



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

DIRECCIÓN DE POSGRADO

MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD

MODALIDAD: INFORME DE INVESTIGACIÓN

Título:

Estudio de Campos Electromagnéticos en la Subestación Eléctrica Tisaleo,
perteneciente a la Corporación Eléctrica del Ecuador Unidad de Negocio
TRANSELECTRIC.

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Magíster en Electricidad
mención Sistemas Eléctricos de Potencia

Autor:

Vega Guashca Abdon Rogelio

Tutor:

Pesantez Palacios Gabriel Napoleón, MSc.

LATACUNGA –ECUADOR

2024

APROBACIÓN DEL TUTOR

En mi calidad de Tutor del Trabajo de Titulación, “Estudio de Campos Electromagnéticos en la Subestación Eléctrica Tisaleo, perteneciente a la Corporación Eléctrica Del Ecuador Unidad De Negocio TRANSELECTRIC”, presentado por Vega Guashca Abdon Rogelio 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, noviembre, 13, 2024



.....
Pesantez Palacios Gabriel Napoleón, MSc.
C.I. 0301893889

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL

El trabajo de Titulación: “Estudio de Campos Electromagnéticos en la Subestación Eléctrica Tisaleo, perteneciente a la Corporación Eléctrica Del Ecuador Unidad De Negocio TRANSELECTRIC”, 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, noviembre, 13, 2024

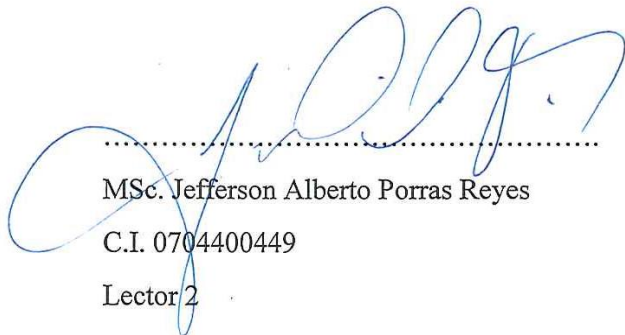


.....
Fernando Arias

MSc. Fernando Rafael Arias Atiaja

C.I. 0502556251

Presidente del tribunal



.....
MSc. Jefferson Alberto Porras Reyes

C.I. 0704400449

Lector 2



.....
Carlos Iván Quinatoa Caiza

MSc. Carlos Iván Quinatoa Caiza

C.I. 0503287864

Lector 3

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis queridos padres, quienes siempre me han apoyado y me enseñaron el valor del esfuerzo y la dedicación. Su amor y enseñanzas han sido mi guía constante en este camino.

A mi esposa e hijos Soraya, Ronny y Sherazade, cuya comprensión y paciencia me han inspirado cada día a seguir adelante y alcanzar mis metas. Su amor incondicional es la base de mis logros.

Finalmente, dedico esta tesis a todos mis profesores y compañeros, que han sido parte fundamental de esta experiencia académica, aportando conocimientos y apoyo invaluable en cada paso.

Abdón

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a la Dirección de Postgrados por brindarme la oportunidad de llevar a cabo este programa de Maestría en Electricidad en Sistemas Eléctricos de Potencia. Su compromiso con la formación de profesionales es admirable.

Agradezco profundamente a mi tutor, MSc. Gabriel Napoleón Pesantez Palacios, por su valiosa orientación, paciencia y apoyo incondicional durante todo el proceso. Su experiencia y dedicación fueron fundamentales al desarrollo de este trabajo.

A mi querida familia, en especial a mi esposa e hijos, gracias por su amor, comprensión y aliento constante. Su apoyo ha sido el pilar que me permitió culminar esta etapa.

¡A todos, muchas gracias!

Abdón Vega

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

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

Latacunga. noviembre, 13, 2024



.....
Ing. Vega Guashca Abdón Rogelio
C.I. 0502423841

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. noviembre, 13, 2024

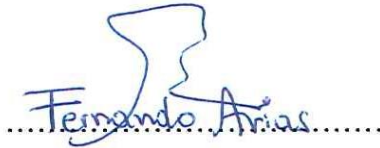


Ing. Vega Guashca Abdón Rogelio
C.I. 0502423841

AVAL DEL PRESIDENTE

Quien suscribe, declara que el presente Trabajo de Titulación: “Estudio de Campos Electromagnéticos en la Subestación Eléctrica Tisaleo, perteneciente a la Corporación Eléctrica Del Ecuador Unidad De Negocio TRANSELECTRIC”, contiene las correcciones a las observaciones realizadas por los miembros del tribunal en la predefensa.

Latacunga. noviembre 13, 2024



.....*Fernando Arias*.....

MSc. Fernando Rafael Arias Atiaja

C.I. 0502556251

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
DIRECCIÓN DE POSGRADO
MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD
MENCIÓN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

Título: Estudio de Campos Electromagnéticos en la Subestación Eléctrica Tisaleo, perteneciente a la Corporación Eléctrica Del Ecuador Unidad De Negocio TRANSELECTRIC.

Autor : Vega Guashca Abdón Rogelio

Tutor : Pesantez Palacios Gabriel Napoleón. Msc

RESUMEN

En la actualidad las radiaciones de los campos electromagnéticos producidos en las líneas de transmisión y en las subestaciones en operación, son un área de estudio crítica debido a su impacto en la salud, la seguridad y el funcionamiento de los equipos. Esto impulsa la investigación con el fin de analizar, precautelar y mantener un control sobre estos campos. En este contexto, el presente trabajo se centra en el análisis de datos recopilados en tiempo real en la Subestación Eléctrica Tisaleo, que incluye patios de 500 kV y 230 kV, así como las bahías de entrada y salida de las líneas de transmisión, el patio de barras, las bahías acopladoras, las bahías de relación de transformación y las casetas de control. El objetivo es determinar si las mediciones, modelaciones y simulaciones obtenidas se encuentran dentro de los límites permisibles establecidos por la normativa vigente. Los resultados obtenidos de esta investigación descriptiva indican que el nivel de exposición en las áreas vulnerables no supera los umbrales establecidos, lo que garantiza la integridad de las personas en esas zonas. Finalmente, el estudio de los campos electromagnéticos en subestaciones de alta tensión es fundamental para asegurar la seguridad de los operadores y la integridad de los equipos, alineándose con las regulaciones internacionales para mitigar riesgos asociados.

PALABRAS CLAVE: Campos electromagnéticos; subestación Tisaleo; radiación no ionizante; simulaciones Matlab y Quickfield, Seguridad Laboral.

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
DIRECCIÓN DE POSGRADO
MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD
MENCIÓN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

Topic: Electromagnetic fields study in the Tisaleo Electrical Substation, belonging to the Electric Corporation from Ecuador TRANSELECTRIC Business Unit.

Author: Vega Guashca Abdón Rogelio

Tutor: Pesantez Palacios Gabriel Napoleón Msc.

ABSTRACT

Currently, electromagnetic field radiations produced in the transmission lines and substations in operation is a study critical area, due to its impact on health, safety and equipment operation. This propels research with the purpose to analyze, precautionary and maintain control over these fields. In this context, the current work focuses on the data analysis collected in real time at the Tisaleo Electrical Substation, which includes 500 kV and 230 kV yards, as well as the transmission lines input and output bays, the busbar yard, the coupling bays, the transformation ratio bays and the control booths. The aim is to determine whether got measurements, models and simulations are within the permissible limits established by current regulations. The got results from this descriptive research indicate, what the exposure level in vulnerable areas does not exceed the established thresholds, which ensures the integrity from people in those areas. Finally, the electromagnetic fields study in high voltage substations, it is essential to ensure the operators safety and the integrity of equipment, aligning with international regulations to mitigate associated risks.

KEYWORDS: Electromagnetic fields, Tisaleo substation, non-ionizing radiation, Matlab and Quick field simulations, occupational safety.

Yo, Marco Paúl Beltrán Semblantes con cédula de identidad número: 0502666514 Magíster en Lingüística Aplicada en la enseñanza del Idioma Inglés como Lengua Extranjera con número de registro de la SENESCYT ; 1020-2021-2354162: CERTIFICO haber revisado y aprobado la traducción al idioma Inglés del resumen del trabajo de investigación con el título: “ESTUDIO DE CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS EN LA SUBESTACIÓN ELÉCTRICA TISALEO, PERTENECIENTE A LA CORPORACIÓN ELÉCTRICA DEL ECUADOR UNIDAD DE NEGOCIO TRANSELECTRIC” de: Vega Guashca Abdón Rogelio, aspirante a Magíster en Electricidad Mención Sistemas Eléctricos De Potencia.

Latacunga, noviembre del 2024.

Atentamente,



Mg. Marco Paúl Beltrán Semblantes

DOCENTE CENTRO DE IDIOMAS-UTC



CENTRO
DE IDIOMAS

ÍNDICE DE CONTENIDOS

INTRODUCCIÓN	1
Planteamiento del problema	2
Formulación del problema.....	2
Objetivo General	3
Objetivos Específicos	3
Estructura de tareas orientada hacia el cumplimiento de metas específicas.	3
Justificación.....	4
Hipótesis.....	4
1. CAPÍTULO I. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	5
1.1 Contexto o base del estado del arte	5
1.2 Conceptos básicos de electromagnetismo.....	7
1.3 Campo Eléctrico.....	8
1.3.1 Punto de carga única	9
1.3.2 Carga distribuida	10
1.3.3 Sistemas de Cargas Distribuidas	10
1.3.4 Líneas de Campo Eléctrico	11
1.3.5 Flujo Eléctrico.....	12
1.3.6 Ley de Gauss	13
1.4 Campo Magnético	14
1.4.1 Ley de Biot Savart.....	14
1.4.2 Ley de Ampere	14
1.4.3 Ley de Lorentz	15
1.4.4 Flujo magnético y ley de inducción de Faraday.....	15
1.5 Ecuaciones de Maxwell.....	16
1.5.1 Densidad de Carga y Campo Eléctrico	16
1.5.2 Estructura del Campo Eléctrico	17
1.5.3 Variación del Flujo Magnético.....	17
1.5.4 Generalidad de Campo Magnético.....	18
1.6 Campo Electromagnéticos	18
1.6.1 Campos Electromagnéticos Naturales.....	19
1.6.2 Campos Electromagnéticos Artificiales.....	19
1.6.3 Radiación de Alta Frecuencia	19

1.6.4	Radiación de Baja Frecuencia.....	20
1.6.5	Radiación en Líneas de Transmisión y Subtransmisión	20
1.6.6	Radiación en Subestaciones	21
1.7	Normativas	21
1.7.1	Normativa internacional IEEE Std 644-1994	22
1.7.2	Guías de la ICNIRP (Comisión Internacional de Protección contra la Radiación No Ionizante) para limitar la exposición a campos electromagnéticos (100 kHz a 300 GHz).....	22
1.7.3	Norma ecuatoriana	25
1.7.4	Normativas para la Medición de Campos Electromagnéticos	26
1.8	Conclusiones del capítulo I.....	27
2.	CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS	29
2.1	Título del proyecto	29
2.2	Objetivo del proyecto.....	29
2.3	Presentación de la propuesta	29
2.4	Metodología empleada para el cumplimiento del objetivo	30
2.5	Proceso de medición.	31
2.5.1	Características de quipos propuestos para la medición.....	33
2.6	Modelación en software MATLAB	33
2.6.1	Modelación de línea, saliente, entrante en bahías y embarrados.	34
2.7	Simulación en software QuickField student 6.4	40
2.7.1	Comparativa de resultados.	43
2.8	Conclusiones del capítulo II.....	43
3.	CAPÍTULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	45
3.1	Análisis de resultados.....	45
3.1.1	Descripción y datos para medición modelación y la simulación.	45
3.1.2	Etapa 1: Resultados de campos electromagnéticos patio de 500 kV. 50	
3.1.3	Etapa 2: Resultados campos electromagnéticos en patio de 230 kV. 57	
3.1.4	Etapa 3: Resultados de Casetas y Sala de Control.	60
3.2	Validación de los resultados.....	63
3.3	Conclusiones del capítulo III	65
	Conclusiones generales	67
	Recomendaciones.....	69
	Referencias Bibliográficas	70

Anexos	76
--------------	----

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Sistemas de tareas en relación con los objetivos específicos	3
Tabla 2. Intensidades típicas de CEM en líneas de transmisión.	20
Tabla 3. Niveles de referencia para campos magnéticos de 60 Hz.	23
Tabla 4. Niveles de exposición ocupacional a campos eléctricos y magnéticos..	24
Tabla 5. Niveles de exposición poblacional, campos eléctricos y magnéticos. ...	24
Tabla 6. Magnitudes de referencia para la exposición de campos electromagnéticos.....	25
Tabla 7. Evaluación de resultados obtenidos con la normativa ICNIRP.	64

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Comportamiento de cargas.....</i>	9
<i>Figura 2. Superposición de campos eléctricos.</i>	11
<i>Figura 3. Dirección de campos eléctricos.</i>	12
<i>Figura 4. Superposición de campos eléctricos.</i>	12
<i>Figura 5. Metodología propuesta para el estudio</i>	30
<i>Figura 6. Mallado de subestación, primeras mediciones etapa 1 y etapa 2</i>	31
<i>Figura 7. Mallado de subestación, segundas mediciones.....</i>	32
<i>Figura 8. Modelación de conductores – configuración plana.....</i>	35
<i>Figura 9. Evaluación de las contribuciones al campo eléctrico en la ubicación específica del punto M</i>	37
<i>Figura 10. Flujo de trabajo para la modelación de CEM con MATLAB.....</i>	39
<i>Figura 11. Versión estudiantil de QuickField.....</i>	40
<i>Figura 12. Guía para la simulación de la distribución de campos electromagnéticos</i>	40
<i>Figura 13. Creación de una nueva simulación.</i>	41
<i>Figura 14. Representación de un conductor.....</i>	41
<i>Figura 15. Modificación de propiedades y magnitudes.....</i>	42

<i>Figura 16. Creación de malla</i>	42
<i>Figura 17. Distribución de campos en un conductor -resultados</i>	43
<i>Figura 18. Disposición de bahías de líneas, ATI, barras de la subestación Tisaleo 500 kV.....</i>	46
<i>Figura 19. Puntos de medición, primera etapa – patio de 500 kV Subestación Tisaleo.</i>	47
<i>Figura 20. Disposición de líneas y barras de la subestación Tisaleo 230 kV.</i>	48
<i>Figura 21. Puntos de medición, segunda etapa – patio de 230 kV Subestación Tisaleo.</i>	49
<i>Figura 22. Puntos de medición, tercera etapa – vista general Subestación Tisaleo.</i>	49
<i>Figura 23. Resultado medidos campos electromagnéticos Etapa 1, patio de 500 kV.....</i>	50
<i>Figura 24. Modelación de distribución del campo eléctrico en patio de 500 kV.</i>	51
<i>Figura 25. Distribución del campo magnético en patio de 500 kV.</i>	52
<i>Figura 26. Campos electromagnéticos calculados con MATLAB, Bahía El Inga</i>	53
<i>Figura 27. Campos electromagnéticos calculados con MATLAB, bahía Chorrillos.</i>	54
<i>Figura 28. Campos electromagnéticos simulados en QuickField, bahía El Inga</i>	55
<i>Figura 29. Campos electromagnéticos simulados en QuickField, bahía Chorrillos</i>	56
<i>Figura 30. Distribución de campos electromagnéticos obtenidas, patio de 230 kV.</i>	57
<i>Figura 31. Distribución del campo eléctrico en patio de 230 kV en MATLAB.</i>	58
<i>Figura 32. Distribución del campo magnético en patio de 230 kV en MATLAB.</i>	59
<i>Figura 33. Resultados de campos electromagnéticos en casetas, sala de control medidos.</i>	60
<i>Figura 34. Distribución del campo eléctrico en casetas y sala de control en MATLAB.....</i>	61

INTRODUCCIÓN

Este proyecto forma parte del programa formativo “Estrategias de planeación de sistemas eléctricos en el contexto de la transición energética” y se ajusta a las líneas de investigación enfocada a energías alternativas y renovables, eficiencia energética y protección ambiental, de las cuales se deriva una sub-línea orientada a la conversión y uso racional de la energía encaminada a la sostenibilidad energética y medio ambiente.

La investigación realiza un análisis detallado sobre la inducción de campos electromagnéticos en el patio de la subestación Tisaleo, donde los equipos operan a voltajes de 500 kV/230 kV y manejan una demanda fluctuante de hasta 723 MW.

El trabajo de investigación está estructurado en tres capítulos, los que se detallan de siguiente forma: en el Capítulo I, se desarrolla la Fundamentación Teórica- Metodológica, en primer lugar, se refiere a todos los conceptos relacionados a los temas y subtemas de la investigación, incluyendo las referencias bibliográficas pertinentes sobre campos electromagnéticos en subestaciones y líneas de transmisión, conforme a las normas IEEE. Luego en la segunda parte de este capítulo se trata sobre la metodología a ser utilizada en la investigación relacionada con el análisis de la distribución y composición de los campos electromagnéticos producidos en la subestación Tisaleo, utilizando mediciones y simulaciones del sistema, con la finalidad de comprender su distribución e impacto, así como los elementos indispensables para formular una propuesta que responda al problema identificado en este análisis. El Capítulo II, presenta la solución propuesta para el problema planteado, abordando aspectos como el título de la propuesta, el objetivo, la justificación, la fundamentación y el desarrollo de la metodología, que explican la propuesta en su totalidad. Por su parte, el Capítulo III, se centra en la implementación y validación de la propuesta, es decir, en la aplicación práctica de lo definido previamente. Luego de estos capítulos se detallan los resultados, conclusiones y recomendaciones, para finalizar, se detalla la bibliografía y los anexos que puedan existir.

Planteamiento del problema

El Sistema Nacional de Transmisión de Ecuador está compuesto por líneas de transmisión de 500 kV, 230 kV y 138 kV. Su funcionamiento depende de subestaciones que actúan como nodos dentro del Sistema Eléctrico de Potencia (SEP) y operan a distintos niveles de voltaje para tareas de elevación, reducción y seccionamiento.

La Subestación Tisaleo opera a un nivel de tensión de 500 kV/230 kV/34.5kV, con un banco de Autotransformadores de potencia 450 MVA. Esta infraestructura comprende en patio de 500 kV con una bahía línea de entrada y una bahía de línea de salida, además existe bahías de Autotransformador ATI, acople y patio de barras 1 y 2, respecto a patio de 230 kV, existe bahías ATI, acople, patio de barras 1 y 2 y las cuatro bahías de salida, en actualidad se encuentra desenergizado por falta de construcción de las líneas de subtransmisión. Además, existe transformador terciario para el sistema de servicios auxiliares. Esta configuración destaca la necesidad de realizar un análisis exhaustivo del campo electromagnético presente en los patios, casetas y sus alrededores. Este estudio es crucial para identificar posibles impactos en la salud y establecer límites de seguridad adecuados.

Cada una de estas subestaciones está compuesta de un conjunto de equipos, estructuras, dispositivos eléctricos de potencia que manejan voltajes y corrientes variables en el tiempo, lo que da lugar a la generación de campos electromagnéticos en las bahías. En el contexto de la operación y mantenimiento de subestaciones eléctricas, la interacción en zonas de influencia de campos electromagnéticos (CEM) ha suscitado preocupaciones significativas debido a su potencial impacto en la salud humana y el medio ambiente. Aunque existen regulaciones y directrices para limitar la exposición a estos campos, la falta de estudios exhaustivos y la complejidad de las condiciones operativas en las subestaciones plantean desafíos para comprender y mitigar adecuadamente estos riesgos.

Formulación del problema

¿Es posible analizar los campos electromagnéticos generados por el sistema eléctrico de potencia en la Subestación Eléctrica Tisaleo?

Objetivo General

Analizar la distribución y composición de los campos electromagnéticos producidos en la subestación Tisaleo, utilizando mediciones y simulaciones del sistema, con la finalidad de comprender su distribución e impacto.

Objetivos Específicos

- Realizar una investigación bibliográfica referentes a campos electromagnéticos generados por sistemas eléctricos de potencia.
- Evaluar los niveles de campos electromagnéticos que generan los equipos de potencia de una subestación.
- Analizar el comportamiento y la modelación de los campos electromagnéticos en diferentes condiciones operativas de la subestación.

Estructura de tareas orientada hacia el cumplimiento de metas específicas.

Tabla 1. Relación entre los sistemas de tareas y los objetivos definidos.

Objetivos específicos	Actividad (tareas)	Resultado de la actividad	Descripción de la actividad (técnicas e instrumentos)
Realizar una investigación bibliográfica referentes a campos electromagnéticos generados por sistemas eléctricos de potencia y la revisión de las normativas aplicables.	Revisión bibliográfica referente a radiación de campos electromagnéticos y la seguridad y salud ocupacional.	Desarrollo del marco teórico a base de las normativas técnicas y las regulaciones.	Investigación en tesis, Artículos y Documentos Científicos.
Evaluar los niveles de campos electromagnéticos que generan los equipos de potencia de la subestación.	Aplicación de puntos de medición en sitio señalados con un equipo especializado analizador de Espectro.	Recopilación de datos medidos que permitirá analizar los resultados en diferentes áreas con una demanda carga variable. Determinar área de mayor exposición de campos electromagnéticas.	Medición en condiciones ambientales adecuadas utilizando equipo analizador de Espectro y el termohigrómetro. Simulación en software adecuado.
Analizar los resultados y el comportamiento de campos electromagnéticos.	Elaborar un cuadro comparativo con datos medidos y simulados.	Contrarrestar datos obtenidos con las normativas y determinar el grado de exposición de CEM.	Se utilizo método cualitativo.

Fuente: Autor

Justificación

La investigación aborda diversos enfoques para analizar los campos electromagnéticos. Inicialmente, se emplean mediciones directas en el lugar de interés para recopilación de los datos. Posteriormente, se utiliza software especializado para simular y evaluar los campos electromagnéticos, asegurando la conformidad con las normativas pertinentes.

Este proyecto de investigación tiene como objetivo determinar la distribución del campo electromagnético en la subestación Tisaleo. Para ello, se realiza un estudio cualitativo que incluye observaciones en el lugar para un análisis detallado. A través de este proceso, se busca medir los valores actuales de los campos electromagnéticos y compararlos con los límites de exposición seguros, asegurando así la protección y el bienestar de las personas.

En Ecuador, las instituciones que operan en el sector eléctrico están regidas por normas técnicas ambientales que establecen límites para la propagación de CEM en el espectro de frecuencias más bajas [1]. El estudio del campo electromagnético en subestaciones eléctricas es esencial para garantizar la seguridad del personal, proteger el medio ambiente, minimizar la interferencia electromagnética en los equipos a fin de diseñar y operar eficientemente las subestaciones y de esta manera cumplir con las regulaciones y estándares de seguridad [2].

Hipótesis

¿Es posible analizar los campos electromagnéticos dentro de la subestación aplicando software especializado?

1 CAPÍTULO 1. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

1.1 Contexto o base del estado del arte

La subestación eléctrica Tisaleo, gestionada por CELEC EP TRANSELECTRIC, es parte del Sistema de Transmisión Nacional de Ecuador y se encuentra en la provincia de Tungurahua. Este es un nodo crítico para la transmisión de energía a nivel de voltaje de 500 kV, asociados a 230 kV, cuenta con un predio total de veinte y nueve hectáreas y su infraestructura de construcción está centrada en diez hectáreas, la mayor parte externa está rodeada por predios agrícolas, la parte norte y sur que conectan a varias líneas de transmisión provenientes de las subestaciones Chorrillos y El Inga, además en patio de 230 kV con futuras transmisiones de energía en doble circuito hacia las subestaciones Totorá y Quevedo.

Los campos electromagnéticos (CEM) presentes en las subestaciones eléctricas representan una preocupación significativa tanto para los ingenieros como para los profesionales de la salud, dado el creciente papel que la infraestructura eléctrica desempeña en la sociedad. Estas subestaciones son fundamentales en la transmisión y distribución de electricidad, ya que permiten reducir los altos niveles de tensión a valores manejables para los consumidores [1]. Sin embargo, el proceso de transmisión genera CEM que pueden extenderse más allá de las subestaciones, lo que plantea riesgos para la salud de los trabajadores y residentes cercanos. Por ello, es crucial comprender y mitigar los posibles impactos de los CEM para proteger tanto la salud pública como la eficiencia energética.

El tratamiento de los CEM en subestaciones requiere un análisis detallado de sus fuentes y características. Los equipos de alto voltaje, como los transformadores, interruptores y líneas aéreas, generan CEM con variaciones en intensidad y alcance. Una inquietud específica es la exposición continua a campos de frecuencia extremadamente baja (ELF), la cual algunos estudios han vinculado a diversos problemas de salud, incluyendo el estrés y otras afecciones más graves [2]. Para

garantizar la seguridad, es fundamental medir y modelar con precisión estos campos, y desarrollar estrategias efectivas de mitigación. Las herramientas de simulación avanzadas permiten predecir la distribución de los campos electromagnéticos y detectar puntos críticos donde la intensidad podría representar un riesgo [3].

La gestión de los CEM en subestaciones presenta desafíos técnicos, tanto para reducir su impacto en la salud humana como para mejorar el rendimiento de los equipos. Se han propuesto varias medidas de protección, como el uso de apantallamiento magnético, la colocación estratégica de equipos y la implementación de equipos de protección personal para los trabajadores [4]. Estas medidas ayudan a reducir la intensidad de los campos en áreas críticas sin comprometer el funcionamiento de la subestación. Además, los sistemas de monitoreo continuo permiten rastrear los niveles de campos electromagnéticos en tiempo real, facilitando ajustes para garantizar el cumplimiento de las normativas de seguridad. Estos esfuerzos no solo mejoran los estándares de salud ocupacional, sino que también incrementan la fiabilidad de la infraestructura eléctrica [4].

Un estudio sobre la línea de transmisión de 230 kV (Santa Rosa – Totoras), en Ecuador, estimó los campos electromagnéticos producidos y examinó sus impactos en las comunidades vecinas [5]. Los investigadores utilizaron técnicas de modelado numérico, complementadas con mediciones de campo, para validar los resultados. Las conclusiones del estudio indicaron que los niveles de CEM estaban dentro de los estándares internacionales, lo que proporcionó tranquilidad a las comunidades afectadas. Además, este trabajo mejoró la comprensión de la distribución de los CEM en líneas de alta tensión, ofreciendo una referencia para futuras evaluaciones en contextos similares.

En la subestación de Tena, Ecuador, el estudio se centró en la distribución de CEM y en cómo esta experimenta un impacto debido al incremento en la demanda eléctrica y las modificaciones en la infraestructura [6]. Los investigadores realizaron mediciones de campo y utilizaron modelos computacionales para simular la distribución de los CEM. Los resultados mostraron una clara correlación entre la demanda eléctrica y la intensidad de los campos electromagnéticos, subrayando la

importancia de una supervisión continua para garantizar la seguridad. Aunque los niveles actuales de exposición se consideraron seguros, se destacaron áreas donde se debe prestar mayor atención a medida que crece la demanda.

En una planta minera en Ecuador, se evaluaron los sistemas de diseñados para identificar su eficacia en la protección contra la exposición a campos electromagnéticos [7]. Mediante simulaciones y mediciones de campo, los investigadores identificaron áreas que podrían beneficiarse de mejoras en la protección. Los resultados sugirieron que la optimización de estos sistemas podría reducir la interferencia electromagnética y mejorar significativamente la seguridad, en términos laborales. El estudio subrayó la relevancia de disponer de sistemas de apantallamiento efectivos en entornos industriales, donde existe un riesgo constante de exposición a campos electromagnéticos.

Por último, un estudio adicional en subestaciones de media y alta tensión en Ecuador analizó la distribución de los campos electromagnéticos e identificó las áreas críticas con los niveles más altos de exposición [8]. Los investigadores utilizaron mediciones de campo y modelos computacionales para analizar los patrones de distribución de los campos. Se identificaron áreas con niveles elevados de campos electromagnéticos, lo que destacó la necesidad de implementar mejoras en las medidas de seguridad. Los resultados subrayan la importancia de una supervisión proactiva y ajustes en el diseño de las subestaciones para mitigar los riesgos para el bienestar y garantizar que se respeten las normativas de seguridad.

1.2 Conceptos básicos de electromagnetismo

En esta sección, se abordan los principios básicos del electromagnetismo, comenzando con una revisión del campo eléctrico, un concepto fundamental en la interacción de cargas dentro de un entorno eléctrico, como el de una subestación. A continuación, se examina cómo las cargas puntuales y distribuidas generan campos eléctricos y cómo estos campos afectan el diseño, así como, la operación de sistemas eléctricos de alta tensión. Además, se analiza el campo magnético, que es producto de corrientes eléctricas y es esencial en la dinámica de los sistemas electromagnéticos. Finalmente, se presentan las ecuaciones de Maxwell, que integran estos conceptos en un conjunto de leyes fundamentales para modelar y

comprender los fenómenos electromagnéticos en instalaciones críticas como la Subestación Eléctrica Tisaleo.

1.3 Campo Eléctrico

Para entender cómo pueden interactuar las partículas sin necesidad de contacto directo, se desarrolló el concepto de una región espacial especial capaz de generar efectos físicos y eléctricos. Esta área, conocida como campo eléctrico, permite que surja una fuerza debida a la atracción o repulsión entre cuerpos con carga. Gracias a esta noción, es posible analizar y prever la intensidad de la acción de la fuerza ejercida sobre una carga en una ubicación concreta [9].

Cuando un cuerpo con carga se sitúa cerca de otro cuerpo cargado, surge en esa área una fuerza de campo eléctrico. Si las cargas son de signos opuestos, el campo generará una atracción mutua; en cambio, siempre que las dos cargas presenten el mismo signo, se manifestará una fuerza que las separará. La fuerza de este campo eléctrico, originada por una carga en una ubicación específica, se conoce como la amplitud del campo, que se puede derivar usando la Ecuación 1 [10].

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_0}{q_0} \left[\frac{N}{C} \right] \quad (1)$$

Para comprender cómo actúa una carga en presencia de una fuerza eléctrica, se introduce la relación entre dicha fuerza, representada como \vec{F}_0 , y una carga de prueba q_0 , lo cual nos lleva al concepto de intensidad del campo eléctrico, denotado por \vec{E} . Esta magnitud, en el sistema SI, se expresa mediante la unidad newton por coulomb, indicando la intensidad de la fuerza que actúa sobre cada carga unitaria. Además, el campo eléctrico se representa mediante un vector en cada punto del espacio, que señala la forma en que una fuerza actúa sobre una carga de prueba varía si esta es positiva, adaptándose a las propiedades de la carga o negativa, según la Ecuación (1) [11].

De forma comparable a la influencia gravitacional terrestre, que atrae a personas y objetos dentro de su alcance, existen fuerzas generadas por cargas que interactúan y crean campos eléctricos en el espacio. Estos campos, semejantes a la gravedad,

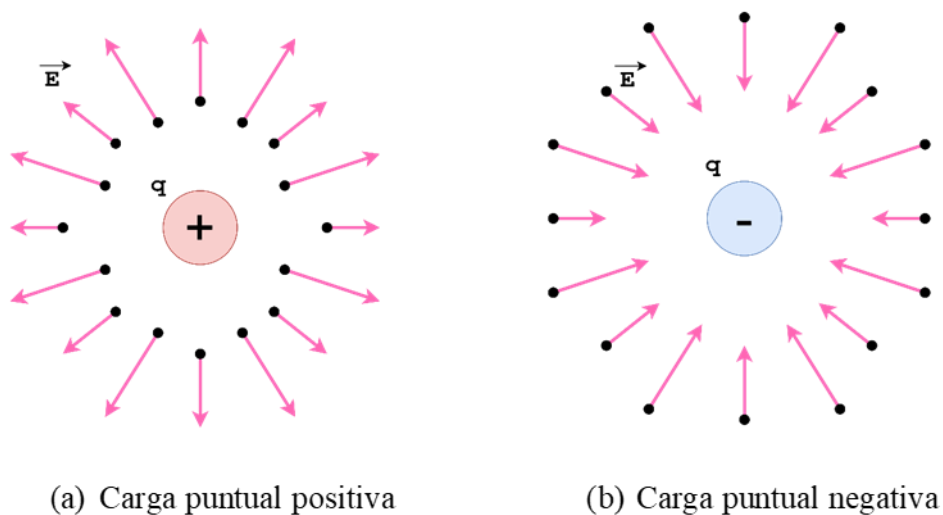
influyen en su entorno y son producidos por diferentes tipos de cargas que interactúan en su proximidad [12].

1.3.1 Punto de carga única

La Ecuación 2 [13] se emplea para estimar la magnitud del campo eléctrico generado en el entorno de una carga puntual aislada [13].

$$\vec{E} = \frac{|q_1 q_2|}{4\pi\epsilon_0 * r^2} \quad (2)$$

Con el fin de determinar el campo eléctrico en el punto P a cierta distancia r de una carga puntual, se considera esta carga como el origen de la medición. Para señalar la dirección del campo hacia el punto específico, se utiliza el vector unitario \hat{r} en la ecuación. En el escenario de una carga puntual con signo positivo, el campo se extiende en líneas dirigidas hacia fuera, proyectándose hacia el exterior, provocando una repulsión sobre una carga de prueba positiva, como se muestra en la Figura 1 [14]. Por el contrario, si se trata de una carga puntual negativa, las líneas de campo se orientan hacia la carga, generando una atracción de la carga de prueba positiva hacia la fuente [15].



*Figura 1. Comportamiento de cargas.
Fuente: [15]*

1.3.2 Carga distribuida

Imaginemos una carga distribuida en el espacio, compuesta por innumerables elementos pequeños que, al actuar conjuntamente, generan un campo eléctrico total [16]. Para determinar el valor del campo en un punto específico, se suman las contribuciones de cada uno de estos elementos mediante un proceso de integración, como se describe en la Ecuación 3.

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{dq\hat{r}}{r^2} \quad (3)$$

Imaginemos un pequeño fragmento de carga, dq , separado una distancia r de la ubicación precisa donde se proyecta obtener el valor del campo eléctrico. La dirección desde este fragmento hacia el punto de interés está indicada por el vector unitario \hat{r} . Cada uno de estos elementos minúsculos contribuye al campo eléctrico según su carga e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia [17]. La combinación de todas las contribuciones permite determinar el campo eléctrico total en el punto requerido, o integra, la contribución de todos los fragmentos a lo largo de la distribución de carga, considerando tanto su magnitud como su dirección.

1.3.3 Sistemas de Cargas Distribuidas

Cuando múltiples cargas están distribuidas en un sistema, al aplicar el principio de superposición, es posible evaluar el campo eléctrico en un punto concreto del espacio [18]. Este principio establece que el campo eléctrico total se obtiene sumando vectorialmente los campos individuales generados por cada carga en el sistema, como se detalla en la Ecuación 4.

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \dots \quad (4)$$

Consideremos que cada carga o distribución de carga en el sistema genera su propio campo eléctrico, como $\vec{E}_1, \vec{E}_2, \vec{E}_3$, que representan los efectos de estas fuentes individuales [18]. La suma vectorial de estos campos considera tanto la magnitud como la dirección de cada uno, produciendo un campo eléctrico total que refleja la influencia combinada de todas las cargas presentes [19]. Este método resulta

especialmente útil para analizar sistemas complejos con múltiples cargas, ya que permite calcular con precisión el campo resultante en cualquier punto específico. El principio de superposición es fundamental en muchas áreas del electromagnetismo, especialmente para examinar campos generados por distribuciones de carga, como las lineales, superficiales y volumétricas, como se representa en la Figura 2.

