

# **EFEECTO DE DIVERSOS AGENTES CONTAMINANTES SOBRE EL DESEMPEÑO DE AISLADORES ELÉCTRICOS**

*EFFECT OF DIFFERENT POLLUTANTS ON  
PERFORMANCE OF ELECTRICAL INSULATORS*

***Sandra Marcela Amézquita Corrales***

Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia  
*smamezquitac@udistrital.edu.co*

***Herbert Enrique Rojas Cubides***

Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia  
*herojasc@udistrital.edu.co*

**Recepción:** 5/octubre/2023

**Aceptación:** 24/abril/2024

## **Resumen**

Los aisladores son elementos de protección en los sistemas eléctricos de potencia, garantizan su seguridad y confiabilidad. Es común verlos en trazados de línea, sometidos a diferentes climas y condiciones ambientales. Debido a esto, y diversos fenómenos naturales, se encuentran expuestos a decenas de agentes contaminantes, los cuales también se asocian con la zona de instalación (desiertos, zonas industriales, etc.). Dichos agentes afectan su rendimiento, variando la distribución del campo eléctrico y aumentando el riesgo de falla. Este artículo expone una metodología para estudiar la variación del campo eléctrico sobre la distancia de fuga de aisladores de media tensión sometidos a diversos agentes contaminantes. Esto se consigue a partir de simulaciones 2D usando COMSOL Multiphysics®, y analizando el efecto de varios parámetros de la capa contaminante (permitividad relativa, conductividad eléctrica y espesor). Los resultados muestran un aumento considerable del campo eléctrico, especialmente con la variación de la conductividad.

**Palabras Clave:** Agente contaminante, Aislador eléctrico, Campo eléctrico, COMSOL Multiphysics®, Simulación.

## **Abstract**

*Insulators are protection elements in electrical power systems, ensure their safety and reliability. It is common to see them in line layouts, subjected to different climates and environmental conditions. Due to this, and various natural phenomena, they are exposed to dozens of pollutants, which are also associated with the installation area (deserts, industrial areas, etc.). These agents affect their performance, varying the electric field distribution and increasing the risk of failure. This paper presents a methodology to study the variation of the electric field on the creepage distance of medium voltage insulators subjected to various pollutants. This is achieved from 2D simulations using COMSOL Multiphysics®, and analyzing the effect of various parameters of the contaminant layer (relative permittivity, electrical conductivity and thickness). The results show a considerable increase in the electric field, especially with varying conductivity.*

**Keywords:** COMSOL Multiphysics®, Electric insulator, Electric field, Pollutant, Simulation.

## **1. Introducción**

Los aisladores eléctricos son elementos que desempeñan un papel fundamental en los sistemas eléctricos de potencia ya que permiten una transmisión y distribución de energía segura y eficiente a los puntos de consumo [Mohyuddin, 2016]. Sin embargo, a menudo estos elementos de protección se enfrentan a desafíos ambientales y operativos que pueden comprometer su integridad y desempeño [Mohyuddin, 2016].

En la fabricación de aisladores se emplean diversos materiales tales como: porcelana, vidrio y poliméricos [Refaie, 2016], [Yang, 2021]. Estos últimos han demostrado un mejor rendimiento en comparación con los otros materiales debido a su hidrofobicidad, estabilidad, menor costo y facilidad de manejo y mantenimiento [Refaie, 2016], [Yang, 2021]. Estas ventajas los convierten en una opción cada vez más popular en aplicaciones de redes eléctricas en baja, media y alta tensión [Refaie, 2016].

Aunque los aisladores eléctricos enfrentan una serie de riesgos relacionados con su operación típica (variaciones en el nivel de tensión, la aparición de sobretensiones, el deterioro por esfuerzos mecánicos), existen otros aspectos que pueden comprometer su funcionamiento óptimo [Astudillo, 2022]. Es así, como el aumento de la corriente de fuga, la presencia de descargas eléctricas atmosféricas, el envejecimiento y la contaminación ambiental son otros tantos de los desafíos que deben enfrentar [Mohyuddin, 2016], [Refaie, 2016]. Adicionalmente, agentes contaminantes como gases de escape, fertilizantes, cenizas volcánicas, excrementos de aves, agua salina, polución atmosférica, polvo, microorganismos, arena y sal pueden afectar negativamente las propiedades de los aisladores y acelerar su deterioro [Naito, 1990], [Rosli, 2021].

Comprender el impacto de los agentes contaminantes en el rendimiento de los aisladores eléctricos es de gran relevancia en el proceso de transmisión y distribución de energía eléctrica [Rosli, 2021]. Por esta razón, este fenómeno ha despertado un gran interés, impulsando su investigación experimental [León, 2015], [Morcelle, 2019], [Naito, 1990]. No obstante, este tipo de pruebas requiere de equipos y personal especializado, espacio físico y laboratorios, muestras de aisladores y agentes contaminantes (biológicos y no biológicos), además de una gran inversión de tiempo y dinero, lo que hace de su ejecución un proceso complejo y, a veces, poco viable. Afortunadamente, en la actualidad se cuenta con diversas herramientas que superan estas desventajas y permiten estudiar el desempeño de aisladores y su relación con diversos agentes contaminantes [Klüss, 2015]. Algunas de estas opciones son la estimación teórica, haciendo uso de modelos matemáticos o circuitales, y las simulaciones que, mediante software especializados, emplean modelos físicos para obtener resultados cercanos a los que se tendrían en un laboratorio [Salhi, 2022]. Estas simulaciones no sólo reducen los tiempos de prueba, sino que también mejoran la precisión de los resultados y permiten modificar varios parámetros a la vez [Krzma, 2018], [Zhang, 2022]. Asimismo, ofrecen la ventaja de medir variables como el campo eléctrico, las corrientes de fuga, el comportamiento del potencial eléctrico y muchas otras que resultan difíciles de medir de manera directa [Refaie, 2016], [Yang, 2021].

