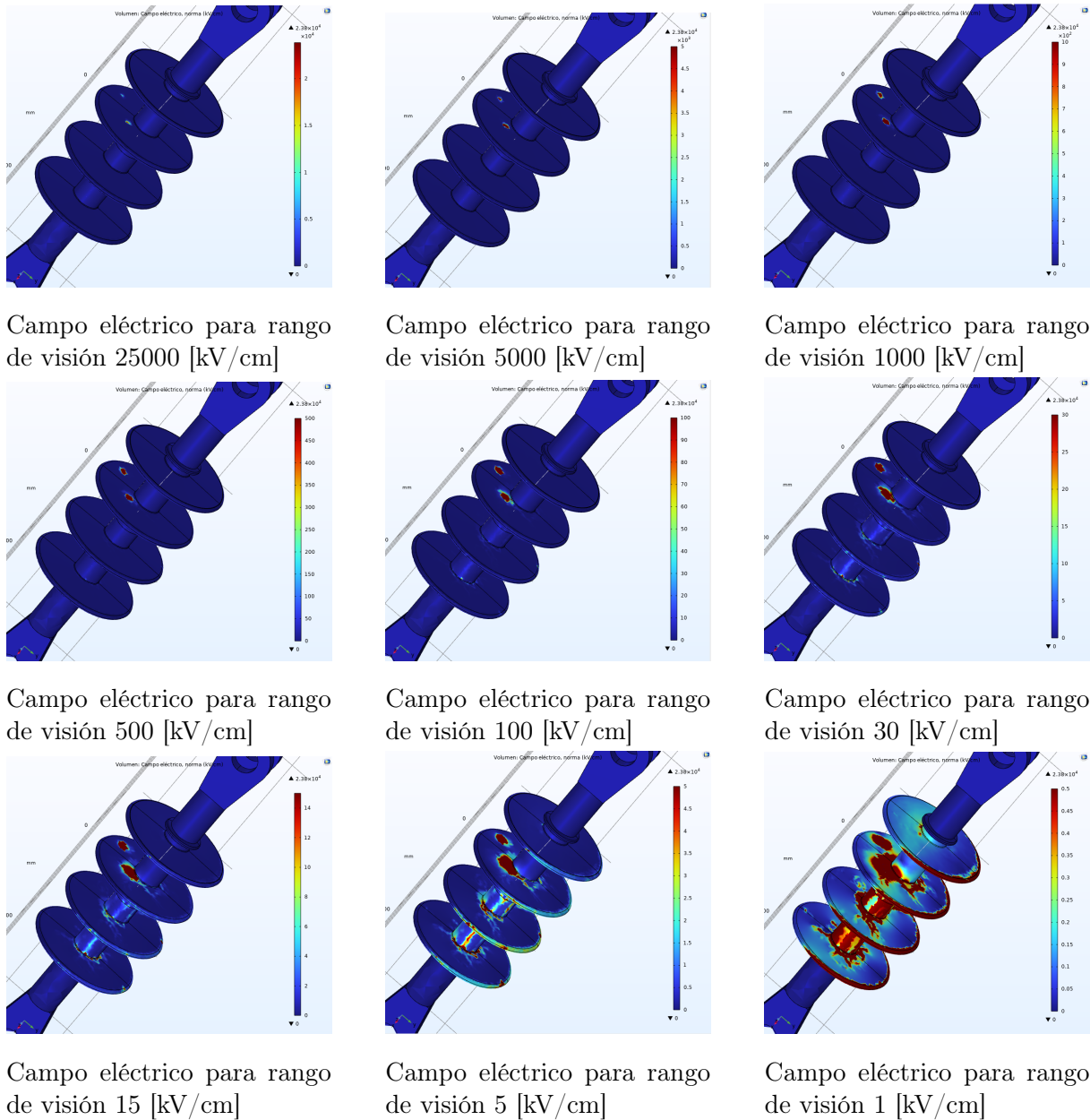


Figura 55: Distribución del campo eléctrico para diferentes rangos de visión para caso 2: contaminación no homogénea.

6.3.3. Tercer caso de conductividad

Este caso corresponde cuando la zonas de contaminación tienen las conductividades de la Tabla 14. Y la representación de las concentraciones de campo de la Figura 56.

Tabla 14: Conductividades por zona de contaminación tercer caso.

Conductividad zona contaminada [S/m]	Conductividad zona no contaminada [S/m]
1×10^{-7}	1×10^{-10}