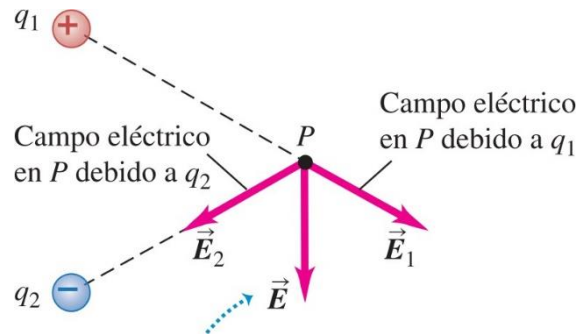


Figura 2. Superposición de campos eléctricos.
Fuente: [19]

1.3.4 Líneas de Campo Eléctrico

Al observar una región donde actúa un campo eléctrico, las líneas que representan este campo ofrecen una guía visual de su comportamiento, indicando tanto la dirección como la intensidad relativa del campo. La Figura 3 ilustra este fenómeno, destacando la orientación del campo eléctrico. Para que estas líneas reflejen correctamente la dirección del campo, se dibujan tangentes al vector de campo en cada punto, mostrando así hacia dónde se movería una carga de prueba positiva si estuviera en el campo, como se ejemplifica en la Figura 4 [14]. La densidad de las líneas también proporciona información sobre la fuerza del campo: cuanto más cercanas estén entre sí, mayor es la intensidad; mientras que una mayor separación sugiere un campo más débil [20]. En el caso de cargas opuestas, las líneas emergen de la carga positiva y se dirigen hacia la carga negativa, lo que visualiza la fuerza de atracción entre ellas [9]. En cambio, cuando las cargas son del mismo signo, las líneas de campo se desvían unas de otras, indicando una interacción de repulsión.

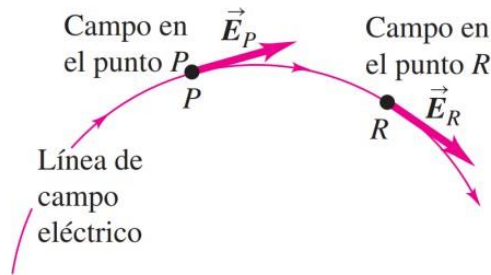


Figura 3. Dirección de campos eléctricos.
Fuente: [21]

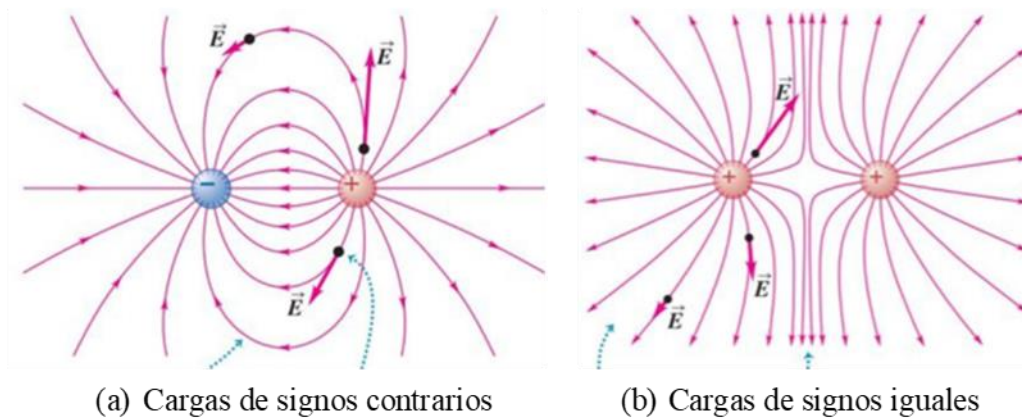


Figura 4. Superposición de campos eléctricos.
Fuente: [21]

1.3.5 Flujo Eléctrico

Para entender cómo interactúa un campo eléctrico con una superficie física, se emplea el concepto de flujo eléctrico, que cuantifica la cantidad de campo que atraviesa esa superficie [22]. Este flujo se define como el producto de la componente del campo eléctrico perpendicular a la superficie y el área de la superficie misma. Cuando el campo eléctrico es uniforme, el flujo, representado por Φ_E , a través de una superficie A se puede calcular directamente mediante la Ecuación 4:

$$\Phi_E = E * A \tag{4}$$

Sin embargo, en casos donde el campo no es uniforme o la superficie es curva, el cálculo se vuelve más complejo, requiriendo una integración sobre toda el área de la superficie para considerar tanto las variaciones en la intensidad del campo como

la orientación de cada sección de la superficie [22]. Bajo estas condiciones, el flujo se representa mediante la Ecuación 5:

$$\Phi_E = \int E * dS \left[\frac{Nm^2}{C} \right] \quad (5)$$

En esta ecuación, dS representa un área infinitesimal de la superficie, y el producto escalar $E * dS$ incorpora solo la componente del campo eléctrico perpendicular a esa área [10]. La suma de todas estas contribuciones, obtenida a través de la integración, da el flujo total a través de la superficie. Este concepto es fundamental en el estudio del electromagnetismo, especialmente en la ley de Gauss, que vincula el flujo eléctrico a través de una superficie cerrada con la carga total contenida en su interior [18].

1.3.6 Ley de Gauss

Imaginemos una superficie cerrada en el espacio, llamada superficie gaussiana, que captura la interacción fundamental entre el campo eléctrico y la carga contenida en su interior [9]. La ley de Gauss describe esta relación estableciendo que el flujo eléctrico a través de esta superficie es proporcional a la cantidad de carga encerrada, sin importar la forma o el tamaño de la superficie en sí. Matemáticamente, esta relación se expresa mediante la Ecuación 6:

$$\Phi_E = \int E * dS = \frac{q_{int}}{\epsilon_0} \quad (6)$$

En esta formulación, la carga total dentro de la superficie se representa como q_{int} , mientras que ϵ_0 es la permitividad del vacío, una constante que describe cómo el campo eléctrico interactúa con el espacio vacío. Este principio permite simplificar el análisis de campos eléctricos, especialmente en sistemas con simetría notable, como configuraciones esféricas, cilíndricas o planas, donde la evaluación de la integral de superficie se vuelve manejable. Al seleccionar cuidadosamente una superficie gaussiana que refleje la simetría del sistema, es posible relacionar directamente la carga encerrada con el campo eléctrico resultante, convirtiendo esta ley en una herramienta poderosa y versátil para resolver problemas de electrostática [15].

1.4 Campo Magnético

El movimiento de cargas eléctricas, típicamente dentro de un conductor, genera campos magnéticos. La forma, fuerza y orientación de estos campos pueden entenderse y calcularse mediante principios y ecuaciones fundamentales. Entre estas leyes, la ley de Biot-Savart destaca como una herramienta esencial para determinar la configuración de los campos magnéticos y comprender cómo se generan y se comportan en diversas circunstancias [23].

1.4.1 Ley de Biot Savart

Cuando una corriente fluye a través de un pequeño segmento conductor, genera un campo magnético en el espacio circundante. Este fenómeno se describe mediante una relación fundamental que establece que el campo magnético (dB) en un punto específico es proporcional a la corriente (I) que atraviesa el segmento y disminuye en intensidad inversamente con el cuadrado de la distancia entre el punto y el segmento conductor. La fórmula que representa esta relación se encuentra en la Ecuación 7 [24]:

$$dB = \frac{\mu_0 I}{4\pi r^3} (dl * r) \quad (7)$$

En esta expresión, dl se refiere a una porción infinitesimal de corriente, r es el vector que conecta el segmento conductor con el punto de observación, y μ_0 es la permeabilidad del vacío, una constante que describe cómo el vacío influye en el campo magnético [24].

1.4.2 Ley de Ampere

La interacción entre el campo magnético y la corriente eléctrica en un circuito cerrado se describe mediante la ley de Ampere, un principio fundamental en electromagnetismo. Esta ley establece que el campo magnético a lo largo de un recorrido cerrado, o bucle, está directamente relacionado con la corriente que atraviesa esa trayectoria. La relación matemática que expresa esta ley se muestra en la Ecuación 8 [25]:

$$\oint B * dl = \mu_0 I_{enc} \quad (8)$$

En esta ecuación, I_{enc} representa la corriente total encerrada por el camino de integración, y μ_0 es la permeabilidad del vacío. La ley de Ampere es especialmente útil para calcular el campo magnético en sistemas de alta simetría, como en solenoides y toroides, donde la simetría facilita la evaluación del campo magnético.

1.4.3 Ley de Lorentz

La interacción dinámica entre campos magnéticos y cargas en movimiento se describe mediante la ley de la fuerza de Lorentz, que explica cómo una carga q experimenta una fuerza (F) cuando se desplaza con velocidad v en un campo magnético (B). La expresión matemática de esta fuerza se presenta en la Ecuación 9 [26]:

$$F = q(v * B) \quad (9)$$

Un aspecto fundamental de esta fuerza es su orientación: siempre es perpendicular tanto a la dirección del movimiento de la carga como al campo magnético mismo. Esta configuración provoca que las partículas cargadas sigan trayectorias circulares o helicoidales al moverse dentro del campo, creando patrones de movimiento característicos bajo la influencia magnética.

1.4.4 Flujo magnético y ley de inducción de Faraday.

Imaginar cómo un campo magnético interactúa con una superficie nos lleva a la idea de flujo magnético (Φ_B), una medida que depende tanto de la intensidad del campo como del área que atraviesan sus líneas de fuerza, considerando también el ángulo θ entre el campo y la normal de la superficie. Este flujo se calcula mediante la Ecuación 10 [27]:

$$\Phi_B = \int B * dA \quad (10)$$

En aplicaciones prácticas, como en sistemas eléctricos de potencia, estas líneas de flujo magnético se representan como bucles cerrados que conectan los polos norte

y sur de una fuente magnética. La densidad de estas líneas refleja la intensidad del campo, donde las líneas están más próximas, el campo es más fuerte [27].

La Ley de Inducción de Faraday conecta este flujo cambiante con la generación de una fuerza electromotriz (FEM) en un circuito cerrado. Según esta ley, cualquier variación en el flujo magnético a través de un bucle induce una FEM en el circuito, lo cual se expresa en la Ecuación 11:

$$E = -\frac{d\Phi_B}{dt} \quad (11)$$

Este principio es fundamental en el diseño de transformadores, generadores e inductores. El signo negativo representa la Ley de Lenz, que indica que la FEM inducida produce una corriente con un campo magnético que se opone al cambio en el flujo magnético inicial [27].

1.5 Ecuaciones de Maxwell

La interacción de cargas y corrientes con campos eléctricos y magnéticos es un aspecto fundamental de la teoría electromagnética y resulta especialmente relevante en instalaciones como las subestaciones eléctricas. En estos lugares, donde se gestionan altas corrientes y voltajes, se generan campos electromagnéticos de gran intensidad. Utilizando las ecuaciones de Maxwell, los ingenieros pueden diseñar subestaciones que operen de forma segura y eficiente, minimizando la interferencia electromagnética y cumpliendo con estrictas normas de seguridad [28].

1.5.1 Densidad de Carga y Campo Eléctrico

Comprender cómo un campo eléctrico surge de las cargas eléctricas es fundamental para la ley de Gauss en electricidad, que formaliza la relación entre la densidad de carga (ρ) y el campo eléctrico (E) mediante la Ecuación (12) [29]:

$$\nabla \cdot E = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (12)$$

La constante ϵ_0 , conocida como la permitividad del vacío, desempeña un papel esencial en esta relación. En subestaciones eléctricas, esta ecuación es clave para evaluar la distribución del campo eléctrico alrededor de conductores e aisladores

cargados. Un análisis preciso de esta distribución ayuda a prevenir el rompimiento dieléctrico, permitiendo que los ingenieros diseñen el aislamiento y el espaciado adecuados para soportar altos voltajes sin riesgo de arcos eléctricos ni fallas operativas.

1.5.2 Estructura del Campo Eléctrico

La disposición y cantidad de cargas eléctricas en una subestación determinan la configuración del campo eléctrico en su entorno. Este campo, representado por el vector E , posee tanto magnitud como dirección en cada punto del espacio, lo que refleja su naturaleza como un campo vectorial. Según la ley de Gauss (Ecuación 12), las líneas del campo eléctrico emergen de las cargas positivas y se dirigen hacia las cargas negativas, generando un patrón característico que varía según el diseño específico de la subestación. Un análisis detallado de esta estructura es esencial para el diseño de componentes como los aisladores, que deben gestionar adecuadamente la distribución del campo eléctrico para prevenir fallos y garantizar un funcionamiento seguro de la subestación [30].

1.5.3 Variación del Flujo Magnético

Imaginemos cómo una variación en las condiciones magnéticas Φ_B sobre una superficie puede generar un campo eléctrico. Este fenómeno, central en la ley de inducción de Faraday, es indispensable para el funcionamiento de componentes como transformadores y dispositivos inductivos en subestaciones eléctricas. La ley de Faraday, que describe matemáticamente este proceso, se presenta en la Ecuación 13 [31].

$$\nabla * B = - \frac{\partial B}{\partial t} \quad (13)$$

En esta expresión, B es el campo magnético y t es el tiempo. En subestaciones, los cambios en el flujo magnético, como los que ocurren en los devanados de los transformadores, inducen voltajes que deben ser cuidadosamente gestionados. Comprender esta ecuación permite diseñar sistemas que controlen estos voltajes inducidos, previniendo posibles interferencias o daños a otros equipos.

1.5.4 Generalidad de Campo Magnético

La presencia de corrientes eléctricas en los conductores y las variaciones en los campos eléctricos generan influencias significativas sobre el campo magnético B dentro de una subestación. Esta compleja interacción se explica mediante la ley de Ampère, ampliada con la corrección de Maxwell, que establece una relación fundamental entre el campo magnético, la densidad de corriente J , y la tasa de cambio del campo eléctrico en el tiempo. Esta interdependencia se representa matemáticamente en la Ecuación 14 [32].

$$\nabla * B = \mu_0 J + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} \quad (14)$$

La permeabilidad y la permitividad del vacío, representadas por μ_0 y ϵ_0 respectivamente, son parámetros esenciales en el cálculo de los campos magnéticos generados en subestaciones eléctricas. En estos entornos, la ecuación que incorpora estos valores es fundamental para analizar los campos alrededor de conductores activos, como las barras colectoras y las líneas de transmisión. Además, durante los procesos de conmutación, las variaciones en los campos eléctricos también pueden afectar el campo magnético circundante. La aplicación de esta ley es crucial para gestionar eficazmente los campos magnéticos, reduciendo la interferencia y promoviendo la seguridad y confiabilidad en la operación de la subestación.

1.6 Campo Electromagnéticos

Los campos electromagnéticos (CEM) son fundamentales en los sistemas de energía, ya que influyen en el funcionamiento y la seguridad de la infraestructura eléctrica. Estos campos, que comprenden componentes tanto eléctricos como magnéticos, son generados por fuentes naturales y por sistemas artificiales, como las líneas de transmisión y las subestaciones. Por ello, comprender las características y efectos de los CEM, incluyendo su frecuencia e intensidad, es necesario para el análisis y la gestión de los sistemas eléctricos. En este contexto, esta sección ofrece un análisis detallado de los CEM, centrándose en sus orígenes naturales y artificiales, su comportamiento en diferentes frecuencias, así como, su impacto en líneas de transmisión y subestaciones [33].

1.6.1 Campos Electromagnéticos Naturales

Estos provienen de fuentes como el campo magnético terrestre, fenómenos atmosféricos como los rayos y la actividad solar. Estos campos suelen tener frecuencias bajas, generalmente por debajo de los 50 Hz. Por ejemplo, el campo magnético de la tierra tiene una frecuencia cercana a 0 Hz y una intensidad aproximada de 50 μT (micro teslas). Aunque estos campos pueden interactuar con los sistemas eléctricos, su impacto es generalmente menor en comparación con los CEM artificiales generados por la infraestructura eléctrica [34].

1.6.2 Campos Electromagnéticos Artificiales

Por otro lado, los CEM artificiales son principalmente generados por sistemas eléctricos y dispositivos electrónicos. En subestaciones, líneas de transmisión y otras infraestructuras eléctricas, estos campos se producen debido a las altas tensiones y corrientes involucradas. Además, estos campos suelen tener la misma frecuencia que el sistema eléctrico (50 Hz o 60 Hz) y son significativamente más fuertes que los CEM naturales. La intensidad de estos campos puede calcularse utilizando las ecuaciones de Maxwell, particularmente la ley de Gauss para la electricidad (ver Ecuación 15) [35].

$$\nabla \cdot E = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (15)$$

En este contexto, E es el campo eléctrico, ρ es la densidad de carga, y ϵ_0 es la permitividad del vacío. Esta ecuación se utiliza para determinar la distribución del campo eléctrico en torno a los componentes del sistema eléctrico.

1.6.3 Radiación de Alta Frecuencia

Aunque la radiación de alta frecuencia, que abarca un rango amplio desde kilohertzio hasta cientos de giga Hertz, no es común en sistemas eléctricos convencionales, puede generarse en subestaciones debido a armónicos y operaciones de conmutación. Este tipo de radiación, con potencial de interferir en sistemas de comunicación, está gobernado por las ecuaciones de Maxwell, donde la ley de inducción de Faraday, presentada en la Ecuación 16, es especialmente relevante [36].

$$\nabla * E = \frac{\partial B}{\partial t} \quad (16)$$

Cuando un campo magnético B varía con el tiempo t , se genera un campo eléctrico. Este fenómeno es particularmente importante en subestaciones, donde las fluctuaciones magnéticas pueden producir radiación de alta frecuencia que impacta significativamente el entorno.

1.6.4 Radiación de Baja Frecuencia

En los sistemas eléctricos, las frecuencias que comienzan en niveles muy bajos y pueden alcanzar varios cientos de Hertz desempeñan un papel clave. Estas frecuencias están directamente relacionadas con la operación de sistemas de corriente alterna, que suelen funcionar a 50 o 60 Hz. Los campos magnéticos generados por estos sistemas se calculan mediante la ley de Ampere, aplicando la Ecuación 14 para obtener resultados precisos [37].

1.6.5 Radiación en Líneas de Transmisión y Subtransmisión

Las corrientes y tensiones elevadas en los sistemas eléctricos generan campos electromagnéticos (CEM) alrededor de las líneas de transmisión y subtransmisión. A medida que aumenta la distancia desde estas líneas, la intensidad de los campos disminuye, lo cual puede analizarse mediante modelos de distribución de campo. La Tabla 2 presenta las intensidades típicas del campo magnético medidas a diferentes distancias de las líneas de transmisión.

Tabla 2. Intensidades típicas de CEM en líneas de transmisión.

Distancia de la Línea (m)	115 kV (μT)	230 kV (μT)	500 kV (μT)
15	6.30	11.80	20.00
30	1.40	4.00	7.50
60	0.40	1.50	3.00
90	0.09	0.36	0.80

Fuente: [38]

Comprender estos valores es crucial para establecer medidas de protección adecuadas en las proximidades de las líneas de transmisión, garantizando el cumplimiento de las normativas de salud y seguridad vigentes.

1.6.6 Radiación en Subestaciones

En las subestaciones, la disposición de los campos electromagnéticos (CEM) es particularmente compleja debido a la cercanía entre diferentes equipos de alta tensión. Como resultado, las áreas alrededor de transformadores, interruptores, barras colectoras y bahías de líneas tienden a experimentar campos eléctricos y magnéticos intensos. Para estudiar estos campos magnéticos en el entorno de una subestación, se utiliza una ecuación basada en la ley de Gauss para el magnetismo [37].

$$\nabla * E = \frac{\partial B}{\partial t} \quad (17)$$

En una subestación, el comportamiento del flujo magnético en superficies cerradas muestra una característica fundamental: siempre es nulo, lo que indica que las líneas del campo magnético se estructuran en bucles cerrados sin principio ni fin. Para modelar detalladamente la distribución de los campos eléctricos y magnéticos en este entorno, se emplean las ecuaciones de Maxwell, una herramienta precisa para comprender su dinámica.

1.7 Normativas

Esta sección presenta un análisis detallado de los aspectos y procedimientos relacionados con distintas Normas Técnicas, tanto a nivel nacional como internacional. En primer lugar, es importante señalar que existen numerosas Normas Técnicas destinadas a establecer límites de exposición y métodos de medición para campos eléctricos y magnéticos. Estas normativas, formuladas por organismos especializados, cuentan con un sólido respaldo científico que garantiza su relevancia y rigor. Su aplicación se extiende a diversos sectores, como la industria, instalaciones de media y alta tensión, y terminales de radiofrecuencia, entre otros.

A nivel internacional, el análisis destaca normativas de referencia para la regulación de la exposición a campos eléctricos y magnéticos, como las establecidas por la ICNIRP (Comisión Internacional de Protección contra la Radiación No Ionizante) y el IEEE (Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos) [39]. En el contexto

local, se menciona el TULSMA (Texto Unificado de Legislación Secundaria de Medio Ambiente), que integra el Anexo 10 de la Norma de Radiaciones No Ionizantes de Campos Electromagnéticos, una referencia clave respaldada por el Tribunal Constitucional y el Ministerio del Ambiente, conforme al Registro Oficial No. 41 de 2007 [40].

1.7.1 Normativa internacional IEEE Std 644-1994

La medición precisa de campos eléctricos y magnéticos en líneas de alta tensión requiere procedimientos bien definidos, especialmente en entornos que emplean metodologías de perfil lateral y longitudinal a un metro sobre el nivel del suelo. Esta normativa internacional ofrece una guía estandarizada para dichas mediciones, incluyendo métodos para evaluar campos de frecuencia industrial cerca del suelo en líneas aéreas de corriente alterna (CA) y directrices para la calibración de los equipos de medición empleados. Además, aunque estos procedimientos pueden aplicarse en áreas próximas a conductores o estructuras energizadas, la norma establece limitaciones específicas para dichas aplicaciones [41].

1.7.2 Guías de la ICNIRP (Comisión Internacional de Protección contra la Radiación No Ionizante) para limitar la exposición a campos electromagnéticos (100 kHz a 300 GHz)

Proteger la salud ante los riesgos de exposición a campos eléctricos y magnéticos es el enfoque central de la normativa de la ICNIRP, respaldada por la Organización Mundial de la Salud (OMS). Esta regulación establece límites específicos para exposiciones a frecuencias de 60 Hz, con recomendaciones diseñadas para mitigar los efectos potencialmente dañinos de los campos electromagnéticos (CEM). Creada para proteger tanto a la población general como a los trabajadores en ambientes con radiaciones no ionizantes, esta norma abarca exposiciones generadas por sistemas eléctricos que operan a 60 Hz y por dispositivos en el espectro radioeléctrico (de 3 kHz a 300 GHz) [39].

La Tabla 3 detalla los niveles de referencia para la exposición a campos eléctricos y magnéticos de 60 Hz, diferenciando entre valores recomendados para el público en general y para personal laboralmente expuesto.

Tabla 3. Niveles de referencia para campos magnéticos de 60 Hz.

Estándar	Campo [mG]	Comentario
Comisión Internacional de Protección contra la Radiación No Ionizante, 1998.	4167.70	Ocupacional
	833.30	Público
Pre estándar europeo ENV 50166-1 (1995).	1333.30	Ocupacional
	5333.30	Público
Asociación Internacional de Protección Radiológica (IRPA).	5000.00	Ocupacional
	1000.00	Público
Junta Nacional de Planificación de Recursos (NRPB), Reino Unido	16000.00	Ocupacional
	16000.00	Público
Conferencia Americana de Higienistas Industriales Gubernamentales (ACGIH)	10000.00	Ocupacional

Fuente: [39]

Para asegurar la seguridad tanto de la población general como de los trabajadores en entornos de alta exposición, se han establecido niveles de referencia para campos eléctricos y magnéticos en distintos rangos de frecuencia, alcanzando hasta 10 GHz. Estos valores, detallados en la Tabla 4, especifican los límites recomendados para minimizar los riesgos en situaciones de exposición ocupacional y pública [39].

La escasa información sobre los efectos de picos de corriente transitoria en la salud, especialmente en rangos de frecuencias bajas, plantea desafíos para la evaluación de riesgos. En respuesta, la ICNIRP recomienda interpretar las restricciones para las densidades de corriente inducidas por campos transitorios o pulsos breves como valores instantáneos, evitando promedios que suavicen su impacto. Al establecer niveles de referencia, estos se derivan de las restricciones básicas mediante modelos matemáticos y la extrapolación de datos de estudios específicos en ciertas frecuencias.

Tabla 4. Exposición ocupacional a campos eléctricos y magnéticos: niveles permitidos y regulaciones

Rango de frecuencia	Intensidad de campo eléctrico (V/m)	Intensidad de campo magnético (A/m)	Densidad de flujo magnético (μT)	Densidad de potencia (W/m ²)
Hasta 1 Hz	–	1,63 x 10 ⁵	2 x 10 ⁵	–
1 – 8 Hz	20000	1,63 x 10 ⁵ /f ²	2 x 10 ⁵ /f ²	–
8 – 25 Hz	20000	2 x 10 ⁴ /f	2,5 x 10 ⁴ /f	–
0,025 – 0,82 kHz	500/f	20/f	25/f	–
0,82 – 65 kHz	610	24,40	30,70	–
0,065 – 65 kHz	610	1,60/f	2/f	–
1 – 10 MHz	610/f	1,60/f	2/f	–
10 – 400 MHz	61	0,16	0,20	10
400 – 2000 MHz	3 √f	0,0008 √f	0,01 √f	f/40
2 – 300 GHz	137	0,36	0,45	50

Fuente: [39]

La siguiente tabla detalla los límites de exposición recomendados para la población en relación con campos eléctricos y magnéticos, mostrando los valores efectivos (rms) en condiciones sin perturbación [39].

Tabla 5. Límites de exposición a campos eléctricos y magnéticos para la población general.

Rango de frecuencia	Intensidad de campo eléctrico (V/m)	Intensidad de campo magnético (A/m)	Densidad de flujo magnético (μT)	Densidad de potencia (W/m ²)
Hasta 1 Hz	–	3,2 x 10 ⁴	4 x 10 ⁴	–
1 – 8 Hz	10000	3,2 x 10 ⁴ /f ²	4 x 10 ⁴ /f ²	–
8 – 25 Hz	10000	4000/f	5000/f	–
0,025 – 0,8 kHz	250/f	4/f	5/f	–
0,8 – 3 kHz	250/f	5	6,25	–
3 – 150 kHz	87	5	6,25	–
0,15 – 1 MHz	87	0,73/f	0,92/f	–
1 – 10 MHz	87/√f	0,73/f	0,92/f	–
10 – 400 MHz	28	0,073	0,092 √f	2
400 – 2000 MHz	1,375 √f	0,0037 √f	0,0046 √f	f/200
2 – 300 GHz	61	0,16	0,20	10

Fuente: [39]

1.7.3 Norma Ecuatoriana

Para garantizar un ambiente seguro y minimizar los riesgos de contaminación, el Libro VI sobre Calidad Ambiental en el Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente incluye las normativas TULSMA, también recogidas en la Normativa Técnica Ambiental. Estas regulaciones, mencionadas en la Disposición General Primera del Reglamento de la Ley de Gestión Ambiental, son aplicables en sectores como telecomunicaciones y electricidad, proporcionando un marco de referencia para la infraestructura en estas industrias [42].

Con un enfoque en la seguridad, el Anexo 10 establece los “Requerimientos mínimos de seguridad para la exposición a campos eléctricos y magnéticos de 60 Hz.” Este documento abarca medidas de protección para espacios como subestaciones y sistemas de transporte de energía, así como estructuras clave como torres, postes, cables y transformadores, involucrados en la generación, transmisión, distribución y uso de la energía eléctrica. Su propósito es salvaguardar tanto al público como a los trabajadores expuestos a radiaciones no ionizantes en estos entornos [42].

Además, la Normativa Técnica Ambiental recomienda mediciones de campos eléctricos y magnéticos en zonas donde puedan presentarse efectos acumulativos con otras fuentes de radiación no ionizante de 60 Hz. En particular, esta medida se sugiere en áreas cercanas a líneas de transmisión o subestaciones en entornos habitados, garantizando la evaluación de posibles impactos en la salud de las personas que viven o trabajan en las proximidades de estas instalaciones. La Tabla 6 a continuación proporciona los niveles de referencia para la exposición a campos electromagnéticos de 60 Hz [42].

Tabla 6. Valores de referencia para la exposición a campos electromagnéticos.

Tipo de exposición	Intensidad de campo eléctrico (E) V/m	Densidad de flujo magnético (B) μT
Público en General	4167	83
Personal Ocupacionalmente Expuesto	8333	417

Fuente: [43]

1.7.4 Normativas para la Medición de Campos Electromagnéticos

Norma IEEE C95.1

El propósito central de este reglamento es establecer límites de seguridad para la exposición humana a campos electromagnéticos (CEM). Define los niveles máximos de exposición permitidos (MPE) para varios rangos de frecuencia, incluidos aquellos críticos en sistemas eléctricos. La normativa también enfatiza la importancia de realizar mediciones precisas de campos eléctricos y magnéticos para asegurar que los niveles de exposición se mantengan dentro de límites seguros. Además, proporciona directrices detalladas sobre los procedimientos de medición, desde la selección de instrumentos hasta los métodos necesarios para obtener datos fiables y exactos [44]. Estas mediciones son particularmente relevantes en subestaciones como la de Tisaleo, donde los equipos de alta tensión generan CEM de considerable intensidad.

Norma IEC 62233:2005

Esta, por su parte, establece métodos de medición para campos electromagnéticos, con un enfoque en la exposición humana. Aunque esta norma se aplica principalmente a electrodomésticos y aparatos similares, sus principios son también relevantes para entornos de mayor escala, como subestaciones eléctricas. En este sentido, la IEC 62233 proporciona procedimientos detallados para medir la intensidad del campo eléctrico y la densidad del flujo magnético, especificando los tipos de sensores, distancias de medición y condiciones necesarias para evaluaciones precisas [45]. De este modo, la norma asegura que las mediciones consideren los peores escenarios en términos de exposición, lo que la convierte en una herramienta necesaria para garantizar la seguridad en ambientes con generación significativa de CEM.

Sistemas de Medición de CEM Ambientales

Finalmente, un sistema de medición para evaluar CEM ambientales, descrito en un documento de la Conferencia de Tecnología de Instrumentación y Medición de la IEEE, utiliza una combinación de técnicas de medición de banda ancha y banda estrecha. Este sistema está diseñado para evaluar la intensidad de los campos electromagnéticos grandes áreas geográficas, lo cual es esencial para analizar la

exposición ambiental alrededor de las subestaciones. Además, el uso de sistemas de posicionamiento global (GPS) y sensores de campo electromagnético de banda ancha permite la creación de mapas geográficos detallados de la distribución de CEM, mientras que los sistemas de banda estrecha permiten mediciones más precisas en ubicaciones específicas [45]. Este enfoque dual garantiza un monitoreo y evaluación detallados de los CEM en áreas como la subestación de Tisaleo, proporcionando datos críticos para el cumplimiento de las normas de seguridad.

1.8 Conclusiones del capítulo I

A lo largo de este capítulo, se ha explorado en profundidad la literatura sobre los campos electromagnéticos (CEM) generados por sistemas eléctricos de potencia. Este análisis abarcó tanto los conceptos teóricos fundamentales como las normativas internacionales vigentes que regulan su impacto. Con base en esta revisión, se destacan las siguientes conclusiones:

- Los equipos de alta tensión, como los de subestaciones eléctricas, generan campos electromagnéticos debido a las intensas corrientes y altos voltajes que manejan. El comportamiento de estos campos sigue los principios esenciales del electromagnetismo, descritos por leyes y ecuaciones fundamentales que explican su distribución y efectos en el entorno.
- Numerosos estudios han investigado los efectos potenciales sobre la salud humana de la exposición a campos electromagnéticos de frecuencia extremadamente baja (ELF), generados por sistemas eléctricos de potencia. Para proteger tanto a los trabajadores expuestos como al público, normativas internacionales, como las directrices de la ICNIRP, establecen estrictos límites de seguridad para estos campos.
- Normativas internacionales, como la IEEE Std 644-1994 y las guías de la ICNIRP, proporcionan lineamientos para la medición y control de los CEM en entornos eléctricos. Estas normativas definen procedimientos precisos para medir los campos electromagnéticos en subestaciones y líneas de transmisión, garantizando una evaluación adecuada de los niveles de exposición.

- Estudios teóricos han confirmado que es posible modelar y calcular los campos electromagnéticos en subestaciones eléctricas mediante métodos analíticos. Estas herramientas permiten anticipar tanto la distribución como la intensidad de dichos campos, facilitando estrategias para mitigar los riesgos asociados a una exposición prolongada.

2. CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS

Para comprender y analizar los campos electromagnéticos en la subestación Tisaleo de 500 kV, se establece una metodología específica de medición y modelado. A lo largo de este capítulo, se detalla este enfoque, diseñado para evaluar con precisión las características y el comportamiento de los campos en esta instalación.

2.1 Título del proyecto

Análisis de los Campos Electromagnéticos en la Subestación Eléctrica Tisaleo, gestionada por la Unidad de Negocio TRANSELECTRIC de la Corporación Eléctrica del Ecuador.

2.2 Objetivo del proyecto

Realizar una medición in situ de los campos electromagnéticos en la subestación Tisaleo de 500 kV, operada por CELEC EP TRANSELECTRIC, con el objetivo de determinar los niveles de radiación no ionizante.

2.3 Presentación de la propuesta

El propósito central de esta iniciativa es medir con precisión los campos eléctricos y magnéticos en la subestación, considerando cuidadosamente las distancias a los equipos instalados. Para recopilar los datos necesarios, se utilizará un analizador de espectro SPECTRAN NF-5035S, calibrado según las normativas vigentes para garantizar alta precisión en las lecturas. Tras las mediciones, se realizará un análisis comparativo que incluirá la modelación de los campos en MATLAB y su simulación en QuickField.

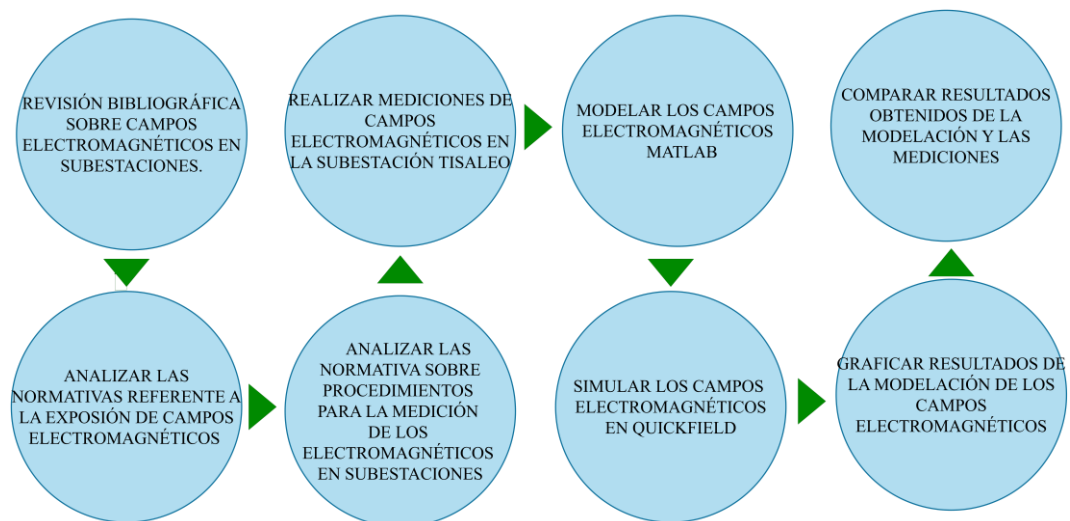
Siguiendo las pautas de la norma IEEE 644-2019, se realizarán mediciones precisas cuyos resultados se compararán con los límites de exposición establecidos por la Comisión Internacional de Protección contra las Radiaciones No Ionizantes

(ICNIRP). Este proceso tiene como objetivo fundamental asegurar la seguridad del personal expuesto y el cumplimiento de las normativas ambientales vigentes.

2.4 Metodología empleada para el cumplimiento del objetivo

El proceso de medición de radiaciones no ionizantes en la subestación se desarrolla mediante un enfoque metódico y estructurado para capturar y modelar datos, como se muestra en la Figura 5. Este procedimiento comienza con una revisión exhaustiva de estudios previos sobre la generación de campos electromagnéticos en subestaciones y bahías de líneas de transmisión de 500 kV, complementada con un análisis normativo sobre la exposición a estos campos y los protocolos de medición establecidos.

A continuación, se realizan mediciones en el sitio de los campos eléctricos mediante un analizador de espectro especializado. Los datos obtenidos se complementan con cálculos de campos electromagnéticos en Matlab, mientras que QuickField, en su versión para estudiantes, se emplea para simular los campos electromagnéticos. Los resultados de las simulaciones se presentan en gráficos que permiten una comparación detallada con las mediciones in situ, validando así los modelos empleados. Finalmente, los hallazgos se integran y documentan en un análisis comparativo entre los datos medidos y los resultados simulados.