De esta manera, estimar los efectos que ocasionan diversos agentes contaminantes sobre aisladores eléctricos puede ser posible a través del monitoreo del campo eléctrico, la medición de su intensidad y el análisis de su distribución a lo largo de la superficie del aislador [Krzma, 2018], [Refaie, 2016]. Por lo anterior, y con el ánimo de aportar en la búsqueda de alternativas confiables para evaluar la respuesta de materiales aislantes ante la presencia de agentes externos, este artículo presenta un estudio enfocado en estimar cambios en el rendimiento de aisladores de media tensión a causa de la presencia de diferentes agentes contaminantes en su superficie. El resto del artículo continúa de la siguiente forma: en la sección 2 se detalla la metodología utilizada para llevar a cabo las simulaciones y las pruebas en aisladores. Posteriormente, en las secciones 3 y 4, se presentan los resultados obtenidos para cada tipo de contaminante y la discusión correspondiente, analizando cambios en la distribución del campo eléctrico sobre la distancia de fuga del aislador. Finalmente, en la sección 5, se presentan las conclusiones derivadas de la investigación.

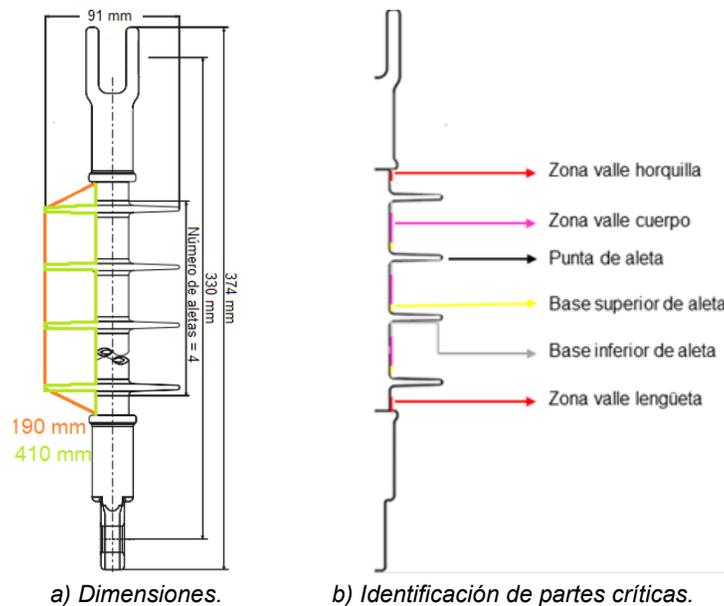
## **2. Métodos**

A lo largo de esta investigación se utilizó el software COMSOL Multiphysics®, el cual es una herramienta de simulación que permite modelar una amplia gama de objetos y fenómenos en entornos 2D y 3D [Cadena, 2019]. En cualquier caso, los objetos pueden ser modelados y luego asignarles propiedades específicas de materiales que lo componen, lo que permite realizar análisis de su respuesta física y eléctrica [Cadena, 2019], [Krzma, 2018]. Adicionalmente, COMSOL Multiphysics® cuenta con un extenso conjunto de fenómenos físicos que pueden ser simulados, abarcando fenómenos mecánicos, eléctricos, magnéticos o una combinación de ellos [Cadena, 2019].

De esta forma, el software seleccionado es una herramienta versátil y poderosa para este estudio y permite el análisis en el contexto de diversas áreas científicas e ingeniería. A partir de la elección de la herramienta de simulación, en este trabajo se ha propuesto una metodología compuesta por tres etapas: (a) modelo del aislador, (b) capa de agente contaminante y (c) configuración de simulación.

## Modelo del aislador

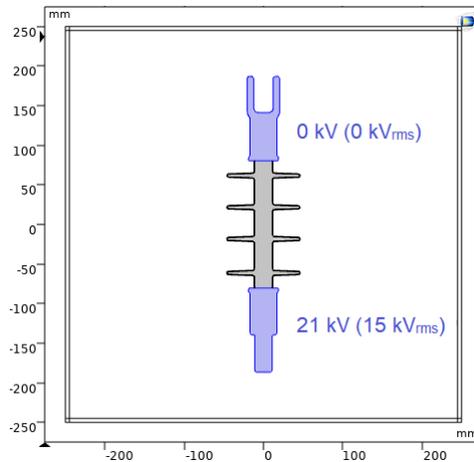
Para las pruebas presentadas en este artículo se seleccionó un aislador comúnmente usado en sistemas eléctricos de Asia, Europa y América. De esta forma, se escogió como objeto bajo prueba (OUT) el aislador ANSI DS-15, cuyas formas, dimensiones y partes críticas se muestran en la figura 1. Dicha información se tomó del catálogo del proveedor [GAMMA, 2018] y se basa en la norma ANSI C29.13-2018 [American National Standards Institute, 2018]. Luego de verificar las geometrías y sus partes constitutivas, el aislador se modelizó en AutoCAD®.



Fuente: elaboración propia.

Figura 1 Aislador compuesto ANSI DS-15.

Luego de esto, con base en la metodología descrita por [Klüss, 2015] se exportó el archivo AutoCAD® a COMSOL Multiphysics® y se asignaron valores a las propiedades eléctricas de los materiales correspondientes. Adicionalmente, se pueden configurar valores para el potencial eléctrico que deben asumir algunas partes del OUT. De esta forma (Figura 2), las partes azules representan los herrajes de acero forjado, mientras que la parte gris corresponde al caucho de silicona [American National Standards Institute, 2018]. Las propiedades de estos materiales se sintetizaron en la tabla 1 y se obtuvieron después de revisar varias fuentes, con especial atención en [Refaie, 2016].



Fuente: elaboración propia.

Figura 2 Apariencia del aislador ANSI DS-15 en COMSOL Multiphysics®.

Tabla 1 Propiedades eléctricas de materiales.

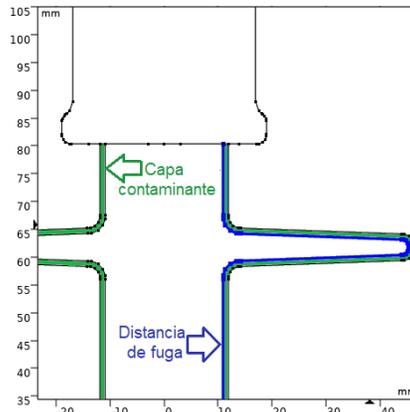
| Material           | Permitividad relativa ( $\epsilon_r$ ) | Conductividad [S/m] |
|--------------------|--|---------------------|
| Aire               | 1                                      | $1 \times 10^{-13}$ |
| Acero forjado      | 1                                      | $5.9 \times 10^7$   |
| Caucho de silicona | 4.3                                    | $1 \times 10^{-12}$ |

Fuente: elaboración propia.

