



# **UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI**

## **DIRECCIÓN DE POSGRADO**

### **MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD**

#### **MODALIDAD: INFORME DE INVESTIGACIÓN**

**Título:**

---

---

**MODELAMIENTO DE LOS AISLADORES DE LA LÍNEA DE 69KV  
MULALO - LA COCHA MEDIANTE ANÁLISIS DE ELEMENTOS  
FINITOS, PARA DETERMINAR LAS FUGAS DE CORRIENTE Y SU  
RELACIÓN CON EL ENSAYO DE ULTRASONIDO A CAUSA DE  
CONDICIONES DE PERDIDA DE RIGIDEZ DIELECTRICA.**

---

---

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de magister en Electricidad  
mención sistemas eléctricos de potencia

**Autor:**

Ing. Estalin Gonzalo Herrera Naranjo

**Tutor:**

Ing. Álvaro Santiago Mullo Quevedo Msc.

**LATACUNGA – ECUADOR  
2023**

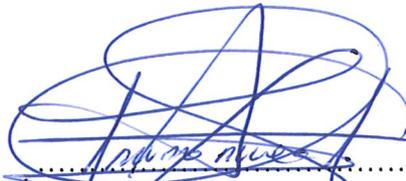
## AVAL DEL TUTOR

En mi calidad de Tutor del Trabajo de Titulación “**Modelamiento de los aisladores de la Línea de 69 kV Mulaló - La Cocha mediante análisis de elementos finitos, para determinar las fugas de corriente y su relación con el ensayo de ultrasonido a causa de condiciones de pérdida de rigidez dieléctrica.**” presentado por Gonzalo Herrera para optar por el título magíster en Electricidad mención sistemas eléctricos de potencia

### CERTIFICO

Que dicho trabajo de investigación ha sido revisado en todas sus partes y se considera que reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la presentación para la valoración por parte del Tribunal de Lectores que se designe y su exposición y defensa pública.

Latacunga, agosto 04 del 2023

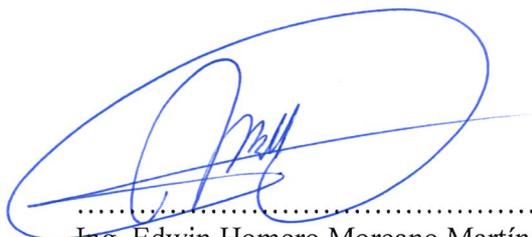


Ing. Álvaro Santiago Mullo Quevedo Msc.  
C.I.: 0502768542

## AVAL DEL TRIBUNAL

El trabajo de Titulación: “**Modelamiento de los aisladores de la Línea de 69kv Mulalo - La Cocha mediante análisis de elementos finitos, para determinar las fugas de corriente y su relación con el ensayo de ultrasonido a causa de condiciones de perdida de rigidez dieléctrica.**”, ha sido revisado, aprobado y autorizado su impresión y empastado, previo a la obtención del título de Magíster en Electricidad mención Sistemas Eléctricos de Potencia ; el presente trabajo reúne los requisitos de fondo y forma para que el estudiante pueda presentarse a la exposición y defensa.

Latacunga, agosto 04 del 2023



.....  
Ing. Edwin Homero Moreano Martínez MSc.  
C.I.: 0502607500  
Lector 1 (Presidente del Tribunal)



.....  
Ing. Marco Aníbal León Segovia MSc.  
C.I.: 0502305402  
Lector 2



.....  
Ing. Cristian Fabián Gallardo Molina MSc.  
C.I.: 0502847692  
Lector 3

## **DEDICATORIA**

Le dedico el resultado de este trabajo a toda mi familia. Principalmente, a mis padres quienes con su amor, paciencia y esfuerzo me han permitido llegar a cumplir hoy un sueño más, gracias por inculcar en mí el ejemplo de esfuerzo y valentía. A mis hermanos por su cariño y apoyo durante todo este proceso.

También quiero dedicarle este trabajo a mi esposa y a mis hijos. Por su paciencia, por su cariño por su comprensión en los días que tuve que ausentarme por mis estudios.

**Estalin Gonzalo Herrera**

## **AGRADECIMIENTO**

Quiero agradecer primer a Dios quien me da la fuerza necesaria para afrontar cada peldaño en mi diario vivir.

A mis padres que han sido de completa ayuda, también por darme esa fortaleza de poder seguir con esta meta que siempre anhele y lucharon se sacrificaron para que yo pueda cumplirla.

Quiero agradecer profundamente a mi esposa, y a mis hijos. Me brindaron su apoyo, me comprendieron, tuvieron tolerancia e infinita paciencia y cedieron su tiempo para que “Papá estudie”, para permitir así llevar adelante una meta más anhelada por mí. A ellos, mi eterno amor y gratitud.

También, agradecer a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a los docentes quienes transmitieron sus valiosos conocimientos permitiéndome crecer profesionalmente.

Familia, amigos eternamente agradecida por todo.

**Estalin Gonzalo Herrera**

## RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Quien suscribe, declara que asume la autoría de los contenidos y los resultados obtenidos en el presente trabajo de titulación.

Latacunga, agosto 04 del 2023



.....  
Estalin Gonzalo Herrera Naranjo  
C.I.: 0502377401

## RENUNCIA DE DERECHOS

Quien suscribe, cede los derechos de autoría intelectual total y/o parcial del presente trabajo de titulación a la Universidad Técnica de Cotopaxi.

Latacunga, agosto 04 del2023



.....  
Estalin Gonzalo Herrera Naranjo  
C.I.: 0502377401

## **AVAL DEL PRESIDENTE DEL TRIBUNAL**

Quien suscribe, declara que el presente Trabajo de Titulación: **“Modelamiento de los aisladores de la Línea de 69kv Mulalo - La Cocha mediante análisis de elementos finitos, para determinar las fugas de corriente y su relación con el ensayo de ultrasonido a causa de condiciones de perdida de rigidez dieléctrica.”** contiene las correcciones a las observaciones realizadas por los lectores en sesión científica del tribunal.

Latacunga, agosto, 04, 2023



.....  
Ing. Edwin Homero Moreano Martínez MSc.  
C.I.: 0502607500

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI**  
**DIRECCIÓN DE POSGRADO**

**MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD**  
**MENCIÓN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA**

**Título:** Modelamiento de los aisladores de la Línea de 69kv Mulalo - La Cocha mediante análisis de elementos finitos, para determinar las fugas de corriente y su relación con el ensayo de ultrasonido a causa de condiciones de pérdida de rigidez dieléctrica.

**Autor:**

Ing. Estalin Gonzalo Herrera Naranjo

**Tutor:**

Ing. Álvaro Mullo Quevedo Msc.

**RESUMEN**

La presente investigación consistió en simular los aisladores de la línea de 69 kV Mulaló – La Cocha mediante análisis de elementos finitos, para determinar las fugas de corriente y su relación con el ensayo de ultrasonido a causa de condiciones de pérdida de rigidez dieléctrica. Para lo cual se realizó ensayos de campo como inspección visual, ultrasonido y termografía. La metodología aplicada consistía en un estudio de campo mediante uso de equipos tecnológicos para determinar el estado de los aisladores y las condiciones ambientales, en los mismos que se encontraron incrustación de polución y fisuras, que con el equipo de termografía se observa que en la fase R mantiene una temperatura de 76°C que aparece un tracking eléctricos de altas frecuencias y amplitudes que se encuentra fuera de las condiciones para que sea intervenido en mantenimiento inmediato, en la fase S una temperatura de 44.8°C con un tracking de ultrasonido estable se encuentra en condiciones normales y en la fase T una temperatura de 59°C con frecuencias de ultrasonido irregulares por lo que se recomienda realizar un cambio inmediato. De acuerdo a la modelación con el software FEMM se procedió a la evaluación dinámica donde en la Fase R posee una fuga de corriente 30 A/m<sup>2</sup> en la fase S una fuga de 3.2 A/m<sup>2</sup> y en la T una fuga de 200 A/m<sup>2</sup>. La misma que determina que existe una relación entre la fuga de corriente y el deterioro superficial de los aisladores y un aumento en la frecuencia y amplitud del ensayo de ultrasonido.

**PALABRAS CLAVE:** aisladores; ultrasonido; simulación; método de elementos finitos.

**UNIVERSIDAD TECNICA DE COTOPAXI  
DIRECCION DE POSGRADO**

**MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD  
MENCION SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA**

**Theme:** Modeling of the insulators of the 69kv Mulalo - La Cocha line through finite element analysis, to determine current leakage and its relationship with ultrasonic testing due to dielectric rigidity loss conditions.

**Author:**

Ing. Estalin Gonzalo Herrera Herrera

**Tutor:**

Ing. Mullo Quevedo Álvaro Msc.

**ABSTRACT**

The present research consisted of simulating the insulators of the 69 kV Mulaló - La Cocha line through finite element analysis, to determine current leakage and its relationship with the ultrasound test due to conditions of loss of dielectric strength. For which field tests are carried out such as visual inspection, ultrasound and thermography. The applied methodology consisted of a field study through the use of technological equipment to determine the state of the insulators and the environmental conditions, in which pollution incrustation and fissures were found, that with the thermography equipment is observed that in the phase R maintains a temperature of 76°C that shows an electrical tracking of high frequencies and amplitudes that is out of the conditions to be intervened in immediate maintenance, in phase S a temperature of 44.8°C with a stable ultrasound tracking under normal conditions and in phase T, a temperature of 59°C with irregular ultrasound frequencies is therefore recommended to make an immediate change. According to the modeling with the FEMM software, the dynamic evaluation was carried out where in Phase R there is a current leakage of 30 A/m<sup>2</sup>, in phase S a leakage of 3.2 A/m<sup>2</sup> and in T a leakage of 200 A/m<sup>2</sup>. The same one that determines that there is a relationship between the current leakage and the superficial deterioration of the insulators and an increase in the frequency and amplitude of the ultrasound test.

**Keywords:** insulators; ultrasound; simulation; finite element method.

MSc. Estuardo Vladimir Sandoval Vizueté con cédula de identidad número: 050210421-9 Licenciado en: Ciencias De la Educación especialidad Inglés con número de registro de la SENESCYT:1010-04-477716; **CERTIFICO** haber revisado y aprobado la traducción al idioma Inglés del resumen del trabajo de investigación con el título: “Modelamiento de los aisladores de la Línea de 69kv Mulalo - La Cocha mediante análisis de elementos finitos, para determinar las fugas de corriente y su relación con el ensayo de ultrasonido a causa de condiciones de pérdida de rigidez dieléctrica.” Realizado por: Estalin Gonzalo Herrera Naranjo, aspirante a Magister en Electricidad Mención Sistemas Eléctricos de Potencia

Latacunga, Julio 28 de 2023

-----  
Estuardo Vladimir Sandoval Vizueté  
050210421-9

# ÍNDICE DE CONTENIDOS

INTRODUCCIÓN .....	1
Antecedentes: .....	1
Planteamiento del problema.....	2
Formulación del problema. ....	3
OBJETIVOS .....	3
General:.....	3
Específicos: .....	3
Sistemas de tareas en relación a los objetivos específicos:.....	4
Justificación.....	4
CAPÍTULO I.....	7
1.1    Antecedentes de la investigación.....	7
FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN .....	9
2.1    Torres de subtransmisión.....	9
2.1.1    Componentes de una torre de subtransmisión.....	10
2.2    Aisladores .....	11
2.2.1    Cadena de aisladores .....	12
2.2.2    Efectos corona en aisladores .....	13
2.2.3    Ultrasonidos en el mantenimiento de aisladores .....	14
2.2.4    Efecto Tracking.....	15
2.2.5    Arco eléctrico .....	16
2.2.6    Pérdida dieléctrica de un aislador .....	17
2.2.7    Contaminación de aisladores.....	19
2.3    Flashover .....	20
2.3.1    Desarrollo de Flashover .....	21

2.3.2	Proceso de formación de un arco en una superficie contaminada de fácil humedecimiento .....	22
2.2.3	Proceso de formación de un arco en una superficie contaminada de difícil humedecimiento .....	23
2.3.3	Corriente de fuga.....	24
2.4	Método de elemento finitos (FEM) .....	25
2.4.1	Pre Procesamiento.....	27
2.4.2	Procesamiento o Solución.....	28
2.4.3	Post-procesado .....	29
2.4.4	Finis Element Method Magnetics FEMM .....	31
<b>CAPITULO II METODOLOGÍA.....</b>		<b>33</b>
3.1	Introducción.....	33
3.2	Tipos de investigación.....	34
3.2.1	Investigación bibliográfica.....	34
3.2.2	Investigación de campo.....	34
3.2.3	Investigación experimental .....	35
3.3	Matriz de operacionalización de variables .....	35
3.3.1	Variable independiente.....	36
3.3.2	Variable dependiente.....	36
3.4	Información del lugar de estudio.....	36
3.4.1	Subestación Mulaló.....	37
3.5	Diseño CAD de los aisladores.....	40
3.6	Análisis de elementos finitos.....	44
3.6.1	Software FEMM.....	45
3.6.2	Importación del modelado CAD al software FEMM.....	46
3.6.3	Selección de los materiales .....	46
3.6.4	Asignación de la tensión eléctrica.....	47

3.6.5	Proceso del mallado .....	49
<b>CAPITULO III ANÁLISIS DE RESULTADOS .....</b>		<b>50</b>
4.1	Introducción.....	50
4.2	Evaluación de los aisladores.....	50
4.2.1	Inspección visual de los aisladores .....	51
4.2.2	Evaluación de aisladores mediante cámara termográfica .....	54
4.2.3	Análisis de aisladores mediante ultrasonido .....	57
4.2.4	Simulación numérica de los aisladores .....	60
4.3	Análisis de resultados .....	66
<b>CONCLUSIONES .....</b>		<b>68</b>
<b>RECOMENDACIONES .....</b>		<b>69</b>

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Torres de subtransmisión.....	10
Figura 2: Aisladores eléctricos.....	11
Figura 3: Cadena de aisladores de retención.....	12
Figura 4: Cadena de aisladores de suspensión.....	12
Figura 5: Cadena de aisladores de suspensión doble.....	13
Figura 6: Aparición de efecto corona.....	13
Figura 7: Equipo generador de UV para visualizar el efecto corona.....	14
Figura 8: Ensayo de ultrasonido en una línea de transmisión.....	15
Figura 9: Arco eléctrico.....	17
Figura 10: Circuito equivalente de un dieléctrico.....	18
Figura 11: Efecto flashover.....	21
Figura 12: Modelo de elemento finito.....	26
Figura 12: Pre-procesamiento.....	27
Figura 13: Procesamiento.....	29
Figura 15: Post Procesamiento.....	30
Figura 16: Esquema metodológico.....	33
Figura 17: Subestación Mulaló Google Maps.....	37
Figura 18: Subestación Mulaló.....	38
Figura 19: Plano eléctrico de la S/E Mulaló.....	39
Figura 20: Ensayo por ultrasonido.....	40
Figura 21: Aisladores de 69 kV.....	41
Figura 22: Inicio en SolidWorks.....	41
Figura 23: Sólido de cemento.....	41
Figura 24: Sólido de cemento 2.....	42
Figura 25: Diseño de la campana.....	42
Figura 26: Fijación de los conductores eléctricos.....	43
Figura 27: Diseño de la base.....	43
Figura 28: Aislador ensamblado.....	43
Figura 29: Elementos finitos.....	44
Figura 30: Aislador en 2D.....	45
Figura 31: Aislador en FEMM.....	45

Figura 32: a) selección del problema b) Importación del modelado CAD .....	46
Figura 33: Colocación de los materiales del aislador.....	47
Figura 34: Tensión de 40 kV.....	48
Figura 35: Tensión de referencia 0V.....	48
Figura 36: Tensiones eléctricas de trabajo .....	49
Figura 37: Mallado del conjunto de aisladores .....	49
Figura 38: Conjunto de aisladores a evaluación .....	51
Figura 39: Inspección visual con drones.....	52
Figura 40: Inspección visual fase R .....	53
Figura 41: Inspección visual fase S.....	53
Figura 42: Inspección visual fase T .....	54
Figura 43: Evaluación mediante cámara termográfica.....	54
Figura 44: Evaluación termográfica fase R.....	55
Figura 45: Evaluación termográfica fase S .....	56
Figura 46: Evaluación termográfica fase T .....	57
Figura 47: Análisis mediante ultrasonido .....	57
Figura 48: Análisis de ultrasonido fase R .....	58
Figura 49: Análisis de ultrasonido fase S.....	59
Figura 50: Análisis de ultrasonido fase T .....	59
Figura 51: Efecto corona en la línea de 69 kV .....	60
Figura 52: Diseño CAD en FEMM del conjunto de aisladores .....	61
Figura 53: Corriente de los aisladores en condiciones ideales.....	61
Figura 54: Corriente de los aisladores en condiciones lluviosas.....	62
Figura 55: Simulación de la fase R .....	63
Figura 56: Corriente de fuga fase R .....	63
Figura 57: Simulación de la fase S.....	64
Figura 58: Corriente de fuga fase S.....	64
Figura 59: Simulación fase T .....	65
Figura 60: Corriente de fuga fase T .....	66

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Sistema de tareas por objetivos específicos .....	4
Tabla 2 Formación de arco.....	22
Tabla 3 Corriente máxima de fuga.....	24
Tabla 4 Etapa de pre-procesamiento .....	27
Tabla 5 Etapa de procesamiento .....	28
Tabla 6 Etapa de post-procesamiento .....	30
Tabla 7 Software FEMM .....	31
Tabla 8 Variable independiente .....	36
Tabla 9 Variable independiente .....	36
Tabla 10 Datos geográficos.....	37
Tabla 11 Características eléctricas de la S/E Mulaló .....	38
Tabla 12 Conductancia eléctrica de los materiales .....	47
Tabla 13 Características de los aisladores.....	50
Tabla 14 Características de la línea de subtransmisión.....	51
Tabla 15 Grado de severidad.....	52
Tabla 16 Grado de severidad.....	55
Tabla 17 Grado de severidad en cada fase de la línea de 69 kV .....	67

## INTRODUCCIÓN

La Empresa Eléctrica Provincial Cotopaxi, más conocida como ELEPCO, es una compañía que se dedica a la generación, transmisión y distribución de energía eléctrica en la provincia de Cotopaxi en Ecuador. Esta empresa es reconocida por su compromiso con la calidad de servicio y el desarrollo sostenible en la región.

La subestación de Mulaló y la subestación La Cocha son dos de las principales estaciones de transmisión de energía eléctrica de ELEPCO. Ambas subestaciones son vitales para garantizar el suministro de energía eléctrica en la región y, por lo tanto, es fundamental que los aisladores de las líneas de 69 kV que las conecten estén en óptimas condiciones para asegurar la continuidad del servicio. La ruptura dieléctrica en los aisladores y sus fugas de corriente pueden afectar gravemente la calidad del servicio eléctrico, lo que hace que su correcto funcionamiento sea vital para la empresa y la comunidad. (Calderon & Nieves, 2022)

Las líneas de 69 kV son una parte crítica del sistema eléctrico de ELEPCO, ya que son responsables de la subtransmisión de energía eléctrica a larga distancia. Los aisladores de estas líneas son componentes esenciales para garantizar el correcto funcionamiento del sistema, ya que evitan la fuga de corriente eléctrica y aseguran la integridad de la línea, ahí radica su importancia en el desarrollo de simulaciones para evaluar su comportamiento ante diferentes condiciones, como la pérdida de rigidez dieléctrica. Además, es necesario llevar a cabo pruebas técnicas como inspección visual y ensayos de ultrasonido para detectar posibles fallas en los aisladores y prevenir problemas mayores en el servicio eléctrico.

### **Antecedentes:**

Las simulaciones computacionales, le ofrecen al usuario una gran variedad y beneficios en el proceso de programación, uno de los aspectos más importantes y que más han avanzado, es la capacidad de los programas CAD de simular el proyecto antes de implementarlo, ponerlo en marcha o es casos especiales remplazarlo ya que son simulados en condiciones reales. el poder simular en un Sistema CAD que posee CDF es vital para eliminar posibles errores y accidentes, que pueden llegar a surgir en altos costos no solo económicos sino de seguridad.

Los Elementos Eléctricos de Alto Voltaje normalmente son elaborados para diferentes tipos de condiciones tanto ambientales como de trabajo ya, que se encuentran siempre en constante funcionamiento, una gran cantidad de elementos eléctricos no son elaborados para condiciones de trabajo extremas como es en este caso, es decir soportar grandes cantidades de contaminación de polvo, humedad, moho, hongos, fisuras; etc., los análisis para estas posibles fallas se realizan tanto con análisis matemáticos, computacionales y pruebas de laboratorio principalmente. Las pruebas de Laboratorio en su mayoría para este tipo de investigaciones solo se las realiza hasta niveles de medio voltaje ya que, para niveles de voltaje, superiores se requieren un gran espacio físico, equipos, materiales y elementos que resultan de un alto costo para adquirirlos, debido a estos aspectos, se ha implementado el uso de softwares que faciliten estas pruebas o a su vez mediante modelos matemáticos en base a los datos obtenidos. Las Simulaciones computacionales, le ofrecen al usuario una gran variedad y beneficios en el proceso de programación, uno de los aspectos más importantes y que más han avanzado, es la capacidad de los programas CAD de simular el proyecto antes de implementarlo, ponerlo en marcha o es casos especiales remplazarlo ya que son simulados en condiciones reales. el poder simular en un Sistema CAD que posee FEM es vital para eliminar posibles errores y accidentes, que pueden llegar a surgir en altos costos no solo económicos sino de seguridad.