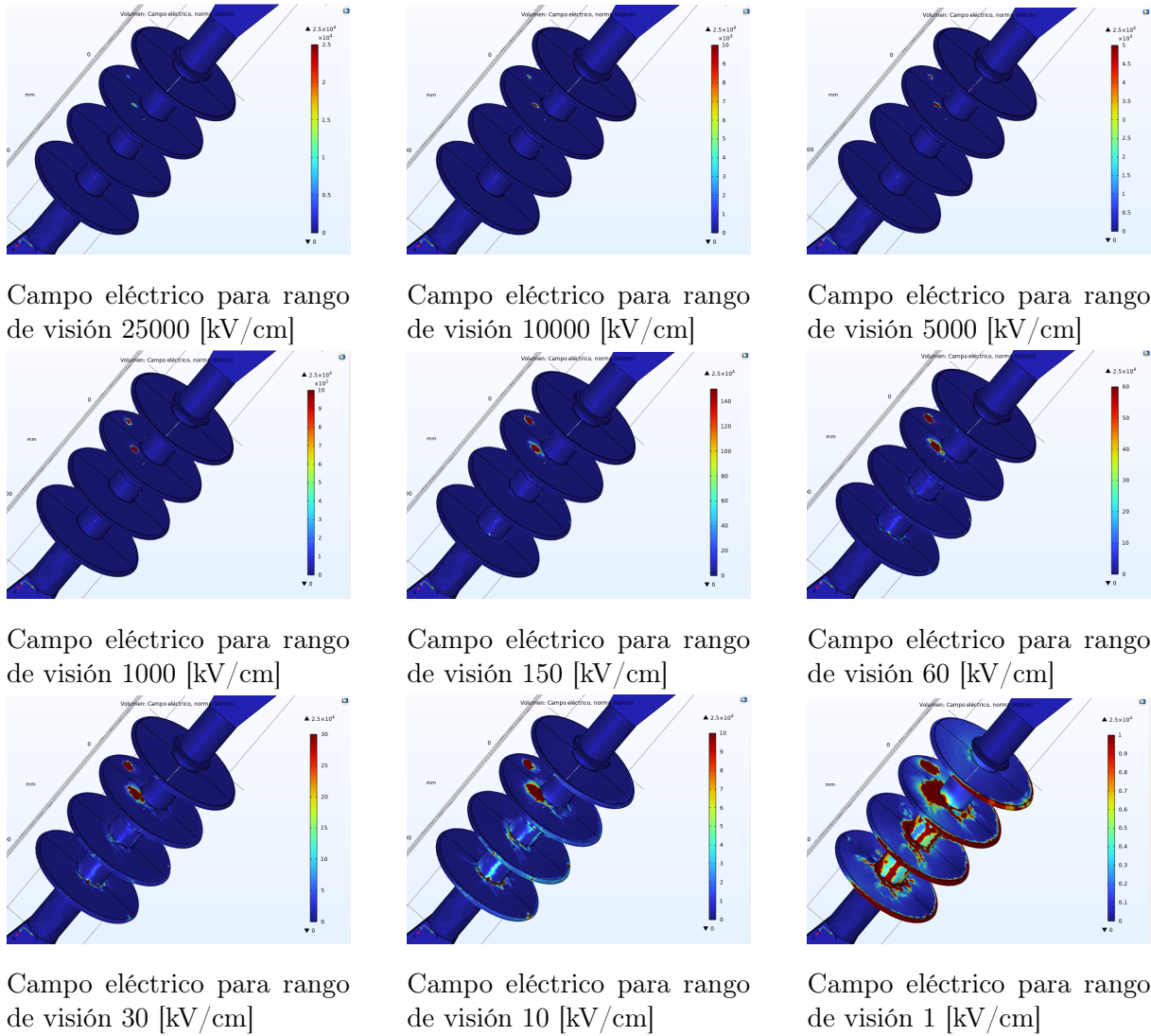


Figura 56: Distribución del campo eléctrico para diferentes rangos de visión para caso 2: contaminación no homogénea.

6.3.4. Mediciones de corriente de fuga y campo eléctrico

Las corrientes de fuga obtenidas con el caso no homogéneo de cambio abrupto se muestran en la Tabla 15. Mientras que el campo eléctrico si bien cambió levemente las concentraciones para rangos de visión de 1kV/cm, se mantuvo un campo eléctrico máximo de 25112 kV/cm.

Tabla 15: Corriente de fuga según conductividades para caso inhomogéneo cambio de conductividad abrupto.

Caso	Corriente de fuga [μA]	conductividad alta contaminación [S/m]	conductividad baja contaminación [S/m]
1	54.999	1×10^{-5}	1×10^{-8}
2	18.113	1×10^{-6}	1×10^{-9}
3	15.052	1×10^{-7}	1×10^{-10}

6.4. Modelo de contaminación no homogénea con cambio escalonado de conductividad

El cuarto modelo utilizado corresponde al que simula al aislador contaminado con una transición más continua entre zonas contaminadas y limpias. Este en conjunto con el cambio abrupto de conductividades, contienen la distribución de contaminante que representa el caso E7. Esta modelación tiene una transición escalonada en las fronteras de contaminación desde una conductividad de 1×10^{-5} [S/m] a una de 1×10^{-8} [S/m], siguiendo la siguiente estructura: 1×10^{-5} , 1×10^{-6} , 1×10^{-7} y 1×10^{-8} [S/m].

En este modelo se presentarán dos casos, cuya conductividad difiere en dos órdenes de magnitud, con el objetivo de realizar una comparación considerando una posible diferencia aún mayor que en el caso abrupto.

6.4.1. Primer caso de conductividad

Este caso corresponde cuando la zonas de contaminación tienen las conductividades de la Tabla 16. La Figura 57 a la 59 muestran la distribución de campo eléctrico.

Tabla 16: Conductividades por zona de contaminación segundo caso.

Conductividad zona contaminada [S/m]	Conductividad zona no contaminada [S/m]
1×10^{-5}	1×10^{-8}

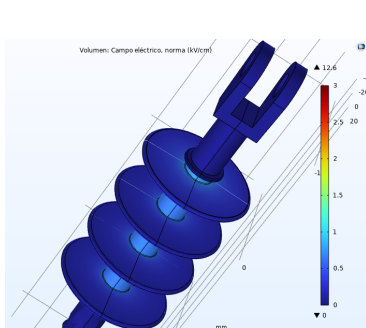


Figura 57: Campo eléctrico para rango de visión 3 [kV/cm]

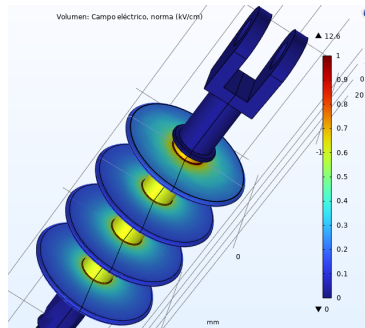


Figura 58: Campo eléctrico para rango de visión 1 [kV/cm]

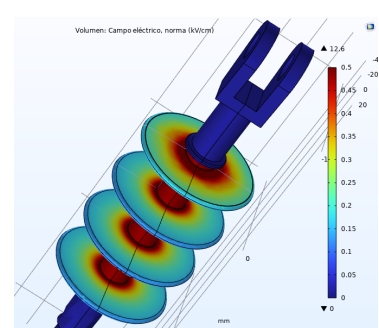


Figura 59: Campo eléctrico para rango de visión 0.5 [kV/cm]

6.4.2. Segundo caso de conductividad

Este caso corresponde cuando la zonas de contaminación tienen las conductividades de la Tabla 18. La Figura 60 a la 62 muestran la distribución de campo eléctrico.