### Capa de agente contaminante

Como se mencionó en la introducción, existen múltiples agentes que pueden contaminar un aislador y afectar su desempeño. Entre los más comunes se tienen contaminación atmosférica, polvo, arena, sal, cenizas volcánicas, excrementos de aves, agua salina, microorganismos (algas, hongos, líquenes), gases de escape y fertilizantes, entre otros. Debido a la variada naturaleza del agente, al estado (líquido, sólido, gas) y a sus parámetros asociados, en este trabajo se incluyó una capa contaminante genérica de 1 mm de espesor sobre toda la superficie de caucho de silicona del aislador, tal como se describe en [Refaie, 2016].

En la figura 3 se muestra en color verde la disposición de la capa contaminante incluida durante las simulaciones. Adicionalmente, esta se configuró como un material de permitividad relativa y conductividad eléctrica variables, los cuales fueron modificados de acuerdo a los valores de los agentes contaminantes seleccionados y presentados en la tabla 2. Todo este proceso se realiza con el fin de evaluar el desempeño de cada contaminante de forma independiente.



Fuente: elaboración propia.

Figura 3 Capa contaminante (verde) y distancia de fuga del aislador (azul).

Tabla 2 Propiedades eléctricas de agentes contaminantes.

| Contaminante                 | Permitividad relativa ( $\epsilon_r$ ) | Conductividad [S/m] | Referencia      |
|------------------------------|--|---------------------|-----------------|
| Mezcla de contaminación      | 81                                     | $6 \times 10^{-4}$  | [Krzma, 2018]   |
| Agua                         | 80                                     | $55 \times 10^{-7}$ | [Refaie, 2016]  |
| Alga                         | 80                                     | $17 \times 10^{-2}$ | [Yang, 2021]    |
| Agua de mar, baja salinidad  | 80                                     | 1                   | [Hidalgo, 2017] |
| Agua de mar, media salinidad | 70                                     | 5                   |                 |
| Tierra                       | 40                                     | $3 \times 10^{-2}$  |                 |
| Tierra húmeda                | 30                                     | $1 \times 10^{-2}$  |                 |
| Partículas de polvo          | 4                                      | $1 \times 10^{-17}$ | [Zhang, 2022]   |

Fuente: elaboración propia.

Los agentes contaminantes se clasifican en dos grupos. El primero, relacionado con agentes “altos en humedad” e incluyen mezclas, agua, algas, agua de mar (baja salinidad), agua de mar (media salinidad). Por otra parte, se tienen los “gránulos” que incluyen tierra, tierra húmeda y partículas de polvo. En su mayoría, los agentes húmedos presentan una permitividad relativa de 80, con variaciones entre 70 y 81. Entre tanto, los gránulos tienen una permitividad relativa menor y oscilan entre 4 y 40. Por otra parte, la conductividad eléctrica de los agentes seleccionados para las pruebas no puede generalizarse, ya que muestra comportamientos muy diversos.

### Configuración y ajustes de la simulación

Para que COMSOL Multiphysics® funcione correctamente es necesario ajustar varios aspectos importantes: geometría, tipo de física, malla y resultados. En lo que respecta a la geometría, además de definir las dimensiones y formas tanto del

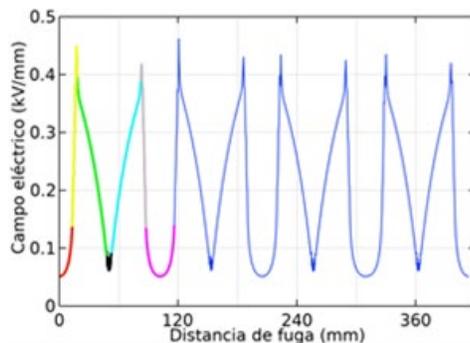
aislador, como de la capa contaminante, es necesario configurar una frontera de espacio, la cual generalmente está compuesta por aire. Entre tanto, durante la selección de la física, el usuario selecciona el modelo del aislador y luego debe ingresar los parámetros de los materiales requeridos. Por último, en la sección de resultados se pueden crear gráficos de diversas dimensiones y tipos, según las necesidades y variables que se deseen medir. En este caso es el campo eléctrico. Ampliando la explicación asociada con la frontera de simulación, como se observa en la figura 2, durante las pruebas se definió un cuadrado de 500 mm x 500 mm que representa el aire que rodea el aislador [Refaie, 2016]. Luego de este espacio y hacia el exterior de la configuración, se creó una capa de 5 mm (contorno de doble línea), la cual es definida como "dominio de objetos infinitos" y corresponde a la frontera de la simulación. Esta configuración permite obtener un espacio de aire infinito que no afecta el potencial aplicado, ni el campo eléctrico que se configura por efecto del aislador. Por otra parte, debido a la necesidad de medir el campo eléctrico como una función dependiente de la conductividad, en el simulador se utilizó una física de "corrientes eléctricas" combinada con física de "circuitos eléctricos". Esto permite obtener resultados precisos en un estudio temporal [Salhi, 2022]. En este caso, para realizar el cálculo del campo eléctrico, el uso de "corrientes eléctricas" solicita al usuario la permitividad relativa y conductividad eléctrica de cada material.

Finalmente, COMSOL Multiphysics® trabaja con el Método de Elementos Finitos (FEM) que consiste en dividir el problema en varias partes pequeñas para disminuir el tiempo de cómputo [Salhi, 2022]. Por ello, requiere la creación de una malla. Considerando que esta debe tener una buena calidad para mejor exactitud y convergencia de los resultados, y aunque en algunos casos puede sobrepasar la capacidad del equipo de cómputo usado, para el desarrollo esta investigación se seleccionó una malla extrafina.