### **Planteamiento del problema.**

Los aisladores eléctricos se utilizan para mantener un aislamiento eléctrico adecuado entre las líneas de transmisión y las torres, impidiendo que la corriente eléctrica fluya hacia las torres, lo que puede generar fallas en el sistema eléctrico, cortocircuitos y apagones en la red eléctrica. Además, los aisladores eléctricos expuestos están a condiciones climáticas adversas, como la lluvia, la ceniza y el viento, lo que puede generar daños y fisuras en su estructura.

La consecuencia de una falla en los aisladores eléctricos puede ser crítica, ya que puede generar danos en el sistema eléctrico y afectar el suministro de energía eléctrica a los usuarios finales. La falta de mantenimiento adecuado en los aisladores eléctricos puede generar roturas y fisuras, lo que disminuye la capacidad

de aislamiento eléctrico y aumenta la probabilidad de fugas de corriente eléctrica. Por lo tanto, es fundamental realizar inspecciones periódicas y pruebas técnicas para detectar las fallas en los aisladores eléctricos y garantizar la seguridad y la calidad en el suministro de energía eléctrica. En este contexto, la investigación propuesta busca determinar las fugas de corriente y su relación con el ensayo de ultrasonido a causa de condiciones de pérdida de rigidez dieléctrica mediante una simulación utilizando los elementos finitos.

### **Formulación del problema.**

De no tener un diagnóstico del estado de los aisladores mediante técnicas de modelación y simulación seguirá existiendo la incertidumbre a fallos prematuros no planificados.

### **OBJETIVOS**

#### **General:**

Evaluar los aisladores de la línea de subtransmisión de 69 kV mediante técnica de elementos finitos para determinar fugas de corriente que posean relación con efectos de ultrasonido y la pérdida de aislamiento.

#### **Específicos:**

Realizar una investigación bibliográfica para determinar conceptos que se van a ser aplicados en el estudio.

Modelación de los aisladores mediante herramientas tecnológicas bajo diferentes condiciones de impurezas.

Realizar la validación del método aplicado mediante análisis comparativo y simulación con elementos finitos.

## Sistemas de tareas en relación a los objetivos específicos:

**Tabla 1**

*Sistema de tareas por objetivos específicos*

<b>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b>	<b>ACTIVIDAD (TAREAS)</b>	<b>RESULTADO DE LA ACTIVIDAD</b>	<b>MEDIO DE VERIFICACIÓN</b>
Realizar una investigación bibliográfica para determinar conceptos que se van a ser aplicados en el estudio.	Investigación bibliográfica mediante libros, publicaciones relevante dentro aisladores y modelaciones.	- Fundamentación técnica–científica para el desarrollo de las variables. - Aplicar una metodología de desarrollo de la investigación.	Investigación de Campo. Investigación Bibliográfica. Sistematización de la información.
Modelación de los aisladores mediante herramientas tecnológicas bajo diferentes condiciones de impurezas.	Análisis con herramientas tecnológicas con el software FEMM	Determinación de condiciones críticas para el aumento de corrientes de fuga.	Investigación Experimental. Diagramas de frecuencias.
Realizar la validación del método aplicado mediante análisis comparativo y simulación con elementos finitos	Validar los resultados y verificación de la variable.	Verificación mediante fichas bibliográficas de la aplicación del algoritmo.	Diagramas eléctricos. Diagramas de ruptura dieléctrica. Análisis Económicos

### **Justificación.**

La justificación del presente proyecto de titulación se basa en la importancia de garantizar la seguridad y la calidad en el suministro de energía eléctrica a los usuarios finales en la provincia de Cotopaxi. Los aisladores eléctricos son componentes críticos en el sistema eléctrico, y cualquier falla en su estructura puede generar daños en el sistema y afectar el suministro de energía eléctrica. Por lo tanto,

la investigación propuesta busca determinar las fugas de corriente y su relación con el ensayo de ultrasonido a causa de las condiciones de pérdida de rigidez dieléctrica, logrará mejorar el mantenimiento y la eficiencia en el sistema eléctrico de ELEPCO.

La investigación permitirá obtener información valiosa sobre el comportamiento de los aisladores eléctricos ante diferentes condiciones de operación, lo que ayudará a detectar posibles fallas ya mejorar su desempeño. Además, la simulación mediante el uso de softwares especializados permitirá evaluar el comportamiento de los aisladores en diferentes escenarios, lo que podrá determinar la mejor estrategia de mantenimiento para garantizar la seguridad y la calidad en el suministro de energía eléctrica.

Los beneficiarios directos de esta investigación son los usuarios finales de la provincia de Cotopaxi, quienes recibirán un suministro de energía eléctrica seguro y de calidad. Además, ELEPCO se beneficiará de la investigación mediante la mejora en el mantenimiento y la eficiencia en el sistema eléctrico, lo que permitirá reducir los costos asociados a la reparación y el reemplazo de equipos dañados.

La ventaja de usar softwares de simulación radica en que permiten evaluar el comportamiento de los aisladores eléctricos en diferentes escenarios, lo que permite determinar la mejor estrategia de mantenimiento. Por otro lado, los ensayos de ultrasonido, las inspecciones visuales y el uso de cámaras termográficas permiten detectar las fugas de corriente y las roturas en los aisladores eléctricos, lo que permite prevenir posibles fallas en el sistema y garantizar la seguridad en el suministro de energía eléctrica. En fin, la combinación de simulaciones y pruebas técnicas permite mejorar la eficiencia en el mantenimiento y garantizar la seguridad y la calidad en el suministro de energía eléctrica. La tecnificación en los procesos de evaluación de los análisis predictivo del correcto funcionamiento de las redes eléctricas dan paso al uso de herramientas tecnológicas que permitan contrastar la información de cada uno de los ensayos siendo los mismos uno complementario con el otro.

## **Hipótesis**

Si se aplica la simulación de elementos finitos mediante el software libre FEMM en los aisladores de 69KV se podrá establecer la relación que existe entre la fuga de corriente por pérdida de aislamiento y la técnica de ultrasonido.

## CAPÍTULO I.

### FUNDAMENTACIÓN TEORICA

#### 1.1 Antecedentes de la investigación

La mejora en la Red de Subtransmisión Mulaló - La Cocha de 69 kV es fundamental para garantizar la seguridad y la calidad en el suministro de energía eléctrica en la región. Por lo tanto, es necesario invertir en el mantenimiento y la mejora de esta red, para evitar posibles fallas y garantizar la continuidad del servicio eléctrico. En este contexto, la investigación propuesta sobre la simulación de los aisladores de la línea de 69 kV Mulaló – La Cocha mediante análisis de elementos finitos, permitirá mejorar el mantenimiento y la eficiencia en el sistema eléctrico de ELEPCO, lo que redundará en una mayor seguridad y calidad en el suministro de energía eléctrica en la región.

En los diversos estudios y bibliografía que se relacionan con el tema “Modelamiento de los aisladores la línea de 69 kV Mulaló - La Cocha mediante análisis de elementos finitos, para determinar las fugas de corriente y su relación con el ensayo de ultrasonido a causa de condiciones de pérdida de rigidez dieléctrica” se tienen los siguientes:

- En la Universidad Politécnica Nacional, se presentó un proyecto de titulación denominado “Determinación del Voltaje en Cadenas de Aisladores de Torres de Transmisión mediante el Método de Elementos Finitos” (Morán, 2018) mencionando lo siguiente:

El estudio presenta la validación del método de los elementos finitos para determinar la distribución de voltaje en las cadenas de aisladores de torres de transmisión. El uso de capacitancias en serie para representar una cadena de aisladores no toma en cuenta factores geométricos ni propiedades eléctricas del material dispuesto en un aislador. El software FEMM es utilizado para realizar un estudio electrostático del modelo de aisladores, estimando una distancia para la

ubicación de un margen de referencia de voltaje nulo con el objetivo de observar la máxima influencia del campo eléctrico generado por las líneas de transmisión sobre las cadenas de aisladores en la torre. El estudio se enfocó en niveles de voltaje de 138 y 230 kV para aisladores de vidrio y porcelana.

- En la Universidad Técnica de Cotopaxi, se presentó un proyecto de titulación denominado “Evaluación de radiaciones no ionizantes generadas por las líneas de energía eléctrica de subtransmisión a 69 kV, en el eje de la subestación La Península - subestación Loreto ubicado en la ciudad de Ambato” (Tiban & Yanchapaxi, 2022) mencionando lo siguiente:

El estudio realizado evaluó las radiaciones no ionizantes por las líneas de energía eléctrica de subtransmisión a 69 kV. Se realizó una recopilación bibliográfica para obtener información sobre el campo eléctrico y campo magnético en una línea de transmisión y se identificaron y valoraron los campos electromagnéticos de acuerdo a la normativa establecida.

Para llevar a cabo el estudio, se recopilaron datos en los puntos referenciados utilizando el equipo EMF 450 METER, que indicaba la cantidad de ondas generadas de CEM en los puntos analizados en la línea de subtransmisión. Además, se realizó de forma analítica el cálculo de radiaciones no ionizantes en las líneas de energía eléctrica, facilitando el cálculo con la ayuda del software EXCEL y se simuló las ondas de campo eléctrico y campo magnético de la línea de subtransmisión mediante el software FEMM.

Luego de contrastar los datos obtenidos en la simulación con los datos obtenidos en las mediciones, se evaluaron los resultados en base a las normas establecidas en las zonas donde se analizó los campos electromagnéticos generados por las líneas de subtransmisión. De esta forma, se pudo observar si los niveles de los CEM estaban dentro de las normativas establecidas y se realizó una validación de los datos obtenidos.

- En la Universidad Politécnica Salesiana, se presentó un proyecto de titulación denominado “Determinación y análisis de descargas parciales

mediante sensores de emisiones acústicas en aisladores tipo PIN 55 5” (Coronel & Chalco, 2022) mencionando lo siguiente:

En el estudio, se llevó a cabo la determinación y análisis de descargas parciales en aisladores tipo PIN 55 5 mediante sensores de emisiones acústicas. Para ello, se realizaron pruebas en campo utilizando sensores de emisiones acústicas y se analizaron las señales obtenidas para detectar la presencia de descargas parciales en los aisladores. Además, se realizaron pruebas de laboratorio para validar los resultados obtenidos en campo.

Los resultados obtenidos en el permitieron identificar la presencia de estudio de descargas parciales en los aisladores tipo PIN 55 5 y se prolongará la ubicación exacta de las mismas. Además, se analizó la relación entre la presencia de descargas parciales y los niveles de contaminación en los aisladores. En base a los resultados obtenidos, se realizó una evaluación del estado de los aisladores y se propusieron medidas para mejorar su mantenimiento y evitar futuras fallas en el sistema eléctrico.

## **FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN**

### **2.1 Torres de subtransmisión**

Las torres de subtransmisión de 69 kV son elementos fundamentales en el sistema eléctrico de potencia, ya que se encargan de transportar la energía eléctrica desde la subestación de transmisión hasta la subestación de distribución. Estas torres pueden tener diferentes diseños y tamaños, dependiendo de la configuración del sistema eléctrico en el que se utilice. (Calderon & Nieves, 2022)

En general, las torres de subtransmisión de 69 kV están diseñadas para soportar grandes cargas de energía eléctrica y para resistir las condiciones climáticas adversas, como fuertes vientos y lluvias intensas. Además, su estructura debe ser lo suficientemente robusta y resistente para soportar los impactos causados por posibles descargas eléctricas o colisiones con objetos externos.

El mantenimiento y la inspección regular de las torres de subtransmisión de 69 kV son esenciales para garantizar su correcto funcionamiento y prolongar su vida útil.

La detección temprana de posibles fallas o daños en estas torres puede evitar situaciones de emergencia y minimizar el riesgo de interrupciones en el suministro de energía eléctrica. Por lo tanto, es fundamental contar con un plan de mantenimiento preventivo para garantizar la eficiencia y la seguridad del sistema eléctrico de potencia. (Zurita, 2020)



**Figura 1:** Torres de subtransmisión

### 2.1.1 Componentes de una torre de subtransmisión

Los componentes principales de una torre de subtransmisión típica incluyen:

- **Postes o pilares:** son las estructuras principales de la torre y sostienen todo el peso de la línea de transmisión eléctrica.
- **Brazos transversales:** son los componentes horizontales de la torre que se extienden desde los postes y sostienen los aisladores.
- **Aisladores:** son los componentes que separan eléctricamente los conductores de la torre de tierra. Están hechos de materiales que son resistentes al calor ya los arcos eléctricos.
- **Conductores:** son los cables de alta tensión que transportan la energía eléctrica a través de la torre. Están hechos de materiales conductores, como el aluminio o el cobre.
- **Grilletes:** son dispositivos de sujeción que se utilizan para unir los conductores a los aisladores.
- **Placas de base:** son las bases de la torre que se fijan al suelo oa una plataforma para proporcionar estabilidad.

- **Pernos y tuercas:** son los elementos de fijación que se utilizan para unir las diferentes partes de la torre entre sí.
- **Escaleras y plataformas:** son componentes que se utilizan para permitir a los trabajadores acceder a la torre para realizar el mantenimiento y las reparaciones necesarias.
- **Pararrayos:** son dispositivos que se utilizan para proteger la línea de transmisión eléctrica de los rayos y otros fenómenos atmosféricos.

## 2.2 Aisladores

Los aisladores eléctricos son componentes fundamentales en cualquier sistema eléctrico que se utiliza para separar eléctricamente los conductores de la línea de transmisión o distribución eléctrica de tierra o de otras estructuras. Estos aisladores están diseñados para soportar voltajes eléctricos muy altos sin permitir que la corriente eléctrica fluya a través de ellos y garantizan una barrera segura para prevenir el contacto directo con la corriente eléctrica. (Cruz & Yugcha, 2021)

Los aisladores eléctricos están hechos de materiales que son capaces de resistir altas temperaturas y arcos eléctricos, como vidrio, cerámica, porcelana, resinas sintéticas y polímeros. Estos materiales son cuidadosamente seleccionados para proporcionar la resistencia dieléctrica necesaria para evitar el paso de la corriente eléctrica.

Los aisladores eléctricos se utilizan en una variedad de aplicaciones, incluyendo líneas de transmisión de energía eléctrica de alta tensión, transformadores, interruptores de alta tensión, equipos de distribución de energía eléctrica y sistemas de generación de energía eléctrica. (Dioses & Hinostroza, 2019)



**Figura 2:** Aisladores eléctricos

### 2.2.1 Cadena de aisladores

En las líneas de transmisión aéreas debido al alto nivel de tensión eléctrica en la cual operan se hace necesario la utilización de cadenas de aisladores como el de la figura 3, constituidas por “n” aisladores en serie, donde el nivel de aislamiento de la cadena es siempre menor que “n” veces el aislamiento de un aislador solo, y esto es más notorio cuando el número de aisladores es grande. El largo de la cadena depende del voltaje, mientras más grande aumenta el largo de la cadena, para cumplir con la distancia mínima, y se requiere una altura mayor en las torres. (Fernandez, 2022)



**Figura 3:** Cadena de aisladores de retención

- **Cadena de Suspensión simple**

Empleado en la alineación y en los pequeños ángulos flexibles como se muestra en la figura 4.

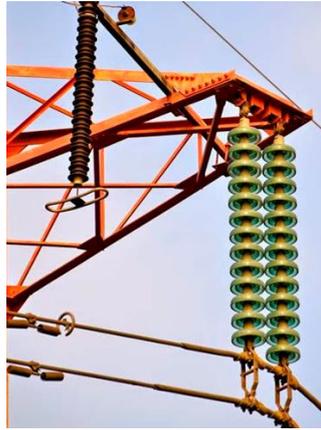


**Figura 4:** Cadena de aisladores de suspensión

- **Cadena de Suspensión Doble**

Utilizadas en algunos cruces importantes y en los ángulos flexibles mayores. El sistema más simple está formado por dos cadenas elementales como se muestra en

la figura 5, unidas por un balancín al estribo o a la horquilla de muñón fijado al brazo de habilitación



**Figura 5:** Cadena de aisladores de suspensión doble

### 2.2.2 Efectos corona en aisladores

El efecto corona es un fenómeno eléctrico que se produce en los conductores eléctricos de alta tensión cuando el voltaje en la línea de transmisión alcanza un nivel crítico. Este efecto se produce cuando la tensión eléctrica en la línea de transmisión supera el nivel de ionización del aire, lo que provoca la formación de pequeñas descargas eléctricas que pueden afectar negativamente el rendimiento de los aisladores. (Frias & Sanchez, 2020)

Cuando los aisladores están sometidos a voltajes muy altos, el efecto corona puede provocar la formación de pequeñas descargas eléctricas que ionizan el aire y crean una capa de ozono alrededor del aislador. Esta capa de ozono puede degradar el material que usa el aislador y reducir su capacidad para resistir la tensión eléctrica, lo que puede provocar una caída en el sistema de transmisión. (Garzón, 2018)



**Figura 6:** Aparición de efecto corona

Como se muestra en la figura 6, el efecto corona puede ser observado mediante la utilización de equipos que usan la luz ultravioleta para detectar la presencia de descargas eléctricas en la superficie de los aisladores. Este método es no destructivo que permite detectar y localizar puntos de fuga en los aisladores sin la necesidad de desmontarlos. Los equipos UV emiten una luz de longitud de onda específica que hace que las descargas eléctricas sean visibles en la superficie del aislador. Esto permite a los técnicos de mantenimiento identificar los puntos de fuga y tomar medidas para repararlos antes de que se produzca un fallo en el sistema de transmisión. (García & Agosto, 2019)



**Figura 7:** Equipo generador de UV para visualizar el efecto corona

### **2.2.3 Ultrasonidos en el mantenimiento de aisladores**

Los ultrasonidos se utilizan en el mantenimiento de equipos eléctricos, especialmente en aisladores, para detectar posibles problemas en su funcionamiento, como fugas de corriente, desgaste o daños en la superficie. Esta metodología se basa en la emisión de ondas sonoras de alta frecuencia que se propagan a través del material del aislador. Estas ondas sonoras son imperceptibles al oído humano, pero pueden ser detectadas por equipos especializados que se utilizan en el mantenimiento predictivo de los equipos eléctricos. (Mise, 2022)

Los equipos de ultrasonidos utilizados en el mantenimiento de aisladores son capaces de detectar posibles problemas en el aislador antes de que se produzcan fallos en el sistema de transmisión eléctrica. Por ejemplo, los equipos pueden detectar la presencia de fugas de corriente eléctrica en la superficie del aislador, lo

que indica que el material aislante puede estar dañado y necesite ser reparado o reemplazado.



**Figura 8:** Ensayo de ultrasonido en una línea de transmisión

Las inspecciones de ultrasonidos para detección de fallos eléctricos se aplican a:

- Líneas de transmisión y distribución de alta tensión
- Inspecciones predictivas de subestaciones
- Conmutadores
- Transformadores
- Cuadros eléctricos de media y baja tensión

Las anomalías en los circuitos eléctricos provocan emisiones ultrasónicas. Al escanear el área con los detectores de ultrasonidos se localizan los puntos donde se generan estas emisiones de ultrasonidos. (Morán, 2018)

#### **2.2.4 Efecto Tracking**

El efecto tracking es un fenómeno eléctrico que ocurre en los materiales aislantes utilizados en los equipos eléctricos, como los aisladores, cuando están sometidos a voltajes altos y humedad. Este fenómeno se produce cuando la humedad en el material aislante y la tensión eléctrica crean un camino conductor en la superficie del aislador, lo que puede provocar un cortocircuito eléctrico y un fallo en el sistema de transmisión. (Orrego, 2019)

El efecto tracking se produce cuando la humedad y la suciedad acumulada en la superficie del aislador se combinan con la tensión eléctrica, lo que crea una corriente eléctrica que fluye a lo largo de la superficie del aislador. Esta corriente eléctrica puede dañar el material aislante y provocar un fallo en el sistema de transmisión. (Meneses, 2020)

Los factores que contribuyen al efecto tracking incluyen la contaminación ambiental, la humedad, la sobrecarga eléctrica y la selección inadecuada de materiales aislantes. La prevención del efecto tracking implica la selección adecuada de materiales aislantes y la implementación de medidas de mantenimiento preventivo para reducir la humedad y la contaminación en la superficie del aislador.