*Figura 5. Metodología propuesta para el estudio
Fuente: Autor*

2.5 Proceso de medición.

La medición de los campos en la subestación Tisaleo de 500 kV se estructura en tres fases organizadas de manera precisa. En la primera fase, representada en la Figura 6, se establece una malla de 430 puntos distribuidos por toda la subestación, lo que permite crear un mapa detallado de los campos eléctricos y magnéticos. Para las simulaciones, el software QuickField Student 6.4 admite hasta 255 puntos en una sola malla, lo cual requiere dividir la estructura en dos: una malla de 255 puntos para el patio de 500 kV y, en la segunda fase, una malla de 175 puntos para la sección de 230 kV.



Figura 6. Mallado de subestación, primeras mediciones etapa 1 y etapa 2
Fuente: [46]

En la tercera etapa, presentada en la Figura 7, se seleccionan seis puntos específicos ubicados en las casetas de relés, donde se establecen tres puntos de medida. Los otros puntos se encuentran en la oficina y el pasillo de la sala de control del patio de 500 kV, además de un punto adicional en la caseta de relés de 230 kV del mismo patio. Estos puntos fueron elegidos por su relevancia en las actividades diarias del personal operativo y su proximidad a equipos de alta tensión.



*Figura 7. Mallado de subestación, segundas mediciones tercera etapa
Fuente: [46]*

Mediante el análisis en etapas para el proceso de medición se considera la configuración de equipamiento estructural y las condiciones geográficas en la Subestación, tomando en cuenta los datos y valores de proporcionados por la Institución como los planos de diseños constructivos y normas técnicas de seguridad y ambiental.

Para medir las radiaciones no ionizantes, se adoptan las recomendaciones de la norma IEEE 644-2019. Esta normativa indica que las mediciones deben realizarse a una altura de un metro sobre el suelo y especifica tanto la orientación adecuada de los instrumentos como el uso de medidores de tres ejes. Además, detalla los procedimientos necesarios para calcular y reportar los resultados obtenidos.

En cada punto de medición, se miden las componentes ortogonales del campo magnético, las cuales se combinan utilizando la expresión $B_R = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2}$.

Determinar el valor eficaz (RMS) del campo magnético resultante es fundamental en este procedimiento, asegurando lecturas precisas mediante la correcta orientación de los dispositivos y, cuando es necesario, la rotación de los medidores de tres ejes. Paralelamente, el técnico documenta sistemáticamente la intensidad de los campos eléctrico y magnético en cada punto de medición, prestando especial atención a cualquier fluctuación en los valores registrados.

Como paso final en el proceso de medición, se realiza una comparación detallada de los resultados con los límites establecidos por la Comisión Internacional de Protección contra Radiaciones No Ionizantes (ICNIRP). Esta verificación es crucial

para confirmar que los niveles de campo eléctrico y magnético observados se encuentran dentro de los parámetros de seguridad, tanto para el público en general como para el personal en entornos laborales con exposición ocupacional.

2.5.1 Características de equipos propuestos para la medición

Los equipos utilizados para medir radiaciones no ionizantes incluyen:

- **Analizador de espectro:** Se utiliza el modelo Spectran NF-5035S de marca AARONIA AG, serie 10788, con certificados de calibración fecha 9 de agosto de 2024, de acuerdo a los estándares con norma ISO/IEC 17025, ver anexo 13, la calibración detallada de las frecuencias y los niveles de atenuación.
- **Termohigrómetro:** El modelo TH-0510, marca Elicrom, con serie E-29074, mide condiciones ambientales la temperatura y la humedad.
- **Flexómetro:** Se utiliza para medir distancias en proceso de mediciones.

La clase de equipo tiene la precisión de medir el campo eléctrico (E) como la densidad de flujo magnético (B), el factor importante se considera las condiciones climáticas temperatura 17.80°C, humedad 48.60%, presión atmosférica 503.40mmHg y velocidad del viento 1.4m/s, estos valores se registra y se influye en las pruebas de mediciones.

2.6 Modelación en software Matlab

La estimación de los campos electromagnéticos (CEM) se realiza mediante su modelación matemática en Matlab. Para ello, se consideran los elementos que generan mayores intensidades de campo, tales como la línea entrante a la bahía El Inga y la línea saliente bahía Chorrillos, además en barras colectoras en patio de 500kV campos energizados de la subestación. El propósito de esto es analizar el impacto de los equipos de alta tensión en las áreas operativas y garantizar que los niveles de exposición cumplan con los límites establecidos. Además, esta modelación permite obtener datos exactos que complementan las mediciones in situ realizadas en la subestación Tisaleo.

2.6.1 Modelación de línea, saliente, entrante en bahías y embarrados.

Esquema de distribución plana

La evaluación del campo eléctrico de las líneas de transmisión puede simplificarse mediante un análisis bidimensional, en el cual las cargas eléctricas se consideran ubicadas únicamente en las superficies de los conductores. En este modelo, los conductores se representan como cilindros paralelos y el medio dieléctrico entre estos y el suelo se aproxima a la permeabilidad del espacio libre. Así, las cargas distribuidas a lo largo de la superficie de cada conductor se imaginan concentradas en el centro de cada cilindro.

Para representar las cargas en la superficie terrestre, se emplea una técnica de "imágenes" de cargas, reflejadas con la misma magnitud pero de polaridad opuesta a las cargas en los conductores [47]. Estas cargas de imagen se sitúan por debajo de la superficie, como si el suelo actuara como un espejo ideal que refleja los conductores [48]. El proceso de simplificación consiste en reducir cada fase del sistema a un único conductor equivalente, cuyo diámetro se calcula mediante la ecuación indicada a continuación. Esta aproximación permite un análisis más directo y eficiente de los componentes del sistema.

$$d_{eq} = d_b * \sqrt[n]{\frac{n * d}{d_b}} \quad (17)$$

$$d_b = \frac{s}{\text{sen}\left(\frac{\pi}{n}\right)} \quad (18)$$

Para describir los parámetros en los cálculos anteriores, se define d_b como el diámetro del conjunto completo de conductores, y n representa la cantidad de subconductores que lo componen. El símbolo d se refiere al diámetro total del haz, mientras que d_{eq} indica el diámetro equivalente del conjunto. En cuanto a los coeficientes de potencial, utilizados en sistemas con conductores paralelos, se emplean fórmulas matemáticas simples para facilitar el cálculo, presentadas a continuación.

$$P_{AA} = \frac{1}{2\pi\epsilon} * \ln\left(\frac{4H_A}{d_{eq}}\right) \quad (19)$$

Los coeficientes de potencial mutuos, que describen la interacción entre dos conductores, se calculan de la siguiente manera:

$$P_{AB} = \frac{1}{2\pi\epsilon} * \ln\left(\frac{S'_{AB}}{S_{AB}}\right) \quad (20)$$

Al analizar los coeficientes de potencial en un sistema de conductores, P_{AA} representa el potencial propio del conductor A, mientras que P_{AB} define el potencial mutuo entre los conductores A y B. El diámetro equivalente del conductor A se expresa como d_{eq} , y su altura sobre el suelo se indica con H_A . La distancia directa entre los conductores A y B se denota como S_{AB} , y la distancia entre el conductor A y su imagen reflejada en el suelo se representa por S'_{AB} , como se muestra en la Figura 8.

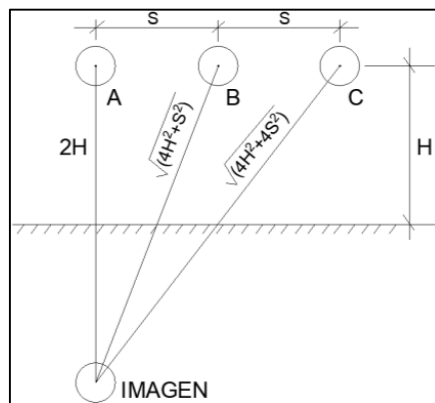


Figura 8. Modelación de conductores – configuración plana.

Fuente: [49]

(21)

$$P_{AB} = P_{BB} = P_{CC}$$

$$P_{AB} = P_{BA} = P_{BC} = P_{CB} \quad (22)$$

$$P_{AC} = P_{CA} \quad (23)$$

Una matriz cuadrada, denominada P, se utiliza para agrupar los coeficientes de potencial.

$$[P] = \begin{bmatrix} P_{AA} & P_{AB} & P_{AC} \\ P_{BA} & P_{BB} & P_{BC} \\ P_{CA} & P_{CB} & P_{CC} \end{bmatrix} \quad (24)$$

El proceso para determinar el campo eléctrico en un punto específico comienza con la resolución de una ecuación matricial. A partir de esta ecuación, y conociendo el voltaje V_r aplicado a cada conductor, se pueden obtener las cargas necesarias para calcular el campo en el espacio [49].

$$[Q_r] = [P]^{-1}[V_r] \text{ y } [Q_i] = [P]^{-1}[V_i] \quad (25)$$

Asimismo, la matriz de capacitancia C está dada por la siguiente ecuación:

$$[C] = [P]^{-1} \quad (26)$$

Al analizar los voltajes en esta ecuación, se considera que los voltajes trifásicos están espaciados 120° con respecto al de la fase central. Con esta separación angular, los componentes real e imaginario de los voltajes pueden evaluarse aplicando las siguientes ecuaciones:

$$v_r(t) = \sqrt{2} * V_{3\phi} * \cos(\varphi) * \cos(\omega t) \quad (27)$$

$$v_i(t) = \sqrt{2} * V_{3\phi} * \text{sen}(\varphi) * \text{sen}(\omega t + 90) \quad (28)$$

El cálculo del campo eléctrico total se realiza mediante la suma de los efectos generados por cada carga en el sistema. En la Figura 9, se observa cómo el campo eléctrico \vec{E}_k en el punto M resulta de la combinación de dos componentes: el campo \vec{E}_{k_1} , que proviene directamente de la carga \vec{Q}_k en el conductor k , y el campo \vec{E}_{k_2} , generado por la imagen de $-\vec{Q}_k$ reflejada en el suelo [49].

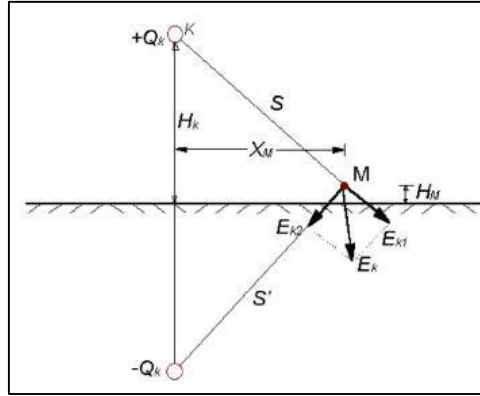


Figura 9. Evaluación de las contribuciones al campo eléctrico ubicación específica del punto M
Fuente: [49]

Para calcular las componentes del campo eléctrico producido por el conductor k , se considera primero la disposición espacial del sistema. La distancia X_M representa la separación horizontal entre el conductor k y el punto de medición M , mientras que H_M indica la altura de este punto sobre el suelo. La elevación del conductor respecto al suelo se designa como H_K . Con estas relaciones, las ecuaciones a continuación permiten determinar las magnitudes de las componentes horizontal y vertical del campo eléctrico generado por las cargas en el conductor k [49].

$$\vec{E}_{kx} = \frac{(\widetilde{Q}_{rk} + j\widetilde{Q}_{ik})}{2\pi\epsilon} \left[\frac{X_M}{X_M^2 + (H_K - H_M)^2} - \frac{X_M}{X_M^2 + (H_K + H_M)^2} \right] \quad (29)$$

$$\vec{E}_{ky} = \frac{(\widetilde{Q}_{rk} + j\widetilde{Q}_{ik})}{2\pi\epsilon} \left[\frac{X_M - H_K}{X_M^2 + (H_K - H_M)^2} - \frac{X_M - H_K}{X_M^2 + (H_K + H_M)^2} \right] \quad (30)$$

En esta fase, el campo eléctrico se descompone en sus componentes vertical y horizontal. Este cálculo integra las contribuciones individuales de todos los conductores presentes en el sistema [49].

$$\vec{E}_x = \sum_k \vec{E}_{kx} = E_{rx} + jE_{ix} \quad (31)$$

$$\vec{E}_y = \sum_k \vec{E}_{ky} = E_{ry} + jE_{iy} \quad (32)$$

Para obtener una descripción integral del campo vectorial, se consideran las componentes reales e imaginarias en ambas direcciones, horizontal y vertical, identificadas como E_{rx} , E_{ix} , E_{ry} y E_{iy} . Estas componentes permiten calcular el valor eficaz del campo eléctrico, determinado por la ecuación presentada a continuación [49].

$$E_{rms} = \sqrt{E_{rx} + E_{ix} + E_{ry} + E_{iy}} \quad (33)$$

La simulación del campo magnético bajo el alimentador de distribución y la barra colectora en un sistema de transmisión utiliza un enfoque similar al cálculo de cargas. Aquí, la corriente que fluye a través de los conductores actúa como la fuente principal del campo magnético. A diferencia de los cálculos eléctricos, el suelo no se considera un conductor magnético; en cambio, las líneas de fuerza magnética lo atraviesan, mientras que el plano de referencia se establece a una profundidad significativa [49].

En el punto de medición M, el campo magnético generado por la corriente del conductor k se descompone en sus componentes horizontal y vertical. Las ecuaciones que definen estas dos componentes se presentan a continuación [49].

$$B_{xi} = \frac{\mu_0 * I_K}{2\pi} \left[\frac{-(h_M - h_k)}{(X_M - H_K)^2 + (h_M - h_k)^2} - \frac{(h_M + h_k)}{(X_M - H_K)^2 + (h_M - h_k)^2} \right] \quad (34)$$

$$B_{yi} = \frac{\mu_0 * I_K}{2\pi} \left[\frac{X_M - H_K}{(X_M - H_K)^2 + (h_M - h_k)^2} - \frac{X_M - H_K}{(X_M - H_K)^2 + (h_M + h_k)^2} \right] \quad (35)$$

Las componentes horizontal y vertical del campo magnético se obtienen sumando las contribuciones de cada conductor involucrado.

$$\widetilde{B}_x = \sum_k \widetilde{B}_{kx} = B_{rx} + jB_{ix} \quad (36)$$

$$\widetilde{B}_y = \sum_k \widetilde{B}_{ky} = B_{ry} + jB_{iy} \quad (37)$$

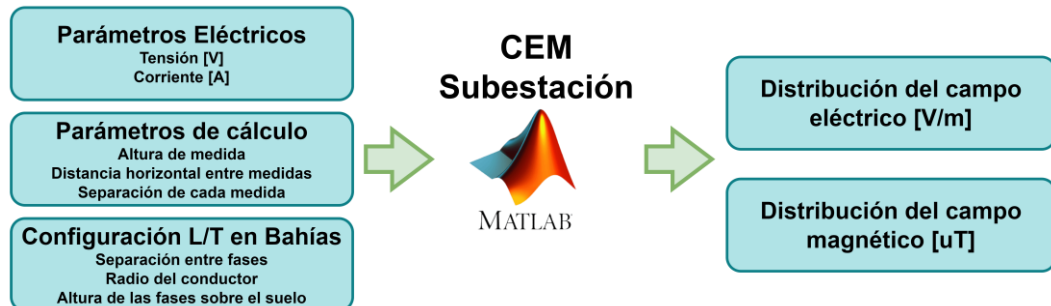
De este modo, el campo magnético total queda completamente definido por las componentes reales e imaginarias, tanto en las direcciones horizontal como vertical [49]. Así, el campo magnético resultante se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$B = \sqrt{B_{rx} + B_{ix} + B_{ry} + B_{iy}} \quad (38)$$

El procedimiento para determinar el campo magnético en una línea eléctrica implica sumar las contribuciones de cada fase, tras calcular el campo para cada una individualmente. Este enfoque es útil tanto en los cálculos como en el diseño de líneas que requieren niveles reducidos de campo magnético o en la optimización de líneas existentes. Analizar el campo magnético en configuraciones simples de conductores facilita este proceso. Además, es fundamental considerar que la intensidad del campo magnético disminuye con el cuadrado de la distancia desde el centro de los conductores [49].

$$B = 3.46 * \frac{I * P}{D^2} \quad (39)$$

La ecuación considera tres parámetros principales: la corriente I , la separación P entre las fases y la distancia D desde el centro de la fase hasta el punto de medición. Este método se ha implementado en programa Matlab, donde se ha configurado la disposición de las barras junto con los puntos de entrada y salida de los alimentadores. Para ilustrar el proceso, la Figura 10 muestra un esquema de las entradas y salidas utilizadas en el modelado, y el diagrama de flujo completo se incluye en el Anexo 3.

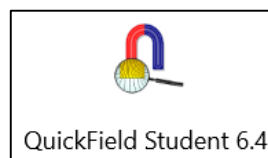


*Figura 10. Flujo de trabajo para la modelación de CEM con MATLAB.
Fuente: Autor*

2.7 Simulación en software QuickField student 6.4

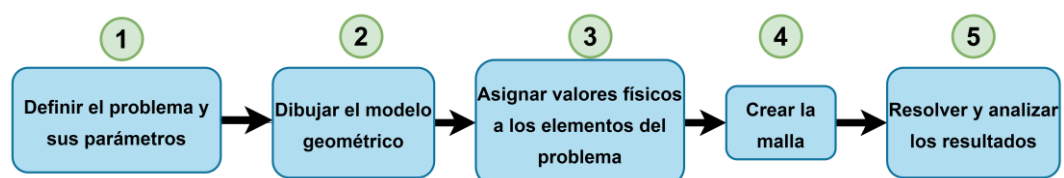
Para abordar problemas complejos en electromagnetismo, análisis térmico y deformación de materiales sólidos, el software QuickField emplea el método de elementos finitos para lograr simulaciones detalladas. Los modelos pueden elaborarse directamente en su interfaz de trazado o, para mayor precisión, importarse desde sistemas de diseño como AutoCAD [50].

Es relevante señalar que QuickField ofrece una versión gratuita para estudiantes, aunque con una limitación de 255 nodos en el tamaño de la malla. A pesar de esta restricción, la versión estudiantil proporciona diversas opciones de análisis útiles en múltiples contextos. En este proyecto, se utilizará esta versión, como se muestra en la Figura 11.



*Figura 11. Versión estudiantil de QuickField.
Fuente: [50]*

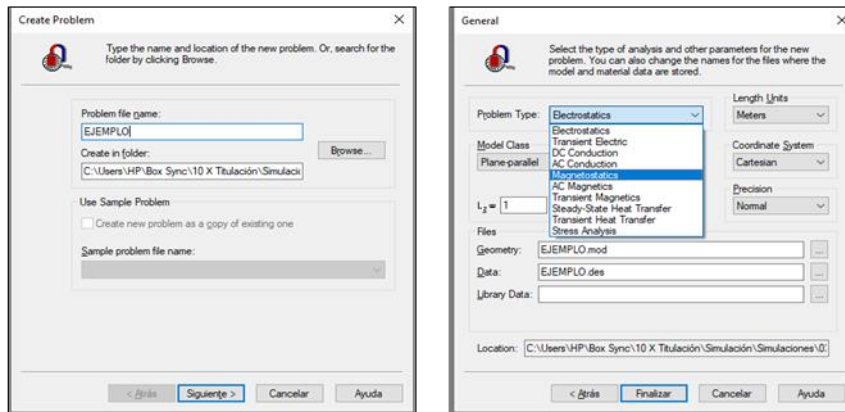
Este software se distingue por una interfaz gráfica intuitiva que facilita el uso de sus múltiples funciones. Entre ellas se incluyen herramientas para el trazado y diseño de geometrías, opciones para seleccionar y editar elementos específicos, así como, la posibilidad de asignar propiedades detalladas a cada componente. También permite la creación de contornos y la generación de gráficos, esenciales para el análisis visual. La configuración y resolución de un problema requieren seguir cinco pasos básicos, ilustrados en la Figura 12.



*Figura 12. Guía para la simulación de la distribución de campos electromagnéticos
Fuente: Autor*

Para iniciar la simulación, el primer paso es crear un archivo nuevo, como se muestra en la Figura 13. Esto se realiza accediendo a la pestaña 'File' y

seleccionando la opción 'New Problem', lo cual abrirá una ventana emergente titulada 'Create Problem'. En esta ventana, se debe asignar un nombre al archivo y especificar el destino de almacenamiento. Al hacer clic en 'Siguiente', aparecerá la ventana 'General', donde es necesario definir el tipo de análisis. En este caso, se seleccionará el análisis electrostático para calcular el campo eléctrico y el análisis magnetostática para determinar el campo magnético.



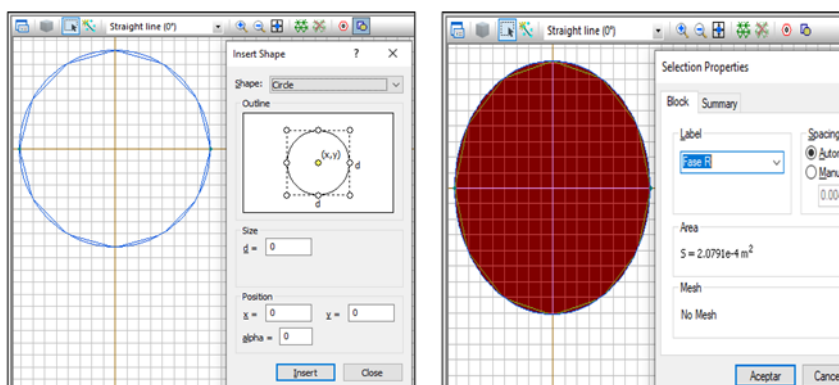
(a) Crear problema

(b) Elegir el tipo de problema

Figura 13. Creación de una nueva simulación.

Fuente: [50]

A medida que se avanza en el proceso, el 'Model Editor' (ver Figura 14) permite construir el modelo geométrico de forma rápida y sencilla. Esta herramienta cuenta con botones y funciones geométricas que facilitan la creación de elementos esenciales, como bloques, bordes y vértices, necesarios para definir la estructura de la simulación.



(a) Inserción de una figura

(b) Asignar el nombre a la figura

Figura 14. Representación de un conductor

Fuente: [50]

Cuando es necesario ajustar las propiedades de algún elemento en el modelo, se abren las ventanas del 'Data Editor' (ver Figura 15). Estas ventanas permiten ingresar valores físicos específicos, fundamentales para definir las fuentes del campo, configurar las condiciones de contorno y asignar las propiedades materiales a los componentes del modelo.

En los cálculos electrostáticos, es imprescindible contar con datos como el diámetro de los conductores, las propiedades de permitividad del aire y de los materiales conductores, además de las tensiones asignadas a cada fase. En contraste, el análisis magnetostática requiere valores de permeabilidad para el suelo, el aire y los conductores, junto con las corrientes específicas de cada componente.

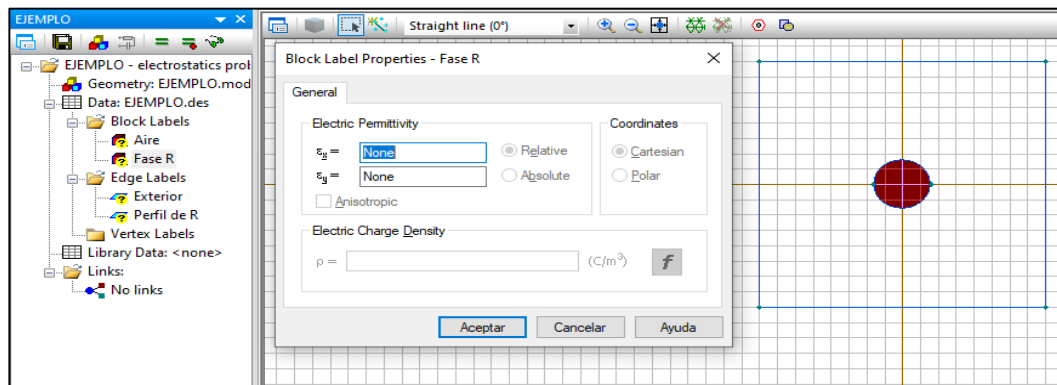
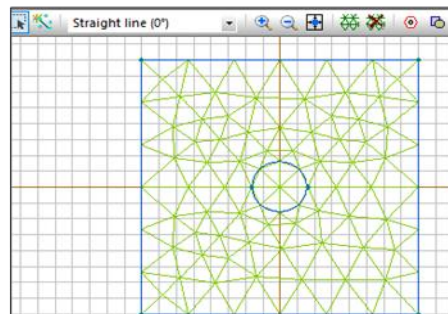


Figura 15. Modificación de propiedades y magnitudes.
Fuente: [50]

El proceso de mallado implica segmentar la región de la solución en múltiples triángulos. La construcción de la malla se realiza utilizando la función "Build Mesh", ilustrada en la Figura 16.



(a) Iconos para insertar y quitar el mallado

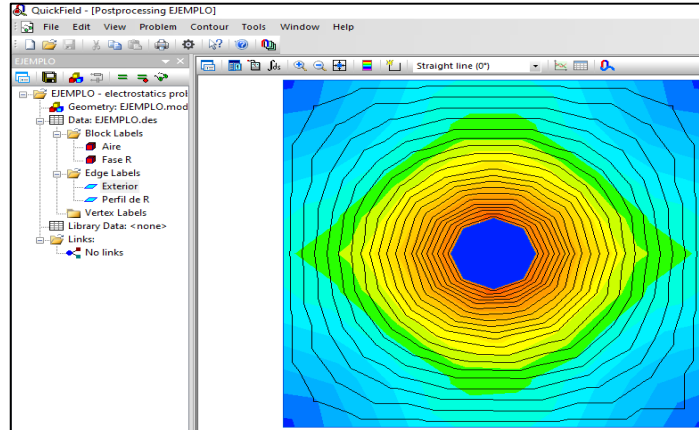


(b) Ejemplo del mallado

Figura 16. Creación de malla

Fuente: [50]

La visualización gráfica de los resultados generados en QuickField se realiza en la ventana de post-procesado, denominada 'Postprocessor' (ver Figura 17). Esta herramienta permite analizar en detalle los datos obtenidos del análisis.



*Figura 17. Distribución de campos en un conductor -resultados
Fuente: [50]*

2.7.1 Comparativa de resultados.

La comparación de los datos de campos electromagnéticos (CEM), tanto medidos como simulados, se realiza utilizando Matlab y QuickField, contrastando los resultados con las recomendaciones de seguridad de la Comisión Internacional de Protección contra Radiaciones No Ionizantes (ICNIRP). Estas pautas proporcionan los valores de referencia necesarios para validar los datos obtenidos. El análisis incluye las mediciones directas en la subestación y las simulaciones de CEM generadas en el entorno de estudio. El objetivo es confirmar que los niveles de exposición cumplen con los valores máximos permitidos, garantizando la seguridad del personal y del público en proximidad a estas instalaciones.

2.8 Conclusiones del capítulo II

En este capítulo se presenta la metodología para evaluar los campos electromagnéticos (CEM), mediante mediciones in situ, cálculos y simulaciones, se busca obtener una evaluación precisa de los niveles de exposición.

- La metodología basada en mediciones in situ, modelación con Matlab y QuickField permite evaluar de manera eficaz los niveles de CEM generados por los equipos de potencia. El uso de una malla de puntos de medición y

procedimientos estandarizados garantiza la obtención de datos precisos y confiables.

- En puntos estratégicos de la subestación, se realizan mediciones de los campos eléctricos y magnéticos de acuerdo con la norma IEEE Std 644-2019 y utilizando equipos calibrados, lo que permite detectar con precisión las zonas de mayor exposición a campos electromagnéticos (CEM). Este enfoque exhaustivo facilita un análisis detallado de los niveles de campo presentes, proporcionando datos cruciales para evaluar la seguridad en el área.
- Las simulaciones propuestas con Matlab y QuickField modelan los campos electromagnéticos generados en la subestación patios de 500 kV y 230 kV. Considerando los resultados de la modelación y simulación se comparan con los valores medidos en sitio, que en lo posterior se confirmaría la efectividad de la metodología propuesta.

3. CAPÍTULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan y analizan los resultados obtenidos a partir de las mediciones in situ, así como los cálculos, modelaciones y simulaciones realizadas en los respectivos softwares para su posterior análisis. Es importante señalar que los patios de la Subestación Eléctrica Tisaleo, comprenden dos niveles de voltaje: el lado de extra alta tensión, con 500 kV en estado operativo, y el lado de alta tensión, con 230 kV en estado desenergizado las bahías y la parte de terciario comprendido de 34.5 kV energizado para el sistema de auxiliares.

Durante el proceso de mediciones in situ, se observó que los valores de los campos electromagnéticos tienden a cero de forma gradual en áreas alejadas a equipos energizados, para ello se considera como una línea base a bahías de entradas y salidas, patio de barras, acoplamiento y bahía de autotransformadores, que en posterior serán analizados y contrastados conforme los límites enmarcados en las normativas. Para indagar y analizar los resultados de los campos electromagnéticos se considera las presentaciones de las figuras en 3D, que muestran los niveles y valores explorados.

En contraste, con los resultados obtenidos se procede a realizar una comparación por medio de la cuantificación del error relativo entre las mediciones IN SITU, los CEM calculados y simulados. Posteriormente, se procede a verificar el cumplimiento de los rangos establecidos por la Comisión Internacional sobre Protección de Radiaciones No Ionizantes (ICNIRP), para los resultados obtenidos en la medición, cálculo y simulación.

3.1 Análisis de resultados

3.1.1 Descripción y datos para medición modelación y la simulación.

La configuración de la subestación eléctrica es extensa debido a su diseño, lo que se considera en función del procedimiento y la normativa. Se establecen puntos con

coordenadas UTM cada 15 metros para facilitar la interpretación en una malla, como se muestra en la Figura 19. Estos puntos se concentran en las bahías de las líneas de transmisión El Inga y Chorrillos, así como en las bahías del banco de autotransformadores y de acople, en el patio de 500 kV.

En cuanto al patio de 230 kV, que se encuentra desenergizado, las bahías de salida no se miden directamente. Sin embargo, debido a la relación de transformación, el nivel de voltaje llega hasta la bahía ATI, lo que permite realizar mediciones de los campos electromagnéticos en esa zona.

En consecuencia, el software QuickField, versión estudiantil, permite crear mallas con hasta 255 nodos. Por lo tanto, la modelación y simulación de los campos electromagnéticos en la Subestación Tisaleo se lleva a cabo en tres etapas. La primera etapa consiste en la medición del patio de 500 kV, que indica la configuración de las bahías, como se describe en la Figura 18.

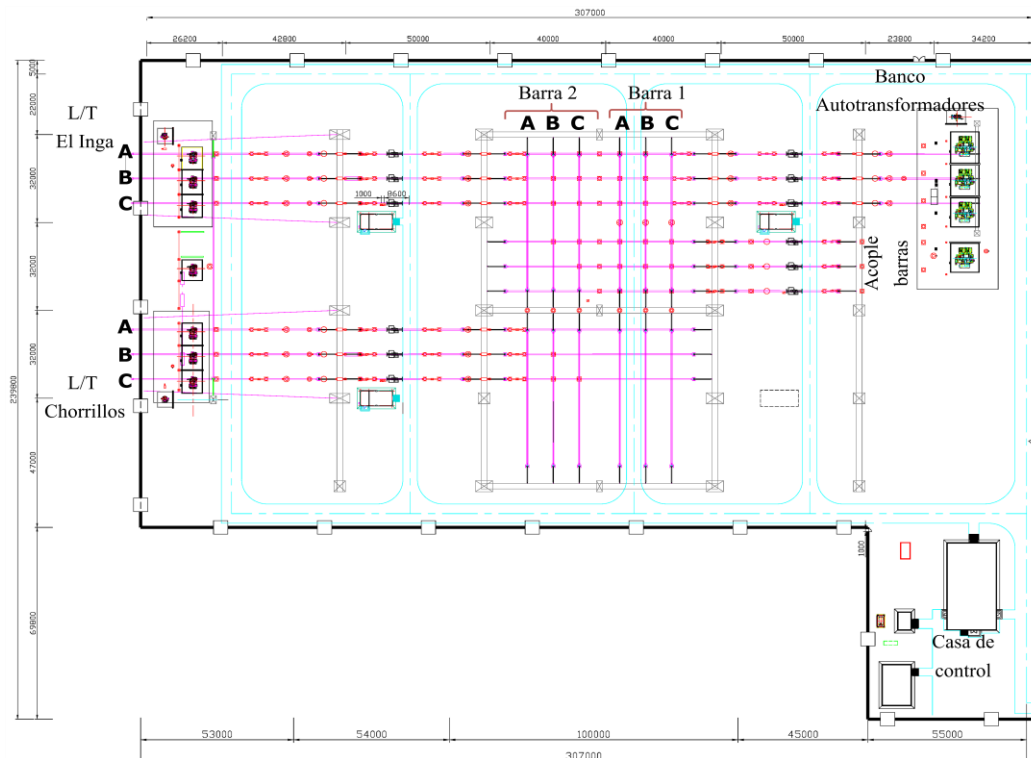


Figura 18. Disposición de bahías de líneas, ATI, barras de la subestación Tisaleo 500 kV.
Fuente: Autor

Conformación de una malla de 255 puntos distribuidos en el patio con coordenadas UTM, tal como se observa en la Figura 19.



Figura 19. Puntos de medición, primera etapa – patio de 500 kV Subestación Tisaleo.
Fuente: Autor

La segunda etapa se lleva a cabo en el patio de 230 kV, tal como se presenta en la Figura 20. Este plano indica la posición de las bahías que van hacer intervenidas con puntos de medición de campos electromagnéticos.

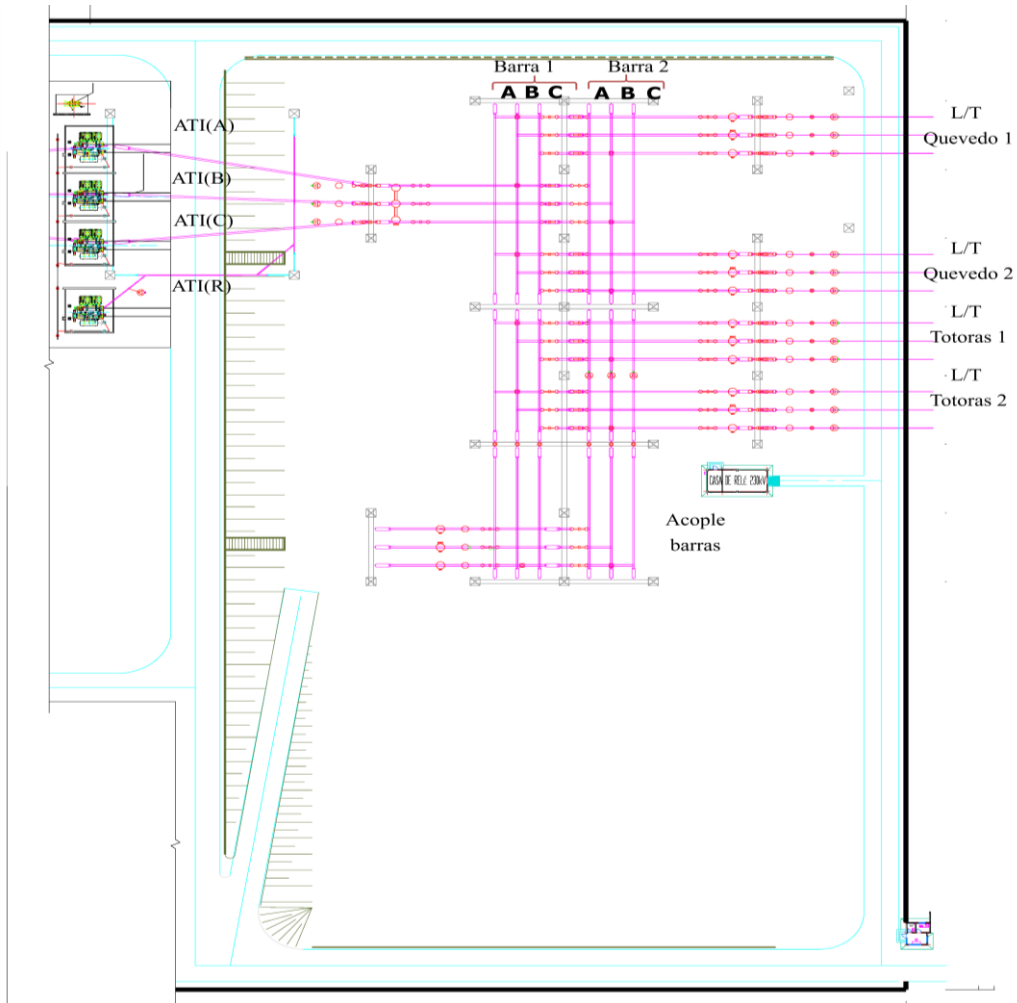


Figura 20. Disposición de líneas y barras de la subestación Tisaleo 230 kV.
Fuente: Autor

La Figura 21 muestra la distribución de 170 puntos de medición, que van del 261 al 430, en el patio de 230 kV en estado de operación desenergizada. Los puntos están organizados en un patrón de cuadrícula con un espaciado uniforme, lo que garantiza una cobertura completa del campo electromagnético de manera homogénea. Cada punto está marcado en base a sus coordenadas UTM, siguiendo un orden numérico secuencial de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo.