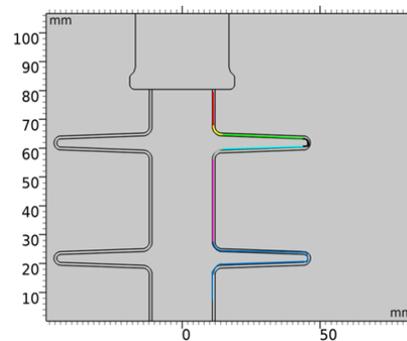
Para visualizar los resultados se requiere definir un conjunto de datos y usar la opción "arista 2D". En este caso, y basados en la metodología propuesta por [Refaie, 2016], se seleccionó manualmente la distancia de fuga del lado derecho del aislador (Línea azul en la figura 3). Luego de esto, en la sección de resultados, se

crea un gráfico en una dimensión (gráfico 1D) y un gráfico lineal. Acto seguido, se selecciona el conjunto de datos creado previamente y, finalmente, la variable a medir, correspondiente al campo eléctrico.

En la figura 4a se muestra un ejemplo del gráfico creado durante la simulación. En esta figura, el eje de las abscisas representa la distancia de fuga en milímetros y el eje de las ordenadas es el campo eléctrico correspondiente en kV/mm (kilovoltio por milímetro). El campo eléctrico que se presenta en cada sección de la superficie del aislador (señaladas en la figura 1b) se resalta con diferentes colores en la figura 4b. De esta forma, el color rojo identifica la zona valle de la horquilla, el negro a la punta de la aleta y el magenta a la zona valle del cuerpo. Estas zonas tienden a presentar el menor campo eléctrico. Mientras, los colores amarillo y gris, que corresponden a la base superior e inferior de aleta del aislador, presentan los valores de campo eléctrico más altos. Este comportamiento, así como el análisis de los resultados, se presentará en la siguiente sección.



a) Campo eléctrico.



b) Relación de colores sobre el aislador.

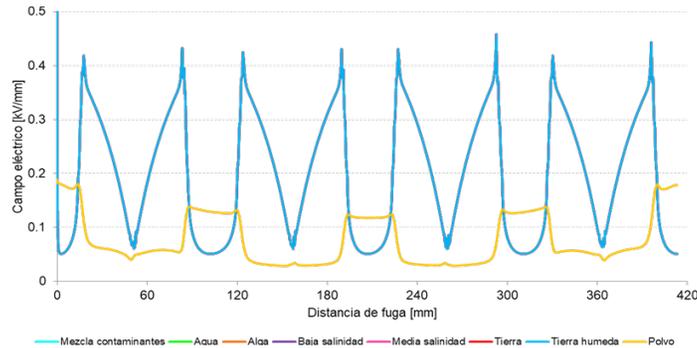
Fuente: elaboración propia.

Figura 4 Ejemplo del comportamiento del campo eléctrico sobre la distancia de fuga.

### 3. Resultados

Una vez aplicada la metodología descrita en la sección anterior, se realizaron simulaciones con cada agente contaminante referido en la tabla 2. Posteriormente, se exportaron los resultados de la distribución del campo eléctrico sobre la distancia de fuga. Finalmente, se procedió a graficar y comparar las curvas obtenidas. La figura 5 muestra el efecto de cada contaminante sobre el campo eléctrico del aislador a lo largo de la longitud de fuga. En este caso, la mayoría de curvas están

solapadas sobre la azul (valor máximo de 0.46 kV/mm y mínimo de 0.05 kV/mm), excepto la gráfica amarilla que corresponde al polvo (valor máximo de 0.18 kV/mm y mínimo de 0.03 kV/mm).



Fuente: elaboración propia.

Figura 5 Campo eléctrico para los diferentes agentes contaminantes.

Comparando los resultados, se observa que con este agente contaminante el campo eléctrico máximo sobre el aislador se reduce 61%.

Considerando las escasas diferencias observadas entre agentes contaminantes, especialmente los que poseen agua o algún contenido de humedad, se decidió ajustar la metodología dividiendo en tres casos el análisis del comportamiento del campo eléctrico sobre la distancia de fuga:

- Efecto de la permitividad relativa de la capa contaminante.
- Efecto de la conductividad eléctrica de la capa contaminante.
- Efecto del espesor de la capa contaminante.

Una síntesis de la combinatoria definida para las pruebas se detalla en la tabla 3.

Tabla 3 Características de la capa contaminante en cada caso de estudio.

| Caso | Permitividad relativa ( $\epsilon_r$ ) | Conductividad [S/m]  | Espesor [mm]       |
|------|--|--|--------------------|
| A    | 4, 15, 26, 37, 48, 59, 70, 81          | $1 \times 10^{-17}$  | 1                  |
|      |  | $1 \times 10^{-3}$   |                    |
|      |  | $1 \times 10^3$  |                    |
| B    | 4                                      | $1, 1 \times 10^{-3}, 1 \times 10^{-6}, 1 \times 10^{-9}, 1 \times 10^{-12}, 1 \times 10^{-15}, 1 \times 10^{-17}$ | 1                  |
|      | 38                                     |  |                    |
|      | 81                                     |  |                    |
| C    | 4                                      | $1 \times 10^{-17}$  | 0.5, 1, 2, 3, 4, 5 |
|      | 80                                     | $55 \times 10^{-7}$  |                    |