La detección del efecto tracking en los aisladores se puede llevar a cabo mediante inspecciones visuales y pruebas eléctricas. Las inspecciones visuales pueden identificar la acumulación de humedad y suciedad en la superficie del aislador, mientras que las pruebas eléctricas pueden detectar la presencia de corriente eléctrica en la superficie del aislador. (Morán, 2018)

### **2.2.5 Arco eléctrico**

El arco es una corriente que fluye a través del aire y produce una descarga de plasma. El arco se escucha como un sonido violento con un comienzo y un desvanecimiento bruscos. El zumbido que se escucha en cuando se producen los efectos corona y tracking están ausentes. (Orrego, 2019)

La representación de la onda de señal del arco muestra picos de muy elevada amplitud que aparecen aleatoriamente en el tiempo. La principal diferencia es que con el tracking es que la duración de cada descarga es más larga, por lo que la representación de la señal de temporal del arco revela picos más anchos.



**Figura 9:** Arco eléctrico

### 2.2.6 Pérdida dieléctrica de un aislador

La pérdida dieléctrica es un fenómeno que ocurre en los materiales aislantes utilizados en los equipos eléctricos, como los aisladores, cuando están sometidos a un campo eléctrico de alta frecuencia. Este fenómeno se debe a la energía eléctrica que se disipa en forma de calor en el material aislante debido a la polarización eléctrica y las corrientes de conducción. (Ramírez & Cabezas, 2020)

La pérdida dieléctrica se puede medir mediante la tangente delta ( $\tan \delta$ ), que es una medida de la relación entre la energía disipada por el material aislante y la energía almacenada en el campo eléctrico. La tangente delta se define como la razón entre la componente resistiva (R) y la componente reactiva (X) de la impedancia dieléctrica del material aislante:

$$\tan(\delta) = \frac{R}{X} \quad (1)$$

Donde:

- $\tan \delta$ : tangente delta
- R: componente resistiva de la impedancia dieléctrica
- X: componente reactiva de la impedancia dieléctrica

La pérdida dieléctrica también se puede calcular utilizando la fórmula de la energía disipada (W):

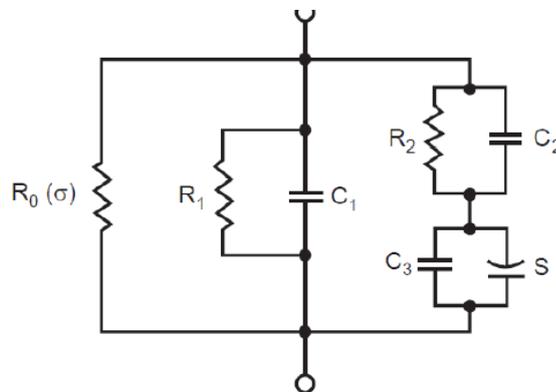
$$W = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C \cdot V^2 \cdot \tan(\delta) \quad (2)$$

Donde:

- $W$ : energía disipada
- $f$ : frecuencia del campo eléctrico
- $C$ : capacitancia del material aislante
- $V$ : voltaje del campo eléctrico

A continuación, se enlistan diferentes tipos de pérdidas que pueden ser asociados con las pérdidas dieléctricas de un aislador:

- Pérdida de conducción  $P_c$  por conducción iónica o electrónica. El dieléctrico, tiene un valor de  $\sigma$  como conductividad.
- Pérdida de polarización  $P_p$  por capa límite de orientación o polarización por deformación.
- Pérdida de ionización  $P_i$  por descargas parciales de zonas internas o externas.



**Figura 10:** Circuito equivalente de un dieléctrico

La figura 10 muestra un circuito equivalente de un dieléctrico con pérdida por conducción, polarización y descargas parciales. Un dieléctrico ideal puede representarse por un condensador puro  $C_1$ , las pérdidas de conducción pueden ser tomadas en cuenta por una resistencia  $R_0$  ( $\sigma$ ) en paralelo. Las pérdidas por polarización producen un componente real de la corriente de desplazamiento que es simulada por la resistencia  $R_1$ . Las descargas parciales de pulso son simuladas por la rama de la mano derecha.  $C_3$  es la capacitancia del vacío y "S" es la chispa que se dispara durante la descarga de PD y la recarga repetida de  $C_3$  se realiza mediante una resistencia  $R_2$  o un condensador  $C_2$ . (Tiban & Yanchapaxi, 2022)

### **2.2.7 Contaminación de aisladores**

La contaminación de los aisladores es un fenómeno que ocurre en los equipos eléctricos, como los aisladores, cuando se acumula suciedad, polvo, humedad u otros contaminantes en su superficie. Este fenómeno puede provocar una disminución en la capacidad del aislador para soportar voltajes eléctricos, lo que puede aumentar el riesgo de fallos en el sistema de transmisión eléctrica.

Sin embargo, cuando los aisladores se contaminan, su capacidad para soportar voltajes eléctricos se ve comprometida. La acumulación de contaminantes en la superficie del aislador puede crear un camino conductor para la corriente eléctrica. Esto puede provocar la aparición de corrientes de fuga y otros problemas eléctricos que pueden afectar la seguridad y fiabilidad del sistema de transmisión eléctrica.

La prevención y el mantenimiento adecuados son importantes para reducir el riesgo de contaminación de los aisladores y garantizar la seguridad y fiabilidad del sistema de transmisión eléctrica. Esto puede incluir la selección adecuada de materiales aislantes, la implementación de medidas de limpieza y mantenimiento preventivo, y la inspección regular de los aisladores para detectar y reparar cualquier problema de contaminación antes de que se produzca un fallo en el sistema de transmisión eléctrica. (Meneses, 2020)

De acuerdo a las normas IEC-60815-1 (IEC, 2008), en general se puede clasificar a la contaminación que se deposita sobre los aisladores en dos grandes tipos:

- Contaminación tipo A o tipo capa sólida
- Contaminación tipo B o tipo niebla salina

#### **2.2.7.1 Contaminación tipo Solida o tipo A**

La contaminación tipo A se produce generalmente en áreas secas y polvorrientas, donde el polvo y la suciedad pueden acumularse fácilmente en la superficie de los aisladores. La acumulación de esta capa sólida puede crear un camino conductor para la corriente eléctrica y provocar una disminución en la resistencia eléctrica del aislador. (Zurita, 2020)

La contaminación tipo A se puede medir utilizando el índice de contaminación de los aisladores (IAC), que es una medida de la cantidad de contaminación en la superficie del aislador. El IAC se determina mediante la medición de la resistencia eléctrica del aislador y se compara con la resistencia eléctrica del mismo aislador en condiciones limpias. (Ureña & Lopez, 2022)

#### **2.2.7.2 Contaminación tipo B o niebla salina**

La contaminación tipo B se produce en áreas cercanas al mar, donde la presencia de sal en el aire es alta, y también puede ocurrir en áreas costeras donde se utilizan productos químicos para el control de la vegetación. La exposición prolongada a la niebla salina puede provocar la formación de una capa conductora en la superficie del aislador, lo que puede reducir su resistencia eléctrica y aumentar el riesgo de fallo en el sistema de transmisión eléctrica. (Tiban & Yanchapaxi, 2022)

La contaminación tipo B se puede medir utilizando el índice de contaminación de los aisladores (IAC), que es una medida de la cantidad de contaminación en la superficie del aislador. El IAC se determina mediante la medición de la resistencia eléctrica del aislador y se compara con la resistencia eléctrica del mismo aislador en condiciones limpias.

### **2.3 Flashover**

El efecto flashover es un fenómeno eléctrico que puede ocurrir en los aisladores eléctricos cuando se produce una descarga eléctrica en su superficie. Esta descarga eléctrica puede provocar la ionización del aire que rodea al aislador, lo que crea un camino conductor para la corriente eléctrica y puede provocar una disminución en la capacidad del aislador para soportar voltajes eléctricos. (Orrego, 2019)

Este fenómeno puede tener consecuencias graves en el sistema de transmisión eléctrica, ya que puede provocar una interrupción del suministro eléctrico a los usuarios y aumentar el riesgo de daños en los equipos eléctricos. Además, el efecto flashover puede provocar la formación de arcos eléctricos, que pueden ser peligrosos para las personas que trabajan en el área de la línea de transmisión.



**Figura 11:** Efecto flashover

La prevención del efecto flashover es importante para garantizar la seguridad y fiabilidad del sistema de transmisión eléctrica. Esto puede incluir la selección adecuada de los aisladores, la implementación de medidas de limpieza y mantenimiento preventivo, la detección y reparación de defectos en el material aislante, y la protección contra sobrevoltajes y cargas eléctricas estáticas.

### **2.3.1 Desarrollo de Flashover**

Existen grandes números de parámetros que intervienen en el proceso de contorneo de los aisladores contaminados, estos son: la conductividad o resistividad de la capa superficial del contaminante, el contenido de agua y su distribución espacial, la turbulencia del aire, las propiedades de la superficie y estructura química de la capa superficial. El efecto de estos parámetros y las distintas combinaciones de ellos ha sido estudiado parcialmente, y la mayoría de las ocasiones de forma empírica. El contorneo se produce bajo ciertas condiciones adecuadas que se indican a continuación. (Fernandez, 2022)

El efecto flashover puede ocurrir cuando la tensión eléctrica en la superficie del aislador supera la tensión de ruptura dieléctrica del material aislante. La tensión de ruptura dieléctrica es la cantidad mínima de voltaje necesaria para ionizar el aire y crear un camino conductor para la corriente eléctrica.

$$V = k \cdot \frac{d}{t} \quad (2)$$

Donde:

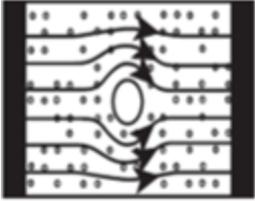
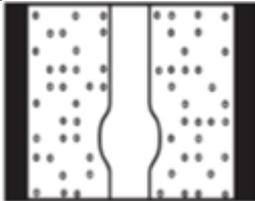
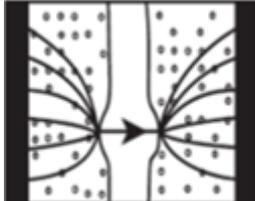
- $V$  es la tensión de ruptura dieléctrica en voltios (V)
- $k$  es la constante dieléctrica del material aislante
- $d$  es la distancia entre los conductores en metros (m)
- $t$  es el espesor del material aislante en metros (m)

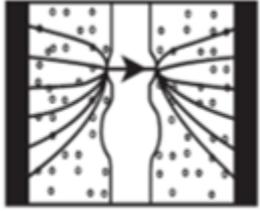
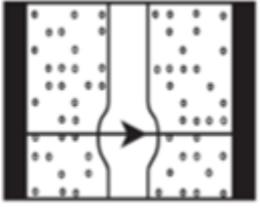
### 2.3.2 Proceso de formación de un arco en una superficie contaminada de fácil humedecimiento

Este proceso es el resultado de la ionización del aire en una zona de alta tensión eléctrica debido a la presencia de contaminantes conductores en la superficie del aislador, lo que puede provocar una disminución en la capacidad del aislador para soportar voltajes eléctricos y aumentar el riesgo de fallos en el sistema eléctrico. (García & Agosto, 2019)

**Tabla 2**

*Formación de arco*

<p>Flujo uniforme de corriente de fuga en la capa de contaminación húmeda</p>	
<p>Calentamiento local de la corriente de fuga forma un punto seco</p>	
<p>Las zonas secas crecen y se unen, formando una banda seca, que interrumpe la corriente</p>	
<p>Arco local a través de la banda seca, hace que las regiones de alta densidad de corriente en las raíces del arco</p>	

<p>La banda seca crece en las raíces del arco hasta que se reducen las rayas eléctricas; el arco migra lateralmente</p>	
<p>El arco crece a lo largo de la superficie húmeda hasta alcanzar una longitud crítica, produciendo una descarga eléctrica</p>	

### 2.2.3 Proceso de formación de un arco en una superficie contaminada de difícil humedecimiento

El proceso de formación de un arco en una superficie contaminada de difícil humedecimiento es similar al proceso en una superficie de fácil humedecimiento. Sin embargo, en este caso, los contaminantes no conductores pueden acumularse en la superficie del aislador, lo que hace que la superficie sea más difícil de humedecer y aumenta el riesgo de formación de arcos eléctricos, lo que puede provocar fallos en el sistema eléctrico. (García & Agosto, 2019)

La principal diferencia entre el proceso de formación de un arco en una superficie contaminada de fácil humedecimiento y en una superficie contaminada de difícil humedecimiento es el tipo de contaminantes que se acumulan en la superficie del aislador. En una superficie contaminada de fácil humedecimiento, los contaminantes son conductores y pueden humedecerse fácilmente en presencia de humedad o lluvia, lo que aumenta la posibilidad de crear un camino conductor para la corriente eléctrica y formar un arco eléctrico. (Garzón, 2018)

En cambio, en una superficie contaminada de difícil humedecimiento, los contaminantes son no conductores y pueden ser más difíciles de humedecer. La acumulación de estos contaminantes puede provocar una acumulación de cargas eléctricas estáticas en la superficie del aislador, lo que aumenta el riesgo de formación de arcos eléctricos. (Garzón, 2018)

### 2.3.3 Corriente de fuga

La corriente de fuga es una corriente eléctrica que fluye a través del material aislante de un sistema eléctrico, en lugar de fluir por los conductores eléctricos designados. La corriente de fuga puede ser causada por varios factores, como la contaminación de los aisladores, la presencia de defectos en el material aislante, la exposición a sobrevoltajes o la presencia de cargas eléctricas estáticas. (Pinzas & Silvera, 2021)

La corriente de fuga puede tener consecuencias negativas en la seguridad y fiabilidad del sistema eléctrico. Por ejemplo, la corriente de fuga puede provocar la degradación del material aislante, lo que puede reducir su capacidad para soportar voltajes eléctricos y aumentar el riesgo de fallos en el sistema eléctrico. Además, la corriente de fuga puede causar interferencias electromagnéticas que afectan el funcionamiento de otros equipos eléctricos cercanos.

La medición y el control de la corriente de fuga son importantes para garantizar la seguridad y fiabilidad del sistema eléctrico. Esto puede incluir la implementación de medidas de limpieza y mantenimiento preventivo, la detección y reparación de defectos en el material aislante, y la protección contra sobrevoltajes y cargas eléctricas estáticas. Además, se pueden utilizar dispositivos de medición y monitoreo para detectar y controlar la corriente de fuga en tiempo real. (Fernandez, 2022)

En la siguiente tabla se presentan los valores máximos que pueden tener los diferentes tipos de aisladores de corriente de fuga.

**Tabla 3**

*Corriente máxima de fuga*

<b>Tipo de aislador</b>	<b>Corriente de fuga max.</b>
Porcelana	5 mA
Vidrio	2 mA
Polímero	1 mA

La corriente de fuga se puede calcular utilizando la ley de Gauss que establece que la corriente de fuga es proporcional al gradiente eléctrico en la superficie del aislador.

$$I = k \cdot E \quad (3)$$

Donde:

- I es la corriente de fuga en amperios (A)
- k es una constante dieléctrica que depende de las características del material aislante y del medio ambiente
- E es el gradiente eléctrico en la superficie del aislador en voltios por metro (V/m)

El gradiente eléctrico se basa en la distancia entre la superficie del aislador y el conductor y el voltaje aplicado:

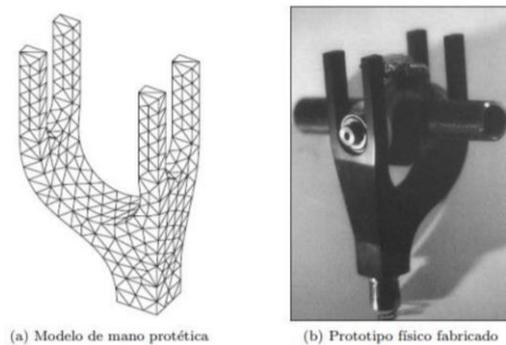
$$E = \frac{V}{d} \quad (4)$$

Donde:

- V es el voltaje en voltios (V)
- d es la distancia entre la superficie del aislador y el conductor en metros (m)

#### **2.4 Método de elemento finitos (FEM)**

El método de elemento finito es un método numérico general para la aproximación de soluciones de ecuaciones diferenciales (ordinarias y parciales) muy utilizado en diversos problemas principalmente de ingeniería y física–matemática aplicada. Típicamente el método de los elementos finitos se programa computacionalmente como se muestra en la figura 12-a, para calcular el campo de la variable dependiente del problema real (ver figura 12-b) y, posteriormente, a través de relaciones generales y constitutivas se calculan las variables secundarias de interés luego que se ha obtenido. (Calderon & Nieves, 2022)



**Figura 12:** Modelo de elemento finito

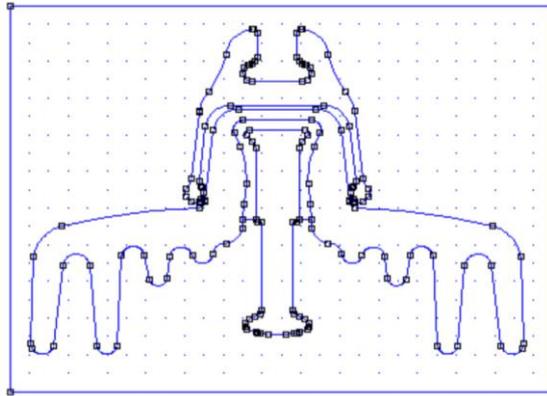
El método de los elementos finitos es muy usado debido a su generalidad y a la facilidad de introducir dominios de cálculo complejos (en dos o tres dimensiones). Además, el método es fácilmente adaptable a problemas de transmisión de calor, de mecánica de fluidos para calcular campos de velocidades y presiones (fluido dinámico) o de campo electromagnético. Dada la imposibilidad práctica de encontrar la solución. (Coronel & Chalco, 2022)

El método FEM se utiliza comúnmente en el diseño y análisis de aisladores eléctricos, esta simulación permite a los ingenieros modelar y analizar el comportamiento mecánico y eléctrico de los aisladores en diferentes condiciones operativas y ambientales. Por ejemplo, se pueden simular las cargas eléctricas, las vibraciones del viento, la acumulación de contaminantes y la humedad en los aisladores para evaluar la resistencia y la durabilidad del aislador en diferentes situaciones. (Dioses & Hinostroza, 2019)

Por otra parte, la simulación FEM también puede ayudar a optimizar el diseño del aislador para mejorar su rendimiento eléctrico y mecánico al mismo tiempo que se minimiza el costo de producción. Los resultados de la simulación FEM pueden ser validados mediante pruebas físicas en el laboratorio y en el campo para garantizar la precisión y la fiabilidad de los resultados. En general, la aplicación de esta simulación en el diseño y análisis de aisladores eléctricos es una herramienta valiosa para mejorar la seguridad y la confiabilidad de las líneas eléctricas y garantizar la continuidad del suministro de energía eléctrica.

### 2.4.1 Pre Procesamiento

El preprocesamiento es una etapa importante en la simulación mediante métodos de elementos finitos (FEM), ya que implica la preparación y el modelado de la estructura o componente que se va a analizar.