Tabla 17: Conductividades por zona de contaminación segundo caso.

Conductividad zona contaminada [S/m]	Conductividad zona no contaminada [S/m]
1×10^{-7}	1×10^{-10}

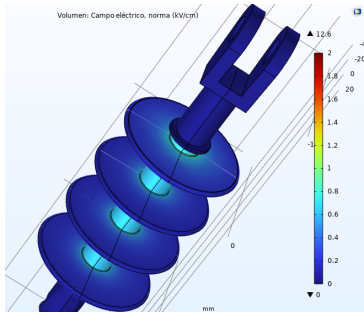


Figura 60: Campo eléctrico para rango de visión 3 [kV/cm]

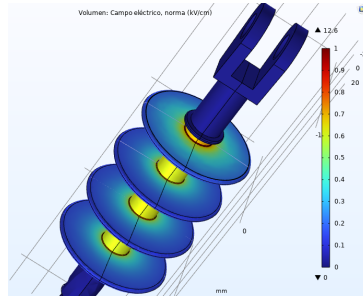


Figura 61: Campo eléctrico para rango de visión 1 [kV/cm]

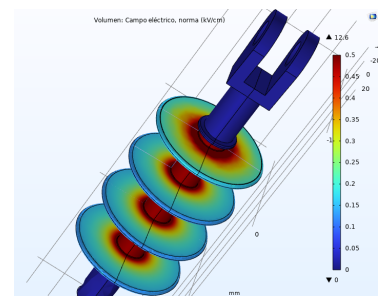


Figura 62: Campo eléctrico para rango de visión 0.5 [kV/cm]

6.4.3. Comparativa de resultados

La corriente de fuga

Tabla 18: Corrientes de fuga caso contaminación no homogénea cambio escalonado de conductividad.

Corriente de fuga [μA]	Conductividad zona contaminada [S/m]	Conductividad zona no contaminada [S/m]
0.221	1×10^{-7}	1×10^{-10}
21.7	1×10^{-5}	1×10^{-8}

A su vez en la Figura 63 se muestra la distribución de campo en distintas fronteras desde los herrajes.

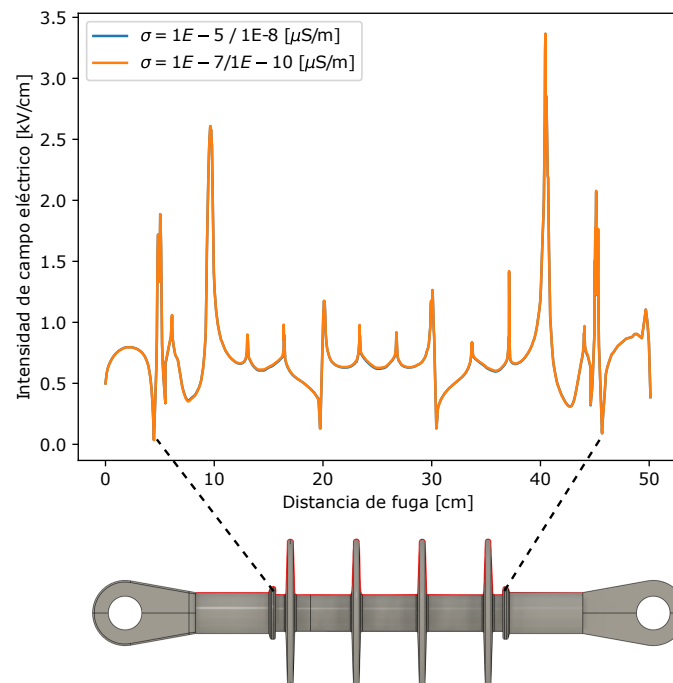


Figura 63: Distribución de potencial a distintos niveles de contaminación.

En la Figura 64 se presenta la distribución de potencial a lo largo de la superficie del contaminante. Una comparativa entre este caso y el cambio de conductividad de forma abrupta, no

puede ser comparado directamente, dado que como la distribución de campo eléctrico resulta inhomogéneo en el caso abrupto, cada camino de fuga tendrá una distribución distinta.