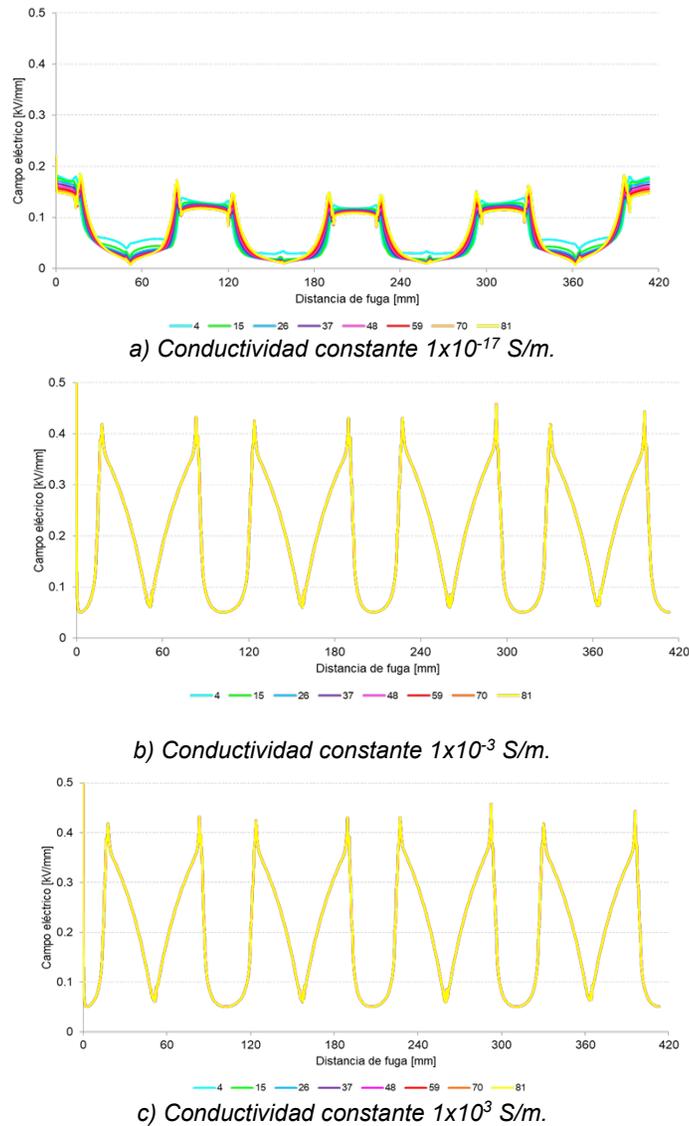
Fuente: elaboración propia.

### **Caso A: variación de la permitividad relativa**

Para analizar el efecto de la permitividad relativa, se consideraron los valores máximos y mínimos de los agentes contaminantes previamente revisados (ver tabla 2). De esta manera, se estableció el siguiente conjunto para la permitividad relativa: 4, 15, 26, 37, 48, 59, 70 y 81. Por su parte, se definieron tres valores de conductividad eléctrica:  $1 \times 10^{-17}$  S/m,  $1 \times 10^{-3}$  S/m y  $1 \times 10^3$  S/m. Asimismo, durante las pruebas se mantuvo un espesor constante de 1 mm para la capa de contaminante. Los resultados obtenidos en este caso se presentan en la figura 6.

En la figura 6a se muestra una tendencia similar en el comportamiento del campo eléctrico a lo largo de las diferentes zonas de la distancia de fuga. En las zonas valle horquilla y valle lengüeta (entre 0 y 15 mm), se aprecia una ligera disminución del campo eléctrico hasta llegar a la base de la primera aleta (base superior), alcanzando un pico máximo de 0.19 kV/mm (permitividad 81). Este comportamiento se repite posteriormente en la zona valle cuerpo (entre 87 y 120 mm aprox.), aunque presenta una reducción del 21%. Luego de la primera zona, y a lo largo de toda la superficie de la aleta (entre 15 y 90 mm), el campo eléctrico desciende rápidamente y vuelve a ascender hasta la base inferior (forma de "v"). En esta zona, se registra el mínimo valor de campo eléctrico registrado en todas las pruebas usando una permitividad de 81 (0.006 kV/mm). Este comportamiento se replica en las aletas centrales, aunque el valor mínimo registra un ligero aumento, llegando a 0.009 kV/mm. Caso especial ocurre al usar la  $\epsilon_r=4$ , donde el campo eléctrico exhibe un mínimo de 0.028 kV/mm.

En la figura 6b y la figura 6c se observa el mismo comportamiento del campo eléctrico para las conductividades media ( $1 \times 10^{-3}$  S/m) y alta ( $1 \times 10^3$  S/m). Se puede apreciar que, sin importar la variación de la permitividad, todas las curvas de campo eléctrico se solapan, apuntando al mismo resultado. Las zonas valle horquilla, valle lengüeta y valle cuerpo presentan un campo eléctrico de 0.05 kV/mm, mientras que el otro mínimo se encuentra en la punta de la aleta (forma de "v"), con un aumento del 20%. Entre tanto, en las bases de las aletas se registran los valores máximos del campo eléctrico, exhibiendo 0.46 kV/mm en la base inferior y 0.42 kV/mm en la base superior. Esto representa una reducción del 9% entre ambas zonas.

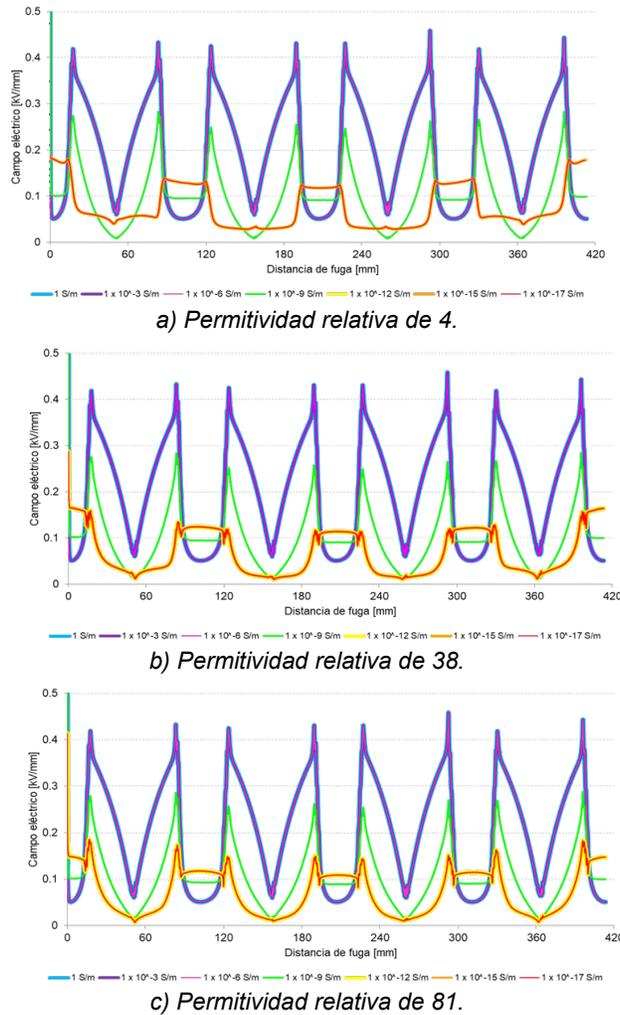


Fuente: elaboración propia.