**Figura 13:** Pre-procesamiento

Durante esta etapa, se definen las condiciones de carga, las condiciones de contorno y las propiedades del material, y se crea un modelo de elementos finitos adecuado para la simulación FEA. La calidad del preprocesamiento afectará significativamente la precisión y la confiabilidad de los resultados de la simulación. (Cruz & Yugcha, 2021) En la siguiente tabla se especifica los pasos típicos del preprocesamiento en la simulación FEM:

**Tabla 4**

*Etapa de pre-procesamiento*

<b>Paso</b>	<b>Descripción</b>
Definición del problema	Identificar los objetivos y los requisitos del análisis FEA
Selección de software	Seleccionar el software FEA adecuado para el problema a resolver
Creación de geometría	Crear o importar la geometría de la estructura o componente que se va a analizar
Definición de materiales	Definir las propiedades del material, como la densidad, el módulo de elasticidad, el

	coeficiente de Poisson y la conductividad térmica
Generación de malla	Generar una malla de elementos finitos adecuada para la simulación FEA
Definición de las condiciones de contorno	Definir las condiciones de contorno, como las restricciones y las cargas, que se aplicarán en la simulación FEA
Asignación de propiedades del material	Asignar las propiedades del material a los elementos finitos en la malla
Verificación del modelo	Verificar la calidad del modelo de elementos finitos, como la densidad de la malla y la precisión de las condiciones de contorno
Exportación del modelo	Exportar el modelo de elementos finitos para su análisis en el software FEA

#### 2.4.2 Procesamiento o Solución

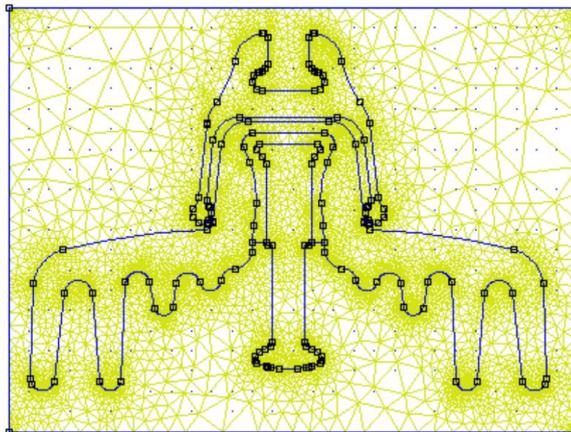
El procesamiento es la etapa en la que se realiza la simulación mediante métodos de elementos finitos en sí misma. Durante esta etapa, se resuelve el modelo de elementos finitos preparado en el preprocesamiento y se obtienen los resultados del análisis. La calidad del procesamiento es crucial para obtener resultados precisos y confiables. (Jiménez & Canelos, 2021) En la siguiente tabla se muestran los pasos típicos del procesamiento en la simulación:

**Tabla 5**

*Etapa de procesamiento*

<b>Paso</b>	<b>Descripción</b>
Selección de las opciones de análisis	Seleccionar las opciones de análisis adecuadas para el problema a resolver, como el tipo de análisis, la formulación matemática y el tipo de solución
Creación de la matriz de rigidez	Crear la matriz de rigidez del modelo de elementos finitos

Aplicación de las condiciones de contorno	Aplicar las condiciones de contorno definidas en el preprocesamiento al modelo de elementos finitos
Solución del sistema de ecuaciones	Resolver el sistema de ecuaciones obtenido a partir de la matriz de rigidez y las condiciones de contorno
Cálculo de los resultados	Calcular los resultados del análisis, como las deformaciones, las tensiones, las cargas y las temperaturas
Verificación de la solución	Verificar la precisión de la solución mediante la comparación de los resultados obtenidos con los valores teóricos o los datos experimentales
Evaluación de la calidad del modelo	Evaluar la calidad del modelo de elementos finitos y la precisión de las condiciones de contorno
Optimización del modelo	Optimizar el modelo de elementos finitos para mejorar la precisión y la eficiencia del análisis

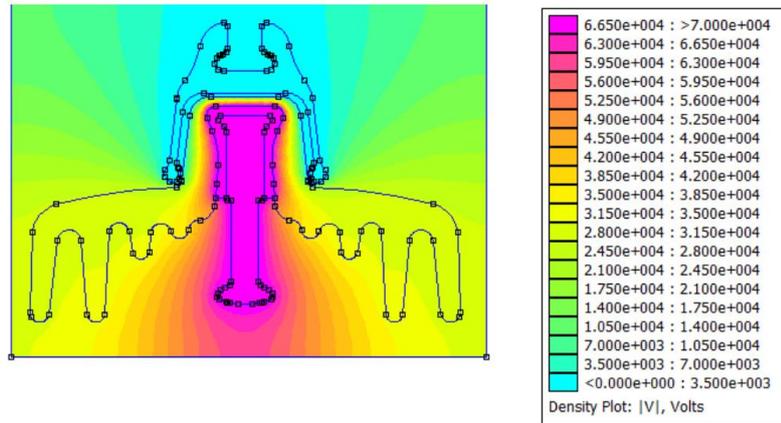


**Figura 14:** Procesamiento

### 2.4.3 Post-procesado

El post-procesamiento es la etapa final en la simulación mediante métodos de elementos finitos. Durante esta etapa, se analizan y visualizan los resultados obtenidos en el procesamiento y se interpretan para tomar decisiones de diseño o resolver problemas en la estructura o componente analizado. La calidad del post-

procesamiento es crucial para una interpretación precisa y una utilización efectiva de los resultados. (Frias & Sanchez, 2020)



**Figura 15:** Post Procesamiento

Puesto que los datos de la solución pueden manipularse de muchas maneras en la fase final de post-procesamiento, el objetivo más importante es aplicar de modo legítimo el juicio de ingeniería con el objetivo de determinar las condiciones bajo las cuales los resultados de la solución obtenida son físicamente razonables.

En la siguiente tabla se presentan los pasos típicos del post-procesamiento en la simulación FEM.

**Tabla 6**

*Etapa de post-procesamiento*

<b>Paso</b>	<b>Descripción</b>
Visualización de los resultados	Visualizar los resultados del análisis, como las deformaciones, las tensiones, las cargas y las temperaturas, en diferentes formatos, como gráficos o animaciones
Análisis de la calidad de los resultados	Analizar la calidad de los resultados obtenidos en el procesamiento en función de la precisión de las condiciones de contorno y la calidad del modelo de elementos finitos

Evaluación del rendimiento	Evaluar el rendimiento del componente o estructura analizada en función de los resultados obtenidos
Interpretación de los resultados	Interpretar los resultados obtenidos y utilizarlos para tomar decisiones de diseño o para resolver problemas en la estructura o componente analizado
Optimización del diseño	Utilizar los resultados obtenidos para optimizar el diseño del componente o estructura analizada
Verificación y validación	Verificar y validar los resultados de la simulación mediante la comparación con los datos experimentales o las soluciones teóricas
Documentación	Documentar los resultados obtenidos y las decisiones de diseño tomadas

#### 2.4.4 Finit Element Method Magnetics FEMM

FEMM (Finite Element Method Magnetics) es un software de simulación gratuito y de código abierto que se utiliza para analizar problemas magnéticos, eléctricos y térmicos mediante métodos de elementos finitos. FEMM es ampliamente utilizado en la industria y la academia para el diseño y análisis de dispositivos electromagnéticos, como motores, transformadores, sensores y actuadores. (Martínez & Sepulveda, 2021)

En la siguiente tabla se presentan algunas simulaciones disponibles en FEMM:

**Tabla 7**

*Software FEMM*

<b>Simulación</b>	<b>Descripción</b>
Análisis magnético	Simulación de campos magnéticos, líneas de flujo magnético y fuerzas en dispositivos magnéticos

	como motores eléctricos, transformadores y solenoides
Análisis eléctrico	Simulación de campos eléctricos y potenciales en dispositivos eléctricos como capacitores, inductores y circuitos eléctricos
Análisis térmico	Simulación de la distribución de temperatura en dispositivos eléctricos y mecánicos, como motores eléctricos, transformadores y componentes electrónicos
Análisis de fuerza electromagnética	Simulación de la fuerza electromagnética en dispositivos como actuadores electromagnéticos y motores lineales
Análisis de resonancia	Simulación de la respuesta en frecuencia y el comportamiento resonante de dispositivos como antenas, circuitos resonantes y sistemas acústicos
Análisis de eddy current	Simulación del flujo de corriente de Foucault inducido en materiales conductores en campos magnéticos variables

## CAPITULO II METODOLOGÍA

### 3.1 Introducción

El presente capítulo se enfoca a los métodos y condiciones experimentales que son utilizados para desarrollar la modelación de los aisladores de la línea de 69 kV (Mulaló – La Cocha) con la finalidad de comprender el comportamiento de la corriente eléctrica y su incidencia con el ultrasonido a causada por las pérdidas de rigidez dieléctrica. Esta modelación se ejecuta utilizando el métodos de los Elementos Finitos, que es una técnica numérica que permite modelar de manera detallada el comportamiento de estructuras complejas. Este método se aplica sobre el modelo del aislador obteniendo respuestas ante las condiciones de operación.

En la siguiente figura se muestra un esquema metodológico en donde da inicio con la definición del objeto de estudio, que para esta investigación son los aisladores de la línea de 69 kV, seguidamente se tiene una formulación de hipótesis en donde se menciona que: “Al aplicar una simulación utilizando elementos finitos para determinar fugas de corriente en los aisladores se podrá establecer una relación con la técnica de ultrasonido y determinar una pérdida de aislamiento”.

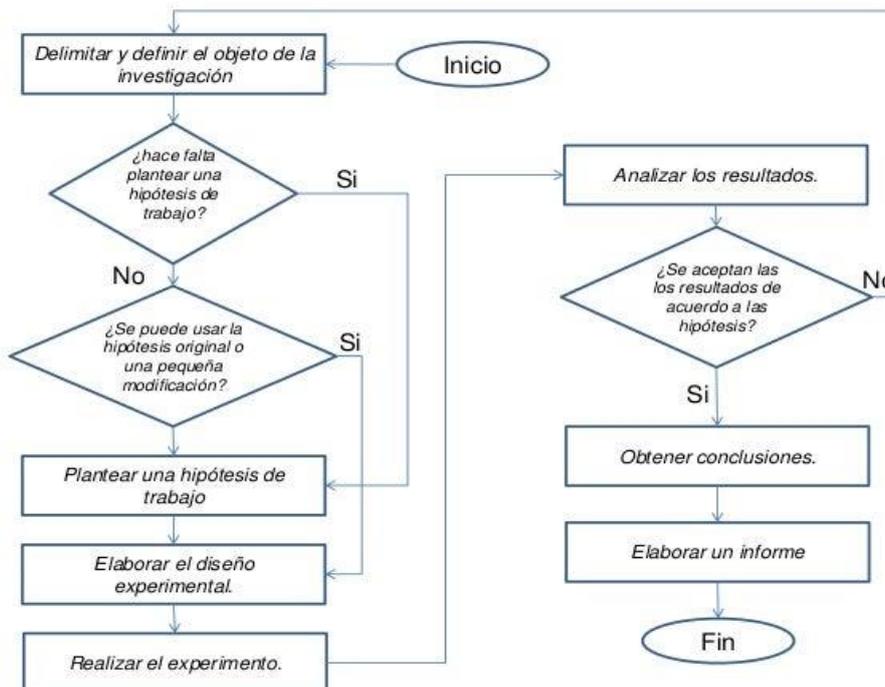


Figura 16: Esquema metodológico

Continuando con el análisis metodológico, se presenta la elaboración de un diseño experimental, es decir mediante el uso de herramientas computacionales se debe realizar la modelación de los aisladores de la línea de 69 kV, para este diseño se utilizan programas como AutoCAD, SolidWorks, Inventor, entre otros.

Para la ejecución del experimento se debe considerar nuevamente el uso de herramientas computacionales para desarrollar la simulación de estos aisladores, software como SolidWorks, Matlab, FEMM, entre otros, son alternativas viables para la obtención de resultados y el análisis de los resultados. Finalmente se puede obtener las conclusiones a partir de estos resultados, dando por terminado el esquema metodológico que menciona la figura 2.

### **3.2 Tipos de investigación**

Para la ejecución del presente proyecto de investigación se parte de una investigación bibliográfica que establece las condiciones técnicas de operación y funcionamiento de las líneas de transmisión, así como también las condiciones técnicas de los aisladores para determinar mediante una investigación de campo los efectos de ultrasonido e inspección visual y su relación con la pérdida de aislamiento superficial de los aisladores.

#### **3.2.1 Investigación bibliográfica**

Se basa en el estudio y análisis de fuentes bibliográficas como: libros, artículos científicos, proyectos de titulación, informes técnicos, entre otros, para obtener información relevante y actualizada sobre un tema específico, permitiendo analizarla críticamente y sintetizarla en un nuevo contexto. (Cruz & Yugcha, 2021)

Dentro del proyecto, esta investigación es útil para obtener información sobre los aisladores eléctricos, sus características, propiedades, materiales y métodos de fabricación, así como también para conocer los principios fundamentales del análisis de elementos finitos y el uso de ensayos de ultrasonido.

#### **3.2.2 Investigación de campo**

Esta investigación se realiza en el lugar donde ocurren los eventos o fenómenos que se están estudiando, con la finalidad de recolectar datos de manera directa y

observar los hechos en su contexto natural (Leyva, 2020). En el proyecto, esta investigación involucra la inspección técnica de los aisladores de la línea de 69 kV para obtener datos como: la corriente eléctrica y el comportamiento mecánico de los aisladores en condiciones reales de operación.

Además, se incluyen la ejecución de ensayos de ultrasonido en los aisladores para detectar posibles pérdidas de rigidez dieléctrica. Estos ensayos son realizados en diferentes condiciones ambientales y de carga eléctrica para evaluar el impacto de estas variables en el comportamiento de los aisladores.

### **3.2.3 Investigación experimental**

Esta investigación implica la manipulación de una o más variables independientes para observar los efectos que tienen sobre una o más variables dependientes en un entorno controlado. En una investigación experimental, se busca establecer una relación de causa y efecto entre las variables independientes y las variables dependientes. (Herrera & Mullo, 2023)

Dentro del proyecto, esta investigación involucra el sometimiento de los aisladores a diferentes condiciones de carga eléctrica y pérdida de rigidez dieléctrica en un entorno controlado. Para ellos se utilizan herramientas computacionales como software de modelamiento por elementos finitos para simular el comportamiento de los aisladores y predecir su respuesta bajo diferentes condiciones de carga eléctrica y pérdida de rigidez dieléctrica.

### **3.3 Matriz de operacionalización de variables**

Esta herramienta utilizada en la investigación permite establecer una relación clara entre las definiciones teóricas y las variables de medición para poder analizar y evaluar el fenómeno de estudio. Como variable independiente se presenta a la modelación de los aisladores de la línea de subtransmisión de 69 kV, mientras que para la variable dependiente se tiene la fugas de corriente y los ensayos de ultrasonido por la pérdida de rigidez eléctrica.

A continuación, se presenta una tabla por cada variable, en donde se muestra cómo se va a medir cada una de las variables definidas en el estudio, esta tabla incluye una su el ítem de medición, técnicas e instrumentos.

### 3.3.1 Variable independiente

**Tabla 8**

*Variable independiente*

<b>Variables</b>	<b>Ítem</b>	<b>Técnicas</b>	<b>Instrumentos</b>
Pérdida por rigidez dieléctrica	-	Inspección	--
Carga eléctrica	A	Medición	Medidor de corriente eléctrica
Geometría de los aisladores	mm	Dimensión	Pie de rey
Diseño CAD de aisladores	mm	Dimensión	Software

### 3.3.2 Variable dependiente

**Tabla 9**

*Variable dependiente*

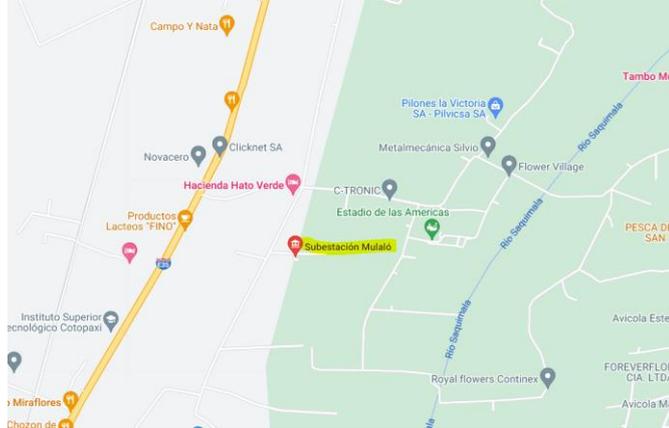
<b>Variables</b>	<b>Ítem</b>	<b>Técnicas</b>	<b>Instrumentos</b>
Fuga de corriente	A	Cálculo	Software
Comportamiento mecánico	--	Cálculo	Software
Propiedades eléctricas de los aisladores	-	Ensayo	Equipo para ensayos de ultrasonido

### 3.4 Información del lugar de estudio

La línea de subtransmisión de 69 kV comprende desde la subestación de Mulaló hasta la subestación de La Cocha ubicada en la provincia de Cotopaxi, ciudad de Latacunga. Esta línea energizada es parte del sistema eléctrico nacional y se encarga de distribuir la energía eléctrica a diferentes partes de la ciudad de Latacunga y sus alrededores.

La línea de subtransmisión de 69 kV es una estructura de alta tensión y está compuesta por una serie de torres y aisladores que permiten la transmisión segura y

eficiente de la energía eléctrica a través de la línea. Además, cuenta con sistemas de protección y control que garantizan la estabilidad y la continuidad del suministro eléctrico.



**Figura 17:** Subestación Mulaló Google Maps

**Tabla 10**

*Datos geográficos*

Latitud	-0,991200
Longitud	-76,6275
Altitud	2943 msnm
Zona horaria	UTC/GMT-5

### 3.4.1 Subestación Mulaló

La subestación Mulaló pertenece a la Empresa Eléctrica Provincial Cotopaxi ELEPCO S.A., tiene la finalidad de prestación del servicio público de electricidad, esta subestación es uno de los 4 nodos de esta empresa que pertenecen al Sistema Nacional Interconectado con una tensión eléctrica de 138/69 kV, brindando estabilidad eléctrica necesaria para la población.

La subestación de Mulaló abastece a las subestaciones La Cocha, San Rafael, El Calvario, Lasso, Sigchos y Novacero en la parte de la salida de la energía eléctrica, a su entrada está conectada a la línea de transmisión Pucará-Santa Rosa a un nivel de voltaje de 138 kV y cuenta con un transformador de 50/63 MVA, que reduce el

voltaje de los 138 kV a 69 kV, el mismo que dispone de regulación automática bajo carga.



**Figura 18:** Subestación Mulaló

En la siguiente tabla se puede observar las características eléctricas que presenta la subestación de Mulaló.

**Tabla 11**

*Características eléctricas de la S/E Mulaló*

<b>Elemento</b>	<b>Marca</b>	<b>Voltaje</b>	<b>Corriente</b>
Interruptor de gas	Mitsubishi	72,5 kV	600 A
Interruptor de gas	Mitsubishi	72,5 kV	600 A
Interruptor de gas	Mitsubishi	72,5 kV	600 A
Transformador de potencial	Nissan Electric	350 kV	--
Transformador de potencia	Mitsubishi	69 kV / 13,8 kV	--
Transformador de servicios auxiliares	Shikoku	13,8 kV / 220 V	--
Alimentador 1	Mitsubishi	13,8 kV	600/1200 A
Alimentador 2	Mitsubishi	13,8 kV	600/1200 A
Alimentador 4	Mitsubishi	13,8 kV	600/1200 A

Es importante realizar un estudio de campo de la línea de subtransmisión de 69 kV principalmente en el conjunto de aisladores, este estudio puede darse mediante una

inspección visual, pruebas eléctricas, análisis de datos, plan de acción y monitoreo continuo.

### 3.4.1.1 Identificación de la ruta de la línea

Se identifica la ruta que sigue la línea de subtransmisión, para ello se revisa la documentación como planos eléctricos y especificaciones técnicas para conocer a detalle el seguimiento de la línea. En la siguiente figura se puede observar un esquema eléctrico del nodo principal de Pucará que alimenta la subestación de Mulaló y que ésta a su vez alimenta con 69 kV a la subestación de La Cocha.

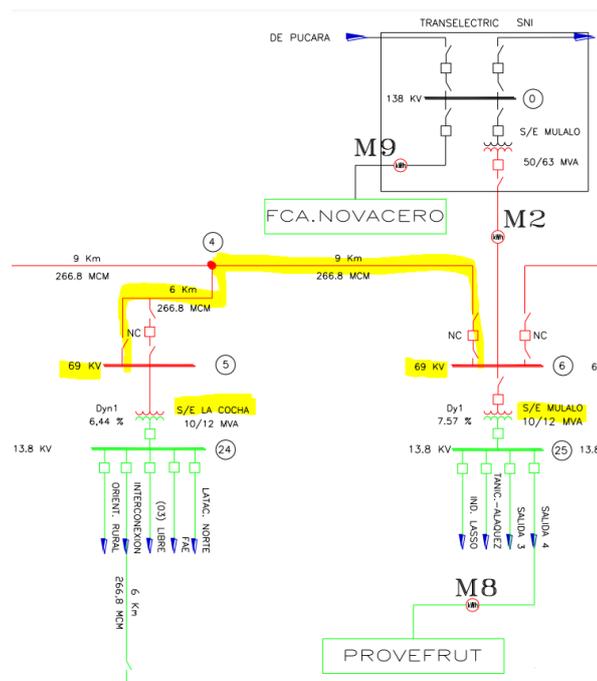


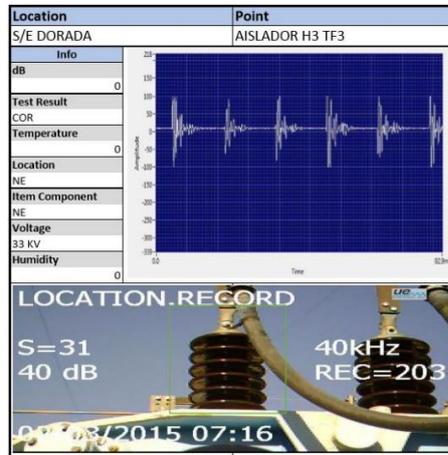
Figura 19: Plano eléctrico de la S/E Mulaló

### 3.4.1.2 Ensayo por ultrasonido

Este tipo de ensayo es una técnica muy utilizada para el desarrollo de mantenimientos preventivos. Su principio de funcionamiento radica en la emisión de ondas sonoras de alta frecuencia que se propagan a través del material y que son reflejadas por las discontinuidades o defectos presentes en el mismo.

En el caso de los aisladores, se puede localizar en que parte se presenta una fuga de corriente eléctrica por medio del ensayo por ultrasonido. Esta técnica se ejecuta mediante la colocación de un transductor ultrasónico en la superficie del aislador o

conjunto de aisladores a inspeccionar, este equipo emite ondas sonoras de alta frecuencia y recibe las ondas reflejadas que son convertidas en señales eléctricas. En la siguiente figura se puede observar un ensayo ultrasónico realizado a un conjunto de aisladores.