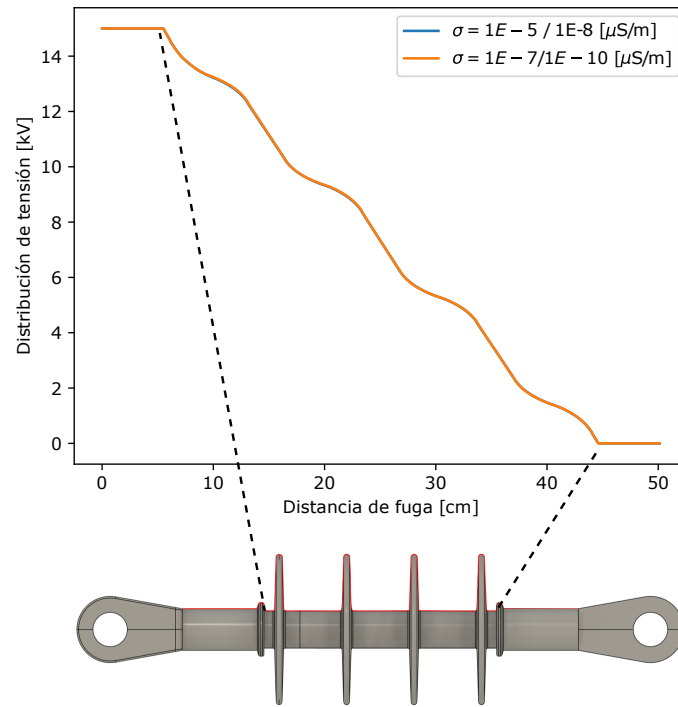


Figura 64: Distribución de potencial a distintos niveles de contaminación.

Para estos casos analizados, se observa que la conductividad deja de producir efectos sobre la intensidad. Esto ratifica la dificultad de una simulación fiable que pueda explicar la problemática.

7. Análisis de resultados

7.1. Comparativa de resultados de corriente de fuga con resultado experimental

En la Tabla 19 se presenta una comparación de las corrientes de fuga según los diferentes casos de modelación. Se observa que los resultados varían significativamente entre cada caso, a pesar de mantener las mismas conductividades. En el caso homogéneo, la corriente de fuga es tres órdenes de magnitud inferior; en el caso semi-homogéneo, la diferencia es de dos órdenes de magnitud; en el modelo no homogéneo con cambio abrupto de conductividad, la variación es de un orden de magnitud; y, finalmente, en el caso no homogéneo escalonado, la diferencia alcanza los tres órdenes de magnitud, siendo un caso muy similar al homogéneo. Esto evidencia que la metodología de modelación influye considerablemente en los resultados obtenidos, lo que podría llevar a interpretaciones no representativas del fenómeno estudiado.

Tabla 19: Comparativa de corrientes de fuga según diversos casos de contaminación.

Contaminación	Conductividad [$\mu S/m$]	Corriente de fuga [μA]
Experimental E7 (95.821 % HR)	0.1	113.533
Homogénea	0.1	0.207
Semi-Homogénea	0.1	4.340
No Homogénea Abrupto	0.1	15.052
No Homogénea Escalonado	0.1	0.221

Los casos experimentales E0, E4 y E6, no se incluyen en la tabla debido a que las máximas conductividades que se llegan a tener son inferiores a las mostradas en la Tabla 19.

7.2. Relación entre corriente de fuga y tensión de ruptura experimental

A partir de las mediciones experimentales realizadas en laboratorio, se obtuvo la Figura 65, que muestra la relación entre la corriente de fuga y la tensión de ruptura. Se observa que tanto el aislador limpio (E0) como el contaminado con sales (E7) presentan un comportamiento similar. En ambos casos, un pequeño aumento en la humedad —y, por ende, en la corriente de fuga— puede reducir significativamente la tensión de ruptura, lo que incrementa la probabilidad de que se produzcan descargas parciales. De esta forma, se sugiere que no es necesario conocer la humedad del ambiente, sino que podría bastar con la medición de corriente de fuga. En cambio, los casos E4 y E6, que tienen una mayor concentración de NSDD debido al caolín, exhiben un comportamiento diferente, aunque con ciertas similitudes entre sí, excepto en la fase inicial de E6, donde se presenta una variación distintiva. Esto sugiere que la presencia de caolín impide una reducción significativa de la tensión de ruptura hasta que la corriente de fuga alcanza valores elevados. Esto sugiere que los contaminantes con alto contenido en caolín resisten de forma significativa los aumentos de humedad en el ambiente, mostrando así que solo en niveles muy elevados de humedad relativa, la tensión de ruptura cae significativamente.

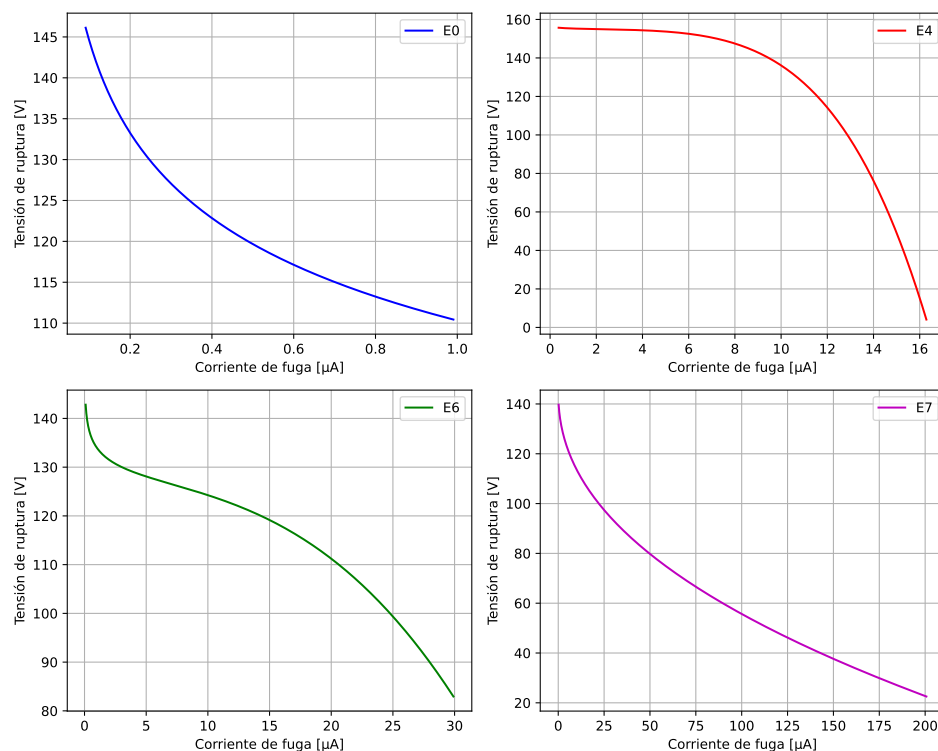


Figura 65: Tensión de ruptura en función de la corriente de fuga.