Figura 6 Campo eléctrico sobre la superficie de fuga en función de la permitividad relativa.

### Caso B: variación de la conductividad relativa

Para estudiar el efecto de la conductividad eléctrica se definieron siete valores: 1 S/m,  $1 \times 10^{-3}$  S/m,  $1 \times 10^{-6}$  S/m,  $1 \times 10^{-9}$  S/m,  $1 \times 10^{-12}$  S/m,  $1 \times 10^{-15}$  S/m,  $1 \times 10^{-17}$  S/m. Además de esta variación, se establecieron tres valores de permitividad relativa (4, 38 y 81), manteniendo un espesor constante de 1 mm. Los resultados de las simulaciones se presentan en la figura 7 y se agrupan en tres niveles de conductividad: (1) alto: curvas azul, morado y rosa; (2) moderado: curva verde; y (3) bajo: curvas amarilla, naranja y rojo.



Fuente: elaboración propia.

Figura 7 Campo eléctrico sobre la superficie de fuga en función de la conductividad.

Sin importar la variación de la permitividad, se aprecia que el comportamiento del campo eléctrico en los niveles de conductividad alto y moderado es similar al descrito en el caso A (Figuras 6b y 6c). En estas pruebas se puede ver que el campo eléctrico tiene un comportamiento en forma de "M", caracterizado por tener una mayor intensidad en las bases de las aletas. En dichas zonas, el nivel alto de conductividad siempre posee un máximo de 0.46 kV/mm, mientras que el nivel moderado reporta ligeras diferencias, alcanzando 0.283 kV/mm cuando  $\epsilon_r=4$  (Figura 7a), 0.285 kV/mm para  $\epsilon_r=38$  (Figura 7b) y 0.288 kV/mm con  $\epsilon_r=81$  (Figura 7c).

Por otra parte, se observa una disminución del campo eléctrico en las zonas valle (horquilla, lengüeta y cuerpo) y en la punta de la aleta donde se alcanza el mínimo

campo eléctrico. En el nivel alto de conductividad, se registra un campo mínimo de 0.05 kV/mm, mientras que, en el nivel moderado de conductividad, y luego de usar  $\epsilon_r=4$ ,  $\epsilon_r=38$  y  $\epsilon_r=81$ , los valores más bajos fueron 0.008, 0.011 y 0.013 kV/mm, respectivamente.

Otra diferencia apreciable en estos dos niveles está en la manera en que varía el campo eléctrico en la zona valle cuerpo (entre 87 y 120 mm de la distancia de fuga). En el nivel de conductividad alto (ver ejemplo de curva azul), se forma una "U" suavizada, asociada al descenso y ascenso del campo eléctrico, con un mínimo de 0.05 kV/mm. Entre tanto, en el nivel medio se mantiene constante con un valor promedio de 0.094 kV/mm (ver ejemplo de curva verde).

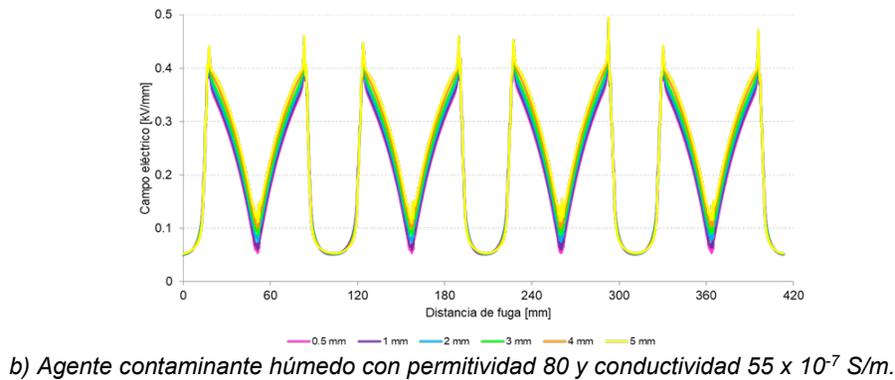
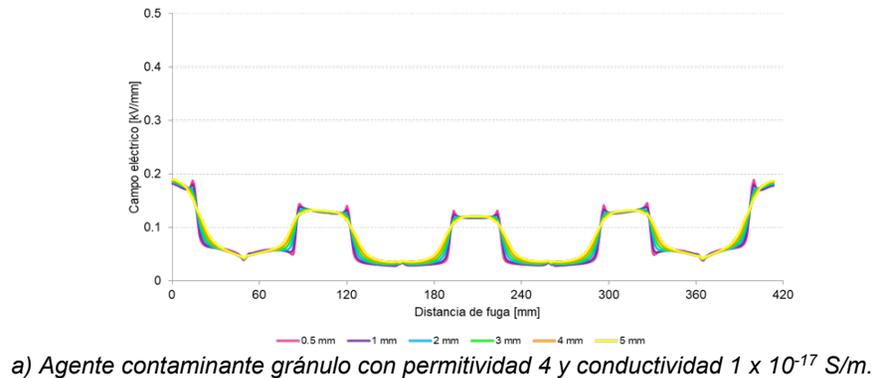
Por otra parte, los resultados obtenidos con el nivel bajo de conductividad (igual o menor a  $1 \times 10^{-12}$  S/m) presentan un comportamiento similar al de la figura 6a. En este caso, el valor máximo del campo eléctrico en las zonas valle horquilla y valle lengüeta fue 0.189 kV/mm con  $\epsilon_r=4$  (ver figura 7a), 0.167 kV/mm con  $\epsilon_r=38$  (Figura 7b) y 0.151 kV/mm al usar  $\epsilon_r=81$  (Figura 7c). Es importante mencionar que en las tres gráficas de la figura 7 el valor inicial del campo eléctrico sobre la horquilla del aislador cambia, para una permitividad de 4 y 38, este corresponde al valor máximo, mientras que usando  $\epsilon_r=81$ , el máximo se encuentra en la base de la aleta (0.185 kV/mm). Asimismo, cuando aumenta la permitividad (ver figura 7c con  $\epsilon_r=81$ ), los picos en la punta de la aleta se vuelven más pronunciados (pico de 0.17 kV/mm) en comparación con valores más bajos que reportaron un campo máximo de 0.14 y 0.13 kV/mm respectivamente.