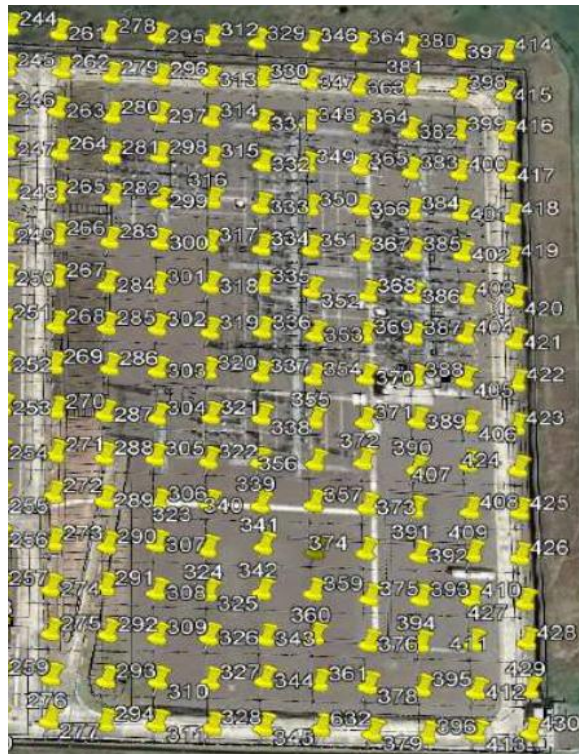


Figura 21. Puntos de medición, segunda etapa – patio de 230 kV Subestación Tisaleo.
Fuente: Autor

La tercera etapa se lleva a cabo en las casetas de 500 kV y 230 kV, así como en la sala de control. Para ello, se establecen 6 puntos de medición, tal como se muestra en la Figura 22.



Figura 22. Puntos de medición, tercera etapa – vista general Subestación Tisaleo.
Fuente: Autor

3.1.2 Etapa 1: Resultados de campos electromagnéticos en patio de 500 kV.

3.1.2.2 Resultados medidos

Analís de resultado dado en la primera etapa, las mediciones se encuentran en Anexo 1, para poder modelar se procede a procesar los datos recopilados utilizando la herramienta de generación de gráficos 2D desarrollada en software Matlab, mediante un diagrama de flujo del algoritmo se puede ver en los Anexos 9 y 10.

El archivo Excel obtenido de las mediciones se carga en la herramienta, y posteriormente se generan gráficos que permiten crear dos vectores, facilitando así la simulación del campo eléctrico y del campo magnético de manera independiente.

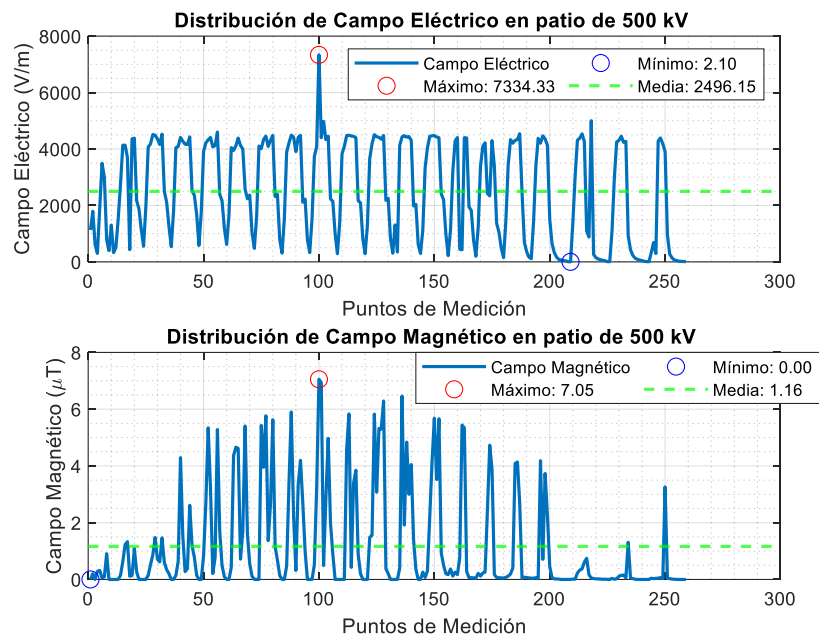


Figura 23. Resultado medidos campos electromagnéticos Etapa 1, patio de 500 kV.

Fuente: Autor

Para finalizar, se verifica que los datos tengan la misma dimensión y se procede a graficar los campos eléctricos medidos, cuyos resultados muestran un valor máximo de 7334.33 V/m, una media de 2496.15 V/m y un mínimo de 2.10 V/m. De igual manera, se presentan los resultados del campo magnético, con un valor máximo de 7.05 μT , una media de 1.16 μT y un mínimo de 0.00 μT , tal como se ilustra en la Figura 23.

Los resultados medidos en la coordenada del punto 100 muestran curvas con picos altos en los campos eléctrico y magnético, ubicados en la Bahía de L/T El Inga, en el patio de 500 kV.

3.1.2.2 *Resultados de distribución de campos electromagnéticos representados con MATLAB*

Para obtener la distribución de campos los electromagnéticos, se procede realizar de manera independiente los campos eléctricos y magnéticos.

Para campo eléctricos se inicia con los datos medidos en sitio, disponibles en anexo 9, se cargan el archivo Excel en el software Matlab. Utilizando la herramienta de graficado en 3D desarrollada, se genera una malla tridimensional basados en los datos cargados, lo que permite representar la distribución en un entorno tridimensional utilizando un esquema de colores, como se muestra en la Figura 24.

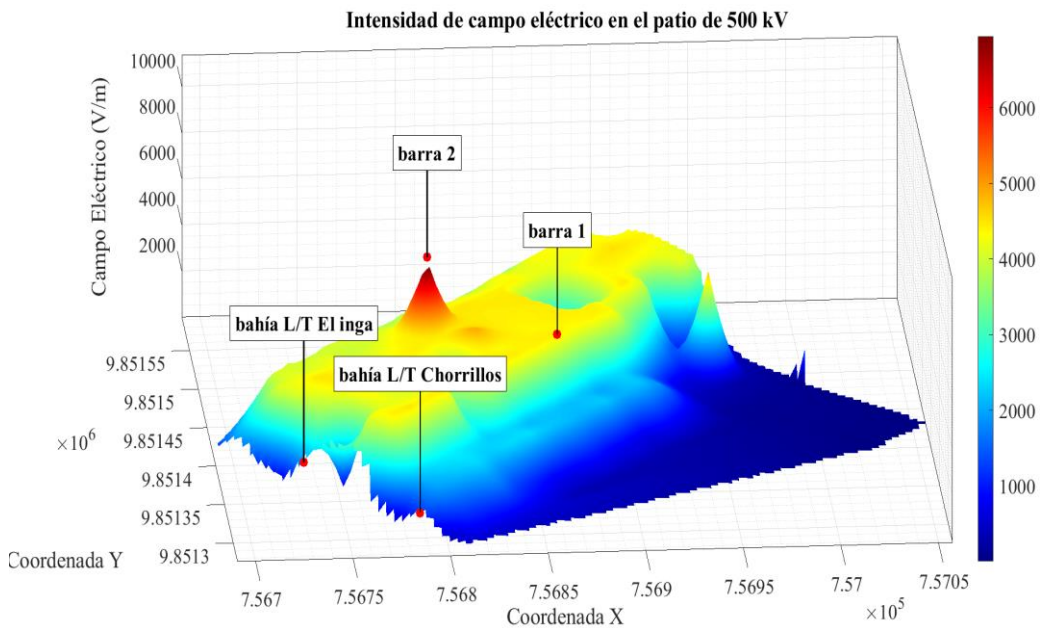


Figura 24. Modelación de distribución del campo eléctrico en patio de 500 kV.
Fuente: Autor

La Figura 24 muestra la distribución de la intensidad del campo eléctrico en el patio de 500 kV de la subestación Tisaleo. La intensidad es más alta cerca de "barra 1", "barra 2", "bahía L/T Chorrillos" y "bahía L/T El Inga", alcanzando un pico de 6000 V/m, hacia los bordes del área, se observa un gradiente de disminución, con valores que descienden a aproximadamente 1000 V/m.

Posteriormente para campos magnéticos se inicia con los datos medidos en sitio, disponibles en anexo 9, se cargan el archivo Excel en el software Matlab. Utilizando la herramienta de graficado en 3D desarrollada, se genera una malla tridimensional basados en los datos cargados, lo que permite representar la distribución en un entorno tridimensional utilizando un esquema de colores, como se muestra en la Figura 25.

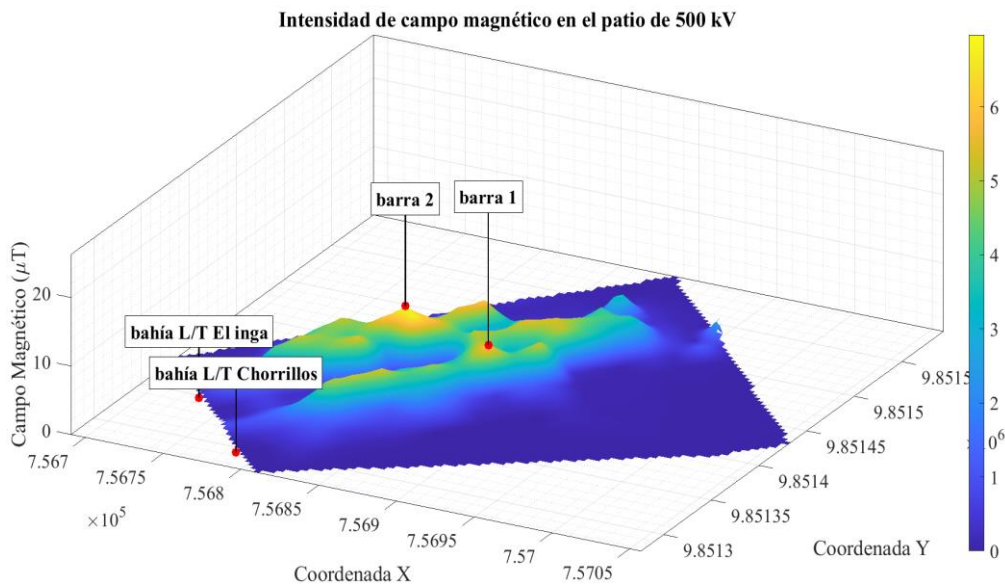


Figura 25. Distribución del campo magnético en patio de 500 kV.
Fuente: Autor

La Figura 25 muestra la distribución de la intensidad del campo magnético en el patio de 500 kV de la subestación Tisaleo, medida en micro teslas (μT). El campo alcanza su máximo cerca de la "barra 1", "barra 2", "bahía L/T Chorrillos" y "bahía L/T El Inga" con valores que se acercan a $6 \mu\text{T}$, mientras que disminuye hacia los bordes.

3.1.2.2 Resultados de campos electromagnéticos calculados en MATLAB

Para calcular los campos electromagnéticos (CEM) utilizando Matlab, se seleccionan las bahías de entrada de las líneas de transmisión de El Inga y Chorrillos. El procedimiento aplicado se basa en lo descrito en el "EPRI AC Transmission Line Reference Book—200 kV and Above, Third Edition", cuya metodología se detalla en el Anexo 3 para los campos eléctricos y en el Anexo 4 para los campos magnéticos.

Para el cálculo del campo electromagnético en la bahía de entrada de la línea de transmisión de El Inga, se utiliza un voltaje de 500 kV y una corriente nominal de 600 A. Además, se parametrizan los datos de los planos, considerando un espaciamiento entre las fases de 10 metros, un diámetro del conductor de 0.4 metros, y tres haces de conductor por fase. La medición con el equipo analizador de espectro se realiza a una altura de 1 metro sobre el nivel del suelo. La Figura 26 muestra los campos eléctrico y magnético calculados a lo largo del plano de medición.

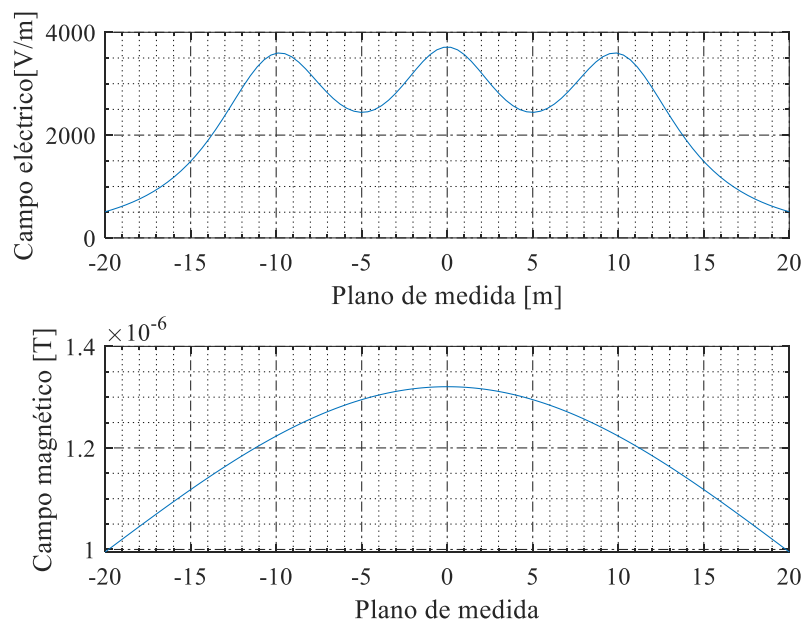


Figura 26. Campos electromagnéticos calculados con MATLAB, Bahía El Inga
Fuente: Autor

El campo eléctrico presenta un valor pico de 3708.59 V/m, exhibiendo un comportamiento periódico con múltiples picos a lo largo del eje. Estos picos se localizan en el centro de los conductores de cada fase, mientras que a medida que se aumenta la distancia, la intensidad del campo eléctrico disminuye. Por otro lado, el campo magnético alcanza un valor máximo de 1.3205 μ T, mostrando una distribución parabólica más suave a lo largo del plano de medición.

Consecuentemente, Para el cálculo del campo electromagnético en la bahía de entrada de la línea de transmisión de El Inga, se utiliza un voltaje de 500 kV y una corriente nominal de 600 A. Además, se parametrizan los datos de los planos,

considerando un espaciamiento entre las fases de 10 metros, un diámetro del conductor de 0.4 metros, y tres haces de conductor por fase. La medición con el equipo analizador de espectro se realiza a una altura de 1 metro sobre el nivel del suelo. La Figura 27 muestra los campos eléctrico y magnético calculados a lo largo del plano de medición.

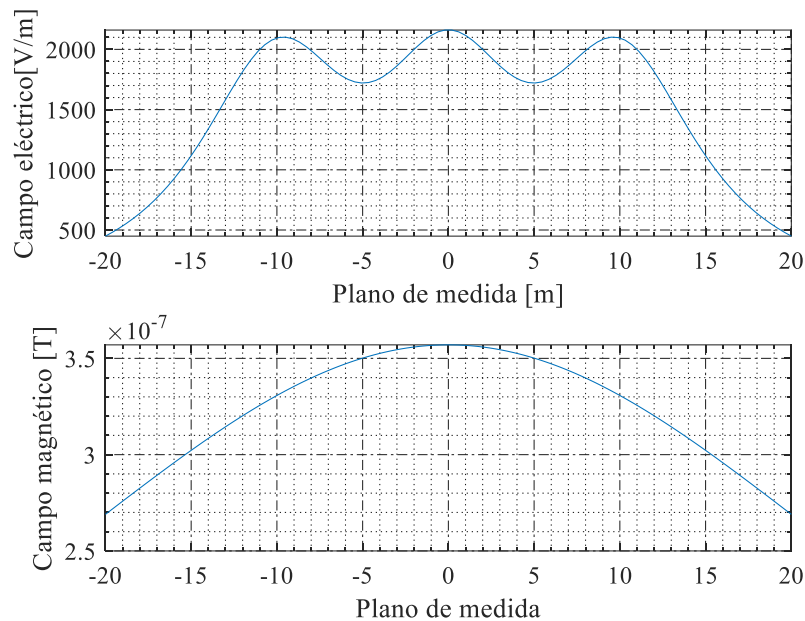


Figura 27. Campos electromagnéticos calculados con MATLAB, bahía Chorrillos.
Fuente: Autor

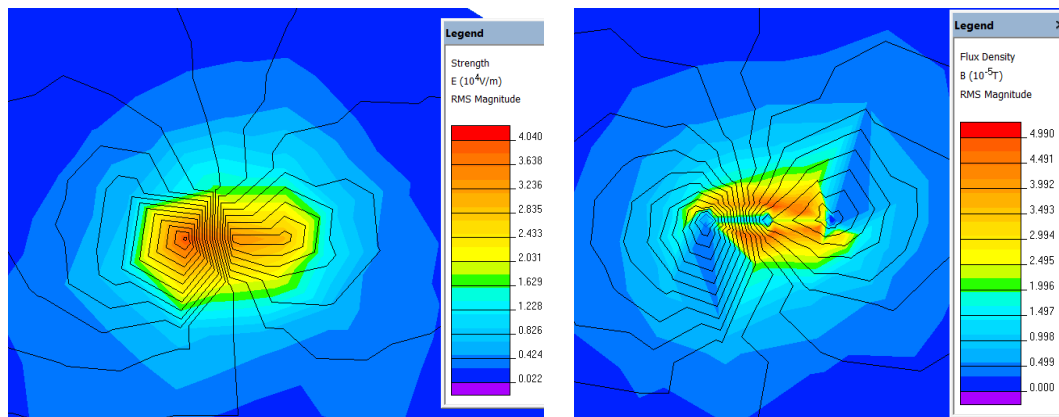
El campo eléctrico presenta un valor pico de 2160.62 V/m, exhibiendo un comportamiento periódico con múltiples picos a lo largo del eje. Estos picos se localizan en el centro de los conductores de cada fase, mientras que a medida que se aumenta la distancia, la intensidad del campo eléctrico disminuye. Por otro lado, el campo magnético alcanza un valor máximo de 0.2690 μ T, mostrando una distribución parabólica más suave a lo largo del plano de medición.

3.1.2.2 Resultados de distribución de campos electromagnéticos representados con QuickField versión estudiante.

Para simular los campos electromagnéticos en las bahías de entrada y salida de las líneas de transmisión, se utilizan los datos de diseño constructivo en el software QuickField versión Student 6.4. Este programa permite aplicar un modelo

específico adaptado a las características de las líneas, cuyos detalles se encuentran en el Anexo 10.

En el proceso de simulación, se parametrizan todos los datos necesarios, incluyendo un nivel de voltaje de 500 kV, una distancia de separación entre fases de 10 metros y una altura de la línea de 33 metros. Los resultados obtenidos de esta simulación se presentan en la Figura 28.



(a) Distribución de campo eléctrico

(b) Distribución de campo magnético

Figura 28. Campos electromagnéticos simulados en QuickField, bahía El Inga
Fuente: Autor

En la Figura 28, se presentan las distribuciones del campo eléctrico y del campo magnético.

(a) **Campo Eléctrico:** La distribución del campo eléctrico alcanza un valor máximo de 3702.05 V/m. Esta intensidad se representa mediante un gradiente de color que va del rojo (indicando alta intensidad) al azul (baja intensidad). Se observa que el campo disminuye de forma radial desde la fuente principal, mostrando un patrón característico que es más intenso en las proximidades de la fuente y se atenúa a medida que se aleja.

(b) **Campo Magnético:** La distribución del campo magnético, por su parte, presenta una densidad de flujo máxima de 1.322 μ T. Esta intensidad es más alta cerca de los conductores y disminuye gradualmente con la distancia. Al igual que

el campo eléctrico, el campo magnético exhibe un patrón radial, con máxima intensidad en las cercanías de los conductores y una disminución hacia el exterior.

En conjunto, ambos campos muestran patrones radiales característicos en las bahías de las líneas de transmisión de alta tensión, evidenciando una mayor concentración de intensidad cerca de las estructuras y una atenuación gradual en dirección externa.

Continuando con la simulación, en el caso de la bahía de Línea de Transmisión Chorrillos, se emplearon los mismos datos de diseño constructivo y la misma parametrización. Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 29.

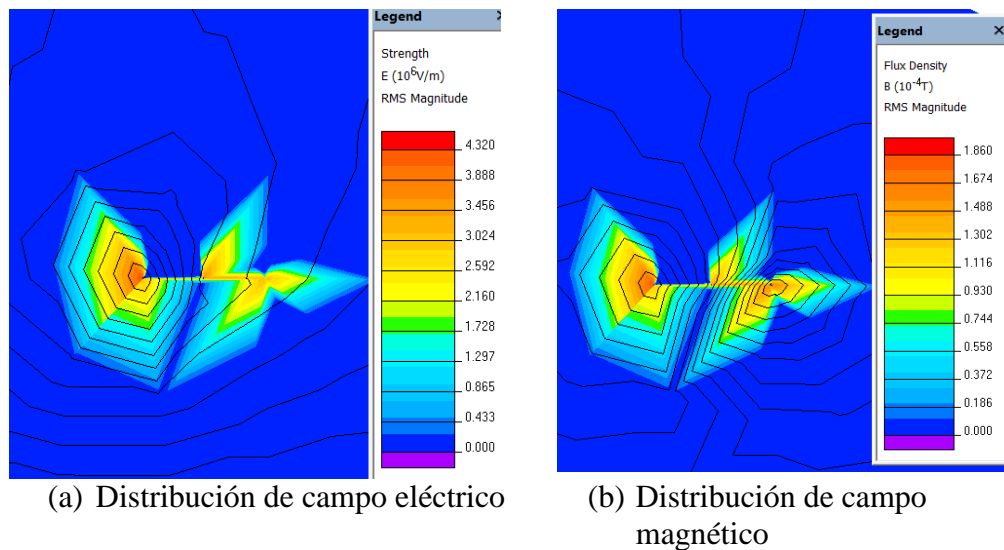


Figura 29. Campos electromagnéticos simulados en QuickField, bahía Chorrillos
Fuente: Autor

En la distribución del campo eléctrico (a) de la Figura 29, la intensidad máxima alcanza un valor de 2165.01 V/m, con una mayor concentración del campo cerca del conductor, que disminuye progresivamente hacia el exterior. De manera análoga, la distribución del campo magnético (b) en la misma figura muestra una densidad de flujo máxima de 0.265 μ T, evidenciando un comportamiento similar en términos de concentración cerca de los conductores y su atenuación a medida que se aleja.

3.1.3 Etapa 2: Resultados campos electromagnéticos en patio de 230 kV.

3.1.2.2 Resultados medidos

Analís de resultado dado en la primera etapa, las mediciones se encuentran en Anexo 1, para poder modelar se procede a procesar los datos recopilados utilizando la herramienta de generación de gráficos 2D desarrollada en software Matlab, mediante un diagrama de flujo del algoritmo se puede ver en los Anexos 9 y 10.

El archivo Excel obtenido de las mediciones se carga en la herramienta, y posteriormente se generan gráficos que permiten crear dos vectores, facilitando así la simulación del campo eléctrico y del campo magnético de manera independiente. Luego verifica que los datos tengan la misma dimensión y procede a graficar los campos eléctricos y magnéticos medidos, como se presenta en la Figura 30.

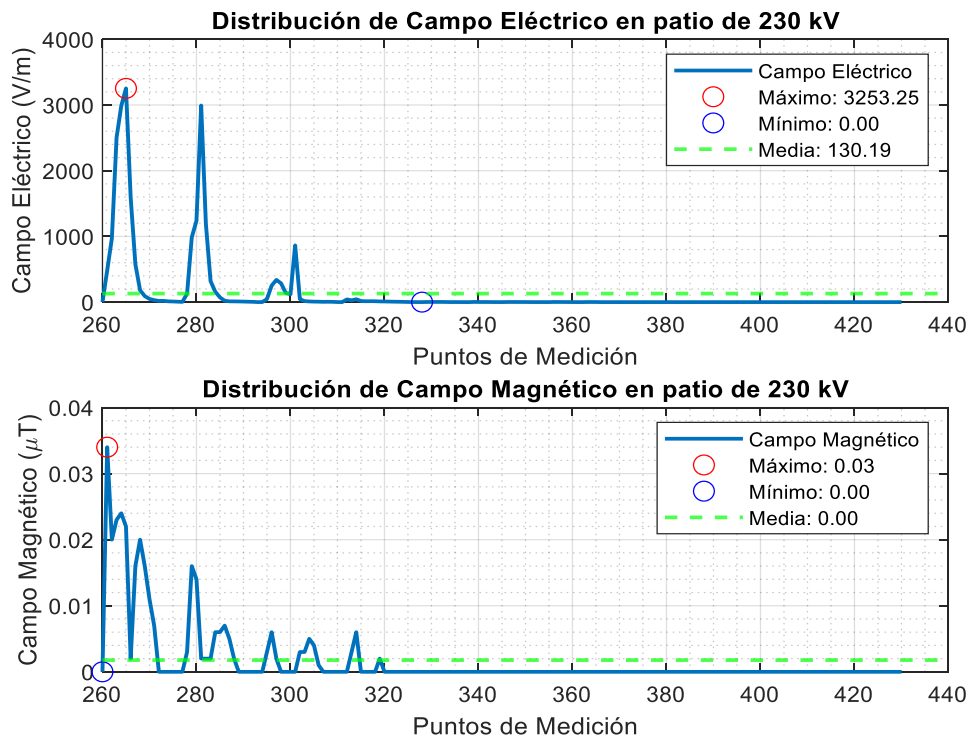


Figura 30. Distribución de campos electromagnéticos obtenidas, patio de 230 kV.

Fuente: Autor

Análisis detallado de las distribuciones del campo eléctrico y magnético en el patio de 230 kV de la subestación Tisaleo, basado en los datos medidos, se obtiene los

resultados que muestran en campo eléctrico con un valor máximo de 3253.25 V/m, una media de 130,19 V/m y un mínimo que llega a 0.00 V/m.

De igual manera, se presentan los resultados del campo magnético, con un valor máximo de 0.03 μT , una media y mínimo que tienden a llegar a 0.00 μT . La intensidad promedio del campo magnético es prácticamente 0.00 μT , debido a la desenergización en ese patio, los resultados se ilustran en la Figura 30

3.1.2.2 *Resultados de distribución de campos electromagnéticos representados con MATLAB*

Para obtener la distribución de campos los electromagnéticos patios de 230kV, se procede realizar de manera independiente los campos eléctricos y magnéticos.

Para campo eléctricos se inicia con los datos medidos en sitio, disponibles en anexo 9, se cargan el archivo Excel en el software Matlab. Utilizando la herramienta de graficado en 3D desarrollada, se genera una malla tridimensional basados en los datos cargados, lo que permite representar la distribución en un entorno tridimensional utilizando un esquema de colores, como se muestra en la Figura 31.

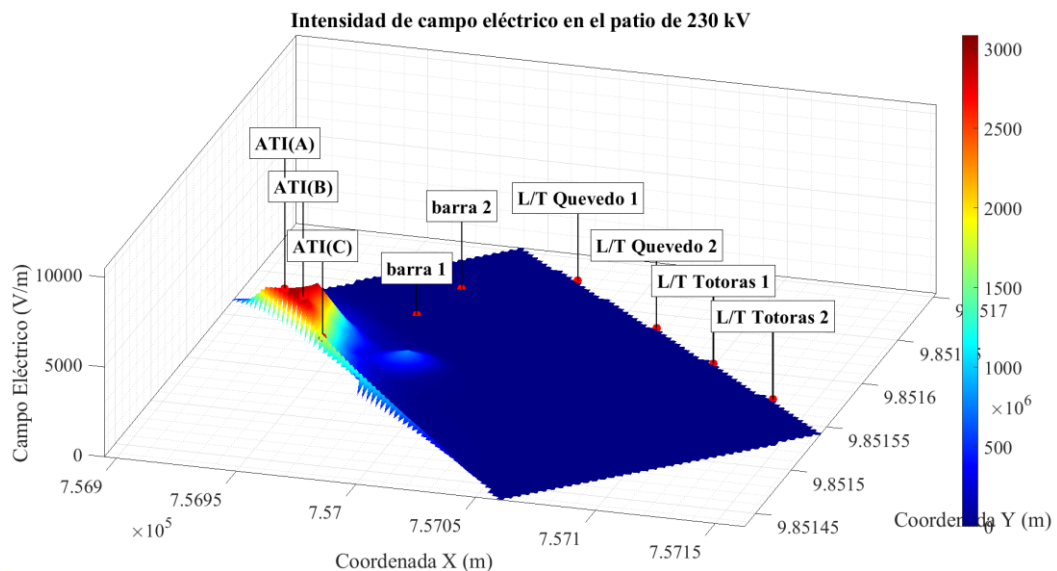


Figura 31. Distribución del campo eléctrico en patio de 230 kV en MATLAB.

Fuente: Autor

Al existir un banco de Autotransformadores en relación de transformación conformado en fases A, B, C y fase de Reserva, para este caso la bahía ATI de

230kV se encuentra energizado hasta la posición de seccionamiento. Mediante la mediciones, modelación y simulaciones se obtiene campos electromagnetismos considerables, los resultados se basan en la figura 31, con intensidad de campo eléctrico que supera 2500 V/m, cercano a área energizada que en forma gradual va descendiendo a 500 V/m cerca de la barra 1 y finalmente hacia las bahías de doble circuito de "L/T Quevedo" y "L/T Totoras".

Posteriormente para campos magnéticos se inicia con los datos medidos en sitio, disponibles en anexo 9, se cargan el archivo Excel en el software Matlab. Utilizando la herramienta de graficado en 3D desarrollada, se genera una malla tridimensional basados en los datos cargados, lo que permite representar la distribución en un entorno tridimensional utilizando un esquema de colores, como se muestra en la Figura 32.

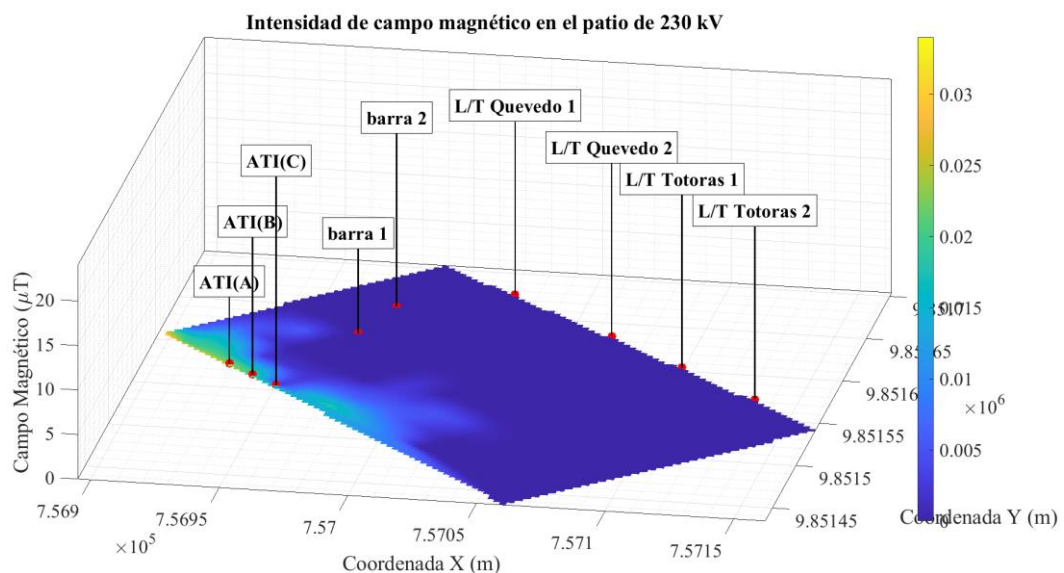


Figura 32. Distribución del campo magnético en patio de 230 kV en MATLAB.
Fuente: Autor

La Figura 32 presenta la distribución de la intensidad del campo magnético en el patio de 230 kV de la subestación Tisaleo, expresada en microteslas (μT). Se observa que el campo magnético alcanza su nivel máximo en la bahía ATI, con un valor de $0.02 \mu\text{T}$. A medida que se desplaza hacia las barras, la intensidad disminuye gradualmente, finalizando en las bahías de las líneas de doble circuito "L/T Quevedo" y "L/T Totoras", donde los valores mínimos alcanzan $0.005 \mu\text{T}$.

3.1.4 Etapa 3: Resultados de Casetas y Sala de Control.

Analís de resultado dado en la tercera etapa, se considera puntos de mayor de concentración de operación, maniobras y rutinas, las mediciones se encuentran en Anexo 2, para poder modelar se procede a procesar los datos recopilados utilizando la herramienta de generación de gráficos 2D desarrollada en software Matlab, mediante un diagrama de flujo del algoritmo se puede ver en los Anexos 9 y 10.

El archivo Excel obtenido de las mediciones se carga en la herramienta, y posteriormente se generan gráficos que permiten crear dos vectores, facilitando así la simulación del campo eléctrico y del campo magnético de manera independiente. Luego verifica que los datos tengan la misma dimensión y procede a graficar los campos eléctricos y magnéticos medidos, como se presenta en la Figura 33.

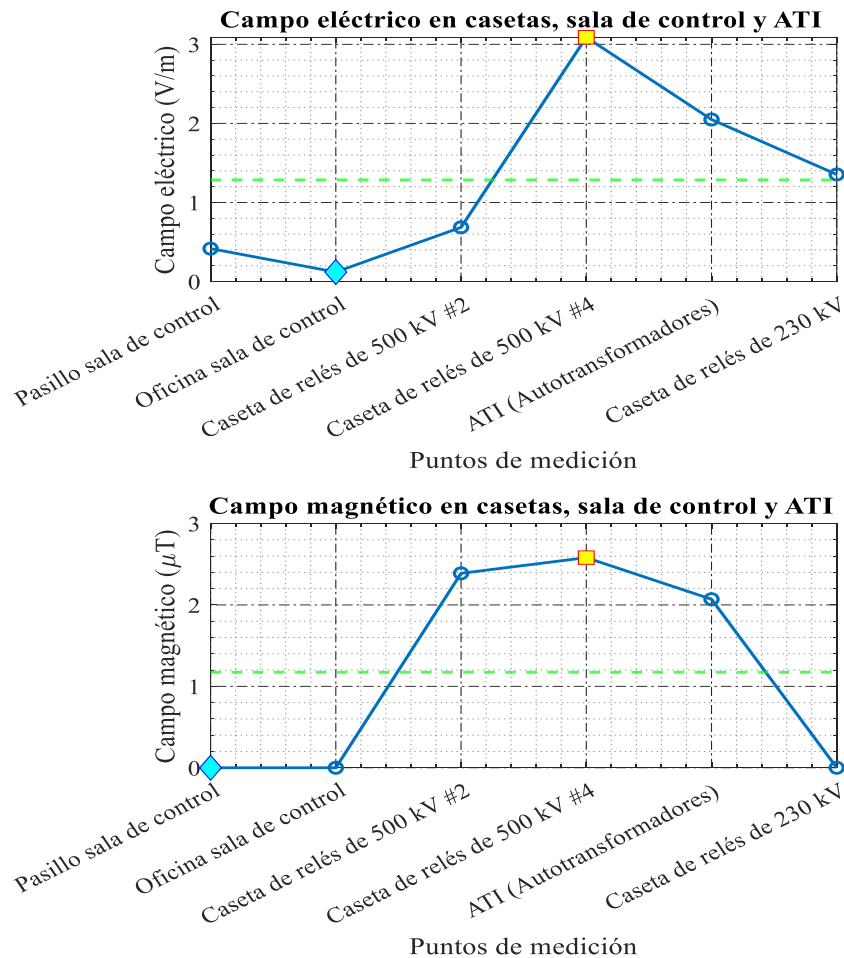


Figura 33. Resultados de campos electromagnéticos en casetas, sala de control medidos.