**Figura 20:** Ensayo por ultrasonido

Los ensayos por ultrasonido son una técnica no invasiva y muy precisa que sirve como herramienta para la detección y localización de fugas de corriente en equipos eléctricos y electrónicos. Además, son rápidos y fáciles de realizar, lo que los hace ideales para su uso en la industria y otros entornos donde la seguridad y el mantenimiento adecuado del equipo son críticos. (Orrego, 2019)

### **3.5 Diseño CAD de los aisladores**

El diseño CAD de los aisladores de una línea de subtransmisión de 69 kV tiene su importancia dentro del proyecto de investigación, este diseño tiene un enfoque en la creación de modelos digitales en 3D de los aisladores utilizando software especializado. Estos modelos digitales permiten visualizar y analizar la geometría y las propiedades físicas de los aisladores, lo que es fundamental para su diseño y fabricación.

#### **2.5.1 Software CAD**

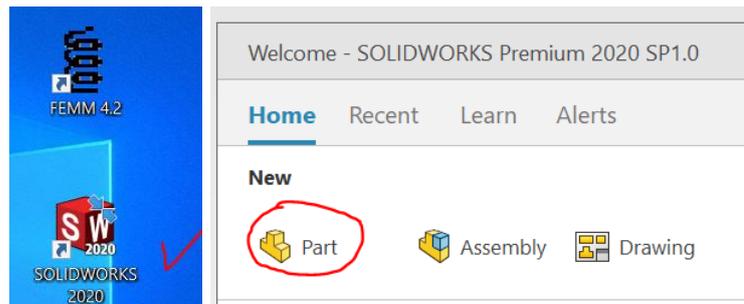
La herramienta computacional para utilizar es el software SolidWorks que es un programa de diseño CAD (Diseño Asistido por Computadora) que se utiliza para crear modelos digitales en 3D de diferentes componentes mecánicos y eléctricos.

Este software es muy utilizado en la industria debido a su capacidad para crear modelos precisos y detallados, y por su interfaz de usuario amigable. En el caso del diseño de los aisladores de la línea de subtransmisión de 69 kV, el software SolidWorks será utilizado para crear modelos digitales que permitan visualizar y analizar la geometría y las propiedades físicas de los aisladores.



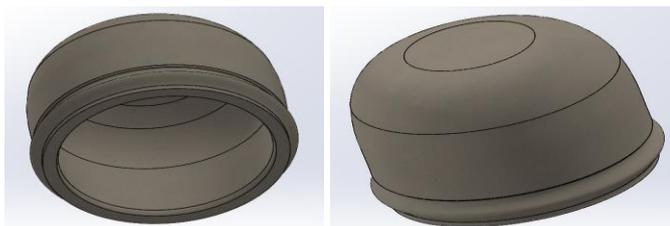
**Figura 21:** Aisladores de 69 kV

En la figura 19 se presentan los aisladores que van a ser diseñados en el software CAD, para ello se abrió el programa y se seleccionó “Part” para diseñar el aislador por partes para posteriormente ensamblarlas como se observa en la siguiente figura.



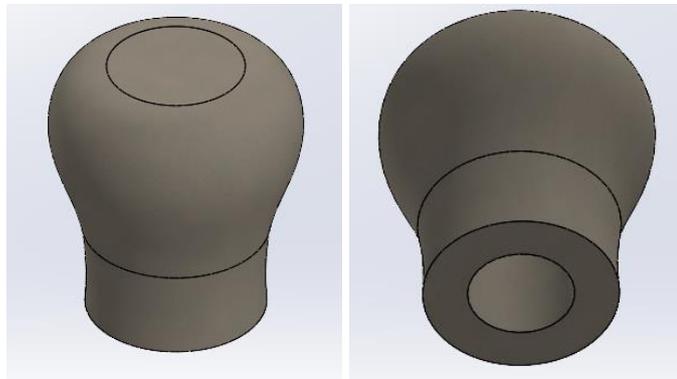
**Figura 22:** Inicio en SolidWorks

Para diseñar el aislador utilizando el software SolidWorks, se inicia realizando el modelado del sólido de cemento como se muestra en la siguiente figura.



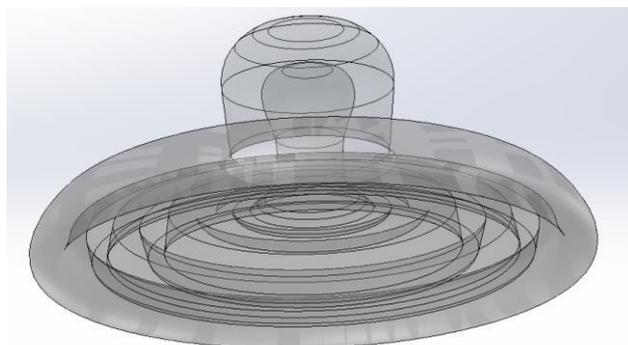
**Figura 23:** Sólido de cemento

Estos modelos son diseñados en función de las especificaciones del aislador, como su forma, tamaño y materiales utilizados, dentro de las funciones que brinda el software se utilizan las herramientas como: la extrusión, revolución y/o barrido para transformar el dibujo 2D en un modelo 3D del aislador. En la siguiente figura se tiene representado el sólido de cemento N. 2 del aislador.



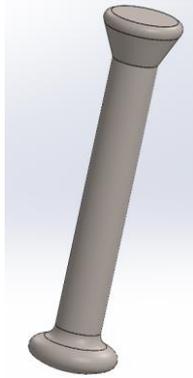
**Figura 24:** Sólido de cemento 2

Los aisladores presentan la campana que es la parte exterior del aislador que se encarga de proporcionar el aislamiento eléctrico entre el núcleo y el ambiente circundante. Esta parte está fabricada de vidrio o porcelana y puede tener diferentes formas y tamaños dependiendo del tipo de aislador. En la siguiente figura se presenta su diseño en CAD.



**Figura 25:** Diseño de la campana

En la siguiente figura se presentan el diseño CAD de la parte denominada “extremo”, que se encarga de fijar a los conductores eléctricos y se aseguran con herrajes, abrazaderas o grilletes.



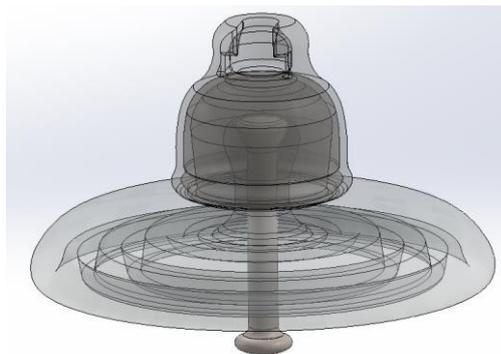
**Figura 26:** Fijación de los conductores eléctricos

En la siguiente figura se observa el diseño de la base, que es la parte inferior del aislador que cumple la función de fijarlo a la estructura de soporte, que puede ser una torre o un poste de transmisión.



**Figura 27:** Diseño de la base

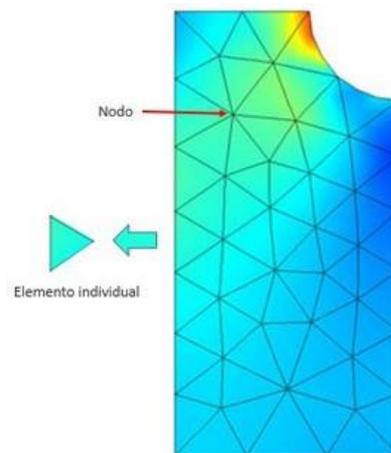
Para evaluar el comportamiento mecánico y eléctrico del aislador es necesario realizar una simulación por computadora utilizando el método de elementos finitos, para lo cual, es necesario realizar el ensamblaje en CAD de las diferentes partes del aislador, como la camisa, los faldones, el núcleo, los extremos y la base.



**Figura 28:** Aislador ensamblado

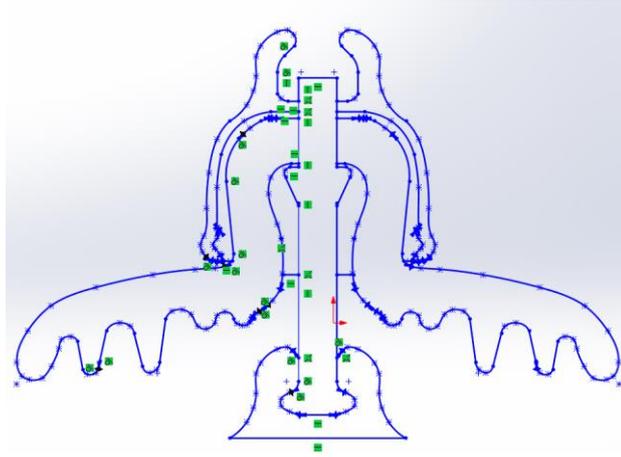
### 3.6 Análisis de elementos finitos

El método de los elementos finitos es una técnica numérica que se utiliza para analizar el comportamiento de estructuras y sistemas mecánicos bajo diferentes condiciones de carga. Este método consiste en dividir la estructura en pequeños elementos finitos y resolver las ecuaciones matemáticas del comportamiento de cada uno de ellos para obtener una solución global del sistema. El método de los elementos finitos permite analizar la distribución de tensiones, deformaciones, flujos de calor y otros fenómenos físicos en una estructura, lo que es fundamental para evaluar su comportamiento mecánico y térmico.



**Figura 29:** Elementos finitos

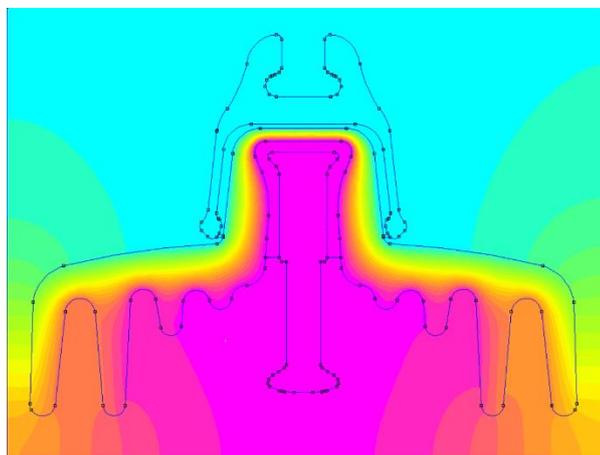
Para analizar un sólido en 3D diseñado en SolidWorks, es posible utilizar el software de simulación por elementos finitos integrado en el mismo programa, que se conoce como “Simulation”. Este software permite definir las condiciones de carga y restricciones, y realizar la simulación de la estructura en 3D para obtener resultados precisos y detallados del comportamiento de la estructura ante diferentes condiciones de carga. Sin embargo, en algunos casos, puede ser conveniente analizar la estructura en 2D debido a que es más rápida y sencilla de realizar. Para hacer esto, se puede exportar la geometría del sólido en 3D a un archivo de formato DXF o DWG, que es compatible con el software de simulación por elementos finitos en 2D.



**Figura 30:** Aislador en 2D

### 3.6.1 Software FEMM

Uno de los softwares de simulación por elementos finitos en 2D más utilizados en la industria es FEMM (Finite Element Method Magnetics). Este software es una herramienta gratuita y de código abierto que se enfoca en el análisis de campos magnéticos y eléctricos en sistemas eléctricos y electrónicos. FEMM permite analizar la distribución de campos eléctricos y de corriente en un aislador de 69 kV en 2D, lo que es fundamental para evaluar su comportamiento eléctrico y la eficacia de su diseño. La evaluación en 2D del aislador de 69 kV mediante FEMM permite identificar posibles áreas de concentración de tensión eléctrica y optimizar el diseño del aislador para reducir el riesgo de fallos y accidentes eléctricos durante su operación en campo.



**Figura 31:** Aislador en FEMM

### 3.6.2 Importación del modelado CAD al software FEMM

Una vez se ha completado el modelado CAD en dos dimensiones del aislador eléctrico, se procede a utilizar el software de simulación dinámica FEMM. Para ello, es necesario seleccionar la opción de "problema de flujo de corriente", como se muestra en la figura 30 a), y posteriormente importar el archivo del modelado del aislador (figura 30 b). De tal manera que se podrá realizar una evaluación precisa acerca del comportamiento del aislador ante las roturas superficiales que se presenten. Es importante señalar que el uso de FEMM dentro de la Ingeniería Eléctrica permite el estudio y evaluación de los sistemas eléctricos de potencia de tal manera que se realizan análisis en diferentes comportamientos bajo ciertas condiciones.

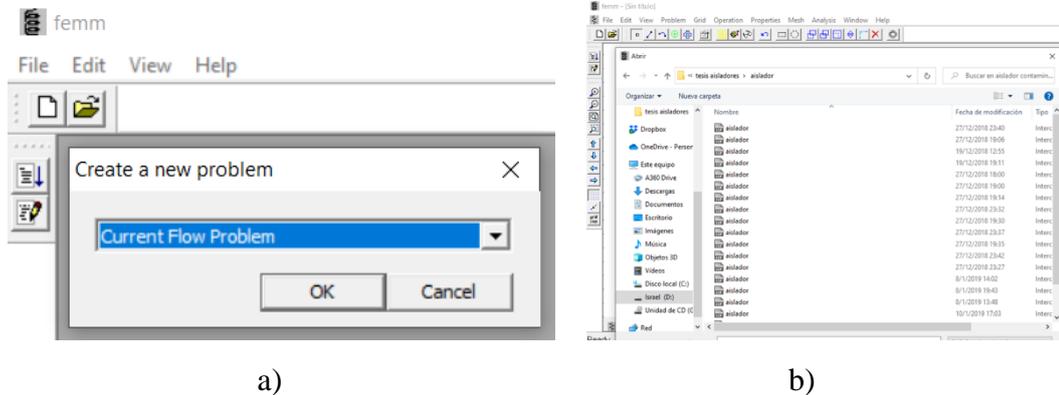


Figura 32: a) selección del problema b) Importación del modelado CAD

### 3.6.3 Selección de los materiales

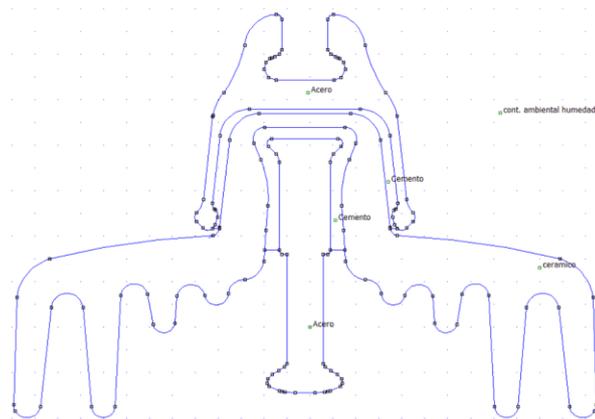
Para la selección de los materiales en los que está fabricado el aislador o el conjunto de aisladores, se debe añadir dentro de las propiedades del software FEMM el nombre del material y se realiza la modificación de sus propiedades, para ello se debe conocer la conductancia eléctrica del material, este valor se puede obtener de la tabla 1.

Una vez incorporado todos los materiales, en el aislador en 2 dimensiones se debe colocar cada material en cada diseño del aislador, como se materiales se tiene: el cemento, acero, cerámica o porcelanato y el aire o contaminación por humedad.

**Tabla 12**

*Conductancia eléctrica de los materiales*

Material	Valor de conductancia eléctrica (S/m)
Aire	$1 \times 10^{-14}$
Acero	$6 \times 10^8$
Cemento	0,0053
Cerámica	$1 \times 10^{-8}$
Humedad	0,00015
Rotura de porcelanato	$1 \times 10^{-7}$



**Figura 33:** Colocación de los materiales del aislador

### 3.6.4 Asignación de la tensión eléctrica

Para la asignación de la tensión eléctrica que debe soportar el conjunto de aisladores es necesario que dentro del software FEMM, específicamente en las propiedades se coloque o se añada los conductores eléctricos, cada uno con su valor correspondiente a la diferencia de potencial.

El valor de la tensión a evaluarse se da considerando un estudio de una línea de transmisión de 69 kV, para lo cual la tensión de fase quedaría bajo la siguiente ecuación:

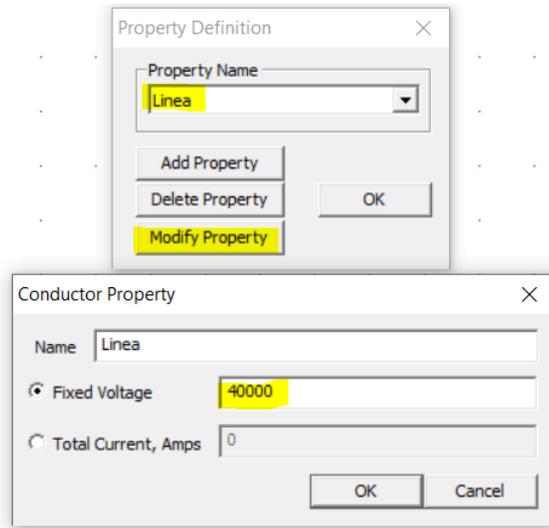
$$V_f = \frac{V_L}{\sqrt{3}}$$

En donde:

$$V_f = \frac{69 \text{ kV}}{\sqrt{3}}$$

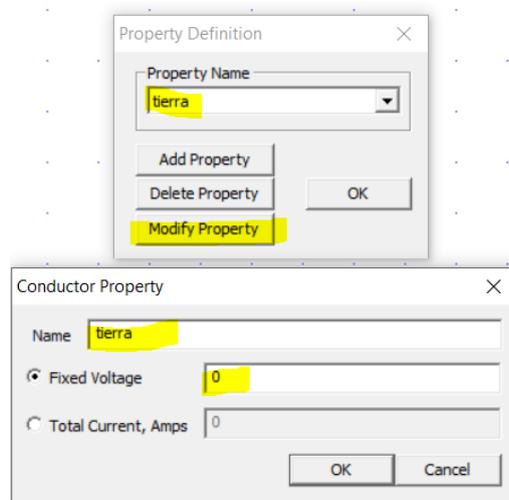
$$V_f = 39,83 \text{ kV} \approx 40 \text{ kV}$$

Por lo tanto, la tensión a colocarse es de 40 kV como se muestra en la siguiente figura.



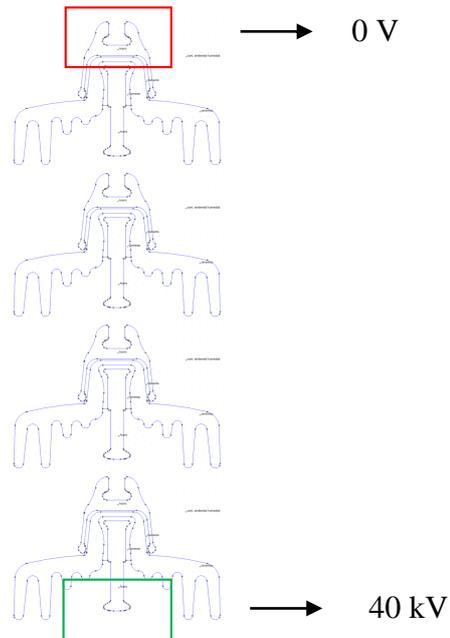
**Figura 34:** Tensión de 40 kV

Dentro de las definiciones de las propiedades también se coloca la referencia que en esta ocasión está denominada como “tierra” y tiene una diferencia de potencial de 0 V como se muestra en la siguiente figura.



**Figura 35:** Tensión de referencia 0V

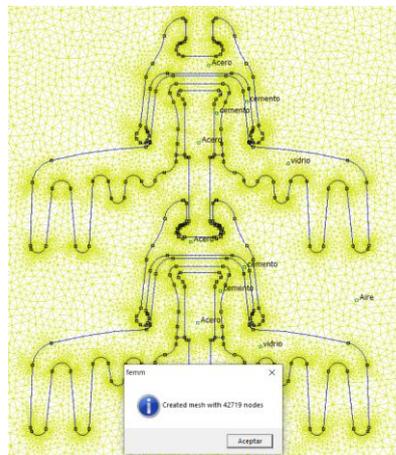
Dentro del y la referencia de tierra sería 0 V, en la figura 8 se puede observar la distribución de estas tensión dentro del aislador.



**Figura 36:** Tensiones eléctricas de trabajo

### 3.6.5 Proceso del mallado

Una vez seleccionada la tensión eléctrica de trabajo, se procede a ejecutar el mallado del conjunto de aisladores, este proceso permite discretizar el dominio de análisis en pequeñas regiones que pueden ser resueltas numéricamente. El software FEMM utiliza el método de elementos finitos para resolver las ecuaciones de Maxwell que describen el comportamiento de campos eléctricos y magnéticos.



**Figura 37:** Mallado del conjunto de aisladores

## CAPITULO III ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 4.1 Introducción

El análisis y los resultados obtenidos en este capítulo demuestran la eficacia y validez de la metodología utilizada en la investigación mostrando criterios acerca de las valoraciones que dieron los resultados mediante la simulación con elementos finitos en el software FEMM de dos dimensiones y el ensayo de ultrasonido a los aisladores de porcelana para 69 kV ubicados en la línea de subtransmisión de subestación Mulaló – La Cocha, de tal manera que se realiza el análisis de relación entre las fugas de corriente y las condiciones de pérdida de rigidez dieléctrica.