Por último, los valores mínimos de campo eléctrico en el nivel bajo de conductividad se hallaron en la punta de las aletas, aunque no necesariamente en la misma. Es así como para una permitividad de 4 se ubicó en las aletas externas (0.007 kV/mm), para la permitividad de 38 fue similar en todas (0.010 kV/mm) y para una permitividad de 81 fue en las aletas centrales (0.028 kV/mm).

### **Caso C: variación del espesor de la capa contaminante**

Para analizar el efecto del espesor se definieron seis valores: 0.5, 1, 2, 3, 4 y 5 mm. Adicionalmente, se seleccionaron dos conjuntos de parámetros que fuesen

representativos de los agentes contaminantes revisados, uno para húmedos y otro para gránulos. De esta forma, el primer conjunto tendrá permitividad relativa de 80 y conductividad eléctrica de  $55 \times 10^{-7}$  S/m, mientras el segundo tendrá permitividad relativa de 4 y conductividad eléctrica de  $1 \times 10^{-17}$  S/m. Los resultados correspondientes a este caso se incluyen en la figura 8.



Fuente: elaboración propia.

Figura 8 Campo eléctrico sobre la superficie de fuga en función del espesor.

Para las curvas incluidas en la figura 8a se puede apreciar que el comportamiento es similar al reportado con nivel bajo de conductividad en el caso B (Figura 7a). De esta forma, el campo eléctrico máximo se presenta en las zonas valle horquilla, valle lengüeta y en la base superior de aleta. En esta configuración, y usando un espesor de 0.5 mm (curva rosa), se registró el mayor pico entre las alternativas revisadas (0.189 kV/mm). Adicionalmente, en esta curva también se presentó el campo eléctrico mínimo (0.028 kV/mm) ubicado en las aletas centrales.

Ahora bien, al analizar la curva amarilla (5 mm) y compararla con la curva rosa (0.5 mm) se registró en la base superior de la aleta (entre 12 y 17 mm sobre la distancia

de fuga) una reducción del 26% en el campo máximo. Asimismo, con el agente contaminante de 5 mm de espesor, el campo eléctrico alcanzó 0.190 kV/mm cerca de la horquilla y, a diferencia de los otros espesores, se aprecia una transición más suave a lo largo de toda la distancia de fuga. Por su parte, en las aletas centrales, con el mismo espesor, se observó un crecimiento del 25% en el campo eléctrico mínimo.

En la figura 8b se puede ver un comportamiento similar al de las figuras 6b y 6c, con un campo eléctrico máximo registrado en la base inferior de la aleta. Para el espesor de 5 mm (curva amarilla) se tiene el mayor pico (0.494 kV/mm), mientras que la curva asociada a 0.5 mm exhibe una reducción del 8% para el mismo parámetro. Asimismo, todas las curvas presentan el mismo campo eléctrico mínimo (0.050 kV/mm). Esto se observó en las zonas valle horquilla, valle lengüeta y valle cuerpo. Finalmente, cuando el espesor de la capa contaminante es 0.5 mm, se observa una reducción del 6% en el campo mínimo reportado en la punta de la aleta (entre 45 y 55 mm sobre la distancia de fuga).

#### **4. Discusión**

Este artículo presenta una metodología para simular aisladores eléctricos contaminados por diferentes agentes. Aunque en este caso, las simulaciones realizadas fueron en dos dimensiones (2), el desarrollo experimental permite medir la distribución del campo eléctrico a lo largo de la distancia de fuga del aislador. En este contexto, se llevaron a cabo varios casos de estudio para analizar el impacto de la capa contaminante en el comportamiento del campo eléctrico, variando tres parámetros específicos: (1) permitividad relativa, (2) conductividad eléctrica y (3) espesor.

Los resultados obtenidos muestran una relación directa entre el campo eléctrico, la permitividad relativa y el espesor de la capa contaminante. Sin embargo, gracias a las simulaciones se observó que estos dos parámetros pierden relevancia cuando la conductividad eléctrica posee valores medios o altos (por encima de  $1 \times 10^{-6}$  S/m). De esta manera, se puede afirmar que la conductividad de la capa contaminante es el parámetro que ejerce mayor influencia sobre el campo eléctrico a lo largo de la

distancia de fuga de los aisladores. Estos hallazgos concuerdan con investigaciones previas, como las realizadas por [Refaie, 2016].

Asimismo, otros autores como [Rosli, 2022] y [Yang, 2021] también han reportado incrementos en el campo eléctrico de los aisladores debido a la contaminación de su superficie (alga y sal). Estos resultados resaltan la importancia de abordar el problema estudiado en este artículo, y ampliar su alcance, incluyendo más agentes y aumentando el detalle de las simulaciones. Esto es aún más relevante si se considera que el aumento del campo eléctrico puede provocar fallas en estos elementos de protección, generando afectaciones tanto al sistema eléctrico de potencia, como la continuidad y confiabilidad del suministro de energía eléctrica.

## **5. Conclusiones**

A continuación, se presentan las conclusiones más relevantes:

- La simulación en COMSOL Multiphysics® posee múltiples ventajas para abordar la problemática bajo estudio, entre ellas se resaltan: la reducción de tiempos de prueba, el ajuste de casos de estudio, el modelamiento de los elementos que conforman los aisladores y agentes contaminantes de diversos tipos. Sin embargo, se requiere usar información confiable que permita el adecuado modelamiento del aislador (geometría) y de la capa contaminante (permitividad relativa y conductividad eléctrica). Asimismo, es necesario definir el tipo de física, la energización de los electrodos, la malla y la visualización de resultados. La metodología presentada en este trabajo puede ser útil en investigaciones similares que involucren el uso de este software o el estudio de aisladores.
- La conductividad eléctrica del agente es el parámetro más dominante en los casos de contaminación analizados. Durante las pruebas se evidenció que las mayores variaciones del campo eléctrico ocurren al pasar de una baja conductividad ( $1 \times 10^{-17}$  S/m,  $1 \times 10^{-15}$  S/m,  $1 \times 10^{-12}$  S/m) a una mayor ( $1$  S/m,  $1 \times 10^{-3}$  S/m,  $1 \times 10^{-6}$  S/m), encontrándose diferencias del 143% (con  $\epsilon_r=4$ ), 175% (con  $\epsilon_r=38$ ) y 149% (con  $\epsilon_r=38$ ).