Fuente: Autor

Según los resultados obtenidos, se confirma que los datos tienen la misma dimensión y se procede a graficar los campos eléctricos medidos. Estos resultados indican un valor máximo de 3 V/m en la caseta #4, con un promedio de 2496.15 V/m y un mínimo de 2.10 V/m. Además, se presentan los resultados del campo magnético, que muestran un valor máximo de 2.58 μT en la caseta #4, en conclusión, la exposición de radiaciones en las áreas internas en las casa y casetas se observa una tendencia a una baja exposición a campos electromagnéticos, como se ilustra en la Figura 33.

3.1.2.2 Resultados de distribución de campos electromagnéticos representados con MATLAB

Para obtener la distribución de campos los electromagnéticos en las casetas y casa de control, se procede realizar de manera independiente los campos eléctricos y magnéticos.

Para campo eléctricos se inicia con los datos medidos en sitio, disponibles en anexo 9, se cargan el archivo Excel en el software Matlab. Utilizando la herramienta de graficado en 3D desarrollada, se genera una malla tridimensional basados en los datos cargados, lo que permite representar la distribución en un entorno tridimensional utilizando un esquema de colores, como se muestra en la Figura 34.

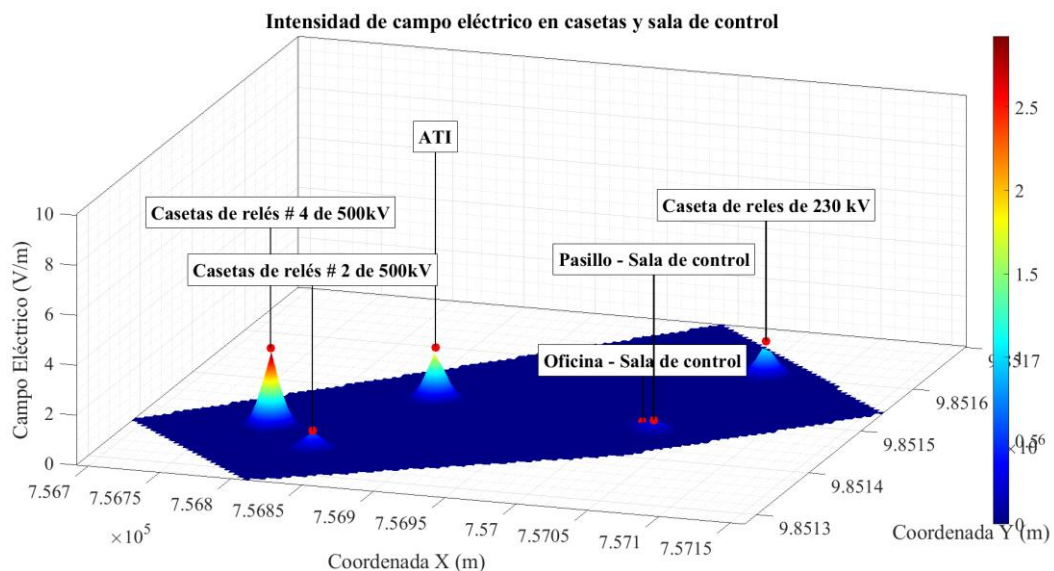


Figura 34. Distribución del campo eléctrico en casetas y sala de control en MATLAB.
Fuente: Autor

La Figura 34 muestra la distribución de la intensidad del campo eléctrico, medida en V/m, en las casetas y la sala de control. La intensidad más alta, aproximadamente 2.5 V/m, se concentra cerca de la caseta de relés #4. Asimismo, se observa un pico de 1.5 V/m en la bahía de los ATI de la caseta #3, correspondiente al patio de 500 kV. En contraste, la intensidad del campo eléctrico en la sala de control y en la caseta de relés de 230 kV es significativamente menor, manteniéndose por debajo de 0.5 V/m. Esta distribución indica claramente que la intensidad del campo disminuye a medida que aumenta la distancia de los equipos de alta tensión

Posteriormente para campos magnéticos se inicia con los datos medidos en sitio, disponibles en anexo 9, se cargan el archivo Excel en el software Matlab. Utilizando la herramienta de graficado en 3D desarrollada, se genera una malla tridimensional basados en los datos cargados, lo que permite representar la distribución en un entorno tridimensional utilizando un esquema de colores, como se muestra en la Figura 35

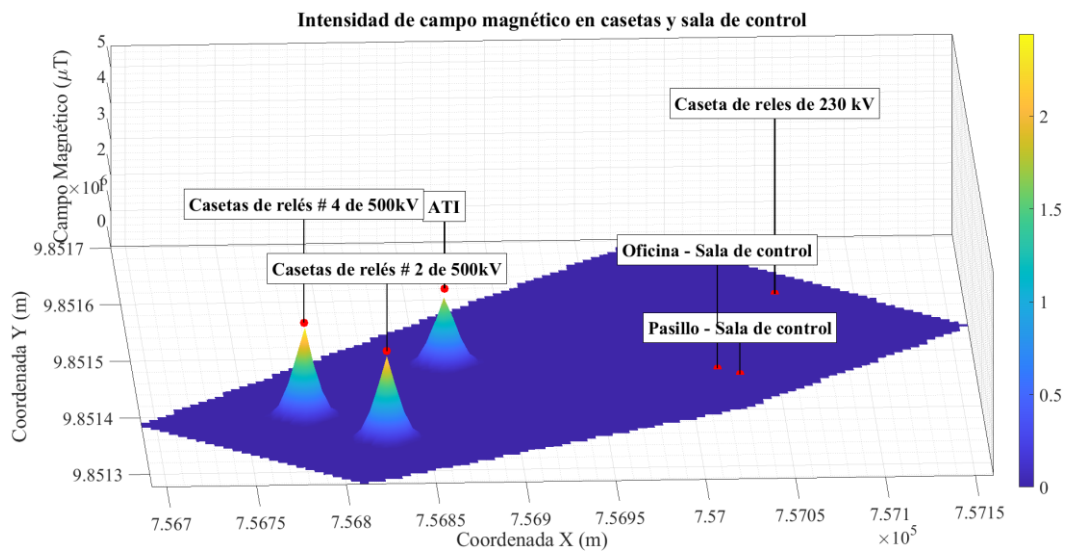


Figura 35. Distribución del campo magnético en casetas y sala de control.
Fuente: Autor

La Figura 35 presenta la distribución de la intensidad del campo magnético, medida en microteslas (μT), en las cabinas, la sala de control y las áreas de ATI. La intensidad máxima, aproximadamente $2 \mu\text{T}$, se registra cerca de las casetas de relés 2, 3 y 4, situadas en el patio de 500 kV, evidenciando una disminución pronunciada

conforme se incrementa la distancia a estas áreas. En contraste, la intensidad del campo magnético en la sala de control y en la caseta de relé de 230 kV es significativamente menor, manteniéndose por debajo de $0.5 \mu\text{T}$. Esta distribución resalta una rápida disminución de la intensidad del campo magnético a medida que se aleja del equipo de alto voltaje.

3.2 Validación de los resultados

En la Tabla 7 se comparan los campos eléctricos y magnéticos medidos, calculados (utilizando Matlab) y simulados (empleando QuickField) en las bahías de las líneas de transmisión El Inga y Chorrillos, así como en los componentes de la subestación. Se evalúan estos valores en relación con las directrices de la ICNIRP, que establecen límites de 8333 V/m para campos eléctricos y $417 \mu\text{T}$ para campos magnéticos. Todos los valores registrados se encuentran significativamente por debajo de los límites establecidos por la ICNIRP, lo que confirma el cumplimiento de los estándares de seguridad.

Por ejemplo, el campo eléctrico más alto medido es en la Barra 2, con un valor de 7327 V/m , que se mantiene dentro del umbral de la ICNIRP. El campo magnético correspondiente es de $7.018 \mu\text{T}$, también muy por debajo del límite. Asimismo, los niveles máximos de campos eléctricos en las bahías de las líneas de transmisión El Inga y Chorrillos son de 3701 V/m y 2166 V/m , respectivamente, con campos magnéticos de $1.324 \mu\text{T}$ y $0.266 \mu\text{T}$, todos dentro de niveles seguros de exposición.

Es importante señalar que los guiones que aparecen en algunas celdas de la Tabla 7 corresponden a los cálculos del patio de 230 kV, que no tenía energía en el momento de la medición. Además, ciertos puntos específicos, como los de medición dentro de una caseta, no pueden ser calculados debido a que la guía no proporciona ecuaciones que modelen esta situación. Por último, el software QuickField presenta una limitación de 255 nodos, lo que restringe la simulación completa de la subestación.

Tabla 7. Evaluación de resultados, medidos, calculados y simulados.

<i>Evaluación de resultados, medidos, calculados y simulados</i>							
N°	Configuración Subestación	Valores medidos		Software Matlab		Software Quickfield	
Ítems	Áreas de intervención	Campo eléctrico medido	Campo magnético medido	Campo eléctrico modelado	Campo magnético modelado	Campo eléctrico Quickfield	Campo magnético Quickfield
		E(V/m)	B(uT)	E(V/m)	B(uT)	E(V/m)	B(uT)
Etapa 1	L/T Bahía El Inga, 500 kV	3701	1,324	3704,7	1,332	3334,23	1,1988
	L/T Bahía Chorrillos 500 kV	2166	0,266	2168,17	0,267	1951,353	0,2403
	Barra 1, 500 kV	4472	6,25	4476,47	6,288	4028,823	5,6592
	Barra 2, 500 kV	7327	7,018	7334,33	7,053	6600,897	6,3477
Etapa 2	ATI, 230 kV	3250	0,023	3253,25	0,022	2927,925	0,0198
	Barra 1, 230kV	2,86	0	-	-	-	-
	Barra 2, 230kV	1,32	0	-	-	-	-
Etapa 3	Caseta #4, 500 kV	3,064	2,568	-	-	-	-
	Caseta #2, 500 kV	0,68	2,378	-	-	-	-
	Caseta #3, 500 kV	2,033	2,056	-	-	-	-
	Oficina sala de control	0,1168	0,000306	-	-	-	-
	Pasillo sala de control	0,413	0	-	-	-	-
	Caseta de 230 kV	1,3443	0,002	-	-	-	-

Fuente: Autor

La Tabla 8 presenta los errores relativos entre los valores medidos, calculados y simulados, lo que respalda la precisión de estas evaluaciones conforme a las directrices de la normativa ICNIRP, utilizando los softwares Matlab y QuickField. Los resultados obtenidos muestran una aproximación precisa a los valores medidos, siendo QuickField el programa que generalmente presenta menores errores relativos, especialmente en áreas con intensidades de campo más bajas. Por ejemplo, el error relativo de QuickField para el campo eléctrico de la línea El Inga es de solo 0.0283%, lo que indica una alta precisión en los cálculos.

Esta exactitud refuerza la fiabilidad de QuickField para confirmar el cumplimiento de las normas de la ICNIRP en varios componentes de las líneas de transmisión. En general, los datos confirman que los campos eléctricos y magnéticos en todas las áreas analizadas se mantienen dentro de los límites de seguridad establecidos por la ICNIRP, asegurando un riesgo mínimo tanto para el personal como para los entornos circundantes.

Tabla 8. Error relativo entre, medidos, calculados y simulados.

Resultados de valores medidos, calculados y simulados con porcentaje de error relativo							
N°	Configuración de la Subestación Tisaleo	Valores medidos		Software Matlab		Software Quickfield	
				Error [%]			
Ítems	Áreas de intervención	Campo eléctrico E(V/m)	Campo magnético B(μT)	Campo eléctrico E(V/m)	Campo magnético B(μT)	Campo eléctrico E(V/m)	Campo magnético B(μT)
Etapa 1	L/T Bahía El Inga, 500 kV	3701	1,324	0,205	0,0035	0,0283	0,002
	L/T Bahía Chorrillos 500 kV	2166	0,266	0,2483	0,003	0,045	0,001
	Barra 1, 500 kV	4472	6,25	0,2124	0,16	0,044	0,02
	Barra 2, 500 kV	7327	7,018	0,0136	0,003	0,013	0,003
Etapa 2	ATI, 230 kV	3250	0,023	8,8923	0,004	0,03	0,003
	Barra 1, 230kV	2,86	0	-	-	-	-
	Barra 2, 230kV	1,32	0	-	-	-	-
Etapa 3	Caseta #4, 500 kV	3,064	2,568	-	-	-	-
	Caseta #2, 500 kV	0,68	2,378	-	-	-	-
	Caseta #3, 500 kV	2,033	2,056	-	-	-	-
	Oficina sala de control	0,1168	0,000306	-	-	-	-
	Pasillo sala de control	0,413	0	-	-	-	-
	Caseta de 230 kV	1,3443	0,002	-	-	-	-

Fuente: Autor

3.3 Conclusiones del capítulo III

- Las mediciones, cálculos con Matlab y simulaciones con QuickField proporcionan valores muy cercanos y congruentes, lo cual se demuestra con un valor relativo de mínimo de 0.001% y máximo de 8.89 %.
- En el patio de 500 kV, los valores máximos registrados fueron 7334,33 V/m para el campo eléctrico y 7,05 μT para el campo magnético. Asimismo, los valores mínimos de campo eléctrico fueron de 2.10 V/m y un campo magnético de 0 μT. Además, el campo eléctrico promedio fue de 2496.15 V/m y una intensidad de campo magnético 1.16 μT. En todos los casos los valores cumplen con la normativa ICNIRP que establece un límite de 8333 V/m para campos eléctricos y 417 μT para campos magnéticos.
- En el patio de 230 kV, el campo eléctrico alcanzó un pico de 3253,25 V/m, mientras que el campo magnético se mantuvo en niveles mínimos,

mostrando una distribución uniforme, particularmente cerca de los autotransformadores.

- Los resultados de todas las áreas analizadas cumplieron con los límites de seguridad de la ICNIRP, lo que valida la metodología aplicada y garantiza el cumplimiento de los estándares internacionales.

4. Conclusiones generales

- A través de una revisión técnica detallada, se comprendieron los fundamentos teóricos de la generación, distribución y efectos de los campos electromagnéticos en sistemas eléctricos de potencia. Las normativas internacionales vigentes, como las guías de la ICNIRP y la IEEE Std 644-1994, establecen los límites de seguridad para la exposición a campos electromagnéticos, que se tomaron como referencia para las mediciones y comparaciones realizadas en este estudio. Esta fase fue fundamental para estructurar los análisis prácticos y metodológicos posteriores.
- Para un análisis de campos electromagnéticos las mediciones, modelación, simulación permitieron evaluar con precisión los niveles de radiación de CEM en la subestación. Las simulaciones realizadas con software Matlab y QuickField versión estudiantil permitieron modelar y simular con precisión la distribución de los campos electromagnéticos de la subestación conformados en patios de 500 kV y 230 kV, los resultados obtenidos se asemejan a valores in situ (mediciones de campo con equipo analizar de espectro), la validez de datos simulados tiene una efectividad de 91,11% dando la confiabilidad al análisis del caso.
- La descripción de resultados obtenidos en la subestación conforme etapas indica que, en patio de 500 kV etapa uno, bahía de entrada de la línea transmisión El Inga se visualiza un campo eléctrico máximo registrado que alcanza a 7334.33 V/m y en campo magnético registrado a 7.05 μ T, por lo tanto, en etapa dos, en patio de 230 kV los valores de campo eléctrico registrado a 3253.25 V/m y en campo magnético alcanza los valores mínimos, en etapa tres que comprende las casetas se registra datos que alcanza a 3.069 V/m y en campo magnético registrado a 2.568 μ T. Todos estos valores cumplen con los límites establecidos por la normativa ICNIRP y la IEEE Std 644-2019, que garantiza la seguridad del personal en la subestación y la población.
- Finalmente, la Subestación Eléctrica Tisaleo opera bajo condiciones seguras en cuanto a la exposición a campos electromagnéticos. Las áreas con

mayores niveles de CEM fueron identificadas con precisión mediante mediciones y simulaciones, lo que permite sociabilizar e implementar las medidas de protección adecuadas al personal ocupacionalmente expuesto ante las radiaciones no ionizantes.

5. Recomendaciones

- Para realizar la simulación de radiaciones no ionizantes en la subestación se debe considerar la extensión de campo debido a las normas establecidas que indican el procedimiento para las mediciones campo eléctrico y magnético, al intentar realizar en una sola malla previo obtener el resultado de forma panorámica no se pudo realizar ya que se tiene software gratuito versión estudiantil donde permite crear hasta 255 puntos en una malla, por lo tanto, se debe adquirir la licencia de software especializado.
- Por norma de seguridad es recomendable identificar y delimitar áreas de mayor exposición de campos eléctricos y magnéticos, que ayuda a prevenir al personal y a posibles interferencias en el funcionamiento en dispositivos o equipos electrónicos.
- La subestación a pasar el tiempo tendrá líneas de subtransmisión en patio de 230 kV, para ello la demanda de carga sea alta y es probable que existe riesgo de campo electromagnéticos considerables, es recomendable prevenir con apantallamientos, barreras físicas, tecnología de aislamiento activo y para el monitoreo en áreas críticas con sensor de intensidad de campo electromagnético que se integre al sistema de monitoreo tiempo real con objeto de minimizar el impacto y mejorar la seguridad y la eficiencia en la subestación.

6. Referencias Bibliográficas

- [1] K. Kuznetsov and A. Zakirova, “Systems and Devices for Protection of Personnel Against Electromagnetic Fields,” in *2019 International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*, IEEE, Sep. 2019, pp. 1–5. doi: 10.1109/RUSAUTOCON.2019.8867806.
- [2] Y. Touitou, B. Selmaoui, and J. Lambrozo, “Assessment of cortisol secretory pattern in workers chronically exposed to ELF-EMF generated by high voltage transmission lines and substations,” *Environ. Int.*, vol. 161, p. 107103, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.envint.2022.107103.
- [3] H. Li *et al.*, “Comparison of Power Frequency Electromagnetic Field in Residential and Occupational locations,” in *2019 IEEE 3rd Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC)*, IEEE, Oct. 2019, pp. 1977–1980. doi: 10.1109/IMCEC46724.2019.8983820.
- [4] A. D. Bajoga *et al.*, “ASSESSMENT OF MAGNETIC FIELD EXPOSURE AND CURRENT DENSITY FROM,” vol. 7, pp. 130–142, 2023.
- [5] M. F. Velasco, X. A. Proaño, W. P. Guamán, and G. N. Pesántez, “Electromagnetic Fields Estimation of the Santa Rosa-Totoras 230 kV Transmission Line,” 2022, pp. 393–405. doi: 10.1007/978-3-031-11438-0_31.
- [6] W. P. Guamán, N. P. Minchala, C. L. Velasco, X. A. Proaño, and G. N. Pesántez, “Study of Electromagnetic Fields Distribution in Tena Electrical Substation,” 2022, pp. 33–46. doi: 10.1007/978-3-031-08942-8_3.
- [7] O. García, “Análisis del sistema de protección de puesta a tierra y apantallamiento eléctrico en una planta minera,” Universidad Técnica de Cotopaxi, 2023.
- [8] L. Minchala and S. Velasco, “Estudio de la distribución de campos electromagnéticos en subestaciones eléctricas de media y alta tensión,” Universidad Técnica de Cotopaxi, 2021.

- [9] W. G. Shadid and R. Shadid, “Electric Model for Electromagnetic Wave Fields,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 88782–88804, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3090862.
- [10] K. Bhattacharya, “Semi-classical description of electrostatics and quantization of electric charge,” *Phys. Scr.*, vol. 98, no. 8, p. 085011, Aug. 2023, doi: 10.1088/1402-4896/ace1b0.
- [11] W. J. B. Oldham Jr., “Self-Organization of Charged Particles in an Electric Field,” *Phys. Sci. Int. J.*, pp. 46–62, Aug. 2021, doi: 10.9734/psij/2021/v25i430253.
- [12] D. Chi, “Multiple Debye Spherical Layers and Universe —Gravitation Originates from Electric Force,” *J. Appl. Math. Phys.*, vol. 09, no. 03, pp. 477–483, 2021, doi: 10.4236/jamp.2021.93033.
- [13] J. Chen, Y. Li, R. Li, and Y. Jin, “Simulation Analysis of the Equipotential Surface of Regular-Shaped Charged Bodies,” in *Proceedings of the 2019 International Conference on Modeling, Simulation and Big Data Analysis (MSBDA 2019)*, Paris, France: Atlantis Press, 2019. doi: 10.2991/msbda-19.2019.9.
- [14] S. G. Arutunian, M. A. Aginian, A. V. Margaryan, M. Chung, and E. G. Lazareva, “Electric field lines of an arbitrarily moving charged particle,” *Am. J. Phys.*, vol. 91, no. 11, pp. 913–922, Nov. 2023, doi: 10.1119/5.0124544.
- [15] S. Gera and S. Sengupta, “Finite model of an electric charge,” *Phys. Rev. D*, vol. 104, no. 4, p. 044057, Aug. 2021, doi: 10.1103/PhysRevD.104.044057.
- [16] M. Hassan *et al.*, “Manipulating Interactions between Dielectric Particles with Electric Fields: A General Electrostatic Many-Body Framework,” *J. Chem. Theory Comput.*, vol. 18, no. 10, pp. 6281–6296, Oct. 2022, doi: 10.1021/acs.jctc.2c00008.
- [17] T. H. Boyer, “Concerning classical forces, energies, and potentials for accelerated point charges,” *Am. J. Phys.*, vol. 91, no. 1, pp. 74–78, Jan. 2023, doi: 10.1119/5.0094457.
- [18] L. Freidel, E. R. Livine, and D. Pranzetti, “Kinematical gravitational charge

- algebra,” *Phys. Rev. D*, vol. 101, no. 2, p. 024012, Jan. 2020, doi: 10.1103/PhysRevD.101.024012.
- [19] A. Guillevic *et al.*, “Particle dynamics in a turbulent electric field,” *Phys. Plasmas*, vol. 30, no. 5, May 2023, doi: 10.1063/5.0135918.
- [20] V. Tchaban, “DYNAMICS OF MOTION OF ELECTRON IN ELECTRICAL FIELD,” *Meas. Equip. Metrol.*, vol. 81, no. 2, pp. 39–42, 2020, doi: 10.23939/istcmtm2020.02.039.
- [21] J. Mund, K.-H. Rehren, and B. Schroer, “Gauss’ Law and string-localized quantum field theory,” *J. High Energy Phys.*, vol. 2020, no. 1, p. 1, Jan. 2020, doi: 10.1007/JHEP01(2020)001.
- [22] I. Krapova and T. Karastaneva, “On the structure of the CP field in Bulgarian,” *Balkanistica*, vol. 15, no. iii, pp. 293–321, 2002.
- [23] J. Donnevert, “The Stationary Magnetic Field,” in *Maxwell’s Equations*, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2020, pp. 43–87. doi: 10.1007/978-3-658-29376-5_3.
- [24] X. M. Yang and Z. Song, “Biot-Savart law in quantum matter,” *Phys. Rev. B*, vol. 102, no. 19, p. 195112, Nov. 2020, doi: 10.1103/PhysRevB.102.195112.
- [25] R. Bonetti, D. Bortis, L. Beglinger, and J. W. Kolar, “Exploring the Physical Limits of Axial Magnetic Bearings Featuring Extremely Large Vertical Levitation Distances,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 57, no. 6, pp. 6931–6943, Nov. 2021, doi: 10.1109/TIA.2021.3096170.
- [26] K. Yao, “Comparison between Motion Effect of Electric Field and Gravitational Field,” *Appl. Sci. Innov. Res.*, vol. 7, no. 1, p. p1, Dec. 2022, doi: 10.22158/asir.v7n1p1.
- [27] Y. Guo, Y. Xu, M. D. Ding, P. F. Chen, C. Xia, and R. Keppens, “The Magnetic Flux Rope Structure of a Triangulated Solar Filament,” *Astrophys. J. Lett.*, vol. 884, no. 1, p. L1, Oct. 2019, doi: 10.3847/2041-8213/ab4514.
- [28] J. Donnevert, “Time-Varying Electric and Magnetic Fields,” in *Maxwell’s Equations*, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2020, pp. 89–131.

doi: 10.1007/978-3-658-29376-5_4.

- [29] O. Eyal and A. Goldstein, “Gauss’ law for moving charges from first principles,” *Results Phys.*, vol. 14, p. 102454, Sep. 2019, doi: 10.1016/j.rinp.2019.102454.
- [30] S. Pennisi, R. E. Tchame, and M. Obounou, “A New Relativistic Model for Polyatomic Gases Interacting with an Electromagnetic Field,” *Mathematics*, vol. 10, no. 1, p. 110, Dec. 2021, doi: 10.3390/math10010110.
- [31] E. A. Ivanova, “Modeling of physical fields by means of the Cosserat continuum,” *ZAMM - J. Appl. Math. Mech. / Zeitschrift für Angew. Math. und Mech.*, vol. 103, no. 4, Apr. 2023, doi: 10.1002/zamm.202100333.
- [32] Y. Berchenko-Kogan and A. Stern, “Constraint-Preserving Hybrid Finite Element Methods for Maxwell’s Equations,” *Found. Comput. Math.*, vol. 21, no. 4, pp. 1075–1098, Aug. 2021, doi: 10.1007/s10208-020-09476-7.
- [33] E. A. Ivanova, “Modeling of electrodynamic processes by means of mechanical analogies,” *ZAMM - J. Appl. Math. Mech. / Zeitschrift für Angew. Math. und Mech.*, vol. 101, no. 4, Apr. 2021, doi: 10.1002/zamm.202000076.
- [34] R. Eisenberg, “Circuits, Currents, Kirchhoff, and Maxwell,” 2023.
- [35] V. KUMAR, “Circuit Equations from Maxwell-Hertz- Heaviside Electromagnetic Equations,” in *2019 IEEE International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies (ICECCT)*, IEEE, Feb. 2019, pp. 1–9. doi: 10.1109/ICECCT.2019.8869213.
- [36] S. Singh, A. Tyagi, and B. Vidhani, “Physics of Absorption and Generation of Electromagnetic Radiation,” in *Electromagnetic Wave Propagation for Industry and Biomedical Applications*, IntechOpen, 2022. doi: 10.5772/intechopen.99037.
- [37] A. Gonoskov, T. G. Blackburn, M. Marklund, and S. S. Bulanov, “Charged particle motion and radiation in strong electromagnetic fields,” *Rev. Mod. Phys.*, vol. 94, no. 4, p. 045001, Oct. 2022, doi: 10.1103/RevModPhys.94.045001.

- [38] H. Xue, A. Ametani, and K. Yamamoto, “Theoretical and NEC Calculations of Electromagnetic Fields Generated from a Multi-Phase Underground Cable,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 36, no. 3, pp. 1270–1280, Jun. 2021, doi: 10.1109/TPWRD.2020.3005521.
- [39] A. Hirata and S. Kodera, “Difference of ICNIRP Guidelines and IEEE C95.1 Standard for Human Protection from Radio-Frequency Exposures,” in *2020 International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC EUROPE*, IEEE, Sep. 2020, pp. 1–5. doi: 10.1109/EMCEUROPE48519.2020.9245744.
- [40] S. Aerts *et al.*, “Spatial and temporal assessment of radiofrequency electromagnetic fields emitted by smart meters and smart meter banks in urban environments,” *Environ. Res.*, vol. 183, p. 109196, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.envres.2020.109196.
- [41] N. Rubtsova, S. Perov, and O. Belaya, “The Comparison of Approaches to Power Frequency Electromagnetic Field Hygienic Regulations,” 2020, pp. 131–137. doi: 10.1007/978-3-030-31676-1_13.
- [42] E. K. Nordhagen and E. Flydal, “Self-referencing authorships behind the ICNIRP 2020 radiation protection guidelines,” *Rev. Environ. Health*, vol. 38, no. 3, pp. 531–546, Sep. 2023, doi: 10.1515/reveh-2022-0037.
- [43] T. Gavrilov, N. Đurić, and D. Kljajić, “An overview of 1998 versus 2020 edition of Guidelines for Limiting Exposure to electromagnetic fields,” *Saf. Eng.*, vol. 11, no. 2, pp. 97–101, 2021, doi: 10.5937/SE2102097G.
- [44] R. Melnick, “Regarding ICNIRP’S Evaluation of the National Toxicology Program’s Carcinogenicity Studies on Radiofrequency Electromagnetic Fields,” *Health Phys.*, vol. 118, no. 6, pp. 678–682, Jun. 2020, doi: 10.1097/HP.0000000000001268.
- [45] D. Colombi *et al.*, “Implications of ICNIRP 2020 Exposure Guidelines on the RF EMF Compliance Boundary of Base Stations,” *Front. Commun. Networks*, vol. 3, Mar. 2022, doi: 10.3389/frcmn.2022.744528.
- [46] Google earth, “Google earth.” [Online]. Available:

https://earth.google.com/web/@0.50579701,-78.07623578,1853.65328468a,68111.3652325d,35y,-0h,0t,0r/data=CgRCAggBOgMKATBKDQj_____8BEAA

- [47] J. Liu *et al.*, “Analysis of Electric Field of AC transmission Line,” in *2019 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT)*, IEEE, May 2019, pp. 1–3. doi: 10.1109/ICMMT45702.2019.8992112.
- [48] J. Cai, L. Hao, L. Xie, and T. Lu, “Analysis of Electric Field for Two-Circuit HVDC Overhead Lines with Different Crossing,” in *2020 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*, IEEE, Oct. 2020, pp. 107–110. doi: 10.1109/CEIDP49254.2020.9437433.
- [49] EPRI, “Handbook for the Assessment and management of Magnetic Field Caused by Distribution Lines,” 2024.
- [50] P. Legazpi, “Manual de Uso Básico de QuickField,” 2024.

7. Anexos

Anexo 1. Informe de medición de campos eléctricos y magnético IN- SITU

En las siguientes tablas se presentan los datos IN-ITU, en cada una de las fuentes fijas monitoreadas.

Tabla 9. Datos medidos IN-SITU.

N°	Cód.	Campo eléctrico E (V/m)	Campo magnético B (μT)	N°	Cód.	Campo eléctrico E (V/m)	Campo magnético B (μT)
1	A1	1128	0	25	A3	1969	0
2	B1	1790	0,203	26	B3	4060	0,142
3	C1	599	0	27	C3	4168	0,52
4	D1	300	0,286	28	D3	4509	0,857
5	E1	1906	0,318	29	E3	4478	1,465
6	F1	3485	0,052	30	F3	4355	0,713
7	G1	2998	0,089	31	G3	4157	0,616
8	H1	784	0,899	32	H3	4520	1,458
9	I1	399	0	33	I3	2500	0,596
10	J1	1301	0	34	J3	2107	0,345
11	K1	327	0	35	K3	1256	0,201
12	L1	509	0	36	L3	538	0
13	A2	1518	0	37	A4	1801	0
14	B2	2739	0,145	38	B4	4036	0,143
15	C2	4129	0,625	39	C4	4082	0,637
16	D2	4129	1,218	40	D4	4402	4,27
17	E2	3701	1,324	41	E4	4272	1,52
18	F2	432	0,114	42	F4	4162	0,274
19	G2	4350	0,135	43	G4	4150	0,377
20	H2	4375	1,081	44	H4	4420	2,6
21	I2	2166	0,266	45	I4	2516	1,178
22	J2	1874	0	46	J4	2360	0,78
23	K2	1139	0	47	K4	1680	0,146
24	L2	553	0	48	L4	580	0

Nota: Los valores de la Tabla 9. Se encuentra a condiciones ambientales de campo.

Fuente: Autor

Tabla 10. Datos medidos IN-SITU (continuación de la Tabla 9).

N°	Cód.	Campo eléctrico E (V/m)	Campo magnético B (μT)	N°	Cód.	Campo eléctrico E (V/m)	Campo magnético B (μT)
49	A5	1762	0	85	A8	1524	0
50	B5	3906	0,831	86	B8	3882	0,469
51	C5	4208	2,706	87	C8	4209	3,34
52	D5	4318	5,312	88	D8	4480	5,86
53	E5	4401	3,19	89	E8	4418	2,234
54	F5	4068	0,207	90	F8	3906	0,314
55	G5	4113	0,765	91	G8	4408	3,305
56	H5	4590	5,25	92	H8	4474	4,175
57	I5	2388	1,7	93	I8	2108	2,668
58	J5	2163	0,485	94	J8	2221	0,984
59	K5	1201	0,098	95	K8	787	0
60	L5	618	0	96	L8	327	0
61	A6	1634	0	97	A9	1509	0
62	B6	4041	0,42	98	B9	3728	0,515
63	C6	3942	4,331	99	C9	4079	3,185
64	D6	4106	4,625	100	D9	7327	7,018
65	E6	4382	4,587	101	E9	4396	6,88
66	F6	4116	0,713	102	F9	4972	0,487
67	G6	3997	1,685	103	G9	4326	2,846
68	H6	2564	5,371	104	H9	4450	4,928
69	I6	2233	1,559	105	I9	2225	1,97
70	J6	2365	0,546	106	J9	2140	0,895
71	K6	1028	0,111	107	K9	1004	0
72	L6	477	0	108	L9	289	0
73	A7	1608	0	109	A10	1406	0
74	B7	4096	0	110	B10	3828	0
75	C7	4004	5,389	111	C10	4086	0
76	D7	4326	3,937	112	D10	4471	4,56
77	E7	4451	5,716	113	E10	4485	5,81
78	F7	4082	1,36	114	F10	4450	0,423
79	G7	4302	2,64	115	G10	4441	3,38
80	H7	4472	5,6	116	H10	4396	3,82
81	I7	2314	1,16	117	I10	2161	0,885
82	J7	2386	0,676	118	J10	2096	0,205
83	K7	795	0,141	119	K10	818	0
84	L7	308	0	120	L10	292	0

Nota: Los valores de la Tabla 10. Se encuentra a condiciones ambientales de campo.

Fuente: Autor

Tabla 11. Datos medidos IN-SITU (continuación de la Tabla 10).

N°	Cód.	Campo eléctrico E (V/m)	Campo magnético B (μT)	N°	Cód.	Campo eléctrico E (V/m)	Campo magnético B (μT)
121	A11	1296	0	157	A14	1109	0,368
122	B11	3650	1,48	158	B14	3208	0,119
123	C11	4180	1,55	159	C14	4276	0,254
124	D11	4503	5,78	160	D14	4399	0,169
125	E11	4425	3,065	161	E14	448	0,757
126	F11	4406	5,28	162	F14	429	5,41
127	G11	4336	5,26	163	G14	4396	5,31
128	H11	4472	6,25	164	H14	4387	0,276
129	I11	2180	0,374	165	I14	1950	0,067
130	J11	2246	0,206	166	J14	1820	0,061
131	K11	825	0	167	K14	765	0,057
132	L11	306	0	168	L14	198	0,046
133	A12	1306	0	169	A15	1220	0,212
134	B12	349	0	170	B15	3383	0,119
135	C12	4123	0,402	171	C15	4087	0,226
136	D12	4421	6,421	172	D15	4213	0,26
137	E12	4468	1,903	173	E15	2419	2,428
138	F12	4408	4,802	174	F15	2334	4,708
139	G12	4436	2,974	175	G15	4288	3,861
140	H12	4301	4,03	176	H15	3384	0,171
141	I12	1980	1,39	177	I15	1361	0,068
142	J12	2037	0,363	178	J15	1049	0,059
143	K12	620	0	179	K15	489	0,057
144	L12	298	0	180	L15	148	0,049
145	A13	1126	0,257	181	A16	1460	0,074
146	B13	3326	0,07	182	B16	3426	0,117
147	C13	4031	0,295	183	C16	4329	0,189
148	D13	4445	2,171	184	D16	4198	0,402
149	E13	4463	4,128	185	E16	4296	4,05
150	F13	4468	5,638	186	F16	4334	4,102
151	G13	4414	3,49	187	G16	4537	2,65
152	H13	4394	5,629	188	H16	2450	0,037
153	I13	2402	0,923	189	I16	692	0,077
154	J13	2202	0,496	190	J16	365	0,069
155	K13	986	0,198	191	K16	167	0,053
156	L13	221	0,171	192	L16	110	0,045

Nota: Los valores de la Tabla 11. Se encuentra a condiciones ambientales de campo.

Fuente: Autor

Tabla 12. Datos medidos IN-SITU (continuación de la Tabla 11).