De esto se concluye que, en regiones cercanas al mar o a salares, incluso pequeños aumentos en la corriente de fuga pueden propiciar la generación de descargas parciales, por lo que en estos casos es recomendable realizar una medición continua de la corriente de fuga. En contraste, en zonas con baja influencia salina, un incremento leve en la corriente de fuga debido al aumento de la humedad no tiene un impacto significativo en el comportamiento general del aislador siempre y cuando no sea mayor a un orden de magnitud.

8. Conclusiones

8.1. Conclusiones sobre la modelación del aislador en COMSOL

La simulación computacional no es una metodología completamente viable para el estudio de la contaminación en aisladores, debido a la necesidad de conocer con precisión todos los parámetros y variables involucradas en el sistema. Aunque es posible simplificar el modelo eliminando ciertos factores, esta reducción de complejidad puede llevar a representaciones idealizadas que limitan la capacidad del modelo para proporcionar información más allá de lo ya conocido. Un ejemplo de esta limitación se observa en los estudios de contaminación abrupta y escalonada. Aunque la distribución de la contaminación es la misma, al hacer las fronteras menos continuas, la simulación dejó de generar resultados realistas, mostrando concentraciones de campo excesivamente altas. Esto indica que, para que una simulación sea representativa de la realidad, es necesario conocer con precisión la geometría de las fronteras del contaminante con el aislador y aire, lo cual hace que la simulación sea mucho más compleja e incluso, inviable. Además, los tiempos de cálculo resultaron ser otro obstáculo: para cada caso, utilizando un procesador Intel Core i7 13700H y 32 GB de RAM, las simulaciones más simples tomaban cerca de una hora, y en muchos casos no convergían.

Un aspecto relevante que también se observa, tanto en las condiciones homogéneas, semi-homogéneas como en las inhomogéneas escalonadas, es que no existe una relación clara entre la contaminación y el campo eléctrico. En consecuencia, no se genera información útil para predecir la ruptura o el mantenimiento según las corrientes de fuga. Esto se debe a que el campo eléctrico no depende del nivel de contaminación, lo que implica que COMSOL no logra representar correctamente el efecto de la contaminación sobre el campo eléctrico y, por ende, sobre la posibilidad de ruptura. Una justificación para lo nombrado es lo mostrado en la sección 7.2, pues con datos experimentales, se muestra una clara correlación entre la tensión de ruptura y la corriente de fuga.

8.2. Conclusiones sobre la humidificación de los contaminantes

8.2.1. Modelo de humidificación

El principal inconveniente detectado en la medición de la corriente de fuga es que, al basarla únicamente en la humedad relativa del ambiente se simplifica en exceso el modelo y se omiten numerosos aspectos físicos relevantes que ocurren de forma simultánea. Por ello, las curvas que relacionan la corriente de fuga con la humedad relativa del ambiente no muestra un comportamiento real del sistema. En particular, una vez que la humedad relativa ambiental alcanza valores cercanos al 100 %, la corriente de fuga sigue aumentando en la práctica, pero el modelo simplificado no logra explicar esta variabilidad. Esto se debe a que la humedad relativa del aire no representa directamente la cantidad de agua absorbida por el contaminante, ya que este proceso depende de factores como la porosidad, la composición química del contaminante y la temperatura de la superficie del aislador.

Para comprender este fenómeno, es necesario considerar otras variables que varían simultáneamente, lo que impide la representación del efecto mediante un único gráfico, dado que no es posible mantener constantes las demás variables. En particular, el incremento en la conductividad de los contaminantes no se debe exclusivamente a la humedad ambiental, sino a la formación

de una **película conductora de humedad** entre la superficie del contaminante y el aire. Adicionalmente, se observa un doble efecto relacionado con la humedad: la difusión de agua dentro del contaminante y la condensación superficial. La difusión de humedad provoca que el contaminante absorba agua internamente, lo que genera un aumento progresivo de la conductividad. Paralelamente, cuando la humedad relativa externa alcanza un valor crítico, comienza a formarse una película de agua líquida en la superficie del contaminante debido a la condensación. Ambos fenómenos ocurren de manera simultánea, pero con desfases temporales, ya que la difusión interna depende del coeficiente de difusión, el cual varía según la composición del contaminante, la temperatura y la presión. Este coeficiente, medido en m^2/s , determina la velocidad a la que el agua se infiltra en la estructura del contaminante. Dichas conclusiones se deducen de [24] y [25]. A medida que la conductividad superficial del contaminante aumenta por la combinación de absorción interna de humedad y condensación superficial, la **tensión de ruptura del aislador se reduce significativamente**. Esto favorece la aparición de descargas parciales, que liberan energía en forma de calor y pueden generar evaporación localizada de la humedad en la superficie del contaminante. Adicionalmente, el aumento de la corriente de fuga incrementa las pérdidas por **efecto Joule**, lo que calienta el aislador y, por diferencia de temperatura con el ambiente, puede provocar evaporación progresiva de la humedad acumulada generando arcos de banda seca. Aunque la evaporación del agua puede, temporalmente, aumentar la rigidez dieléctrica en ciertas zonas, el estrés térmico y químico inducido por las descargas parciales **erosiona la superficie del aislador**. Con el tiempo, este daño acumulativo degrada la capacidad de aislamiento del material, haciéndolo más vulnerable a futuros eventos de descarga y aumentando la probabilidad de falla en el sistema.