- En los casos donde se emplearon bajas conductividades ( $1 \times 10^{-17}$  S/m) se observó que al variar el espesor desde 0.5 mm hasta 5 mm el mayor campo eléctrico sobre la distancia de fuga se mantuvo en 0.19 kV/mm. Adicionalmente, al variar la permitividad relativa entre 4 y 81 sólo se reportó una variación del 4% en el campo eléctrico. Finalmente, para una conductividad media ( $55 \times 10^{-7}$  S/m), y luego aumentar hasta diez veces el espesor del contaminante, sólo se evidenció una variación del 8%, mientras el cambio de la permitividad relativa no evidenció alteraciones significativas del campo eléctrico máximo (0.46 kV/mm).
- Sobre la distancia de fuga del aislador, después de superar un umbral de conductividad eléctrica (entre  $1 \times 10^{-9}$  S/m y  $1 \times 10^{-6}$  S/m), se evidenció un comportamiento constante del campo eléctrico. Este tiene forma de “M” y, por lo general, se repite en cada aleta. Usando dicho umbral, las simulaciones mostraron un campo eléctrico máximo en las bases inferior y superior de las aletas (0.46 kV/mm) y un valor mínimo en las zonas valle horquilla y valle lengüeta (0.05 kV/mm). Lo anterior, fue evidente para diferentes tipos de agentes contaminantes y permitividad relativa (entre 81 y 4). No obstante, al variar el espesor de la capa contaminante se mantuvo la forma y el pico mínimo del campo eléctrico (conductividad de  $55 \times 10^{-7}$  S/m).

## **6. Bibliografía y Referencias**

- [1] American National Standards Institute. ANSI C29.13-2018 for Insulators-Composite- Distribution Deadend Type. ANSI, 2018.
- [2] Astudillo, V. Identificación de fallas en los aisladores de una línea de transmisión mediante visión artificial. Tesis de maestría. Universidad Técnica de Cotopaxi. Latacunga, Ecuador, 2022.
- [3] Cadena, A., & Mendoza, J. Modelado en COMSOL de la distribución de campo eléctrico en una cadena de aisladores de una línea de transmisión de energía típica de 115 kV producida por una descarga atmosférica considerando algunos contaminantes típicos en la superficie aislante. Trabajo de grado. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia, 2019.

- [4] GAMMA. Catálogo: aisladores poliméricos para redes de distribución y herrajes para montaje. Electroporcelana Gamma S.A., 2018.
- [5] Hidalgo, P. Cálculo automatizado de la intensidad de campo eléctrico por onda de superficie. Trabajo de grado. Universidad de Jaén Escuela Politécnica Superior de Linares. Jaén, España, 2017.
- [6] Klüss, J., Bichik, A., Arshad, A., Strandberg, J., Kazmi, S., Laiho, M., Stark, T., Panchal, J., Ahmad, B., & Väkeväinen, K. Simulation precision and the human factor. *Nordic Insulation Symposium on Materials, Components and Diagnostics*, No. 24, 69–74, 2015.
- [7] Krzma, A., Khamaira, M., & Abdulsamad, M. Comparative Analysis Of Electric Field And Potential Distributions Over Porcelain And Glass Insulators Using Finite Element Method. *Proceedings of First Conference for Engineering Sciences and Technology*, No. 1, 176–184, 2018.
- [8] León, A., Pérez, C., & Cantor, L. Desempeño eléctrico de aisladores cerámicos y poliméricos ante el crecimiento de microorganismos en su superficie: caso de estudio. Trabajo de grado. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia, 2015.
- [9] Mohyuddin, S. Simulation and analysis of electric field distribution on porcelain disc insulators under dry and clean conditions using Finite Element Method. *IJSTE-International Journal of Science Technology & Engineering*, No. 2, 541–546, 2016.
- [10] Morcelle, P., Álvarez, R., Catalano, L., Calo, E., & Mayora, H. Evaluación del estado de aisladores compuestos retirados de servicio – experiencias tendientes a determinar la expectativa de vida residual. XVIII ERIAC Décimo Oitavoencuentro Regional Ibero-Americano Do CIGRE, 2019.
- [11] Naito, K., Matsuoka, R., & Sakanichi, K. Investigation of the insulation performance of the insulator covered with lichen. *Transactions on Power Delivery*, No. 5, 1634–1639, 1990.
- [12] Refaie, S., Abd Elrahman, M., & Mohamed, M. Electric field distribution of optimized composite insulator profiles under different pollution conditions. *Ain Shams Engineering Journal*, No. 9, 1349–1356, 2016.

- [13] Rosli, M., Sham, N., Kamarudin, M., Yousof, M., Jamail, N., & Rahman, R. The effectiveness of mitigation schemes on electric field intensity (stress control) for overhead line glass insulator. *International Journal of Electrical and Electronic Engineering and Telecommunications*, No. 11, 1–6, 2021.
- [14] Salhi, R., Mekhaldi, A., Tegar, M., Kherif, O., & Amine, M. Cap-pin glass insulator simulation and leakage current waveform extraction. *2nd International Conference on Advanced Electrical Engineering*, 2022.
- [15] Yang, S., Liu, Y., & Sun, L. Simulation of electrical performance of algae contaminated silicone rubber. *3rd International Conference on Electrical Materials and Power Equipment*, 2021.
- [16] Zhang, G., Lan, L., Wang, Y., & Wen, X. Simulation study on the pollution accumulation of the porcelain insulator in a wind tunnel under direct-current composite electric field. *Electric Power Systems Research*, No. 209, 1–13, 2022.