N°	Cód.	Campo eléctrico E (V/m)	Campo magnético B (μT)	N°	Cód.	Campo eléctrico E (V/m)	Campo magnético B (μT)
193	A17	1428	0,043	227	A19	1093	0,038
194	B17	3407	0,064	228	B19	2957	0,006
195	C17	4369	0,025	229	C19	4249	0,026
196	D17	4202	4,155	230	D19	4299	0,113
197	E17	4462	0,707	231	E19	4447	0,142
198	F17	4354	3,7	232	F19	4229	0,155
199	G17	4121	2,23	233	G19	4261	0,055
200	H17	1514	0,456	234	H19	928	1,304
201	I17	642	0,06	235	I19	429,6	0,054
202	J17	326	0,018	236	J19	229,7	0,029
203	K17	164	0,017	237	K19	131,6	0,009
204	L17	80,8	0,012	238	L19	87,6	0
205	M17	67,5	0	239	M19	66,97	0
206	N17	49,9	0	240	N19	46,8	0
207	O17	32,2	0	241	O19	18,16	0
208	P17	5,4	0	242	P19	7,1	0
209	Q17	2,1	0	243	Q19	5,6	0
210	A18	1348	0,014	244	A20	327	0,044
211	B18	3018	0,008	245	B20	682	0,027
212	C18	4302	0,225	246	C20	295	0,04
213	D18	4371	0,328	247	D20	4276	0,045
214	E18	4527	0,371	248	E20	4382	0,066
215	F18	4259	0,601	249	F20	4178	0,029
216	G18	1095	0,743	250	G20	3900	3,238
217	H18	878	0,168	251	H20	946	0,038
218	I18	4997	0,048	252	I20	273,9	0,03
219	J18	261,9	0,033	253	J20	140,1	0,012
220	K18	151,2	0,021	254	K20	64,44	0,007
221	L18	101,5	0,017	255	L20	48,99	0
222	M18	75,23	0,015	256	M20	22,99	0
223	N18	53,76	0,007	257	N20	17,6	0
224	O18	37,96	0,008	258	O20	12,3	0
225	P18	7,6	0,004	259	P20	5,4	0
226	Q18	6,1	0	260	Q20	2,3	0

Nota: Los valores de la Tabla 12. Se encuentra a condiciones ambientales de campo.

Fuente: Autor

Tabla 13. Datos medidos IN-SITU (continuación de la Tabla 12).

N°	Cód.	Campo eléctrico E (V/m)	Campo magnético B (μT)	N°	Cód.	Campo eléctrico E (V/m)	Campo magnético B (μT)
261	A21	480	0,034	295	A23	46,68	0,003
262	B21	970	0,02	296	B23	250,8	0,006
263	C21	2501	0,023	297	C23	338,6	0,002
264	D21	2980	0,023	298	D23	286,1	0
265	E21	3250	0,022	299	E23	138,6	0
266	F21	1591	0,002	300	F23	119,1	0
267	G21	576,9	0,016	301	G23	862	0
268	H21	181	0,02	302	H23	45,57	0,003
269	I21	91,31	0,016	303	I23	15,61	0,003
270	J21	48,61	0,011	304	J23	9,68	0,005
271	K21	30,81	0,007	305	K23	7,5	0,004
272	L21	18,3	0	306	L23	6,52	0,001
273	M21	19,1	0	307	M23	4,11	0
274	N21	11,82	0	308	N23	5,2	0
275	O21	9,6	0	309	O23	4,2	0
276	P21	6,6	0	310	P23	0,88	0
277	Q21	3,1	0	311	Q23	0,2	0
278	A22	128,6	0,003	312	A24	41,81	0
279	B22	986	0,016	313	B24	27,1	0,003
280	C22	1236	0,014	314	C24	44,27	0,006
281	D22	2990	0,002	315	D24	17,26	0
282	E22	1190	0,002	316	E24	13,41	0
283	F22	318,8	0,002	317	F24	14,16	0
284	G22	157,8	0,006	318	G24	13,21	0
285	H22	71,83	0,006	319	H24	10,76	0,002
286	I22	20,79	0,007	320	I24	9,62	0
287	J22	11,86	0,005	321	J24	8,024	0
288	K22	10,95	0,002	322	K24	6,6	0
289	L22	10,01	0	323	L24	5,281	0
290	M22	8,4	0	324	M24	3,98	0
291	N22	5,91	0	325	N24	2,013	0
292	O22	4,31	0	326	O24	0,76	0
293	P22	0,621	0	327	P24	0,45	0
294	Q22	0,423	0	328	Q24	0	0

Nota: Los valores de la Tabla 13. Se encuentra a condiciones ambientales de campo.

Fuente: Autor

Tabla 14. Datos medidos IN-SITU (continuación de la Tabla 13).

N°	Cód.	Campo eléctrico E (V/m)	Campo magnético B (μT)		N°	Cód.	Campo eléctrico E (V/m)	Campo magnético B (μT)
329	A25	2,01	0		363	A27	1,123	0
330	B25	2,331	0		364	B27	1,762	0
331	C25	2,76	0		365	C27	1,32	0
332	D25	2,86	0		366	D27	0	0
333	E25	1,78	0		367	E27	0	0
334	F25	0,46	0		368	F27	0	0
335	G25	0,692	0		369	G27	0	0
336	H25	0,586	0		370	H27	0	0
337	I25	0,236	0		371	I27	0	0
338	J25	0,218	0		372	J27	0	0
339	K25	2,7	0		373	K27	0	0
340	L25	2,1	0		374	L27	0	0
341	M25	1,7	0		375	M27	0	0
342	N25	1,681	0		376	N27	0	0
343	O25	1,012	0		377	O27	0	0
344	P25	0,433	0		378	P27	0	0
345	Q25	0	0		379	Q27	0	0
346	A26	1,657	0		380	A28	0	0
347	B26	1,986	0		381	B28	0	0
348	C26	1,546	0		382	C28	0	0
349	D26	1,763	0		383	D28	0	0
350	E26	1,56	0		384	E28	0	0
351	F26	0,627	0		385	F28	0	0
352	G26	0,514	0		386	G28	0	0
353	H26	0,483	0		387	H28	0	0
354	I26	0,418	0		388	I28	0	0
355	J26	0,209	0		389	J28	0	0
356	K26	1,918	0		390	K28	0	0
357	L26	1,781	0		391	L28	0	0
358	M26	1,518	0		392	M28	0	0
359	N26	1,211	0		393	N28	0	0
360	O26	0,618	0		394	O28	0	0
361	P26	0,218	0		395	P28	0	0
362	Q26	0	0		396	Q28	0	0

Nota: Los valores de la Tabla 14. Se encuentra a condiciones ambientales de campo.

Fuente: Autor

Tabla 15. Datos medidos IN-SITU (continuación de la Tabla 14).

N°	Cód.	Campo eléctrico E (V/m)	Campo magnético B (μT)		N°	Cód.	Campo eléctrico E (V/m)	Campo magnético B (μT)
397	A29	0	0		414	A30	0	0
398	B29	0	0		415	B30	0	0
399	C29	0	0		416	C30	0	0
400	D29	0	0		417	D30	0	0
401	E29	0	0		418	E30	0	0
402	F29	0	0		419	F30	0	0
403	G29	0	0		420	G30	0	0
404	H29	0	0		421	H30	0	0
405	I29	0	0		422	I30	0	0
406	J29	0	0		423	J30	0	0
407	K29	0	0		424	K30	0	0
408	L29	0	0		425	L30	0	0
409	M29	0	0		426	M30	0	0
410	N29	0	0		427	N30	0	0
411	O29	0	0		428	O30	0	0
412	P29	0	0		429	P30	0	0
413	Q29	0	0		430	Q30	0	0

*Nota: Los valores de la Tabla 15. Se encuentra a condiciones ambientales de campo.
Fuente: Autor*

Anexo 2. Datos de Medición IN-SITU Casetas y sala de control

En las siguientes tablas se presentan los datos IN-ITU, en cada una de las fuentes fijas monitoreadas

Tabla 16. Datos medidos IN-SITU – casetas y sala de control.

N°	Descripción	Campo eléctrico E (V/m)	Campo magnético B (μT)
1	PASILLO - SALA DE CONTROL	0,413	0
2	OFICINA - SALA DE CONTROL	0,1168	0,000306
3	CASETA RELES DE 500 KV #2	0,680	2,378
4	CASETA RELES DE 500 KV #4	3,064	2,568
5	ATI	2,033	2,056
6	CASETA RELES DE 230kV	1,3443	0,002

Nota: Los valores de la Tabla 16. Se encuentra a condiciones ambientales de campo.

Fuente: Autor

Anexo 3. Guía EPRI para el cálculo de campos eléctricos

El siguiente ejemplo guía al lector a través del cálculo de coeficientes de potenciales, cargas en los conductores, campo eléctrico (real, imaginario, vertical y horizontal, componentes y resultantes). Considere una línea trifásica de 525 kV con las fases (a, b, c) en una configuración plana, 10 m entre fases, 10,6 m de altura sobre el suelo y paquetes de tres conductores, 3,3 cm de diámetro, con 45 cm de separación. El campo se calcula en un punto a 20 m de la línea central, y a 2 m sobre el suelo

Cada fase se reduce a un solo conductor equivalente cuyo diámetro se calcula:

Cálculo del diámetro del círculo del haz.

$s = 0.45 \text{ m}$ (45 cm de separación entre sub conductores)

$n = 3$ (número de conductores del haz).

$d = 0.033 \text{ m}$ (3.3 cm de diámetro de cada sub conductor)

$$d_b = \frac{s}{\sin\left(\frac{\pi}{n}\right)} = \frac{0.45}{\sin\left(\frac{\pi}{3}\right)} = 0.519 \text{ m}$$

Ahora se usa d_b para calcular el diámetro equivalente:

$$d_{eq} = d_b * \sqrt[n]{\frac{nd}{d_b}} = 0.519 * \sqrt[3]{\frac{3 * 0.033}{0.519}} = 0.300 \text{ m}$$

Donde:

d_b es el diámetro del haz.

n es el número de sub conductores en el haz.

d es el diámetro de los sub conductores.

s es la distancia entre sub conductores.

Los coeficientes de potencial propios se calculan utilizando la siguiente ecuación

$$P_{kk} = \frac{1}{2\pi\epsilon} = \ln\left(4 * \frac{H_k}{d_k}\right)$$

$$P_{kk} = \frac{1}{2\pi(8.85 * 10^{-12})} \ln\left(4 * \frac{(10.6)}{0.3}\right) = 8.9039 * 10^{10} \text{ m/F}$$

P_{kk} es el coeficiente de potencia propio del conductor k .

$$\varepsilon = 8.854 * 10^{-12} \text{ F/m}$$

H_k es la altura sobre el suelo del conductor k .

d_k es el diámetro del conductor k .

Por lo que:

$$P_{kk} = P_{aa} = P_{bb} = P_{cc}$$

Ahora para calcular el potencial mutuo se usa

$$P_{kl} = \frac{1}{2\pi\varepsilon} = \ln\left(\frac{S'_{kl}}{S_{kl}}\right)$$

$$P_{kl} = \frac{1}{2\pi(8.85 * 10^{-12})} \ln\left(\frac{23.44}{10}\right) = 1.53 * 10^{10} \text{ m/F}$$

$$P_{ac} = \frac{1}{2\pi(8.85 * 10^{-12})} \ln\left(\frac{29.14}{20}\right) = 6.77 * 10^9 \text{ m/F}$$

Donde

S_{kl} es la distancia entre el conductor k y el conductor l .

S'_{kl} es la distancia entre el conductor k y la imagen del conductor l .

$$P = \begin{bmatrix} P_{aa} & P_{ab} & P_{ac} \\ P_{ba} & P_{bb} & P_{bc} \\ P_{ca} & P_{bc} & P_{cc} \end{bmatrix}$$

$$P = \begin{bmatrix} 8.91 & 1.53 & 0.68 \\ 1.53 & 8.91 & 1.53 \\ 0.68 & 1.53 & 8.91 \end{bmatrix} * 10^{10} \text{ m/F}$$

$$[P]^{-1} = \begin{bmatrix} 11.60 & -1.90 & -0.56 \\ -1.90 & 11.9 & -1.90 \\ 0.56 & -1.90 & 11.6 \end{bmatrix} * 10^{-12} \text{ m/F}$$

$$[Q_r] = [P]^{-1} - [V_r]$$

$$[Q_i] = [P]^{-1} - [V_i]$$

$$V_{ra} = -0.5 * \frac{525}{\sqrt{3}} = -151.6 \text{ kV}$$

$$V_{rb} = \frac{525}{\sqrt{3}} = -303.1 \text{ kV}$$

$$V_{rc} = -0.5 * \frac{525}{\sqrt{3}} = -15.6 \text{ kV}$$

$$V_{ia} = -0.5 * (525) = 262.5 \text{ kV}$$

$$V_{ib} = 0$$

$$V_{ic} = 0.5(525) = 262.5 \text{ kV}$$

$$[Q_r] = \begin{bmatrix} 11.60 & -1.90 & -0.56 \\ -1.90 & 11.9 & -1.90 \\ 0.56 & -1.90 & 11.6 \end{bmatrix} * 10^{-12} * \begin{bmatrix} -151.6 \\ -303.1 \\ -151.6 \end{bmatrix}$$

$$Q_{ra} = -2.25 * 10^{-6} \text{ C/m}$$

$$Q_{rb} = 4.18 * 10^{-6} \text{ C/m}$$

$$Q_{rc} = -2.25 * 10^{-6} \text{ C/m}$$

$$Q_{ia} = 3.19 * 10^{-6} \text{ C/m}$$

$$Q_{ib} = 0 \text{ C/m}$$

$$Q_{ic} = -3.19 * 10^{-6} \text{ C/m}$$

$$\vec{E}_{kx} = \frac{(\vec{Q}_{rk} + j\vec{Q}_{ik})}{2\pi\epsilon} \left[\frac{X_M}{X_M^2 + (H_K - H_M)^2} - \frac{X_M}{X_M^2 + (H_K + H_M)^2} \right]$$

$$\vec{E}_{ax} = \frac{(-2.25 * 10^{-6} + j3.19 * 10^{-6})}{2\pi(8.85 * 10^{-12})} \left[\frac{30}{30^2 + (10.6 - 2)^2} - \frac{20}{30^2 + (10.6 + 2)^2} \right]$$

$$\vec{E}_{ax} = -100 + j141 \text{ V/m}$$

$$\vec{E}_{bx} = \frac{(4.18 * 10^{-6} + 0)}{2\pi(8.85 * 10^{-12})} \left[\frac{20}{20^2 + (10.6 - 2)^2} - \frac{20}{20^2 + (10.6 + 2)^2} \right]$$

$$\vec{E}_{bx} = 481 \text{ V/m}$$

$$\vec{E}_{cx} = \frac{(-2.25 * 10^{-6} - 3.19 * 10^{-6})}{2\pi(8.85 * 10^{-12})} \left[\frac{10}{10^2 + (10.6 - 2)^2} - \frac{10}{10^2 + (10.6 + 2)^2} \right]$$

$$\vec{E}_{bx} = -762 - j1080 \text{ V/m}$$

$$\vec{E}_{ky} = \frac{(\vec{Q}_{rk} + j\vec{Q}_{lk})}{2\pi\epsilon} \left[\frac{X_M - H_K}{X_M^2 + (H_K - H_M)^2} - \frac{X_M + H_K}{X_M^2 + (H_K + H_M)^2} \right]$$

$$\vec{E}_{ay} = \frac{(-2.25 * 10^{-6} + j3.19 * 10^{-6})}{2\pi(8.85 * 10^{-12})} \left[\frac{30 - 10.6}{30^2 + (10.6 - 2)^2} - \frac{30 + 10.6}{30^2 + (10.6 + 2)^2} \right]$$

$$\vec{E}_{ay} = 838 - j1189 \text{ V/m}$$

$$\vec{E}_{by} = \frac{(-4.18 * 10^{-6} + j0)}{2\pi(8.85 * 10^{-12})} \left[\frac{20 - 10.6}{20^2 + (10.6 - 2)^2} - \frac{20 + 10.6}{20^2 + (10.6 + 2)^2} \right]$$

$$E_x = -381 - j939 \text{ V/m}$$

$$E_y = -1750 - j4438 \text{ V/m}$$

$$E_{rms} = \sqrt{(-381 - 939)^2 + (1750 + 4438)^2} = 4877 \text{ V/m}$$

Anexo 4. Guía EPRI para el cálculo de campos magnéticos

Los cálculos de campo magnético requieren los siguientes parámetros de entrada:

- La posición de cada fase (x_k, y_k) . Aquí, y_k es la altura de la fase sobre el suelo asumiendo un terreno nivelado. Si una fase consiste en un conductor agrupado, esta posición generalmente se considera el centroide del paquete. Para los cálculos del derecho de paso, el valor de y_k debe tener en cuenta la caída del cable, ya que la altura mínima producirá los peores resultados cerca del suelo.
- La corriente RMS que pasa a través de cada fase, I , junto con su ángulo de fase ϕ .

Paso 1: Descomponga las Corrientes en Componentes real y reactivo

Para los cálculos de campo magnético, la corriente RMS para cada fase debe descomponerse en sus partes reales y reactivas (imaginarias) en función de su ángulo de fase. Esto se hace usando la ecuación:

$$I_p = I(\cos \phi + j \sin \phi)$$

donde

I = la corriente RMS en la fase

ϕ = el ángulo de fase

Para sistemas de 3 fases con fases A, B y C, las fases deben estar separadas por 120 grados. En un sistema A B C, un conjunto de ángulos de fase sería de 0, 120 y 240 grados. Si las corrientes, por ejemplo, de dos circuitos diferentes, viajan en direcciones opuestas, se debe aplicar una corriente negativa para uno de los circuitos.

Paso 2: Calcule el Vector de Campo Magnético para cada Fase

Se asume que cada fase consiste en un elemento lineal infinito, como simularía el caso de una línea larga y recta. Esto no es, por supuesto, siempre el caso. Por ejemplo, las regiones cercanas a los ángulos de línea o donde se cruzan las líneas

de transmisión no están adecuadamente representadas por esta suposición y requieren cálculos 3D más complejos. Para este simple caso 2D, el vector de campo magnético es:

$$B = \frac{\mu_0 I_p}{2\pi r^2} [-(y - y_k)\hat{i} + (x - x_k)\hat{j}]$$

Donde

x, y = las coordenadas x e y del punto donde se va a calcular el campo

x_k, y_k = las coordenadas x e y de la posición de fase

r^2 = la distancia entre la fase y el punto

μ_0 = la constante de permeabilidad del campo magnético del espacio entre los puntos.

Paso 3: Calcule el Campo Magnético Resultante

Sumar los vectores calculados durante el Paso 2 juntos para adquirir el vector de campo magnético total. A partir de este vector, la magnitud del campo magnético se puede calcular de la siguiente manera:

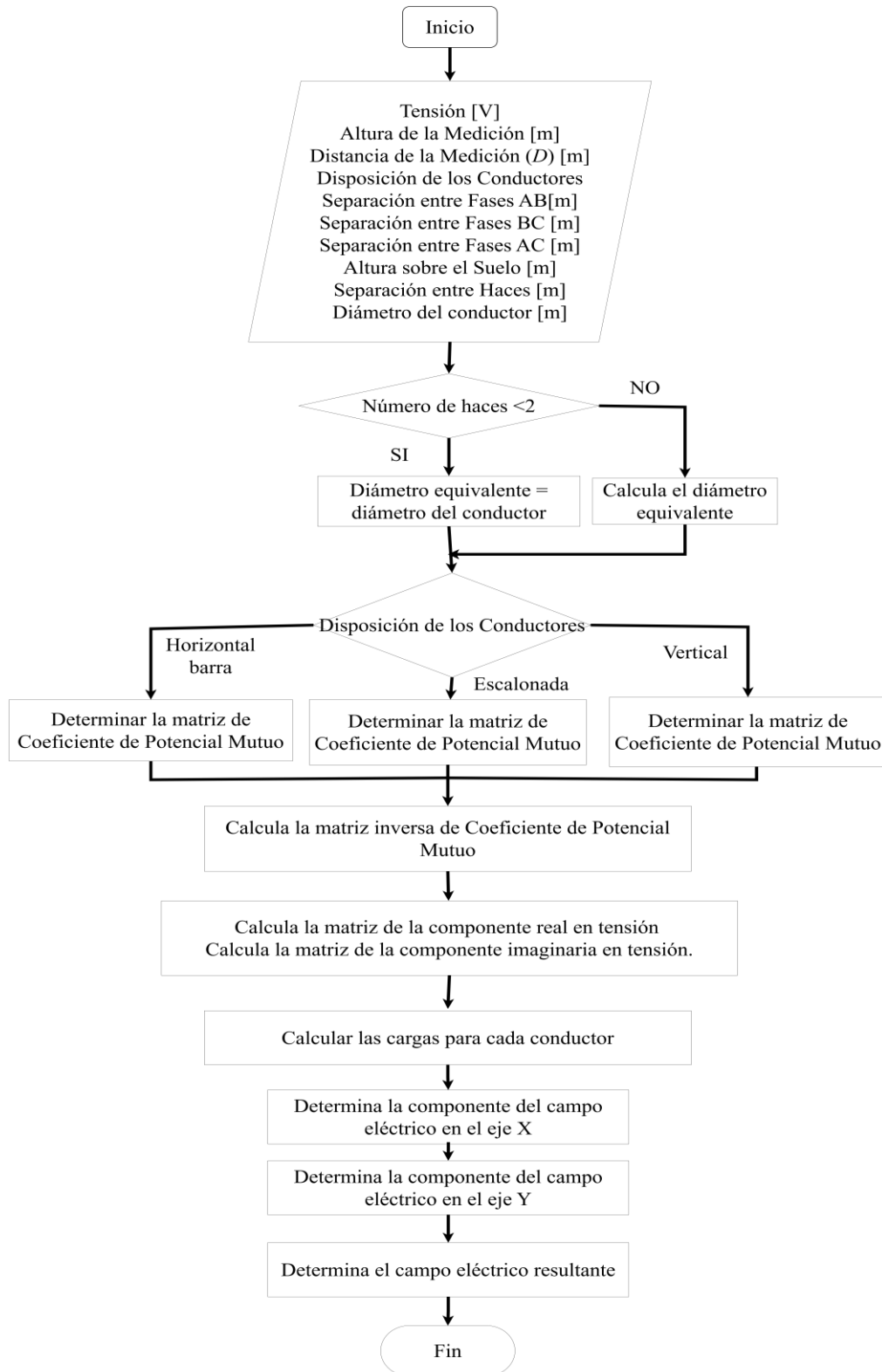
$$B_r = \sqrt{B_{x_r}^2 + B_{x_i}^2 + B_{y_r}^2 + B_{y_i}^2}$$

donde

$B_{x_r}^2, B_{x_i}^2$ = los componentes reales y reactivos del campo magnético en la dirección x

$B_{y_r}^2, B_{y_i}^2$ = los componentes reales y reactivos del campo magnético en la dirección y

Anexo 4. Diagrama de flujo del algoritmo para el cálculo de campos eléctricos.



Anexo 5. Código de Matlab para el cálculo del campo eléctrico.

A continuación, se presenta el código utilizado en Matlab para calcular los campos eléctricos.

```
% clear

% close all

% clc

%% Sección 1: Datos iniciales y representación gráfica de la distribución de las
fases

s = 0.45; % Separación entre sub-conductores (m)

n = 3; % Número de sub-conductores en el haz

d = 0.4; % Diámetro de cada sub-conductor (m)

H = 33; % Altura de los conductores sobre el suelo (m)

% [H] = coordenadas(H);

epsilon = 8.854e-12; % Permisividad del vacío (F/m)

% Coordenadas de las fases

x_a = -9; % Fase A (10 metros a la izquierda)

x_b = 0; % Fase B (en el centro)

x_c = 9; % Fase C (10 metros a la derecha)

y_a = H; % Altura de las fases sobre el suelo

y_b = H;

y_c = H;

%% % Generar gráfico

% figure;

% hold on;
```

```

% plot([x_a, x_b, x_c], [y_a, y_b, y_c], 'ro', 'MarkerSize', 10, 'LineWidth', 2); %
Fases a, b, c

%

% % Dibujar los sub-conductores del haz para cada fase

% for i = 1:n

%   % Fase A

%   plot(x_a, y_a + (i-2)*s, 'ks', 'MarkerSize', 6, 'MarkerFaceColor', 'k'); % Sub-
conductores

%   % Fase B

%   plot(x_b, y_b + (i-2)*s, 'ks', 'MarkerSize', 6, 'MarkerFaceColor', 'k');

%   % Fase C

%   plot(x_c, y_c + (i-2)*s, 'ks', 'MarkerSize', 6, 'MarkerFaceColor', 'k');

% end

%

% % Etiquetas para las fases

% text(x_a, y_a + 0.5, 'Fase A', 'HorizontalAlignment', 'center');

% text(x_b, y_b + 0.5, 'Fase B', 'HorizontalAlignment', 'center');

% text(x_c, y_c + 0.5, 'Fase C', 'HorizontalAlignment', 'center');

%

% % Mostrar las distancias horizontales

% text((x_a + x_b)/2, y_a + 1, '10 m', 'HorizontalAlignment', 'center'); %
Distancia entre A y B

% text((x_b + x_c)/2, y_b + 1, '10 m', 'HorizontalAlignment', 'center'); %
Distancia entre B y C

%

% % Mostrar la altura desde el suelo

```

```

% text(x_b + 1, y_b/2, sprintf('Altura = %.1f m', H), 'HorizontalAlignment',
'center');

%

% % Información adicional del haz en el gráfico

% text(x_a - 1.5, y_a - 1.5, sprintf('Nº Haces: %d', n), 'HorizontalAlignment',
'center');

% text(x_a - 1.5, y_a - 2.5, sprintf('Sep: %.2f m', s), 'HorizontalAlignment',
'center');

% text(x_a - 1.5, y_a - 3.5, sprintf('Diam: %.2f m', d), 'HorizontalAlignment',
'center');

%

% % Configuración del gráfico

% xlabel('Distancia horizontal (m)');

% ylabel('Altura sobre el suelo (m)');

% title('Distribución de las fases en configuración plana');

% grid on;

% % xlim([-15 15]);

% % ylim([0 12]);

% hold off;

%% Sección 2: Cálculo del diámetro del haz (d_b) y diámetro equivalente (d_eq)

d_b = s / sin(pi/n); % Diámetro del haz

d_eq = d_b * nthroot(n * (d / d_b), n); % Diámetro equivalente

fprintf('El diámetro del haz (d_b) es: %.4f m\n', d_b);

fprintf('El diámetro equivalente del haz (d_eq) es: %.4f m\n', d_eq);

%% Sección 3: Cálculo de los coeficientes de potencial

```

```

P_kk = (1 / (2 * pi * epsilon)) * log(4 * H / d_eq); % Coeficiente de potencial
propio

S_ab = 9; % Distancia entre fases A y B

S_ac = 18; % Distancia entre fases A y C

S_ab_prime = sqrt(S_ab^2 + (2 * H)^2); % Distancia a la imagen de fase B

S_ac_prime = sqrt(S_ac^2 + (2 * H)^2); % Distancia a la imagen de fase C

P_ab = (1 / (2 * pi * epsilon)) * log(S_ab_prime / S_ab); % Coeficiente mutuo A-
B

P_ac = (1 / (2 * pi * epsilon)) * log(S_ac_prime / S_ac); % Coeficiente mutuo A-
C

P_bc = P_ab; % Simetría entre B y C

fprintf('El coeficiente de potencial propio (P_kk) es: %.4e m/F\n', P_kk);
fprintf('El coeficiente de potencial mutuo P_ab es: %.4e m/F\n', P_ab);
fprintf('El coeficiente de potencial mutuo P_ac es: %.4e m/F\n', P_ac);

%% Sección 4: Construcción de la matriz de potencial P

P = [
    P_kk, P_ab, P_ac;
    P_ab, P_kk, P_bc;
    P_ac, P_bc, P_kk
];

disp('Matriz de Potencial P (en m/F):');

disp(P);

%% Sección 5: Calcular la matriz inversa de P (C_inv)

C_inv = inv(P); % Cálculo de la matriz inversa de P

disp('Matriz inversa C_inv (en F/m):');

disp(C_inv);

```

```

%% Sección 6: Cálculo de los voltajes trifásicos (partes reales e imaginarias)
V_LL = 500000; % Voltaje entre fases en kV
V_m = V_LL / sqrt(3); % Voltaje a tierra en kV
f = 60; % Frecuencia en Hz
omega = 2 * pi * f; % Frecuencia angular
% Ángulos de fase con fase B como referencia
theta_a = 120; % Ángulo de fase para fase A
theta_b = 0; % Ángulo de fase para fase B (referencia)
theta_c = -120; % Ángulo de fase para fase C
% Cálculo de las partes reales e imaginarias de los voltajes trifásicos
V_a_real = V_m * cosd(theta_a); % Parte real fase A
V_a_imag = V_m * sind(theta_a); % Parte imaginaria fase A
V_b_real = V_m * cosd(theta_b); % Parte real fase B (referencia)
V_b_imag = V_m * sind(theta_b); % Parte imaginaria fase B
V_c_real = V_m * cosd(theta_c); % Parte real fase C
V_c_imag = V_m * sind(theta_c); % Parte imaginaria fase C
% Vector de voltajes reales
V_r = [V_a_real; V_b_real; V_c_real]; % kV
% Vector de voltajes imaginarios
V_i = [V_a_imag; V_b_imag; V_c_imag]; % kV
% Mostrar los resultados de las fases
fprintf('Fase A: V_real = %.2f kV, V_imag = %.2f kV\n', V_a_real/1000,
V_a_imag/1000);
fprintf('Fase B: V_real = %.2f kV, V_imag = %.2f kV\n', V_b_real/1000,
V_b_imag/1000);

```

```

fprintf('Fase C: V_real = %.2f kV, V_imag = %.2f kV\n', V_c_real/1000,
V_c_imag/1000);

%% Sección 7: Cálculo de las cargas reales e imaginarias
% Cálculo de las cargas reales  $[Q_r] = [P]^{-1} * [V_r]$ 
Q_r = C_inv * V_r;
% Cálculo de las cargas imaginarias  $[Q_i] = [P]^{-1} * [V_i]$ 
Q_i = C_inv * V_i;
% Mostrar los resultados de las cargas
disp('Cargas reales Q_r (en C/m):');
disp(Q_r);
disp('Cargas imaginarias Q_i (en C/m):');
disp(Q_i);

%% Sección 8: Cálculo de los componentes del campo eléctrico en el punto M
% Solicitar al usuario la posición del punto de medición en el eje horizontal
fprintf('Definir la posición del punto de medición en el eje X (en metros).\n');
fprintf('Nota: El valor positivo indica que el punto de medición está a la derecha
del centro de la línea,\n');
fprintf('y un valor negativo indica que está a la izquierda del centro de la línea.\n');
% posicion_medicion = input('Ingrese la posición del punto de medición (por
defecto 20 m a la derecha del centro): ');
% posicion_medicion = 3.34;
posicion_medicion = dist_1;
if isempty(posicion_medicion)
% Si el usuario no ingresa un valor, se asume 20 m a la derecha
posicion_medicion = 20;
end

```

```

% Distancia de cada conductor respecto al centro de la línea (A está a -10 m, B en
0 m, C en +10 m)

distancia_conductores = [-9, 0, 9]; % Posiciones relativas de los conductores
respecto al centro

% Calcular las distancias reales desde el punto de medición a cada conductor
X_M = abs(posicion_medicion - distancia_conductores); % Las distancias
dependerán del punto de medición

H_M = 1;

% Inicializar los campos
E_x = 0; % Componente horizontal total
E_y = 0; % Componente vertical total

% Para cada conductor k (fases a, b, c)
for k = 1:3

% Cargas reales e imaginarias (Q_r y Q_i ya calculados)
Q_k = Q_r(k) + 1i * Q_i(k); % Carga total en el conductor k (como número
complejo)

% Altura del conductor k (la misma para todos)
H_k = H; % 10.6 m

%% Cálculo del componente horizontal E_kx usando la ecuación 7.3-6
E_kx = (Q_k / (2 * pi * epsilon)) * ( ...
    (X_M(k) / (X_M(k)^2 + (H_k - H_M)^2)) - ...
    (X_M(k) / (X_M(k)^2 + (H_k + H_M)^2)) );

%% Cálculo del componente vertical E_ky usando la ecuación 7.3-7
E_ky = (Q_k / (2 * pi * epsilon)) * ( ...
    ((H_M - H_k) / (X_M(k)^2 + (H_k - H_M)^2)) - ...
    ((H_M + H_k) / (X_M(k)^2 + (H_k + H_M)^2)) );

```

```

% Sumar los componentes horizontales y verticales

E_x = E_x + E_kx;

E_y = E_y + E_ky;

end

% Mostrar los resultados de los componentes del campo eléctrico (en formato
complejo)

fprintf('Componente horizontal del campo eléctrico (E_x): %.4e + j %.4e V/m\n',
real(E_x), imag(E_x));

fprintf('Componente vertical del campo eléctrico (E_y): %.4e + j %.4e V/m\n',
real(E_y), imag(E_y));

%% Sección 9: Cálculo del valor RMS del campo eléctrico

% Componentes reales e imaginarios de los campos horizontal y vertical

E_rx = real(E_x); % Parte real del campo eléctrico horizontal

E_ix = imag(E_x); % Parte imaginaria del campo eléctrico horizontal

E_ry = real(E_y); % Parte real del campo eléctrico vertical

E_iy = imag(E_y); % Parte imaginaria del campo eléctrico vertical

% Cálculo del valor RMS del campo eléctrico según la ecuación 7.3-10

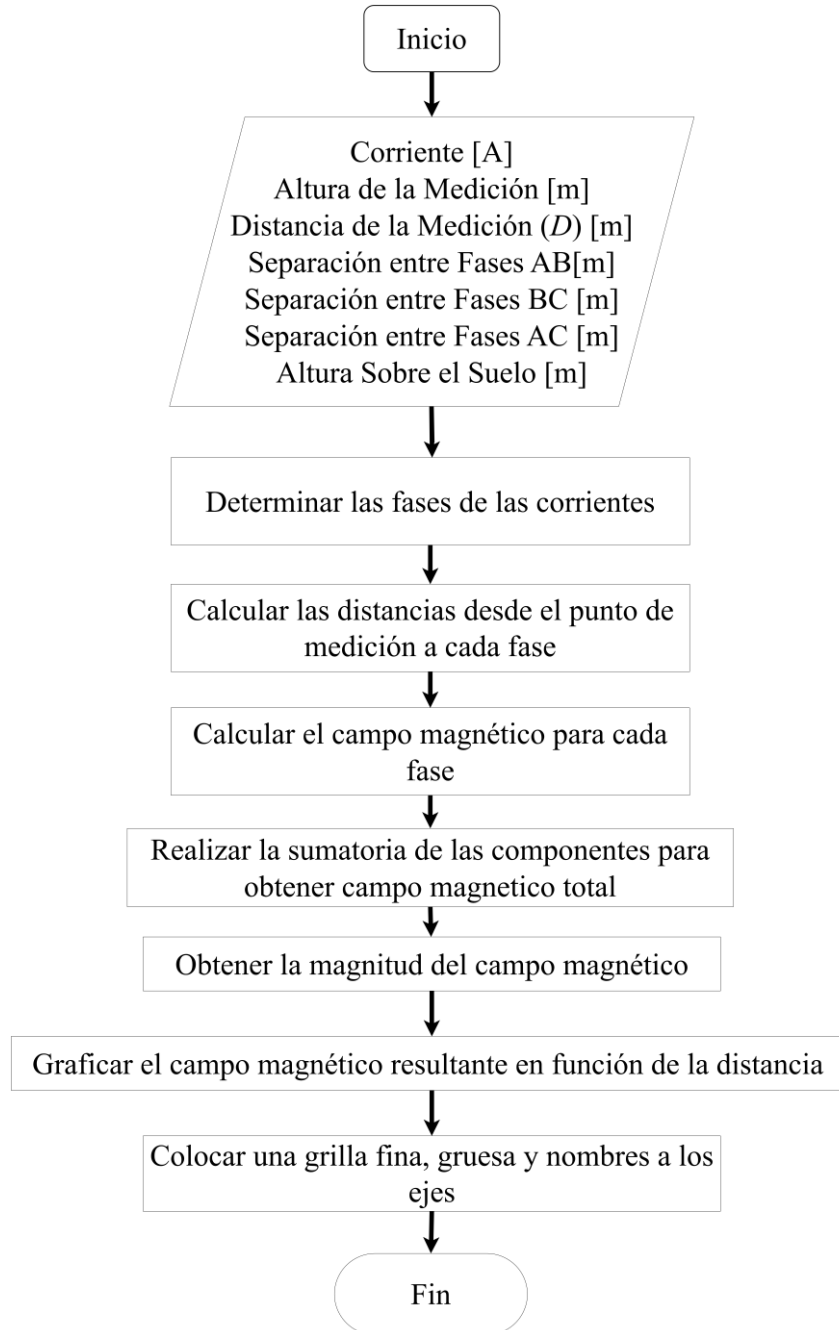
E_rms = sqrt(E_rx^2 + E_ix^2 + E_ry^2 + E_iy^2);

% Mostrar el resultado del campo eléctrico RMS

fprintf('El valor RMS del campo eléctrico E_rms es: %.4e V/m\n', E_rms);

```

Anexo 6. Diagrama de flujo del algoritmo para el cálculo de campos magnéticos.