En general, este capítulo proporciona una evaluación profunda y detallada de los resultados de la investigación, permitiendo que las personas interesadas en el tema comprendan el mejor alcance y relevancia del estudio.

### 4.2 Evaluación de los aisladores

Para una mejor comprensión del estado inicial de los aisladores en la línea de subtransmisión de la subestación Mulaló – La Cocha de 69 kV, se describen a continuación sus características generales.

**Tabla 13**

*Características de los aisladores*

<b>Parámetro</b>	<b>Descripción</b>
Tipo de aislador	Suspensión
Material aislante	Porcelana
Diámetro	225 mm
Altura	146 mm
Distancia de fuga	292 mm
Resistencia mecánica	67 kN
Voltaje de arco eléctrico	130 kV

La tabla presentada a continuación describe las características principales de la línea de subtransmisión de 69 kV en la subestación Mulaló - La Cocha. Esta línea de

transmisión es fundamental para el suministro de energía eléctrica en la zona, ya que permite la transferencia de energía eléctrica desde la subestación hasta los diferentes puntos de consumo. La tabla proporciona información relevante sobre el voltaje nominal, tipo de conductor utilizado, aislamiento y tipo de estructura.

**Tabla 14**

*Características de la línea de subtransmisión*

<b>Parámetro</b>	<b>Descripción</b>
Voltaje nominal	69 kV
Número de circuitos	2
Tipo de conductor	ACAR 550 MCM
Material del conductor	Alambre de aluminio reforzado con aleación de aluminio
Aislamiento	3 conjuntos de 6 aisladores de porcelana
Estructura	Mixta: acero galvanizado autosoportantes y postes de hormigón armado



**Figura 38:** Conjunto de aisladores a evaluación

#### **4.2.1 Inspección visual de los aisladores**

Para el desarrollo de la inspección visual de los aisladores de la línea de 69 kV se utilizaron 3 drones como herramientas más eficientes y seguras, estos equipos

pueden facilitar una inspección detallada de los aisladores de tal manera que se posibilite en la detección temprana de posibles fallas o daños en los mismos.



**Figura 39:** Inspección visual con drones

Posterior a la inspección visual se determinó el grado de severidad estableciéndose 4 tipos que pueden ser identificador mediante colores, estas condiciones son reparación inmediata, mantenimiento programado, observación y normal, en la siguiente figura se encuentra el detalle del grado de severidad.

**Tabla 15**

*Grado de severidad*

<b>Grado</b>	<b>Color</b>	<b>Condición Visual</b>
1	Rojo <span style="color: red;">■</span>	Reparación inmediata
2	Anaranjado <span style="color: orange;">■</span>	Mantenimiento programado
3	Amarillo <span style="color: yellow;">■</span>	Observación y limpieza
4	Verde <span style="color: green;">■</span>	Normal

#### **4.2.1.1 Inspección visual conjunto de aisladores fase R**

A través de la inspección visual presentada por un registro fotográfico de la línea de 69 kV, se analizaron las 3 fases que contiene la torre de subtransmisión, la siguiente figura muestra al conjunto de 6 aisladores que corresponden a la fase “R”, en donde se puede observar el deterioro de los mismo, así como también entra el factor de la suciedad, el desgaste por el tiempo de uso, entre otros factores ambientales como la contaminación. Los puntos más críticos de ruptura se localizan en la unión entre aisladores como se observa detalladamente en cuadros de color rojo.



**Figura 40:** Inspección visual fase R

El grado de severidad que se cataloga a este conjunto de aisladores es de color rojo con un significado de “reparación inmediata”.

#### **4.2.1.2 Inspección visual conjunto de aisladores fase S**

En la siguiente figura se muestra el conjunto de seis aisladores correspondientes a la fase "S" de la línea de subtransmisión de 69 kV. Es posible observar que, debido a factores ambientales, estos aisladores se encuentran en un estado de suciedad, sin embargo, después de una evaluación detallada, se determinó que la suciedad presente en los aisladores no afecta significativamente su capacidad de aislamiento eléctrico.

Es importante destacar que los aisladores pueden estar expuestos a diferentes tipos de contaminantes que se acumulan en su superficie, lo que puede afectar su capacidad de aislamiento eléctrico. El grado de severidad que se cataloga a este conjunto de aisladores es de color amarillo con un significado de observación y limpieza.



**Figura 41:** Inspección visual fase S

#### 4.2.1.3 Inspección visual conjunto de aisladores fase T

Para finalizar con la inspección visual de las tres fases que comprende la línea de subtransmisión de 69 kV, se analiza la fase “T” mostrada en la siguiente figura, se puede destacar a simple vista que existe un deterioro superficial notable conllevando a tener fugas de corriente eléctrica por medio de la rotura de rigidez dieléctrica lo que representa un riesgo para la seguridad y la fiabilidad del suministro eléctrico, como medida de corrección y prevención es necesario el cambio correspondiente lo que significa que el grado de severidad es de color rojo denominado “reparación inmediata”.

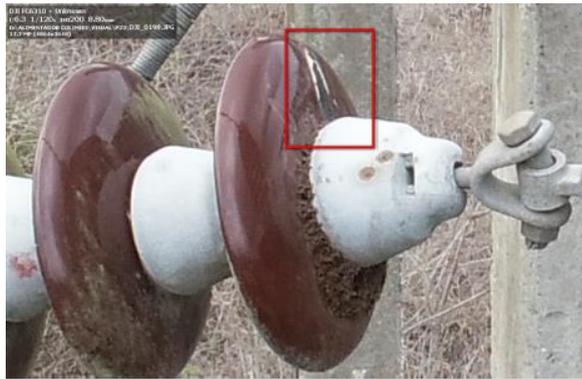


Figura 42: Inspección visual fase T

#### 4.2.2 Evaluación de aisladores mediante cámara termográfica

Para la evaluación de la temperatura que emite el conjunto de aisladores de la línea de subtransmisión de 69 kV se utiliza una cámara termográfica como se muestra en la siguiente figura. Esta evaluación tiene mayor relevancia que la inspección visual realizada con anterioridad, pues indica en que parte exacta se encuentran diferentes tipos de fallas que la inspección visual no puede definir.



Figura 43: Evaluación mediante cámara termográfica

Posterior a la evaluación termográfica se determinó el grado de severidad estableciéndose 3 tipos que pueden ser identificados mediante la temperatura que emite cada conjunto de aisladores, esto se muestra con detalle en la siguiente tabla.

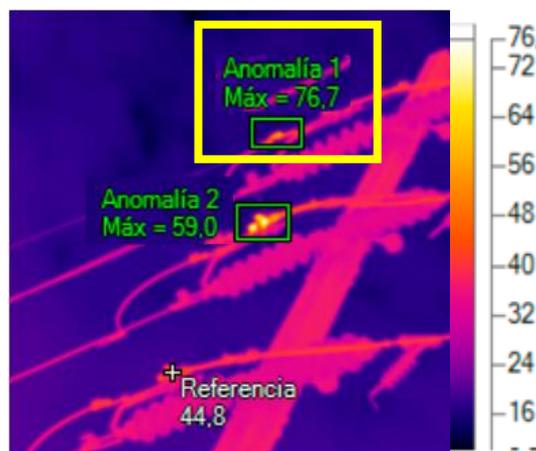
**Tabla 16**

*Grado de severidad con cámara termográfica*

Grado	Color	Temperatura	Condición Visual
1	Rojo	$\geq 61$ °C	Reparación inmediata
2	Anaranjado	21 °C a 60 °C	Mantenimiento programado
3	Verde	14 °C a 20 °C	Normal

#### 4.2.2.1 Termografía en el conjunto de aisladores fase R

La evaluación con cámara termográfica del conjunto de aisladores correspondientes a la fase "R" de la línea de subtransmisión de 69 kV, reveló una serie de anomalías en los mismos. Se pudo observar una elevada temperatura en varios puntos críticos de los aisladores, mencionando un deterioro considerable en su capacidad de aislamiento eléctrico. Estos puntos críticos se localizaron en las zonas de unión entre los aisladores, lo que indica una posible rotura de rigidez dieléctrica y un alto riesgo de fallo eléctrico. Dado el grado de severidad de las anomalías detectadas, se recomienda llevar a cabo una reparación inmediata de los aisladores afectados para garantizar la seguridad y la fiabilidad del suministro eléctrico.



**Figura 44:** Evaluación termográfica fase R

#### 4.2.2.2 Termografía en el conjunto de aisladores fase S

La evaluación con cámara termográfica del conjunto de aisladores correspondientes a la fase "S" de la línea de subtransmisión de 69 kV, reveló la presencia de puntos con temperatura un poco superior a la temperatura normal, se mantiene alrededor de 44,8 °C mencionando que dentro del grado de severidad se puede mencionar que está en color anaranjado y que necesita tener un mantenimiento programado. Aunque esta evaluación no representa un riesgo inmediato para la seguridad y la fiabilidad del suministro eléctrico, puede ratificarse las áreas expuestas a la contaminación ambiental, se recomienda llevar a cabo una limpieza y observación periódica de los aisladores.

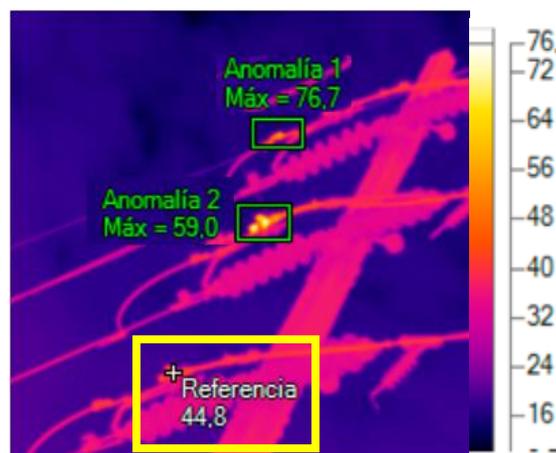


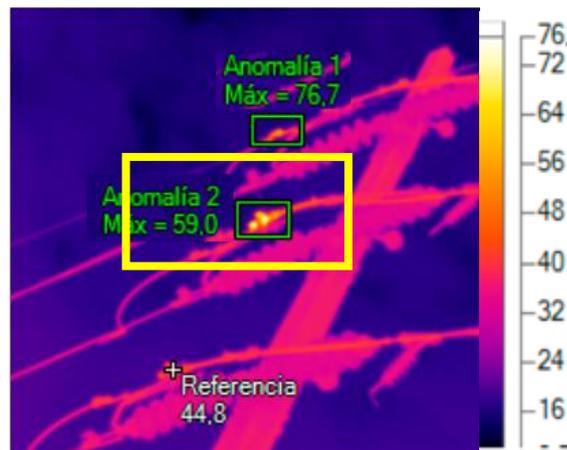
Figura 45: Evaluación termográfica fase S

#### 4.2.2.3 Termografía en el conjunto de aisladores fase T

Finalmente, en la evaluación termográfica del conjunto de aisladores correspondientes a la fase "T" mostrada en la siguiente figura, indica anomalías y puntos de temperaturas elevadas, a pesar de tener un valor de 59 °C se menciona que se necesita una reparación inmediata, por lo tanto, está catalogado mediante el grado 1 de color rojo.

En particular, se observó una elevada temperatura en varios principales de los aisladores, lo que indica una rotura de rigidez dieléctrica y fugas de corriente eléctrica. Estas anomalías representan un riesgo importante para la seguridad y la fiabilidad del suministro eléctrico, en este sentido, la evaluación periódica con

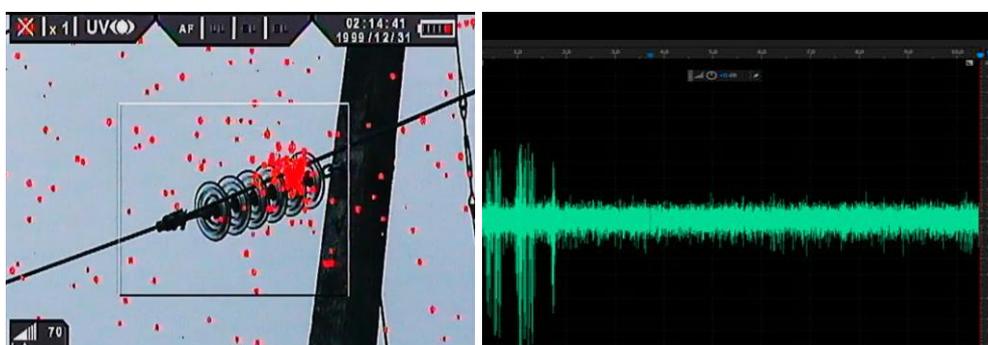
cámara termográfica se presenta como una herramienta eficaz para detectar tempranamente estos problemas y tomar medidas preventivas oportunas.



**Figura 46:** Evaluación termográfica fase T

#### 4.2.3 Análisis de aisladores mediante ultrasonido

Para realizar el análisis de fugas de corriente de los aisladores de la línea de subtransmisión de 69 kV se puede aplicar también el ultrasonido, este método capta en forma de ondas sonoras todos esos iones que presenta el conjunto de aisladores. En combinación con el método de evaluación mediante cámaras termográficas, que se obtiene un estudio más completo y preciso, de tal manera que se puedan tomar medidas preventivas oportunas para garantizar la calidad y la fiabilidad del suministro eléctrico.



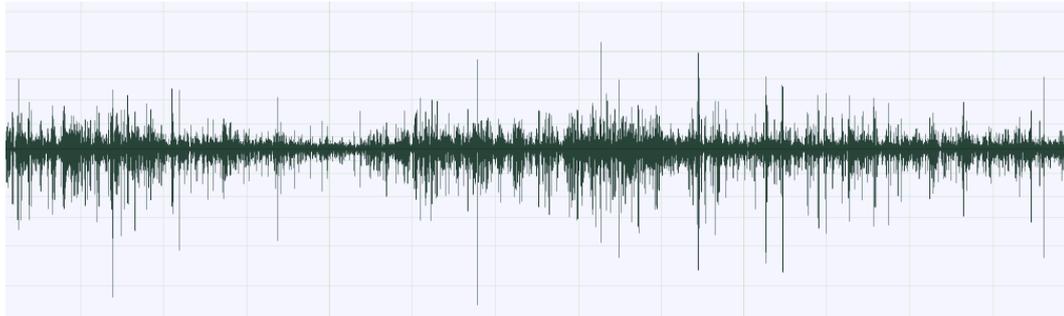
**Figura 47:** Análisis mediante ultrasonido

Los ultrasonidos muestran fenómenos como el efecto corona que para su evaluación es necesario captar la radiación UV en donde se puede observar la ionización en las líneas eléctrica de alto voltaje como se observa en la figura 47,

#### 4.2.3.1 Ultrasonido en el conjunto de aisladores fase R

Basado en el análisis de ultrasonido realizado en el conjunto de aisladores de la fase "R", se ha detectado la presencia de tracking en los aisladores de porcelana tipo campana como se observa en la figura 48. La presencia de frecuencias armónicas consecutivas y variaciones en la amplitud indica que hay fallas incipientes en los aisladores y esto representa un riesgo para el sistema eléctrico. Dado que el tracking es un proceso que daña gradualmente los aisladores, es importante que se realice el cambio pertinente y se lleve a cabo el mantenimiento adecuado para garantizar el funcionamiento correcto del sistema eléctrico.

Además, este resultado comprobó nuevamente que el conjunto de aisladores presenta fallas en el sistema eléctrico por fugas de corriente y falla de la rigidez dieléctrica. Estos problemas pueden ser causados por una variedad de factores, como el envejecimiento de los materiales, la contaminación ambiental, la exposición a la humedad, entre otros.



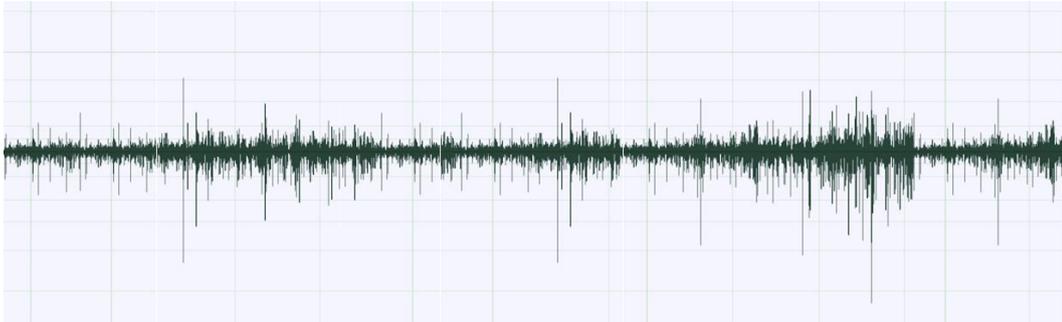
**Figura 48:** Análisis de ultrasonido fase R

#### 4.2.3.2 Ultrasonido en el conjunto de aisladores fase S

Por medio del análisis de ultrasonido mostrado en la siguiente figura realizado a los aisladores de la fase "S", se detecta la presencia de un tracking leve. Esto indica que se están presentando fallas incipientes en los aisladores, pero aún no son tan graves como para requerir un cambio de los mismos.

En este caso, se recomienda realizar una limpieza en los aisladores para eliminar cualquier contaminación que pueda estar reemplazada por su rendimiento. Es importante recordar que el monitoreo regular de los aisladores es esencial para

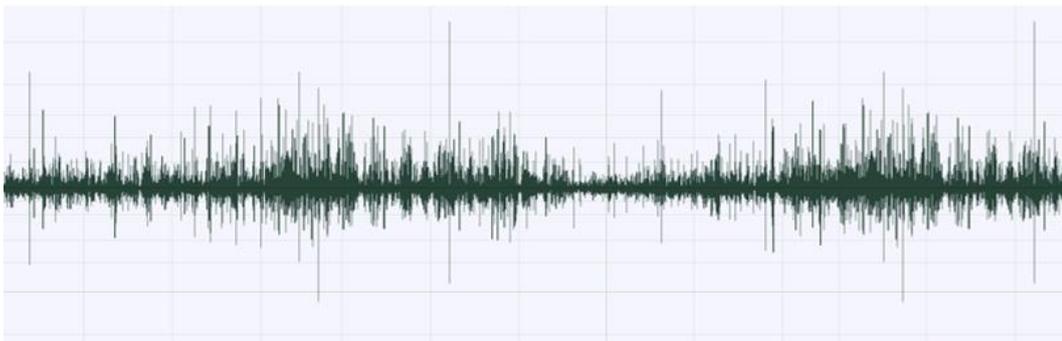
detectar cualquier falla incipiente y tomar medidas preventivas antes de que se conviertan en un problema mayor.



**Figura 49:** Análisis de ultrasonido fase S

#### **4.2.3.3 Ultrasonido en el conjunto de aisladores fase T**

Mediante el análisis de ultrasonido realizado en el conjunto de aisladores de la fase "T", se ha detectado la presencia de un tracking fuerte en los aisladores, esta onda sonora se presenta en la siguiente figura e indica que a través del tiempo la frecuencia sonora ha ido creciendo, es decir, que los aisladores están deteriorados o presentan fisuras en su construcción lo que indica la presencia de fugas de corriente eléctrica y ha reducido su capacidad dieléctrica provocando la aparición de fallas en el material aislante.



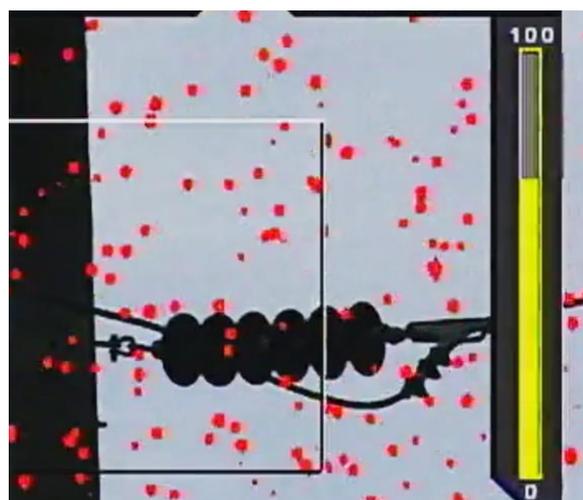
**Figura 50:** Análisis de ultrasonido fase T

#### **4.2.3.4 Efecto corona en la línea de 69 kV**

Para determinar la presencia del efecto corona en la línea de 69 kV se utilizaron rayos ultravioletas permitiendo detectar la presencia del efecto corona en la línea de subtransmisión de 69 kV. En la figura obtenida a través de la técnica de inspección, se pueden observar puntos de color rojo que representan la ionización

del aire en la zona afectada por la descarga corona. La presencia de esta ionización indica que se ha producido una descarga eléctrica en la zona, lo que puede provocar la generación de ozono y daños en los aisladores.

Al utilizar la técnica de inspección mediante rayos ultravioleta, es posible detectar la presencia del efecto corona y tomar medidas preventivas para evitar su propagación. En este caso, se recomienda llevar a cabo un mantenimiento adecuado de los aisladores y realizar cambios de los elementos dañados para evitar la aparición de fallas mayores en el futuro.