8.2.2. Hipótesis sobre la medición de conductividades muy bajas

Los resultados experimentales obtenidos muestran valores de conductividad considerablemente bajos en comparación con los reportados en la literatura. La hipótesis que podría explicar este fenómeno está relacionada con los tiempos de asentamiento de la humedad en el interior de los contaminantes. Este comportamiento se esperaría observar cuando las conductividades se estabilicen en sus valores máximos. Una representación de esta hipótesis se ilustra en la Figura 66:

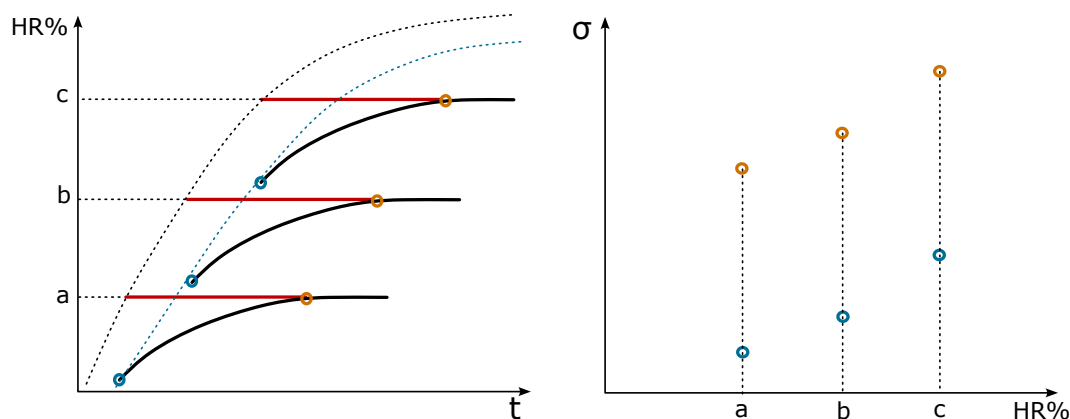


Figura 66: Hipótesis de comportamiento de conductividad en función de humedad relativa.

La curva punteada negra representa el aumento de la humedad relativa con un caudal constante de humedad, mientras que la línea punteada celeste ilustra cómo varía la humedad interna del contaminante en función de la humedad exterior del ambiente. Los círculos celestes indican las conductividades que se medirían si se analiza con un caudal constante de humedad, y la línea roja muestra el comportamiento de la humedad externa cuando mantiene constante en un valor determinado. El círculo naranja corresponde a la conductividad máxima que se podría alcanzar a la humedad relativa indicada por la línea roja.

Se puede observar que la línea negra refleja cómo evolucionaría la humedad interna del contaminante, desde el círculo celeste hasta el círculo naranja, si se mantiene fija una humedad externa. Además, se observa que las conductividades máximas, las cuales son las que se alcanzarían en este escenario, corresponden a los círculos naranjas, mientras que los círculos celestes representan las conductividades que se medirían en un experimento con caudal constante, sin permitir que la humedad interna del contaminante se establezca en un valor fijo.

8.3. Efecto de la permitividad en la simulación

En la simulación se observó que la variación de la permitividad no afecta significativamente los resultados, ya que el estudio se realizó bajo condiciones de corriente continua. Por lo tanto, en estudios donde no se dispone de un valor preciso de permitividad para algún elemento de la modelación, no es necesario contar con una alta exactitud; una estimación es suficiente.

8.4. Resultados en el contexto chileno

Los resultados de las simulaciones no permitieron ofrecer recomendaciones específicas para el contexto chileno, ya que la confiabilidad de los datos dependía en gran medida del método de simulación utilizado. Sin embargo, a partir de datos experimentales, se concluyó que en zonas cercanas al mar, como la región de Antofagasta (entorno E7), un aumento en la corriente de fuga debido al aumento de humedad del ambiente podría indicar una reducción significativa en la tensión de ruptura, lo que a su vez sugiere la posible ocurrencia de descargas parciales.

9. Recomendaciones de trabajo futuro

- Se recomienda el uso de COMSOL para el análisis de campo cuando la geometría completa del modelo a estudiar es conocida, ya que esto elimina incertidumbres que podrían afectar significativamente los resultados, como se evidenció en las secciones anteriores. En el caso del análisis de aisladores, su aplicación podría ser útil, por ejemplo, para estudiar la formación de distintos tipos de gotas en la superficie del aislador y su influencia en el campo eléctrico, dado que estos parámetros son previamente conocidos. Modelos estocásticos o problemas aleatorios pueden ser muy complicados de representar y de tener resultados confiables.
- Para reducir los tiempos de simulación, es posible optimizar los modelos evitando el uso simultáneo de múltiples módulos. Una estrategia adicional consiste en precargar resultados, como los valores de conductividad. Por ejemplo, dado que la temperatura y la humedad

influyen directamente en la conductividad, si el objetivo no es analizar el comportamiento transitorio, sino principalmente las dependencias, es posible considerar valores dentro de los rangos obtenidos para dichas variables, lo que permitiría simplificar el análisis sin comprometer la precisión de los resultados.