Anexo 7. Código de Matlab para el cálculo del campo magnético.

```
%% Sección 10: Cálculo del campo magnético

% Parámetros

mu_0 = 4 * pi * 1e-7; % Permeabilidad del vacío (H/m)

I = 462; % Corriente RMS en cada fase (A)

x = dist_1; % Posición del punto de medición en el eje X

y = 1; % Altura del punto de medición sobre el suelo

H = 33;

y_a = H; % Altura de las fases sobre el suelo

y_b = H;

y_c = H;

% % Coordenadas de los conductores (en metros)

% x_a = -10; y_a = 10.6; % Fase A

% x_b = 0; y_b = 10.6; % Fase B

% x_c = 10; y_c = 10.6; % Fase C

% Fases de las corrientes

I_A = I * (cosd(0) + 1i * sind(0)); % Fase A: 0°

I_B = I * (cosd(120) + 1i * sind(120)); % Fase B: 120°

I_C = I * (cosd(240) + 1i * sind(240)); % Fase C: 240°

% Distancias desde el punto de medición a cada conductor

r_A = sqrt((x - x_a)^2 + (y - y_a)^2);

r_B = sqrt((x - x_b)^2 + (y - y_b)^2);
```

```
r_C = sqrt((x - x_c)^2 + (y - y_c)^2);
```

```
% Cálculo del campo magnético B para cada fase (en microteslas, μT)
```

```
B_Ax = (mu_0 * I_A / (2 * pi * r_A^2)) * -(y - y_a);
```

```
B_Ay = (mu_0 * I_A / (2 * pi * r_A^2)) * (x - x_a);
```

```
B_Bx = (mu_0 * I_B / (2 * pi * r_B^2)) * -(y - y_b);
```

```
B_By = (mu_0 * I_B / (2 * pi * r_B^2)) * (x - x_b);
```

```
B_Cx = (mu_0 * I_C / (2 * pi * r_C^2)) * -(y - y_c);
```

```
B_Cy = (mu_0 * I_C / (2 * pi * r_C^2)) * (x - x_c);
```

```
% Sumar las componentes para obtener el campo magnético total
```

```
B_x_total = B_Ax + B_Bx + B_Cx;
```

```
B_y_total = B_Ay + B_By + B_Cy;
```

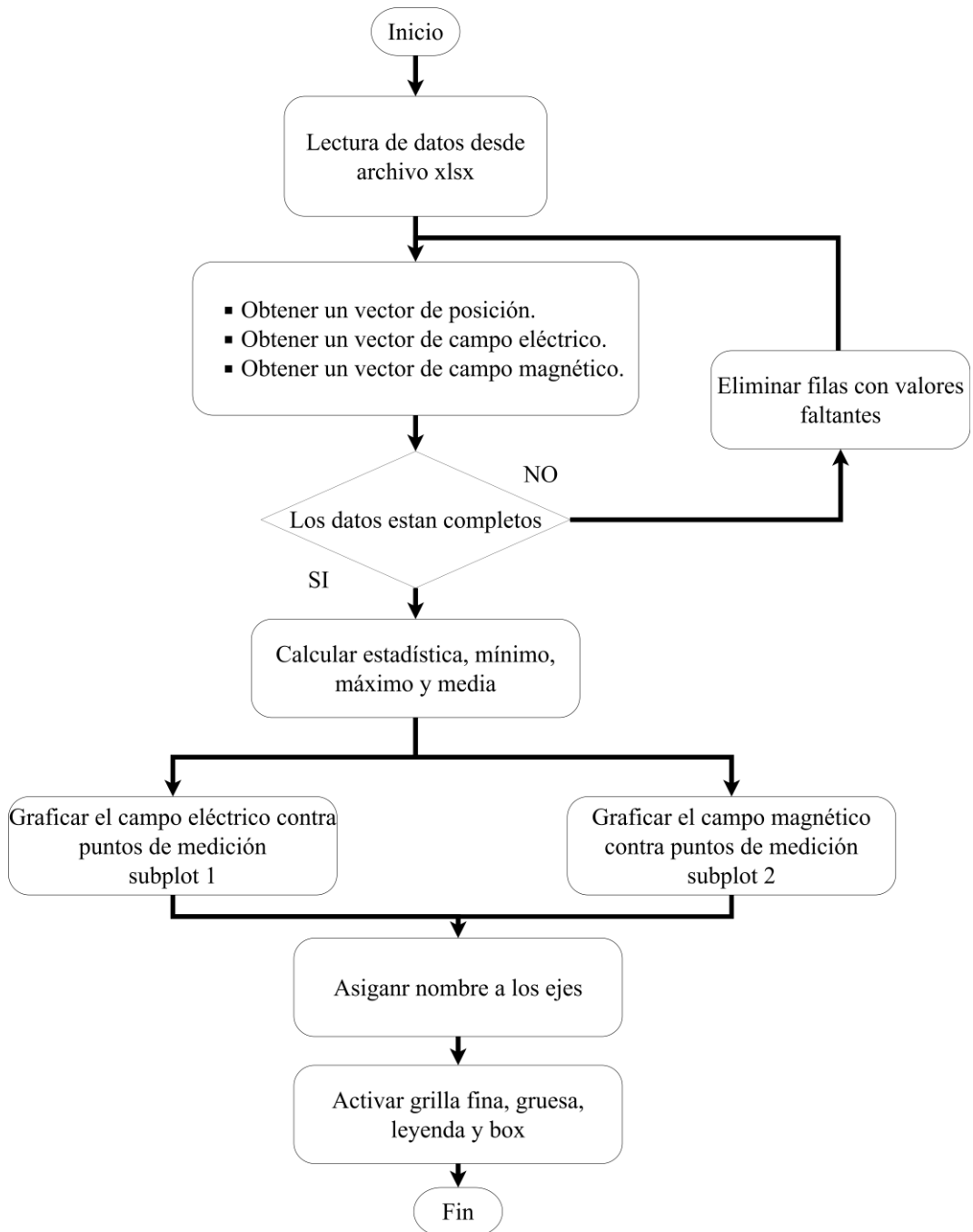
```
% Magnitud del campo magnético resultante
```

```
B_total = sqrt(real(B_x_total)^2 + imag(B_x_total)^2 + real(B_y_total)^2 +  
imag(B_y_total)^2);
```

```
% Mostrar los resultados
```

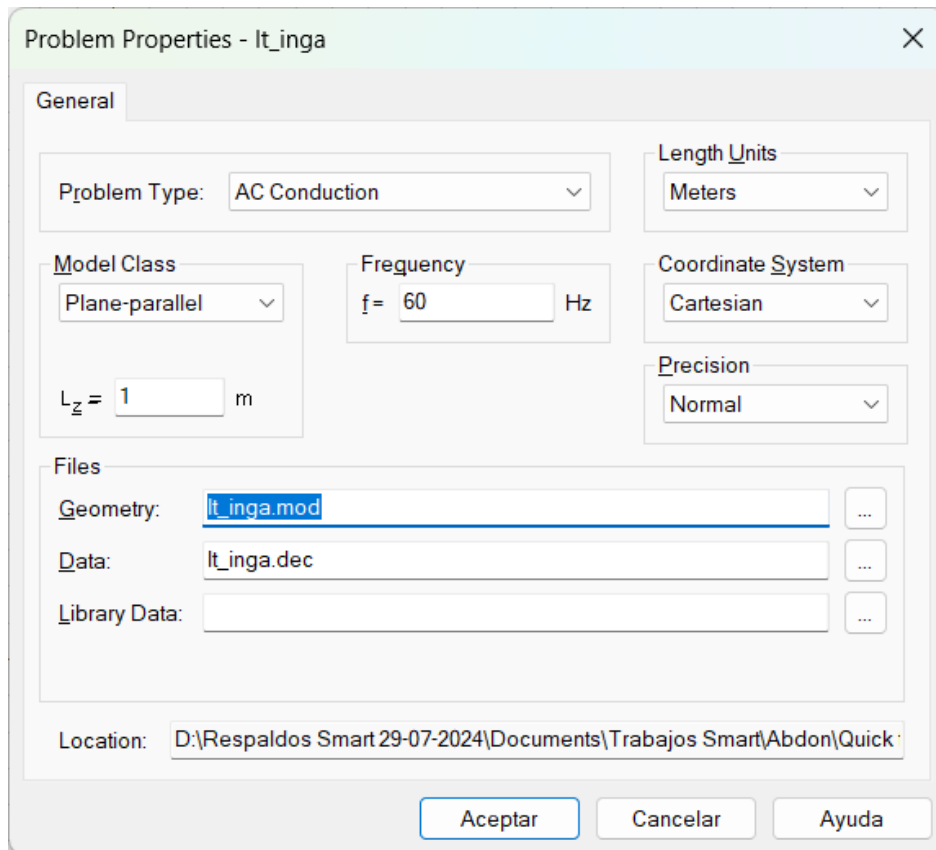
```
fprintf('Campo magnético total (B_r): %.4f μT\n', B_total * 1e6); % Convertir a  
microteslas
```

Anexo 8. Diagrama de flujo del algoritmo de la herramienta graficadora.

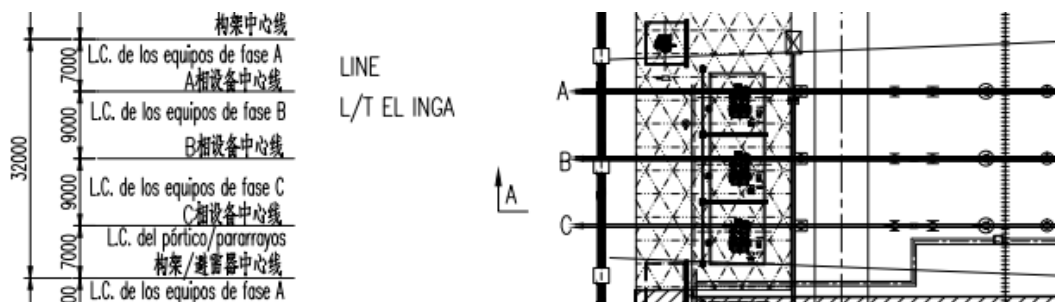


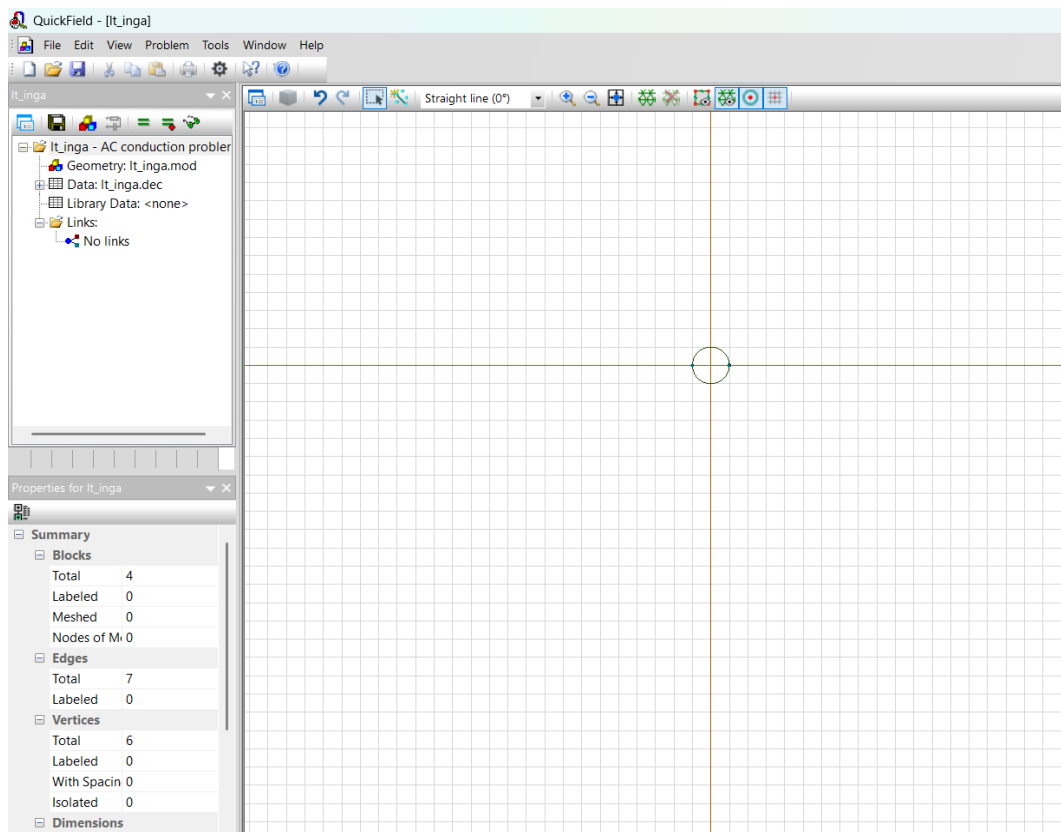
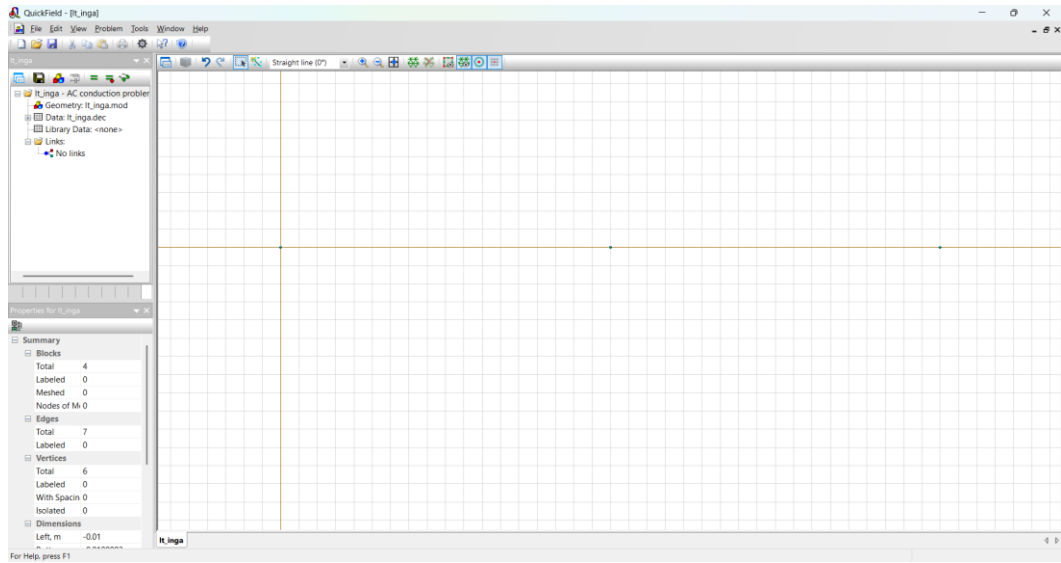
Anexo 9. Modelo de bahía de L/T El Inga, configuración planta Quick Field.

Paso 1: Se crea un nuevo problema con el nombre “ It_inga”, luego se escoge el problema de tipo AC Conduction y se parametriza una frecuencia de 60 Hz.

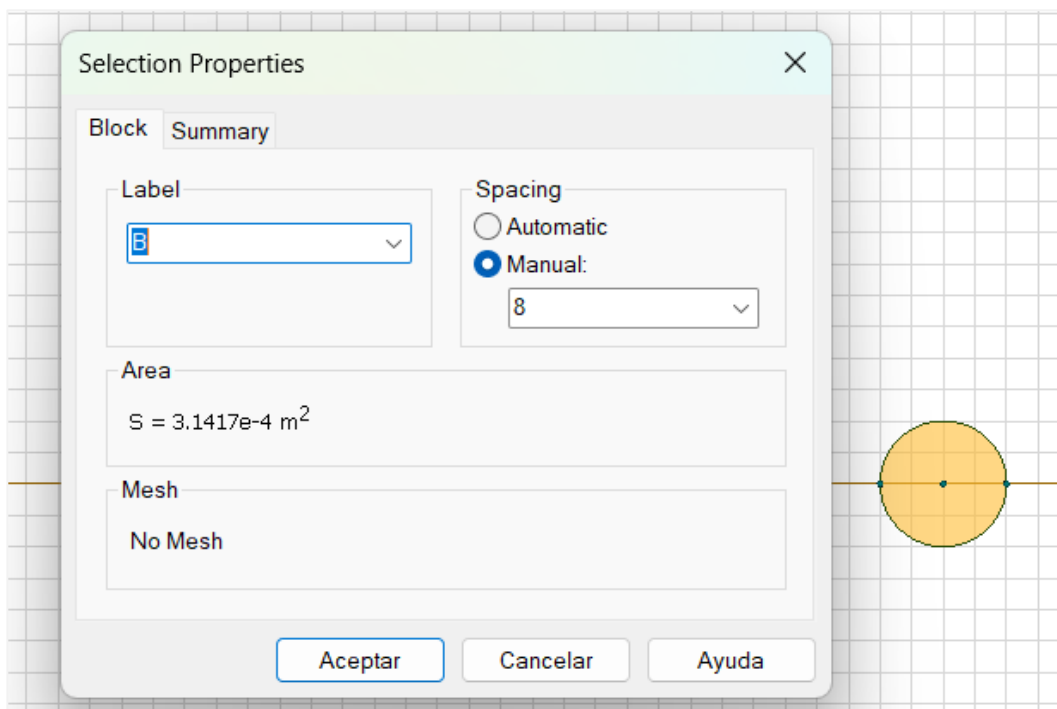
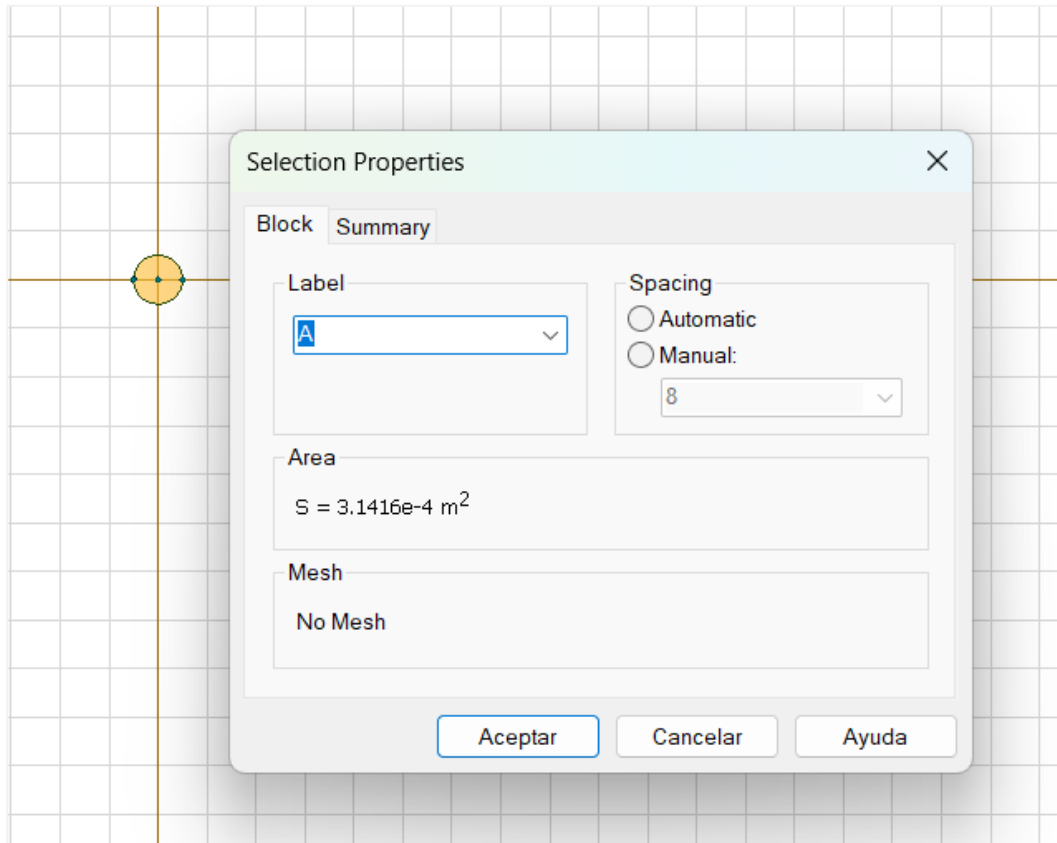


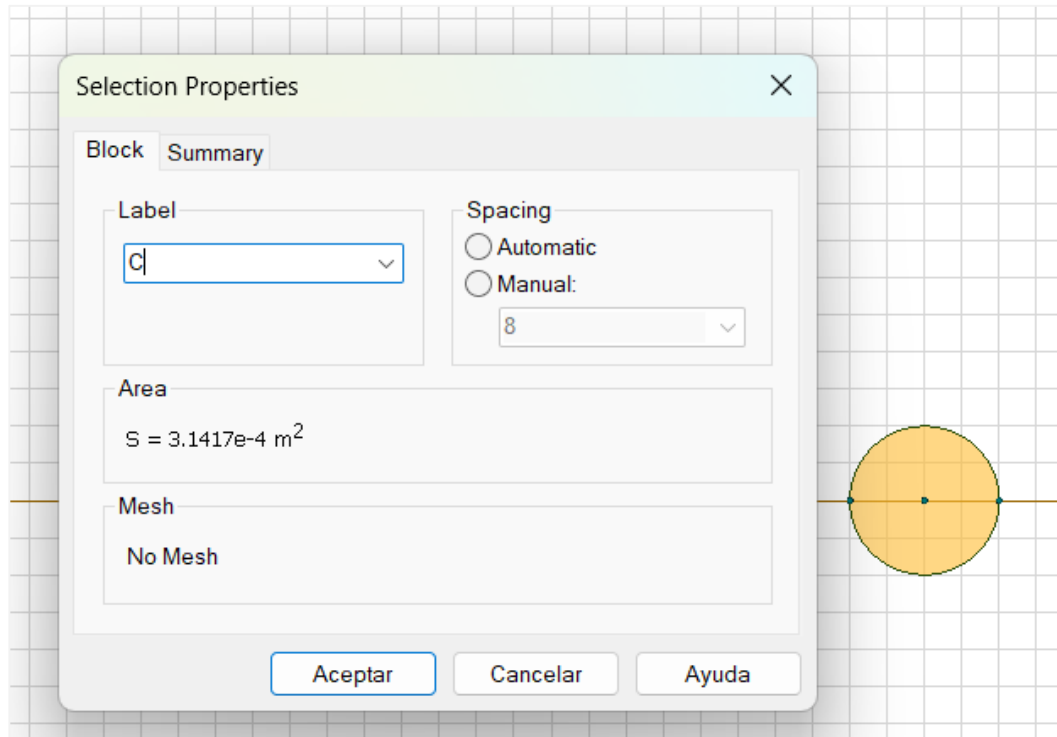
Paso 2: Se dibuja la geometría de la bahía de entrada de la L/T El Inga, para lo cual, es necesario obtener las medidas de espaciamiento entre fases. Esto se obtiene de los planos de la subestación, específicamente del patio de 500 kV.



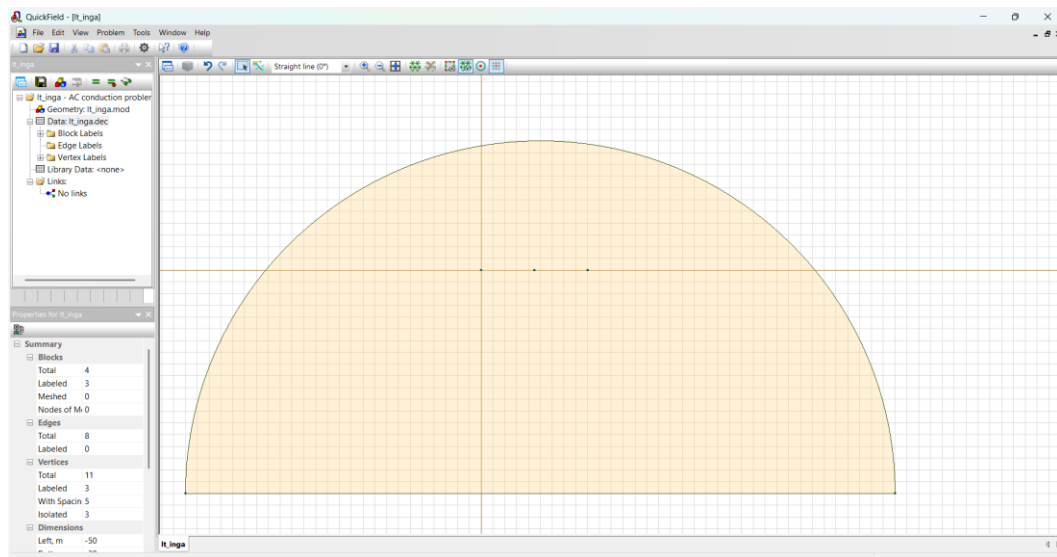


Paso 3: En cada uno de los puntos, que representan las fases se debe asignar nombres, en este caso se usa A, B y C.

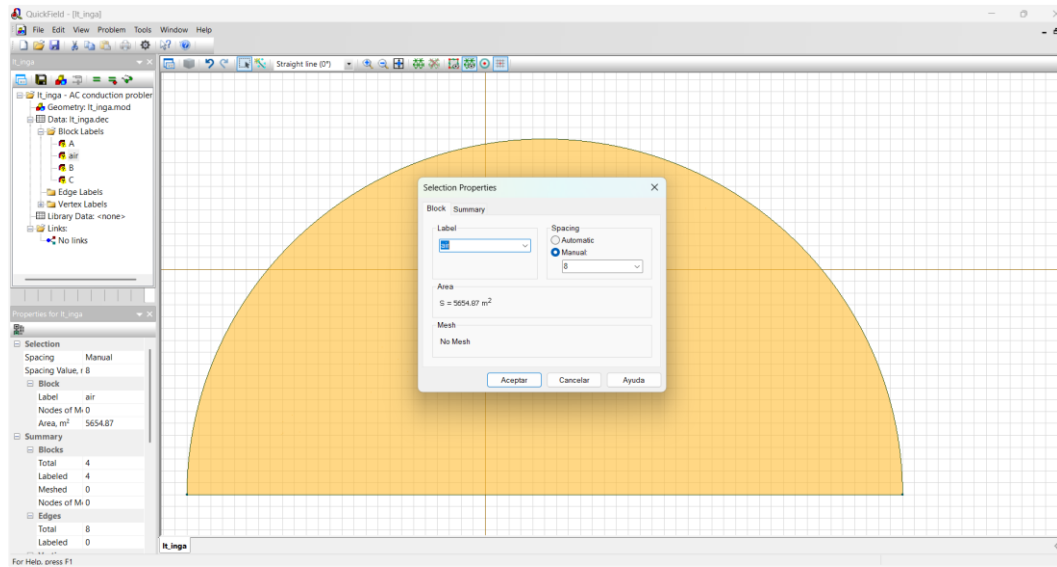




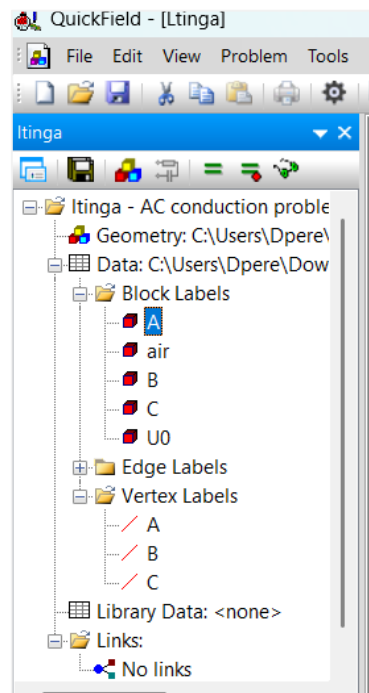
Luego se debe crear el medio circundante en donde se propagarán los campos electromagnéticos. En este caso es el aire.



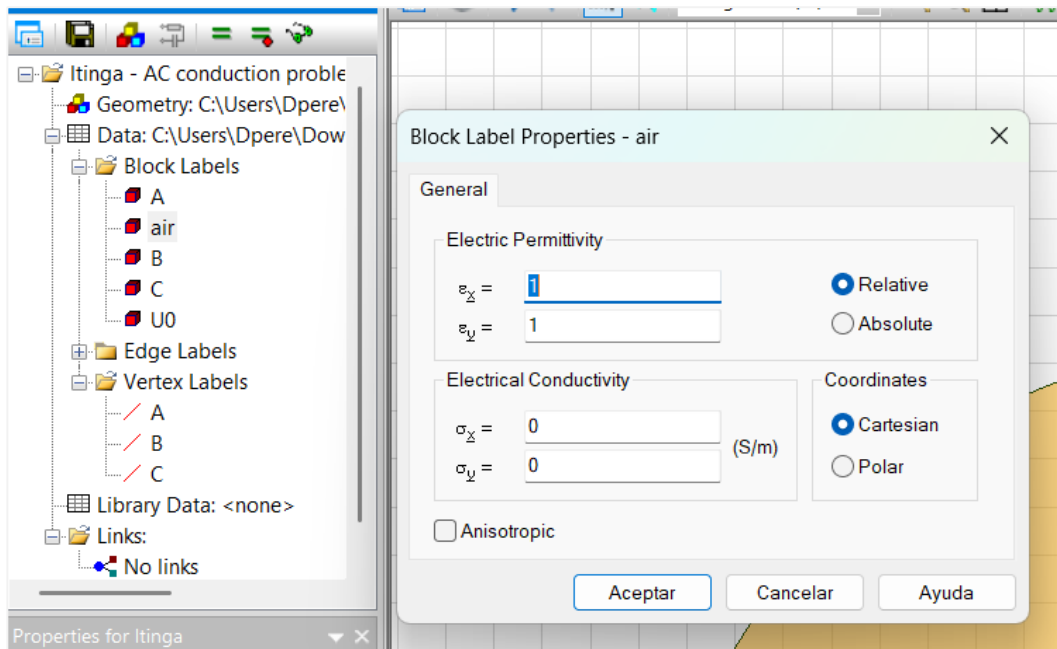
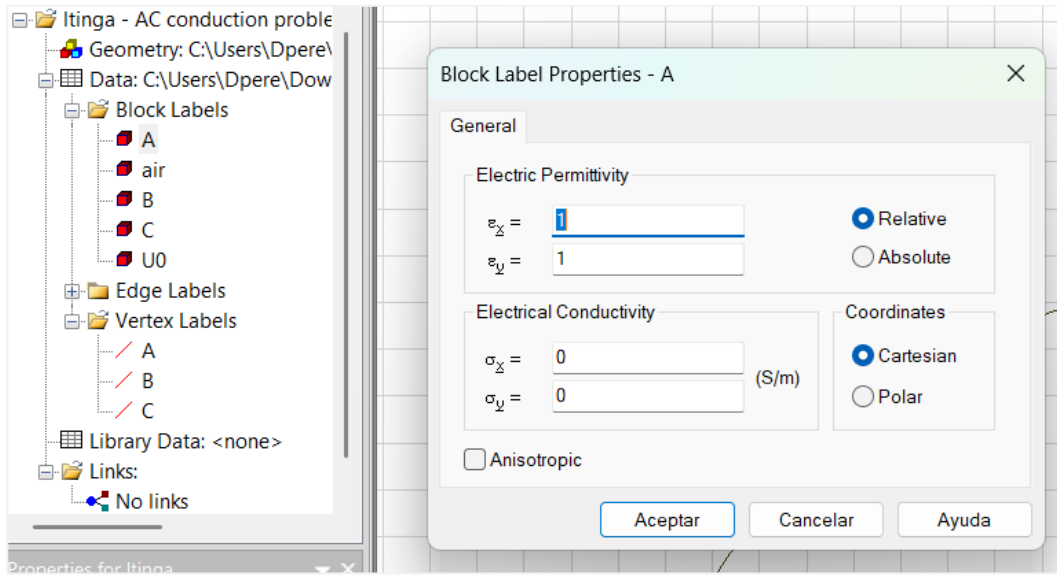
Asimismo, se debe asignar un nombre al medio circundante, que en este caso es air.