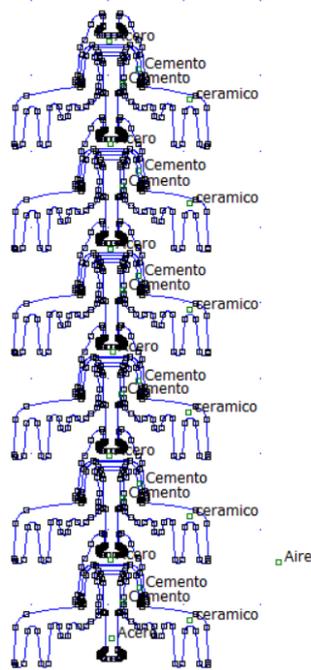


**Figura 51:** Efecto corona en la línea de 69 kV

#### **4.2.4 Simulación numérica de los aisladores**

La simulación numérica realizada en el software FEMM permite prever el comportamiento del conjunto de aisladores de la línea de subtransmisión de 69 kV, en función de las tres inspecciones descritas anteriormente (visual, termográfica y ultrasonido) se realizó la simulación de los aisladores por cada fase utilizando elementos finitos.

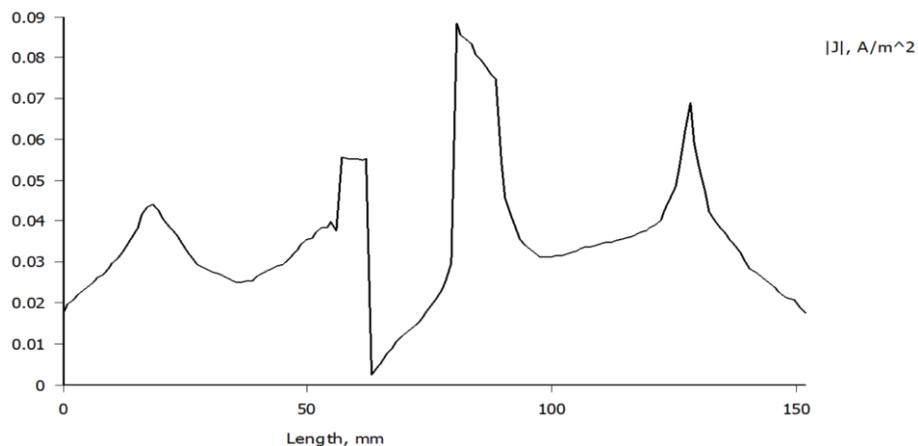
En la siguiente figura se puede observar el anclaje en CAD de los 6 aisladores que corresponden a cada fase (R, S y T) de la torre de subtransmisión permitiendo obtener una representación visual detallada, también se muestra que cada parte de cada aislador presenta el nombre de su material con el que fue fabricado, adicional se observa que el aire también es un componente que se ingresa dentro de la simulación.



**Figura 52:** Diseño CAD en FEMM del conjunto de aisladores

#### 4.2.4.1 Simulación en el conjunto de aisladores estado normal

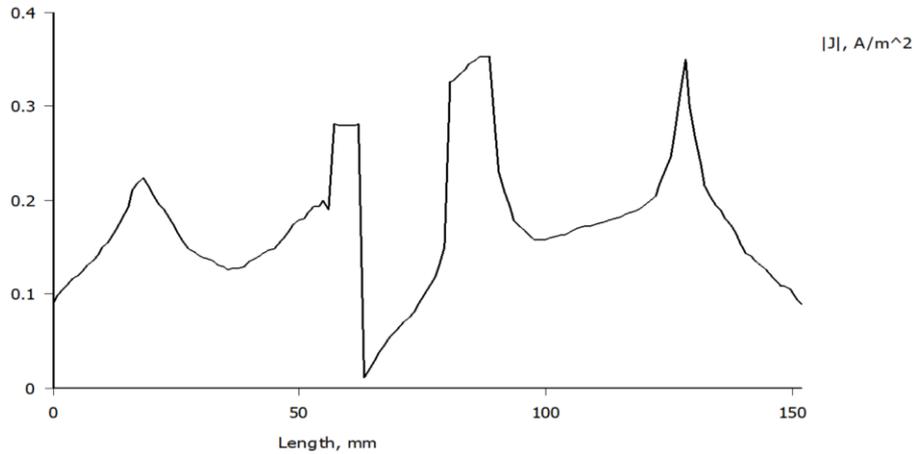
Se realizó la simulación de un conjunto de aisladores el cual se encuentran en condiciones adecuadas para la línea de subtransmisión de 69 kV, se ejecutó la evaluación cuando los aisladores se encuentran en un estado normal, es decir sin la presencia de lluvia, polvo, humedad o cualquier otro factor físico que puede provocar daños en el aisladores. En la siguiente figura se puede observar que la corriente eléctrica no tiene una superación de los 0,09 amperios, esto en estado ideal.



**Figura 53:** Corriente de los aisladores en condiciones ideales

#### 4.2.4.2 Simulación en el conjunto de aisladores estado lluvioso

Cuando existe la presencia de agentes físicos como la lluvia, el polvo, entre otros, se puede observar que en la siguiente figura el pico máximo de corriente llega alrededor de los 0,35 amperios, esto quiere decir que el aislador bajo estas condiciones sigue operando en normalidad, porque no sobrepasa la cantidad de corriente de recomendación de 0,5 A.



**Figura 54:** Corriente de los aisladores en condiciones lluviosas

#### 4.2.4.3 Simulación en el conjunto de aisladores fase R

Dentro de la fase “R”, se presenta el conjunto de aisladores que de manera visual presentaban roturas superficiales y falta de limpieza en la parte externa, lo que puede generar una falla en el sistema eléctrico. La siguiente figura muestra la distribución del voltaje en el aislador, donde se puede observar que, en la zona de la rotura superficial, la tensión varía entre los 22 kV y 8 kV. Esta variación de la tensión en la zona de la rotura superficial puede generar una debilidad en la estructura del aislador, lo que aumenta el riesgo de falla en el sistema eléctrico.

Además, se analizó la corriente eléctrica en una de las zonas de la rotura superficial del aislador. La figura 55 muestra una gráfica que indica que existe un pico bastante elevado de corriente de fuga que alcanza un máximo aproximado de 30 amperios, este valor supera el límite de los 0,5 amperios, lo que indica que el aislador presenta una ruptura dieléctrica debido a la tensión y la corriente de fuga generada en la zona de la rotura superficial.

De acuerdo con las cuatro inspecciones realizadas, este conjunto de aisladores tiene un grado 1 en severidad lo que ratifica que es necesario realizar el cambio de inmediato de los aisladores en mal estado.

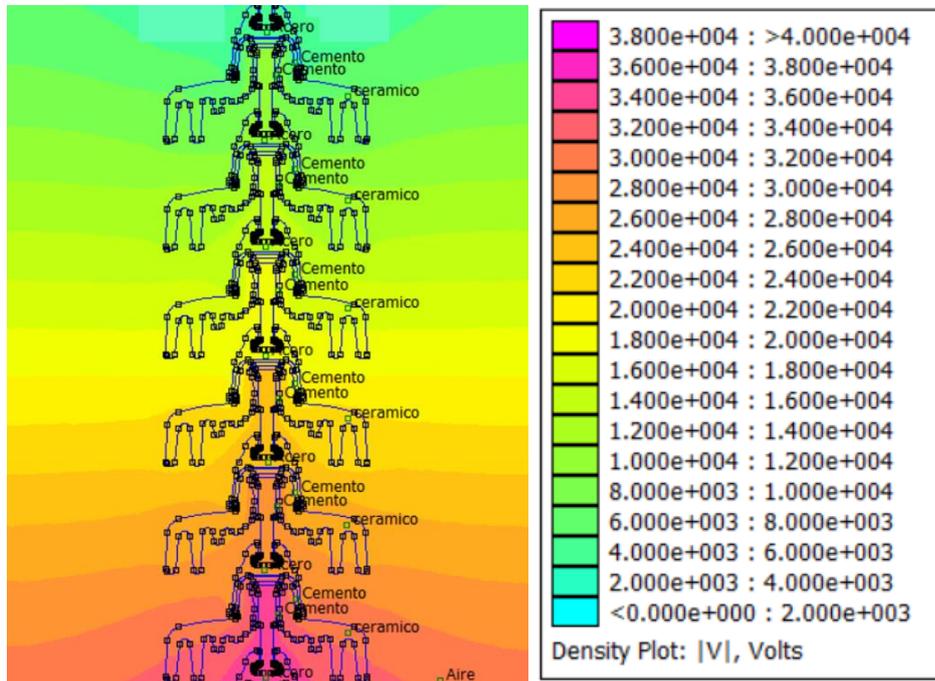


Figura 55: Simulación de la fase R

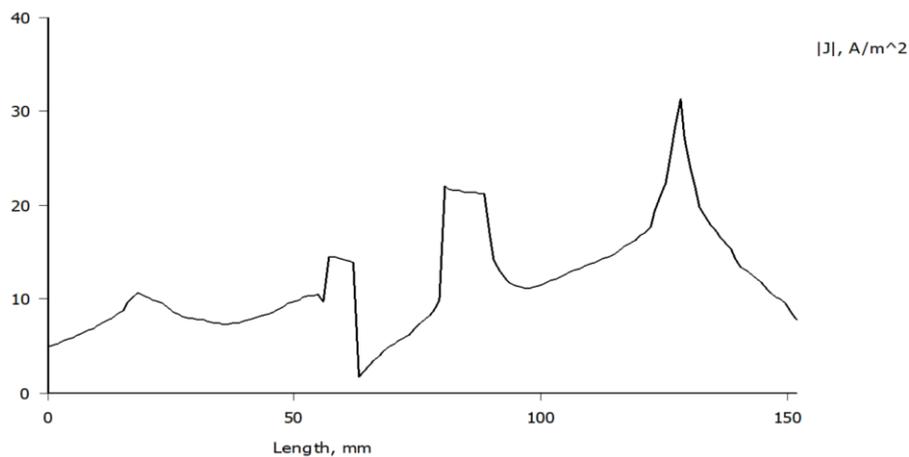


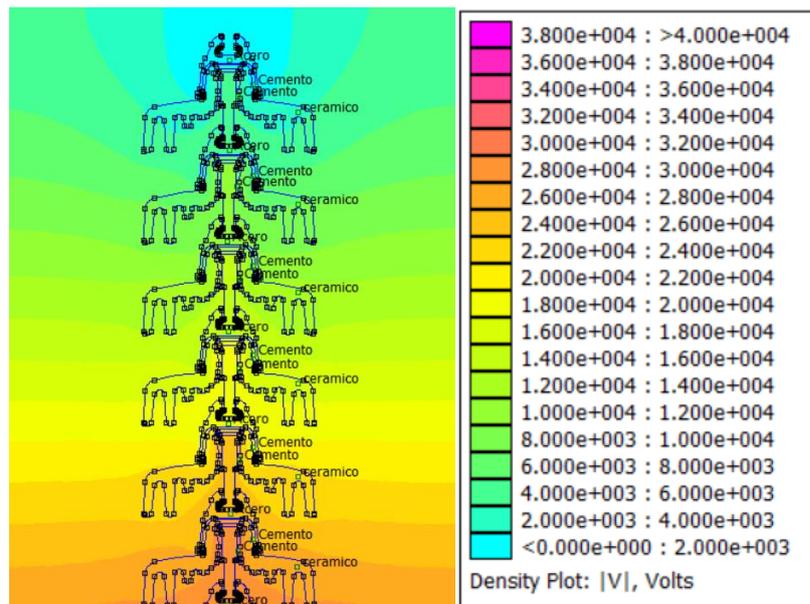
Figura 56: Corriente de fuga fase R

#### 4.2.4.4 Simulación en el conjunto de aisladores fase S

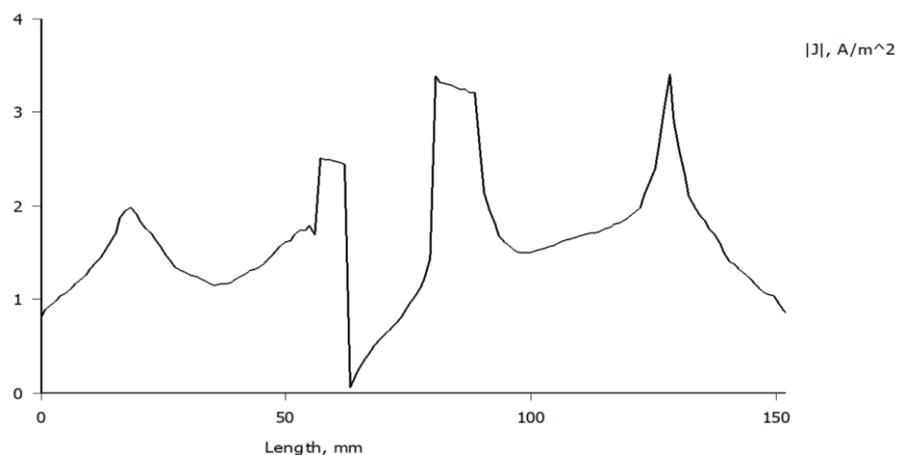
Para la fase S, se realizó una simulación numérica para evaluar el comportamiento del conjunto de aisladores. La siguiente figura muestra la distribución de la tensión eléctrica en el aislador, donde se puede apreciar que se presentan valores altos de

tensión eléctrica, alrededor de los 30 kV, en comparación con los valores esperados en condiciones normales, que están alrededor de los 10 kV. Este resultado sugiere una posible falla dieléctrica en la primera capa exterior del aislador.

Para evaluar el grado de severidad de la falla, se realizó una evaluación de las corrientes de fuga alrededor de la rotura superficial del aislador. La figura 57 presenta la gráfica de las corrientes de fuga, donde se menciona que el pico más alto de corriente eléctrica es de 3,3 amperios, superando los 0,5 amperios para provocar una ruptura dieléctrica. Esto indica que el aislador bajo estas condiciones tiende a provocar fallas eléctricas dentro del sistema.



**Figura 57:** Simulación de la fase S



**Figura 58:** Corriente de fuga fase S

El grado de severidad de la falla se evalúa en función del riesgo que representa para el sistema eléctrico. En este caso, se puede considerar que la falla tiene un grado 3 de severidad de color amarillo, lo que indica que es necesario un mantenimiento preventivo en los aisladores para garantizar la seguridad y confiabilidad de la sistema eléctrico.

#### 4.2.4.5 Ultrasonido en el conjunto de aisladores fase T

La fase “T” presenta la varias roturas superficiales del conjunto de aisladores de la línea de 69 kV, lo que a simple vista se determinó que puede generar una falla en el sistema eléctrico. La siguiente figura muestra la distribución de la tensión eléctrica alrededor de los 34 kV hasta los 30 kV, lo que indica una situación anormal por falla del aislamiento. Para comprobar la existencia de una posible ruptura dieléctrica, se analizó la gráfica de las corrientes de fuga alrededor de la rotura superficial del aislador, presentada en la figura 59.

En este conjunto de aisladores, se observa que el pico más alto de corriente eléctrica supera significativamente los 0,5 amperios, alcanzando valores de pico de corriente de hasta 200 amperios. Estos valores son indicativos de una falla dieléctrica rotundamente en el aislador, lo que puede provocar fallas eléctricas en el sistema debido a una falta de aislamiento adecuado.

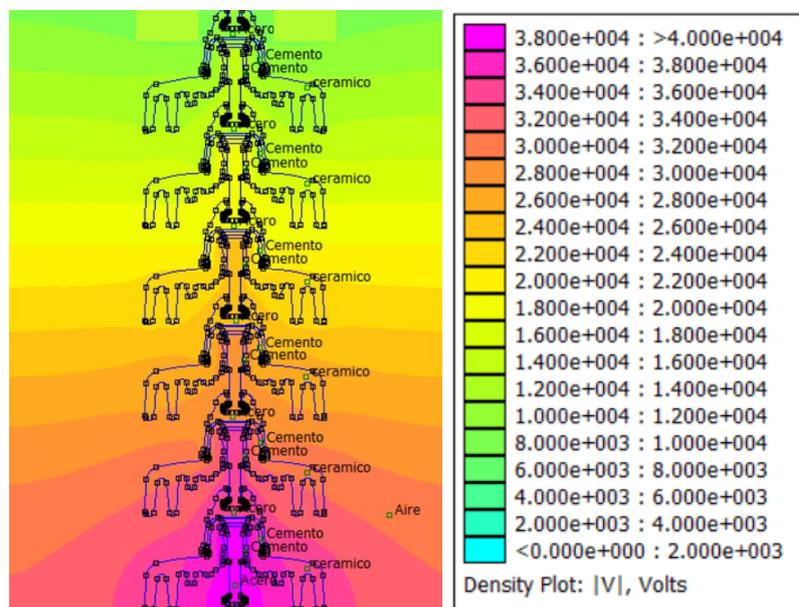
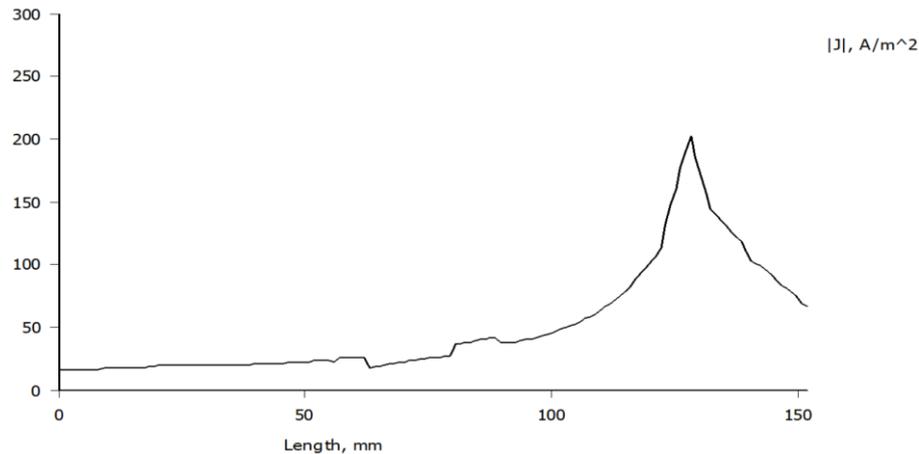


Figura 59: Simulación fase T



**Figura 60:** Corriente de fuga fase T

El grado de severidad de la falla se evalúa en función del riesgo que representa para el sistema eléctrico. En este caso, se puede considerar que la falla tiene un grado de severidad de 1 de color rojo, lo que indica que es necesario un cambio de aisladores de inmediato para garantizar la seguridad y confiabilidad del sistema eléctrico.

#### 4.3 Análisis de resultados

El análisis de los resultados de las evaluaciones realizadas en la torre de subtransmisión de 69 kV revela que se llevaron a cabo cuatro tipos de inspección y evaluaciones: visual, termográfica, ultrasonido y simulación. Cada una de estas evaluaciones se realizó en las tres fases de la torre, las cuales constaron de un conjunto de seis aisladores cada una.

Después de realizar las evaluaciones correspondientes, se prolongará que en la fase "R" se deben cambiar de inmediato los aisladores que presentan roturas o grietas, ya que estas fallas provocan fugas de corriente eléctrica y pueden generar problemas en el sistema eléctrico. En la fase "S", se indicó que el grado de severidad es variable, pero se coincidirá en que es necesario realizar limpieza y mantenimiento preventivo en el conjunto de aisladores.

Por otro lado, la fase "T" resultó ser la más crítica de todas, ya que se observó de manera visual que las grietas eran considerables. En los cuatro casos de realizaciones, se coincidió en la necesidad de realizar un cambio del conjunto de aisladores de manera inmediata para garantizar la seguridad y la confiabilidad del sistema eléctrico.

Es importante resaltar que la realización de las cuatro evaluaciones mencionadas permite obtener una visión más detallada y precisa del estado de los aisladores. La evaluación visual permite detectar fallas a simple vista, mientras que la termografía permite detectar fallas por sobrecalentamiento de los componentes. La evaluación por ultrasonido permite detectar fallas en el interior de los componentes, y la simulación numérica permite evaluar el comportamiento de los aisladores en diferentes condiciones de operación. En la siguiente tabla se presenta un resumen del grado de severidad que presenta cada fase con cada evaluación e inspección realizada al conjunto de aisladores.