- Para el análisis de aisladores, se recomienda realizar ensayos y estudios experimentales con un control preciso de la humedad. Esto es fundamental, ya que, según lo visto en los ensayos experimentales, las constantes de tiempo asociadas a la humedad son muy lentas, pudiendo tardar desde minutos hasta horas en estabilizarse. Si se emplea un humidificador como el utilizado en los ensayos y luego se apaga asumiendo que la humedad medida en ese instante es la definitiva, se incurrirá en un error significativo. De acuerdo con lo observado, la humedad podría aumentar en más de un 10 % tras el periodo de estabilización, lo que afectaría la precisión del análisis.
- Cuando se requiere analizar simultáneamente las tensiones de ruptura y la humedad, se presenta un problema relacionado con la propagación de una onda electromagnética en el aire durante la ruptura. En el caso estudiado, el sensor de humedad operaba mediante una sonda, lo que permitió que la onda electromagnética se propagara a través de ella, actuando como una antena y dañando el higrómetro. Las tensiones medidas directamente en el higrómetro, sin ningún tipo de protección, alcanzaban valores cercanos a 600 V durante las rupturas. Sin embargo, al emplear una jaula de Faraday de cobre, se logró reducir estos valores a un promedio de 50 V.
- La conductividad está directamente relacionada con la humedad. Como esta tarda en difundirse en los contaminantes, se recomienda intentar realizar mediciones a una humedad estable durante un tiempo determinado. Esto se fundamenta en la hipótesis de que un contaminante puede saturarse por completo a diferentes niveles de humedad, lo que permitiría alcanzar las conductividades máximas posibles para cada valor de humedad relativa externa. Así, se obtendría una curva que refleje las mayores conductividades y, en consecuencia, las mayores corrientes de fuga posibles.

Anexo A: Equipos e indumentaria utilizada

A.1. Cámara de humedad

El diseño de la cámara de humedad mostrado en las Figuras 68 y 69, corresponde a uno propio.



Figura 67: Fotografía de cámara de humedad.

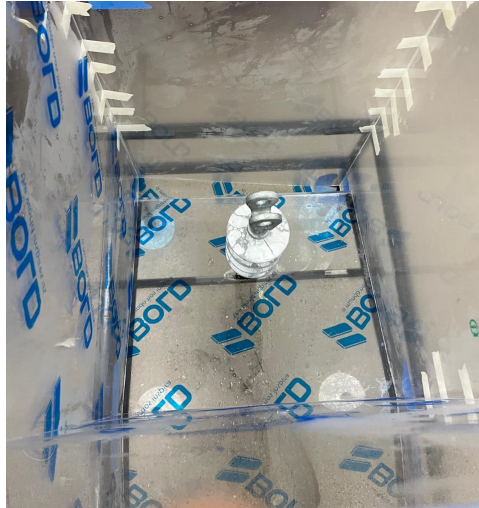


Figura 68: Fotografía de colocación de aislador dentro de cámara de humedad.

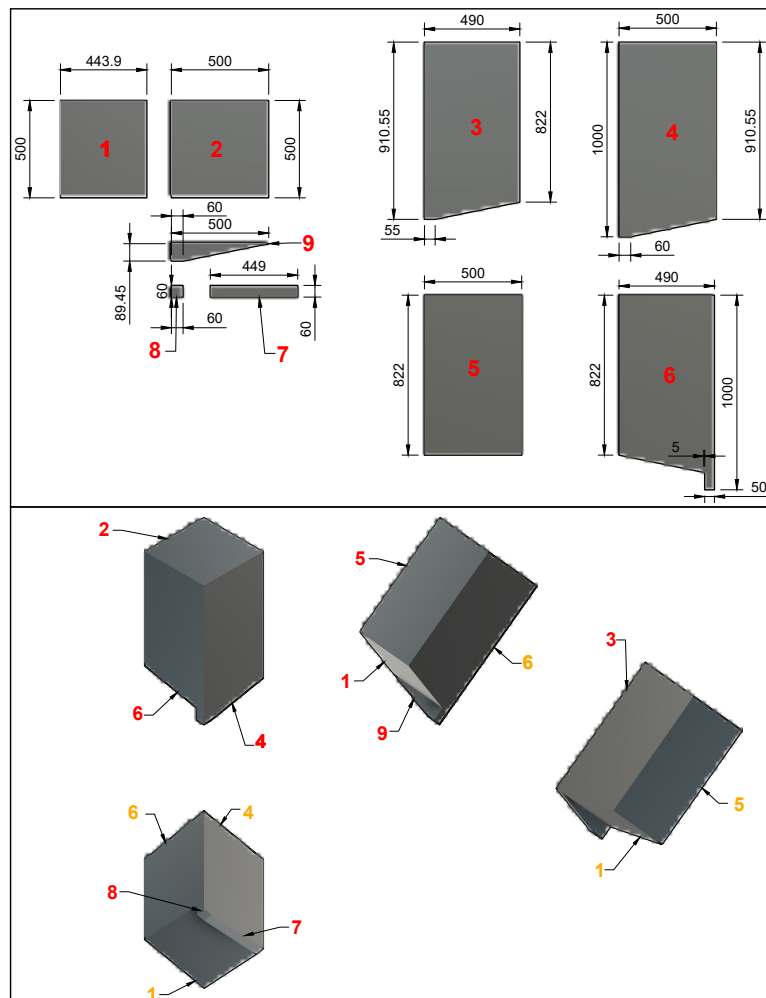


Figura 69: Dimensiones de cámara de humedad.

A.2. Equipo de humidificación

El humidificador utilizado es el mostrado en la Figura 70, corresponde a uno ultrasónico de la marca comercial Xiaomi modelo -Humidifier 2 Lite-. Este fue adaptado para conexión directa de manguera a cámara de humedad.



Figura 70: Humidificador utilizado marca Xiaomi.

A.3. Equipo de medición de humedad y temperatura

El equipo de la Figura 71, corresponde a un Datalogger Temperatura y Humedad con Sonda Certificado marca Elitech modelo Tlog 10EH.



Figura 71: Higrómetro con sonda de temperatura y humedad.

Referencias

- [1] Generadoras de Chile, “Generación eléctrica en Chile.” generadoras.cl.
- [2] A. Alassi, S. Bañales, O. Ellabban, G. Adam, and C. MacIver, “HVDC transmission: Technology review, market trends and future outlook,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019.
- [3] El Mercurio de Calama, “Línea eléctrica Kimal-Lo Aguirre iniciaría su construcción en 2025 - Conexión Energía.” [conexionenergia.com](https://www.conexionenergia.com/2023/06/27/linea-electrica-kimal-lo-aguirre-iniciariasu-construccion-en-2025-2/). <https://www.conexionenergia.com/2023/06/27/linea-electrica-kimal-lo-aguirre-iniciariasu-construccion-en-2025-2/>.
- [4] INMR, “Composite Insulators HVDC Systems -.” [inmr.com](https://www.inmr.com/composite-insulators-hvdc-systems/). <https://www.inmr.com/composite-insulators-hvdc-systems/>.
- [5] Tech Talk, “Transmission Insulators: Composite insulators witness growing adoption | Global Transmission Report.” [globaltransmission.info](https://globaltransmission.info/transmission-insulators-composite-insulators-witnessgrowing-adoption/). <https://globaltransmission.info/transmission-insulators-composite-insulators-witnessgrowing-adoption/> (accessed Jun. 20, 2024).
- [6] M. Roman, R. R. van Zyl, N. Parus, and N. Mahatho, “Insulator leakage current monitoring: Challenges for high voltage direct current transmission lines” Cape Peninsula University of Technology and Eskom Holdings SOC Ltd, Johannesburg, South Africa.
- [7] R. Taherian, The Theory of Electrical Conductivity, Faculty of Chemical Materials Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran.
- [8] SILPAK S.A., “Ficha Técnica de Aisladores Poliméricos de Silicona Suspensión - Retención,” SILPAK S.A., Quilicura, Chile, 2022. [Online]. Disponible: www.silpak.cl
- [9] ASTM International, ASTM B193-20: Standard Test Method for Resistivity of Electrical Conductor Materials, West Conshohocken, PA, USA, 2020.
- [10] Shin-Etsu Chemical Co., Ltd., “Characteristic properties of Silicone Rubber Compounds,” Shin-Etsu Silicone Division, Tokyo, Japan, Tech. Rep., Mar. 2020. [En línea]. Available: <https://www.shinetsusilicone-global.com/>
- [11] International Electrotechnical Commission, “Selection and Dimensioning of High-voltage Insulators Intended for Use in Polluted Conditions - Part 1: Definitions, Information and General Principles,” IEC/TS 60815-1:2008, Edition 1.0, October 2008.
- [12] International Electrotechnical Commission, IEC TS 61245:2015 - Artificial pollution tests on high-voltage ceramic and glass insulators to be used on d.c. systems. 2nd ed. IEC, Mar. 2015.
- [13] W. H. Hayt Jr. and J. A. Buck, *Engineering Electromagnetics*, 8th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2012, pp. 1-580.

- [14] ASTM A525: Standard Specification for General Requirements for Steel Sheet, Zinc-Coated (Galvanized) by the Hot-Dip Process. ASTM International, 1986.
- [15] E. David and T. Andritsch, Dielectric Properties of Epoxy/POSS and PE/POSS Systems, Springer Series on Polymer and Composite Materials. Springer Nature Switzerland AG, 2018, pp. 233-254.
- [16] M. I. Illanes Jorquera, "Análisis del desempeño de aisladores en condiciones de contaminación bajo excitación continua mediante medición de descargas parciales," Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile, Trabajo de titulación, 23 de septiembre de 2024.
- [17] L. Yin, W. Yang, K. Wang, B. Y. Yan, Y. Chen, X. Chen, y C. Zhang, "Temperature coefficient of conductivity dependent electric field distribution in GFRP based SFCL bushing," IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 31, no. 8, art. 0604403, Nov. 2021. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/TASC.2021.3118272>
- [18] DFM Consultores, "Estudio de Impacto Ambiental: Línea de Transmisión Eléctrica HVDC Kimal - Lo Aguirre," Octubre, 2023.
- [19] BS EN 60507:2014 - Artificial pollution tests on high-voltage ceramic and glass insulators to be used on a.c. systems, British Standards Institution, 2014. doi: 10.3403/30247062.
- [20] A. A. Salem, K. Y. Lau, Z. Abdul-Malek, W. Zhou, S. Al-Ameri, S. A. Al-Gailani, y R. A. Rahman, "Investigation of High Voltage Polymeric Insulators Performance under Wet Pollution," Polymers, vol. 14, no. 6, p. 1236, Mar. 2022, doi: 10.3390/polym14061236.
- [21] ZTelec Group, "FR4 Material Guide," ZTelec Group, Tech. Rep., 18-mar-2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.ztelecgroup.com/zt-industry-news/283.html>.
- [22] CADX Services, "FR4-04 Material Guide," CADX Services. [En línea]. Disponible en: https://cadxservices.com/archive_cadx-services/guides/fr404.htm.
- [23] O. Quirós, J. Ramírez, M. Martínez y J. Rodríguez, "Evaluación del recubrimiento polimérico para aisladores convencionales,"^{en} II Congreso Venezolano de Redes y Energía Eléctrica, Margarita, Venezuela, junio 2009.
- [24] R.B. Bird, W.E. Stewart, and E.N. Lightfoot, Transport Phenomena, 2nd ed. New York: Wiley, 2002.
- [25] E.L. Cussler, Diffusion: Mass Transfer in Fluid Systems, 3rd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2009.