**Tabla 17**

*Grado de severidad en cada fase de la línea de 69 kV*

	<b>R</b>	<b>S</b>	<b>T</b>
<b>Inspección visual</b>	<b>Grado 1</b> Suciedad Fisura de la superficie	<b>Grado 3</b> Impregnación de suciedad	<b>Grado 1</b> Deterioro Superficial Impregnación de suciedad
<b>Evaluación termográfica</b>	<b>Grado 1</b> T : 76°C Ref. >>61°C reparación Inmediata.	<b>Grado 3</b> T : 44.8°C Ref. >> 21-60°C Mntto Programado.	<b>Grado 2</b> T : 59°C Ref. 21-60°C reparación programada.
<b>Análisis de ultrasonido</b>	<b>Grado 2</b> Armónicos consecutivos y variación de frecuencia	<b>Grado 2</b> Traking leve y no varía en frecuencia ni en amplitud.	<b>Grado 2</b> Traking elevado en amplitud y frecuencia.
<b>Simulación FEMM</b>	<b>Grado 2</b> Fuga de corriente 30A/m <sup>2</sup>	<b>Grado 3</b> Fuga de corriente 3.2A/m <sup>2</sup>	<b>Grado 1</b> Fuga de corriente 200A/m <sup>2</sup>

Para obtener un análisis comparativo en condiciones normales de funcionamiento de los aisladores se procedió a realizar dos simulaciones en condiciones climáticas normales y en condiciones climáticas agrestes de lluvia como se muestra en la tabla 18 en la que se aprecia que las corrientes no superan.

## CONCLUSIONES

Se realizó un estudio bibliográfico y de campo en el cual se determinaron las condiciones climáticas del sector que está en los 16°C con una humedad relativa de 78%, con el uso de un aislador de porcelana PINCO-75 con su contaminación superficial que fue evaluado mediante procesamiento de mallado con la aplicación de elementos finitos que con la aplicación de las ecuaciones de maxwell del FEMM calcula las condiciones de las variables eléctricas dando como resultado que la contaminación depende mucho de condiciones ambientales, estado superficial del aislador, polución ya que al cambiar las características dieléctricas, aumenta o disminuyendo su conductividad dependiendo el caso.

Se aplicó el uso complementario de la moderación numérica (elementos finitos) ayuda a obtener datos que no se pueden adquirir con equipos de medición. Es así que de acuerdo a la disposición de los aisladores se observa que en condiciones normales de funcionamiento puede circular una corriente de fuga de 900mA y en condiciones de lluvia hasta los 500mA, que por condiciones de rigidez dieléctrica el sistema esta alejado de un efecto flashover.

Se determino que los ensayos no destructivos aplicados a los aisladores como son inspección visual, termografía y ultrasonido para validar su informe es necesario la modelación mediante el software FEMM de lo cual se pudo complementar un criterio técnico relacionando el grado de severidad con la corriente de fuga, tomando en consideración las condiciones climáticas, estado de los aisladores y contaminación superficial. De acuerdo con el ensayo realizado en la fase R la contaminación del aislador permite una fuga de 30A/m<sup>2</sup>, en la fase S se observa una contaminación ligera y de acuerdo con la modelación existe una circulación de corriente de 3.2 A/m<sup>2</sup> y en la fase T donde se observa un deterioro de aislamiento dieléctrico, fallas en herrajes y de acuerdo con la modelación existe una corriente de 200A/m<sup>2</sup> que se lo considera lo más crítico.

## RECOMENDACIONES

Es importante profundizar los estudios de fugas de corriente asociado a fenómenos eléctricos como efecto corona, que permita establecer una relación con el deterioro prematuro de los herrajes que provocan la rotura de los aisladores y en ocasiones por el aumento de eventos provoca el flashover en las líneas.

Es necesario mantener estudios más amplios de simulación dinámica a eventos comparativos en la región costa, sierra y oriente, ya que una de las variables en el aumento de las corrientes de fuga en la superficie de un aislador es la humedad relativa, por ende, el comportamiento de los aisladores va a ser diferente y resulta necesario ejecutar una simulación que permita analizar condiciones de régimen normal y críticos.

Los estudios de simulación dinámica asociado a los ensayos no destructivos online como ultrasonido, termografía e inspección visual resultan una complementaria de otra, es por ello por lo que surge la necesidad de orientar los estudios hacia el análisis del mantenimiento predictivo donde la modelación asocie los tiempos óptimos de intervención de las líneas sin que esto repercuta la confiabilidad y mantenga los índices FMIK y TTIK.

Dentro del punto de eficiencia energética es importante profundizar los estudios de pérdidas de energía a causa de fallas en el aislamiento ya que existe un aumento de corrientes y temperatura.

## Referencias

- Calderon, C., & Nieves, J. (15 de febrero de 2022). *Estudio de la coordinación de protecciones para la línea en 69kV de transmisión San Antonio-Alazán*. Obtenido de <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/21864>
- Coronel, A., & Chalco, J. (14 de enero de 2022). *Determinación y análisis de descargas parciales mediante sensores de emisiones acústicas en aisladores tipo PIN 55 5*. Obtenido de <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/21661>
- Cruz, E., & Yugcha, V. (14 de septiembre de 2021). *Mantenimiento predictivo aplicando técnicas: visuales, termográficas, efecto corona y ultrasonido acústico para detectar anomalías y prever interrupciones de energía eléctrica, no programadas, de las líneas de subtransmisión en el Ecuador*. Obtenido de <http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/8013>
- Dioses, J., & Hinostroza, G. (13 de enero de 2019). *Monitoreo y control de la contaminación en los aisladores de las Líneas de Transmisión de 500kv dentro de la Franja Costera Centro-Sur Peruana*. Obtenido de <http://repositorio.unac.edu.pe/handle/20.500.12952/4329>
- Diseño construcción de la línea de subtransmisión a 69 kv songa*. (10 de diciembre de 2019). Obtenido de <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/17013>
- Fernandez, M. (20 de enero de 2022). *Estudio y detección de defectos en piezas de silicona para su uso como aislamiento en alta tensión*. Obtenido de <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/53823>
- Frias, M., & Sanchez, J. (01 de enero de 2020). *Determinación de características dieléctricas en crucetas de poliéster reforzado con fibra de vidrio en diversas condiciones ambientales mediante ensayos en el Laboratorio de*

*Alta Tensión de la Universidad Politécnica Salesiana, sede Cuenca.*  
Obtenido de <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/18383>

García, M., & Agosto, N. (10 de junio de 2019). *Modelamiento y simulación del efecto Flashover voltage en los aisladores de suspensión de las líneas de transmisión de 500 kV, ante el impacto de la caída de ceniza del volcán Cotopaxi en la zona de mayor influencia.* Obtenido de <https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/15633/1/T-ESPEL-EMI-0359.pdf>

Garzón, D. (14 de diciembre de 2018). *Diseño eléctrico de la subestación Zumbahua 69/13,8 kV para la Empresa Eléctrica de Cotopaxi ELEPCO S.A.* Obtenido de <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/19913>

Herrera, E., & Mullo, Á. (09 de julio de 2023). *Estudio de la ruptura dieléctrica en los aisladores de la línea de transmisión de 69 kv en ELEPCO SA mediante simulación dinámica.* Obtenido de <https://editorialalema.org/index.php/pentaciencias/article/view/655>

Jiménez, J., & Canelos, R. (10 de mayo de 2021). *Simulación del campo electromagnético en una línea de transmisión de extra alto voltaje mediante el método de los elementos finitos.* Obtenido de [http://scielo.senescyt.gob.ec/scielo.php?pid=S1390-67122021000100001&script=sci\\_arttext](http://scielo.senescyt.gob.ec/scielo.php?pid=S1390-67122021000100001&script=sci_arttext)

Martinez, F., & Sepulveda, E. (01 de abril de 2021). *Detección de descargas parciales a través de radiación ultravioleta en redes de media y alta tensión en Colombia.* Obtenido de <https://geox.udistrital.edu.co/index.php/Tecnura/article/view/17991>

Meneses, D. (21 de enero de 2020). *Investigations on a Low-Density Polymeric Foam for Internal Electrical Insulation of Hollow-Core Composite Insulators.* Obtenido de [https://web.archive.org/web/20220520102259id\\_/https://publications.rwth-aachen.de/record/840827/files/840827.pdf](https://web.archive.org/web/20220520102259id_/https://publications.rwth-aachen.de/record/840827/files/840827.pdf)

- MIse, C. (30 de octubre de 2022). *Estudio de cargabilidad del sistema de subtransmisión a 69kv Ambato – Latacunga para determinar las condiciones de operación*. Obtenido de <http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/9558>
- Morán, J. L. (21 de febrero de 2018). *Determinación del Voltaje en Cadenas de Aisladores de Torres de Transmisión mediante el Método de Elementos Finitos*. Obtenido de <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/19222>
- Orrego, F. (20 de mayo de 2019). *Clasificación de Aislamiento Cerámico de Media Tensión mediante Ensayos de Laboratorio y Tratamiento de Señales de Ultrasonido*. Obtenido de <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/69609>
- Pinzas, C., & Silvera, F. (15 de mayo de 2021). *Modelado y medición de los campos electromagnéticos en una línea de transmisión de 500kv, utilizando el método de elementos finitos*. Obtenido de <http://repositorio.unac.edu.pe/handle/20.500.12952/6132>
- Ramírez, J., & Cabezas, K. (14 de septiembre de 2020). *Cálculo de la distribución de voltajes en las cadenas de aisladores de una línea de transmisión de 500 kV utilizando el método de los elementos finitos*. Obtenido de [http://scielo.senescyt.gob.ec/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1390-65422020000300001](http://scielo.senescyt.gob.ec/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1390-65422020000300001)
- Tiban, R., & Yanchapaxi, A. (14 de marzo de 2022). *Evaluación de radiaciones no ionizantes generadas por las líneas de energía eléctrica de subtransmisión a 69 kv, en el eje de la subestación La Península - subestación Loreto ubicado en la ciudad de Ambato*. Obtenido de <http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/9303>
- Ureña, M., & Lopez, B. (10 de febrero de 2022). *Análisis estático no lineal (Push Over) de los talleres de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica y de la Facultad de Ingeniería en Sistemas Electrónica e Industrial, con aisladores sísmicos, ubicadas en el campus Huachi de la Universidad Técnica de A.* Obtenido de <https://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/35487>

Zurita, C. (11 de septiembre de 2020). *Análisis de impactos socio-ambientales para el diseño y construcción de líneas de transmisión eléctrica de 69 kv, 138 kv y 230 kv*. Obtenido de <http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/7083>

# ANEXOS

Fecha de inspección: 22/02/2023

Hora de inspección: 17:02

PUNTO DE INSPECCIÓN: 04

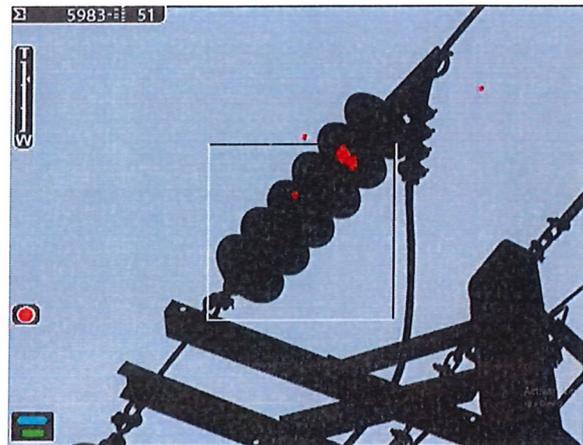
Nº POSTE / TORRE:	085
LOCALIZACIÓN UTM:	-76,6275 -0,9912
UBICACIÓN:	Mulaló – La Cocha 69 kV

TIPO DE ESTRUCTURA:



### EFFECTO CORONA

FASE R



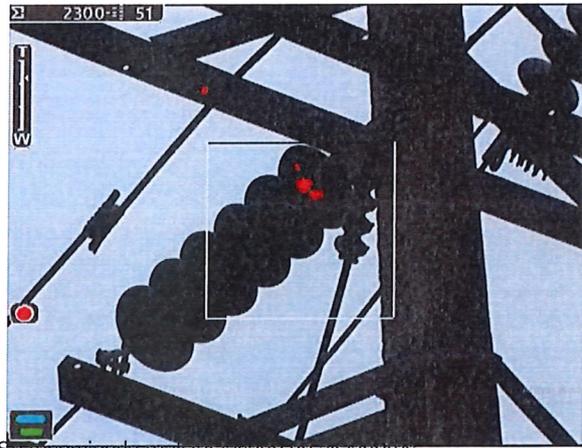
Se recomienda realizar lavado de aisladores.

FASE S



Se recomienda realizar lavado de aisladores.

FASE T



Se recomienda realizar lavado de aisladores.

Fecha de inspección: 21/02/2023

Hora de inspección: 11:43



PUNTO DE INSPECCIÓN No: 01

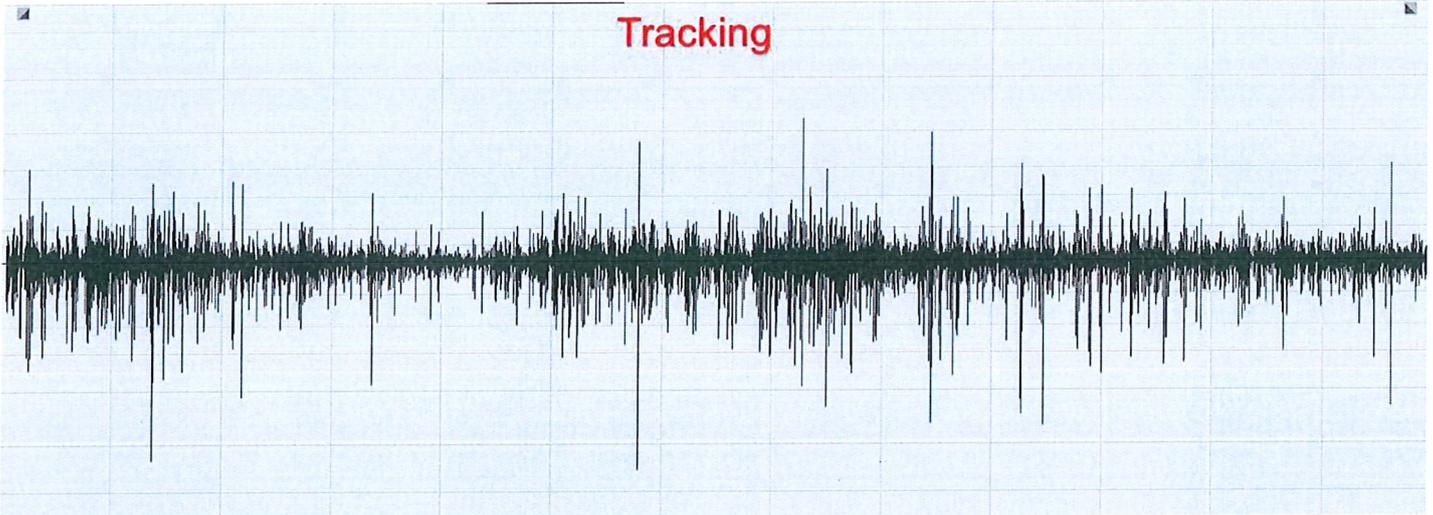
N° POSTE / TORRE:	085
LOCALIZACIÓN:	-76,6275 -0,9912
UBICACIÓN:	Mulaló – La Cocha 69 kV

TIPO DE ESTRUCTURA:	
GRADO DE SEVERIDAD:	<span style="background-color: red; color: red;">██████████</span>



FASE R

Tracking



El espectro muestra frecuencias armónicas consecutivas y variación en amplitud indicando fallas incipientes de Tracking. Realizar cambio y/o mantenimiento.

Fecha de inspección: 21/02/2023

Hora de inspección: 13:03



PUNTO DE INSPECCIÓN No: 02

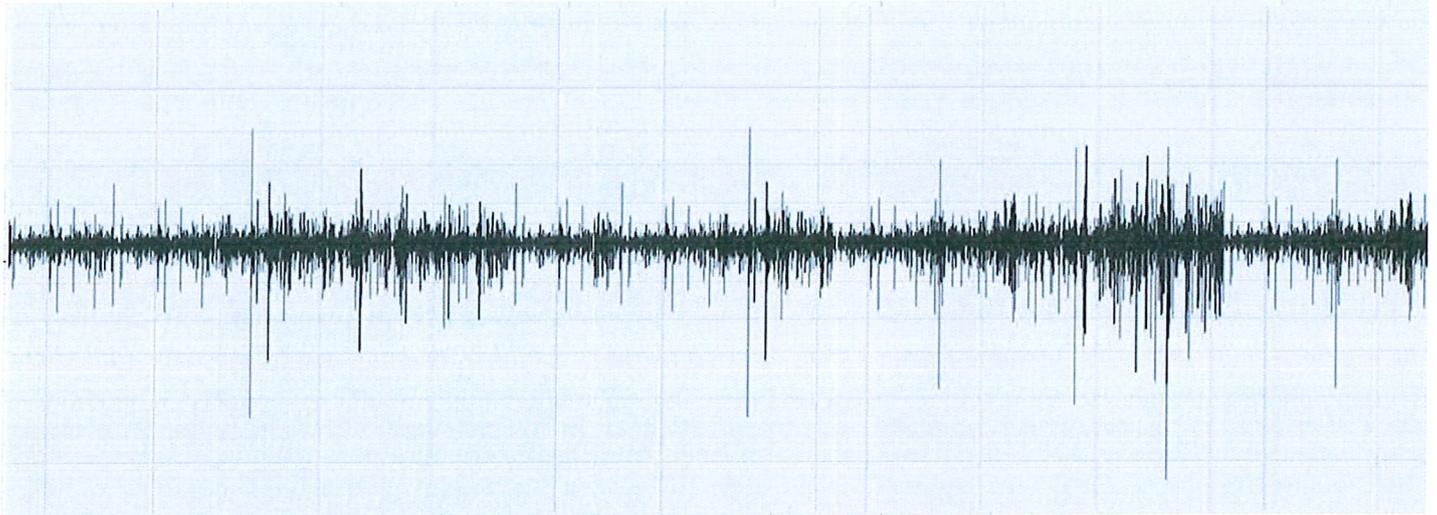
Nº POSTE / TORRE: 085  
LOCALIZACIÓN: -76,6275 -0,9912  
UBICACIÓN: Mulaló – La Cocha 69 kV

TIPO DE ESTRUCTURA:

GRADO DE SEVERIDAD:



FASE S



El espectro muestra frecuencias armónicas consecutivas y variación en amplitud indicando fallas cortas de Tracking. Realizar mantenimiento.

Fecha de inspección: 21/02/2023

Hora de inspección: 15:21

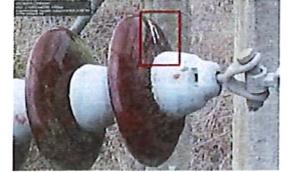


PUNTO DE INSPECCIÓN No: 03

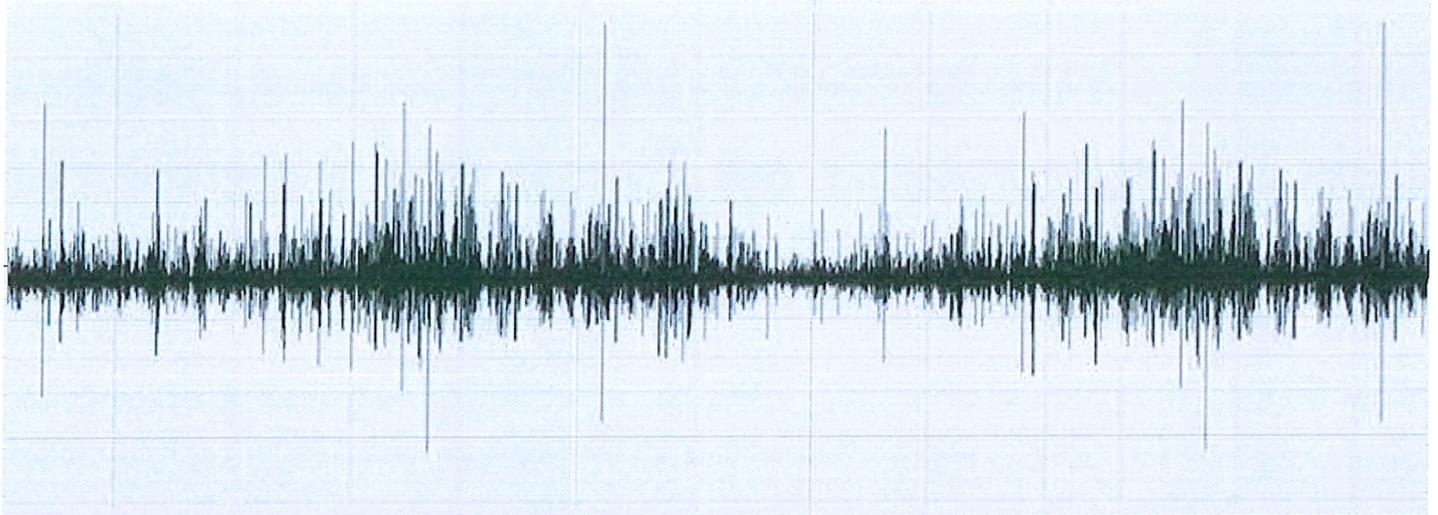
Nº POSTE / TORRE: 085  
LOCALIZACIÓN: -76,6275 -0,9912  
UBICACIÓN: Mulaló – La Cocha 69 kV

TIPO DE ESTRUCTURA:

GRADO DE SEVERIDAD:



FASE T



El espectro muestra frecuencias armónicas consecutivas y variación en amplitud indicando grandes fallas de Tracking. Realizar mantenimiento inmediato (cambio).