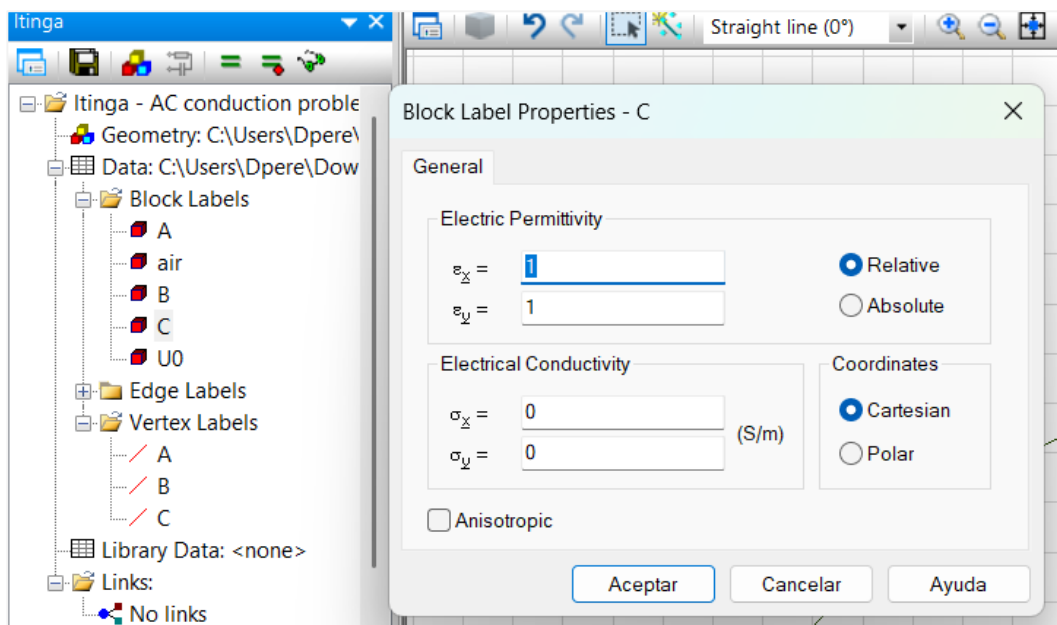
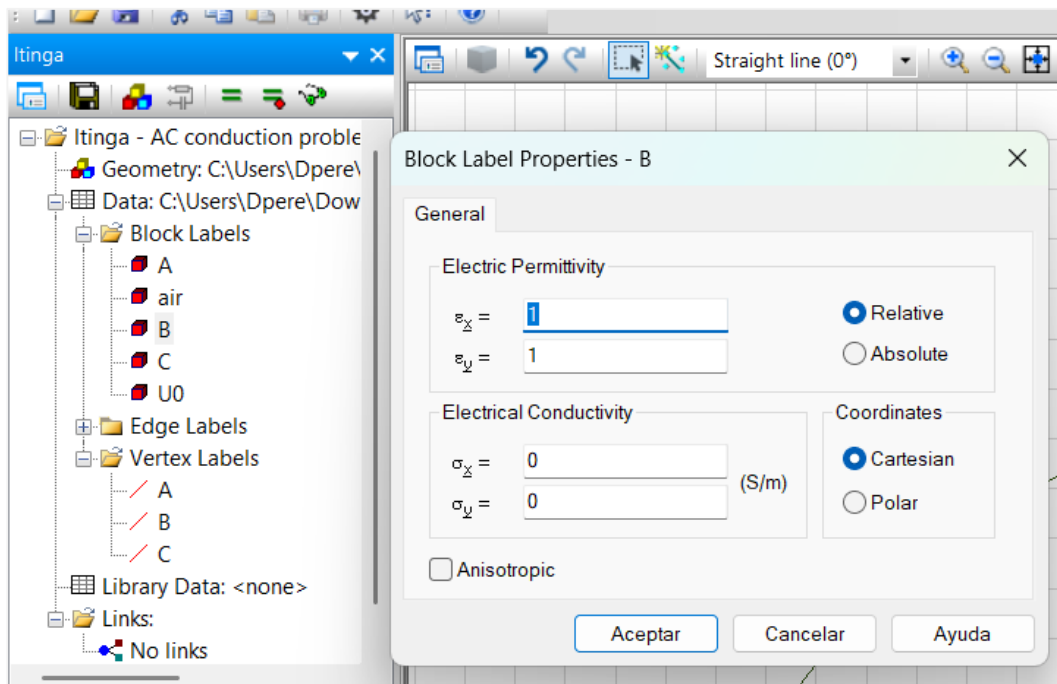


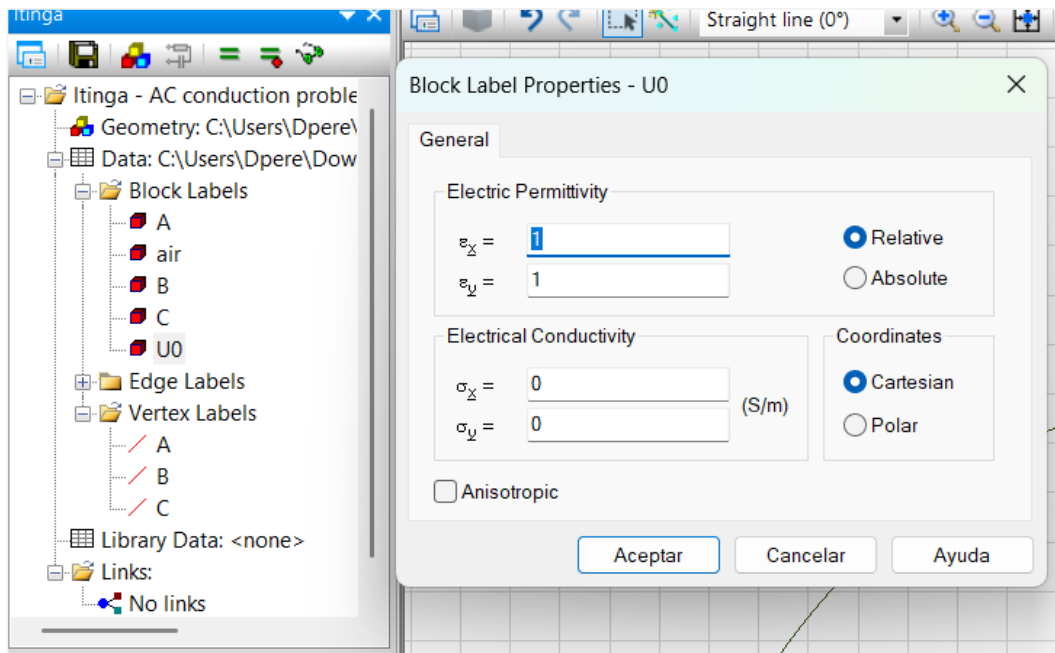
Paso 4: Una vez definidos los nombres se procede a parametrizar las condiciones de borde. Para lo cual, en el área de problemas se observa lo siguiente:



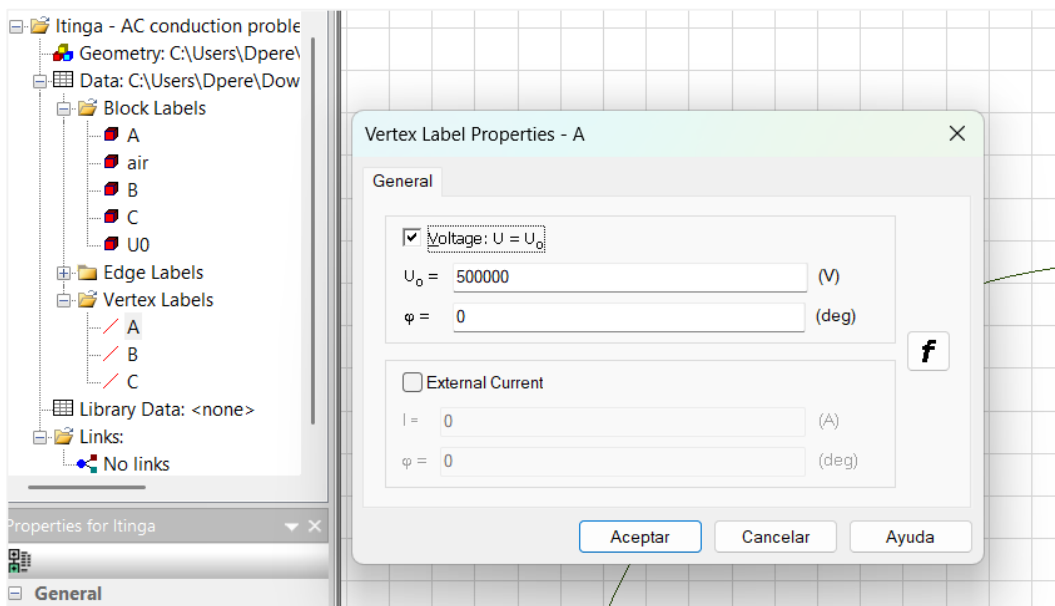
En cada una de las fases (A, B, C), el medio circundante (air) y el medio de referencia, que se refiere a la base del medio circundante (U0), se parametrizan conforme a la permitividad eléctrica.

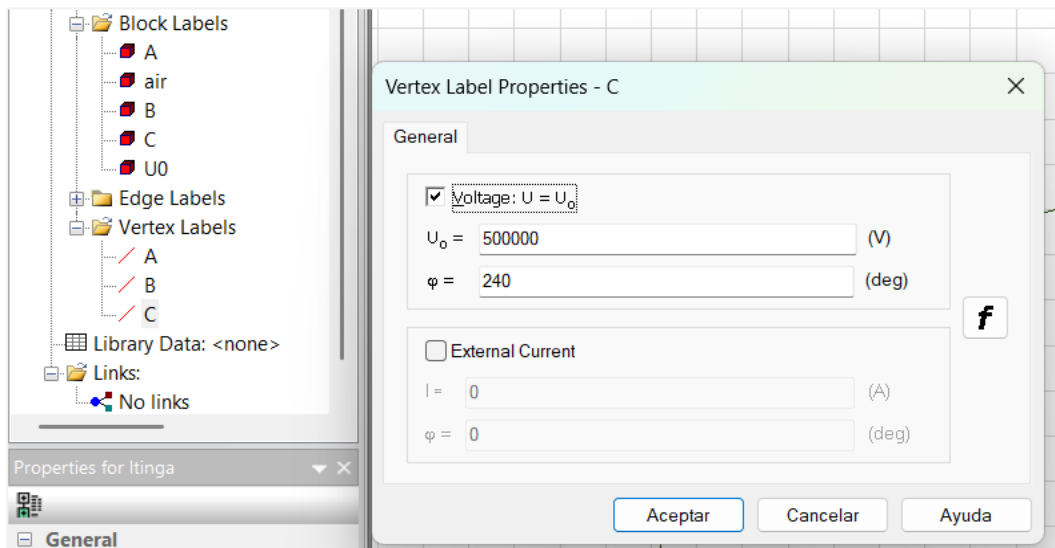
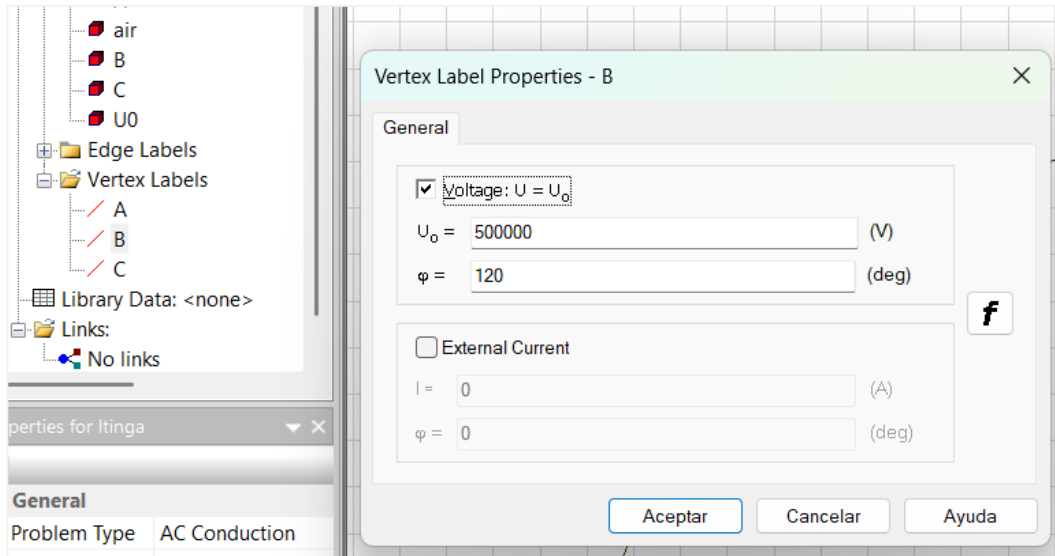




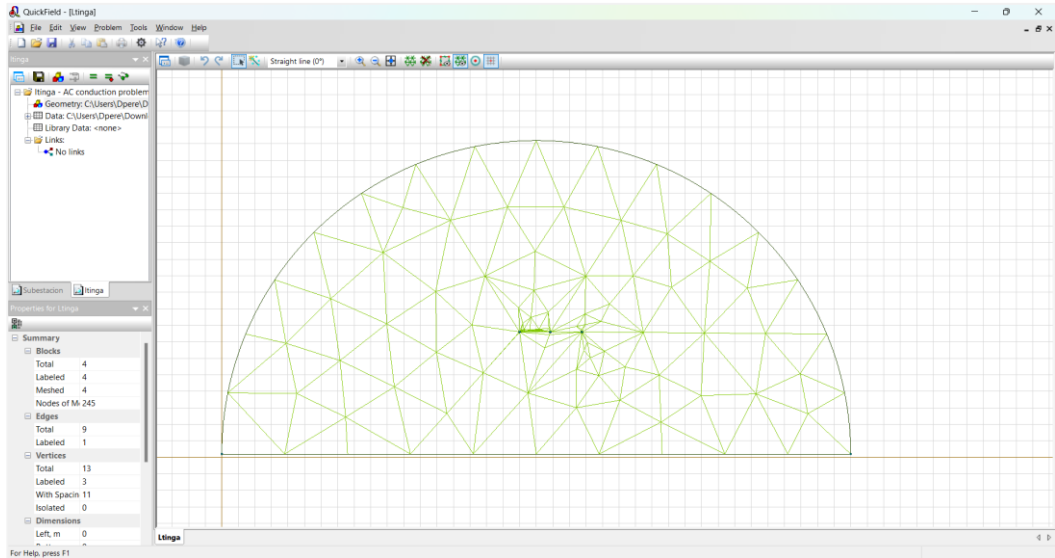


Por otro lado, se debe parametriza el nivel de tensión en cada uno de los vértices. En este caso son 3 (A, B, C).





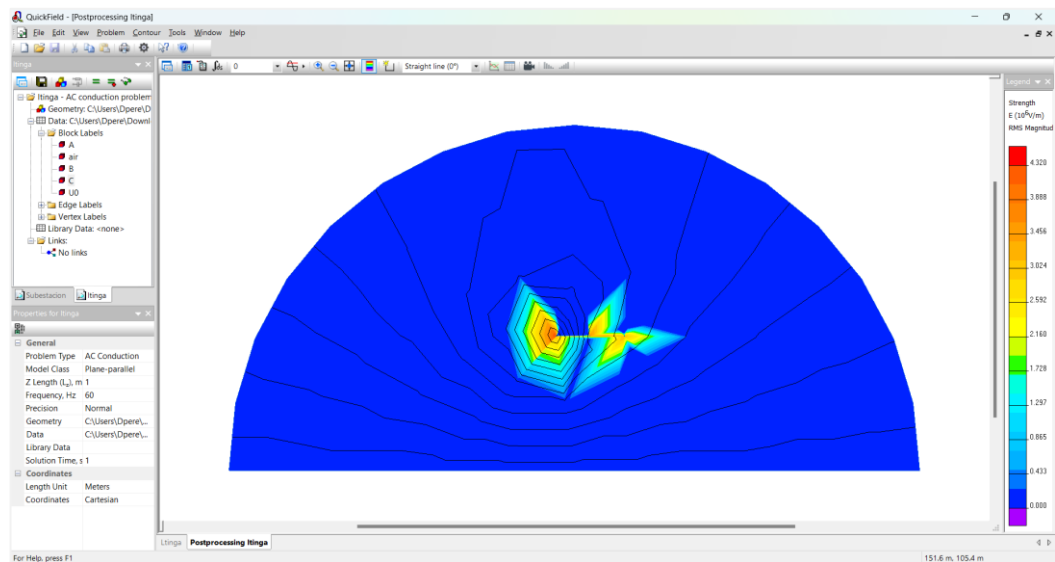
Paso 5: Se debe generar una malla en cada una de las fases y en el medio circundante. Aquí es importante ajustar el tamaño de la malla en cada elemento, puesto que la sumatoria no puede exceder los 255 nodos.



Nota: Fíjese que el espaciamiento es de 8, dando 205 nodos para el espacio circundante que es el aire. Además, la malla de las fases A, B y C serán con un espaciamiento de 100 puesto que están rodeados por aire.

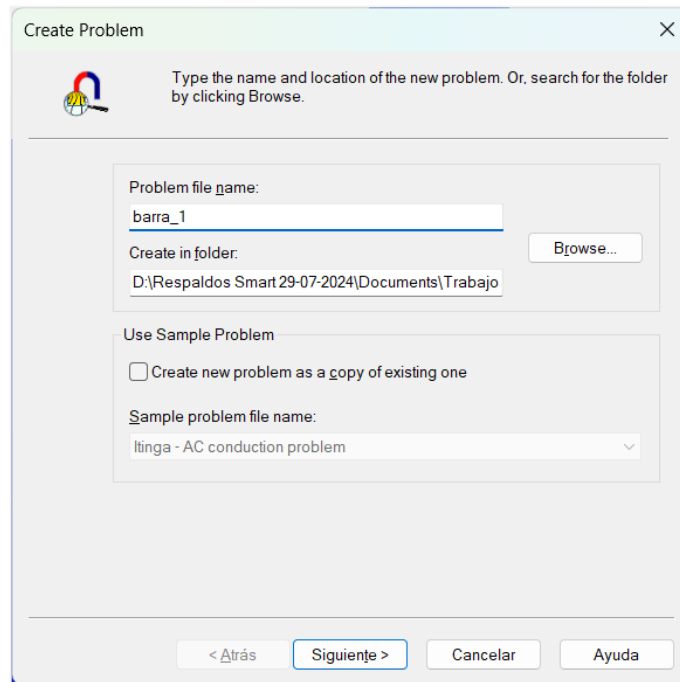
Paso 6: Una vez parametrizado y mallado todo, se procede a la resolución, para lo cual se da un clic en botón solve.

Paso 7: Analiza la distribución de campos eléctricos obtenidos para la bahía de entrada de la L/T El inga del patio de 500 kV.

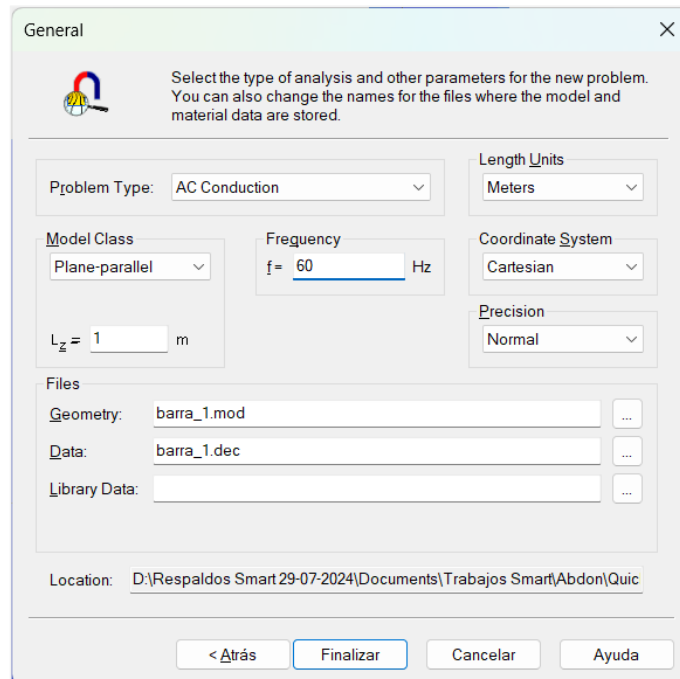


Anexo 10. Modelo de barra en Quick Field.

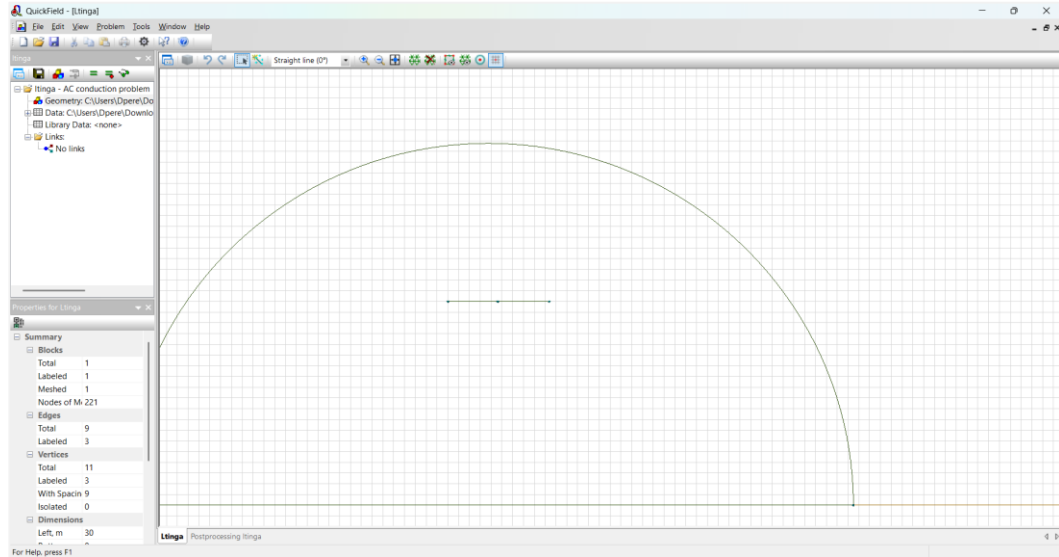
Paso 1: Se abre un nuevo problema con el nombre barra_1



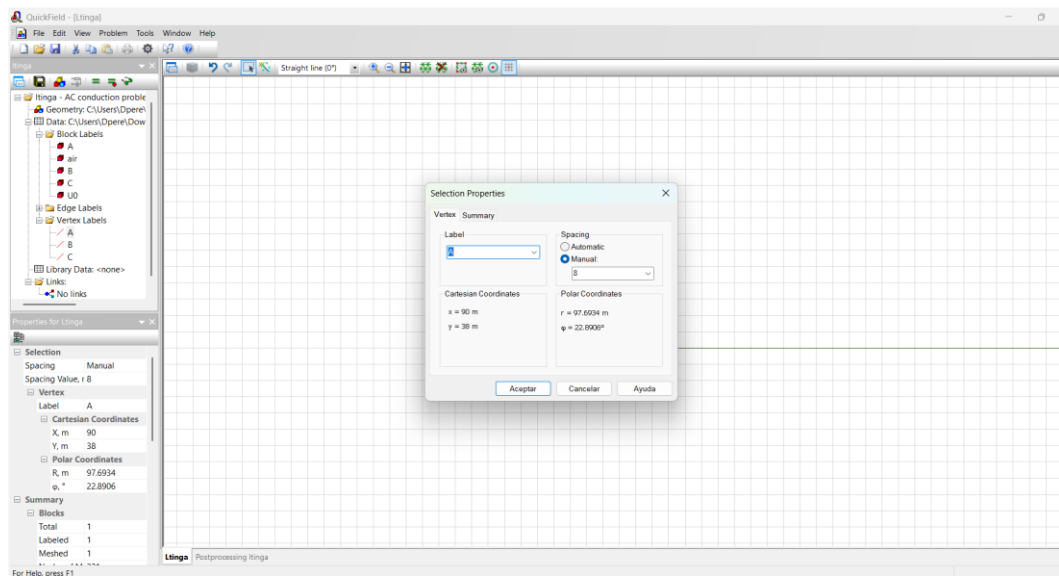
Luego se escoge el problema de tipo AC Conduction y se parametriza una frecuencia de 60 Hz.

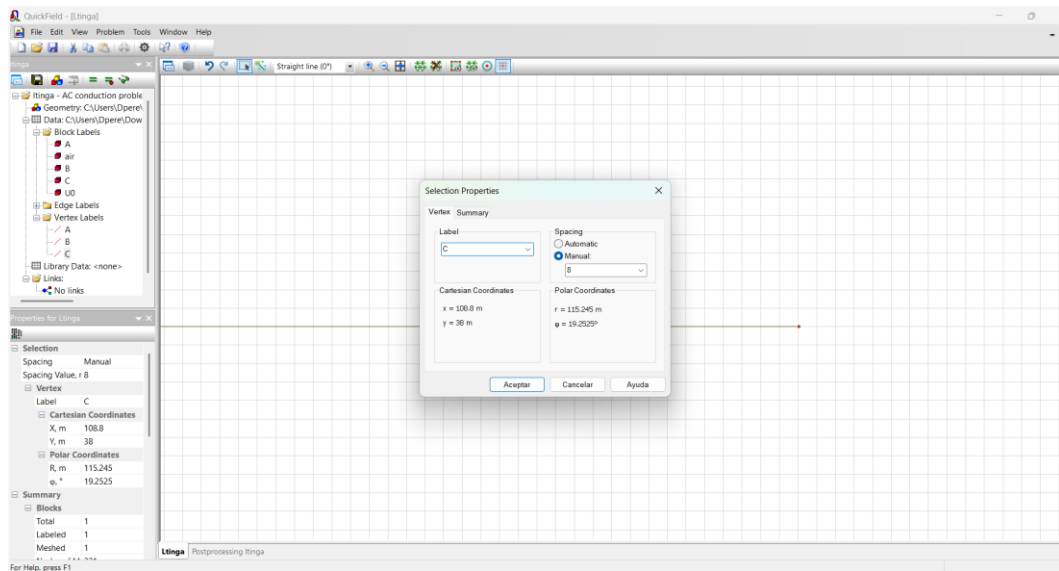
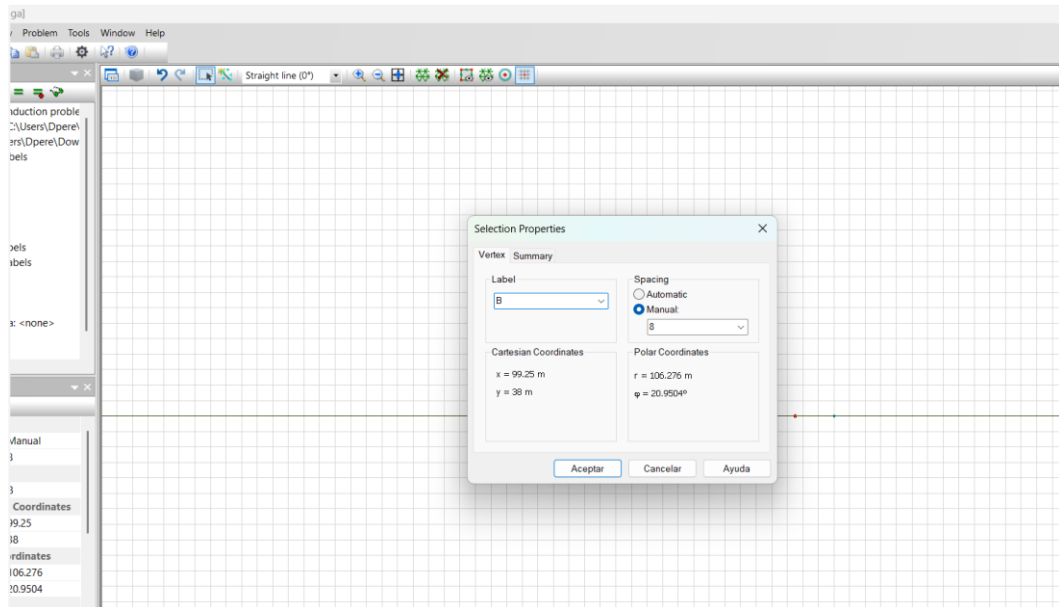


Paso 2: Se dibuja la geometría de la barra colectora, para lo cual, es necesario obtener las medidas de espaciamiento entre fases. Esto se obtiene de los planos de la subestación, específicamente del patio de 500 kV.

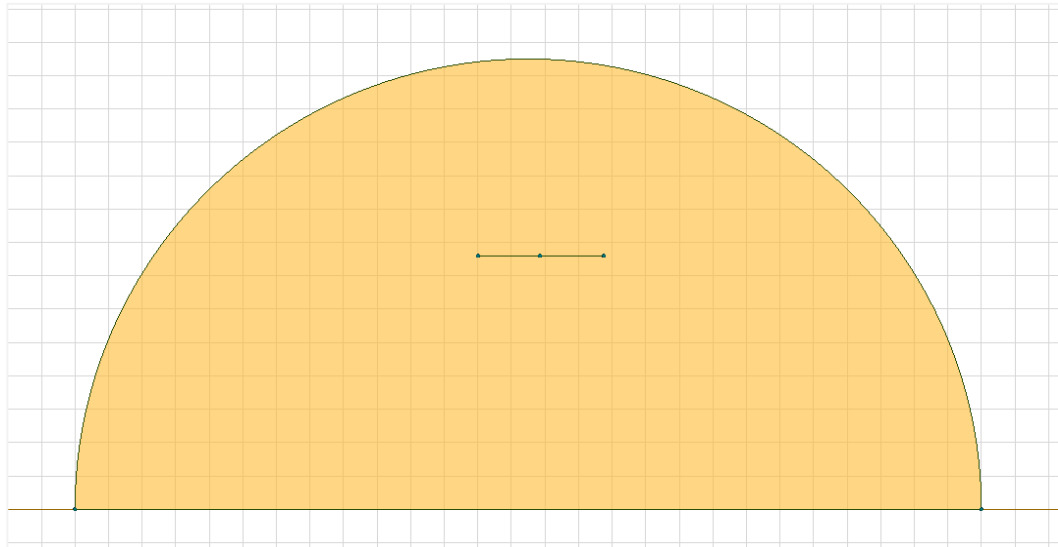


Paso 3: En cada uno de los puntos, que representan las fases se debe asignar nombres, en este caso se usa A, B y C.

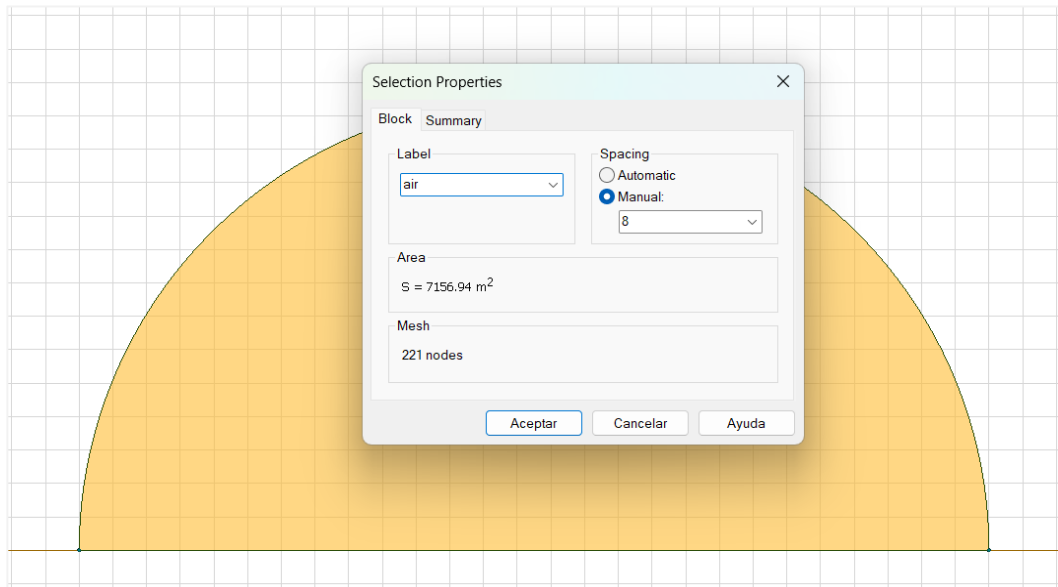




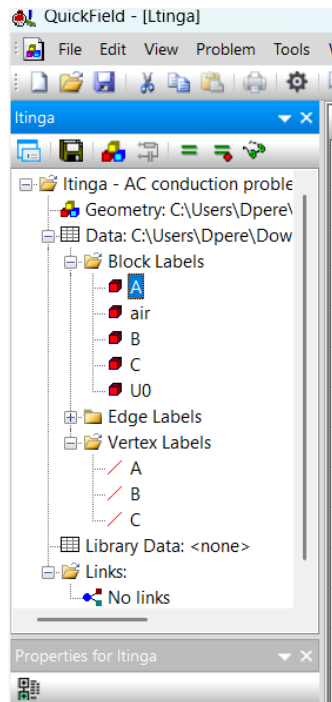
Luego se debe crear el medio circundante en donde se propagarán los campos electromagnéticos. En este caso es el aire.



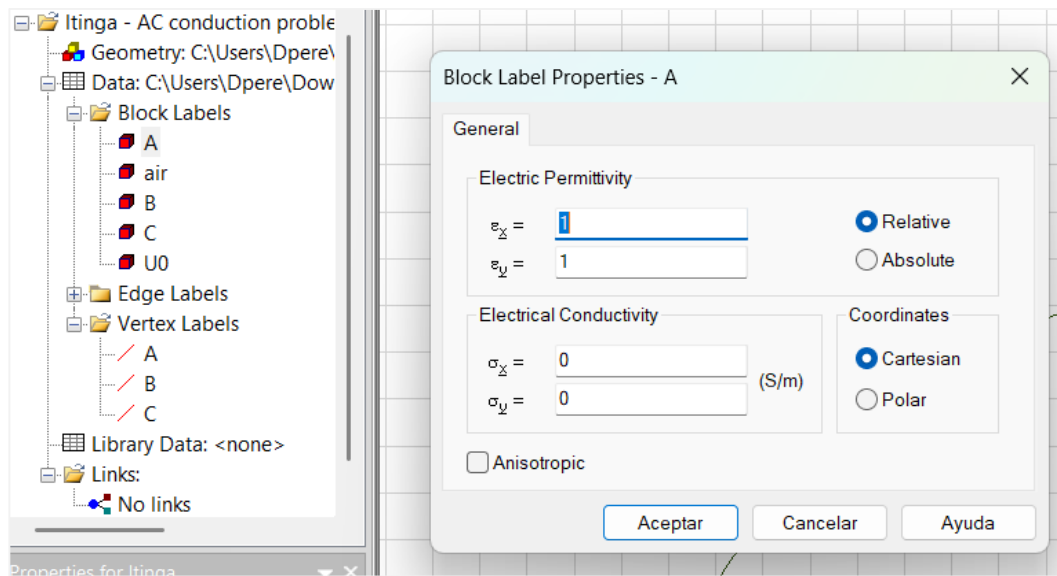
Asimismo, se debe asignar un nombre al medio circundante, que en este caso es air.

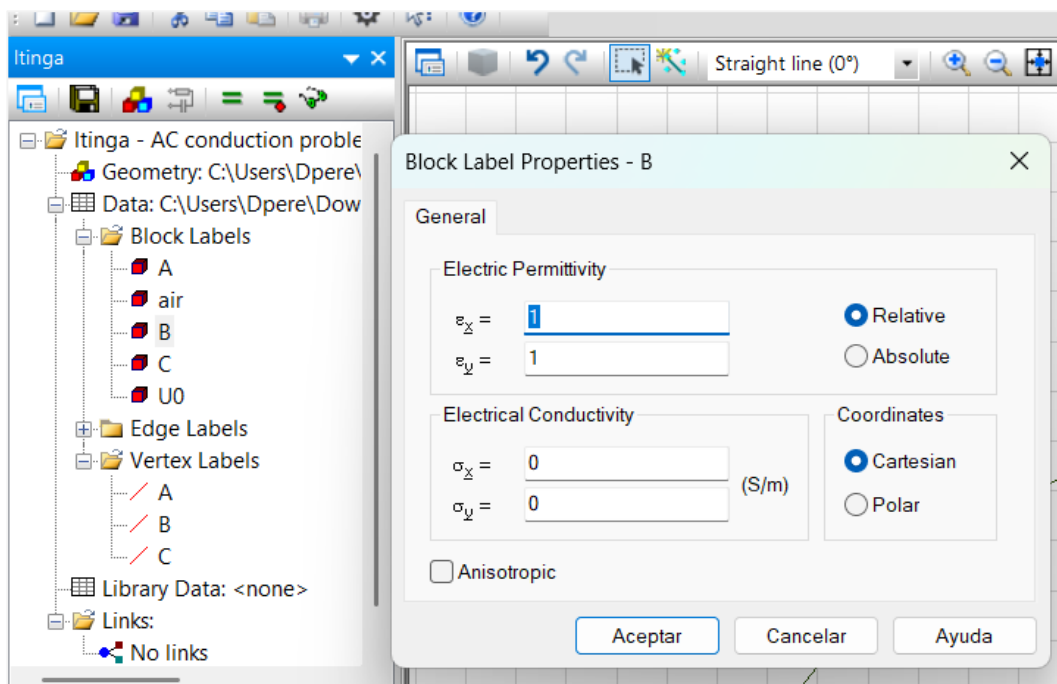
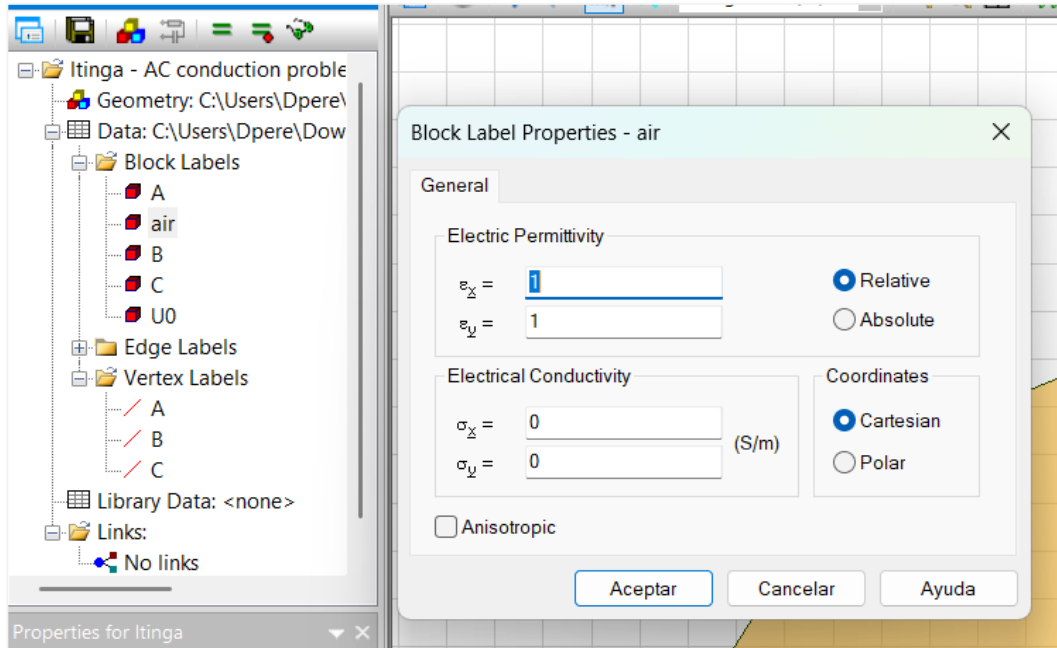


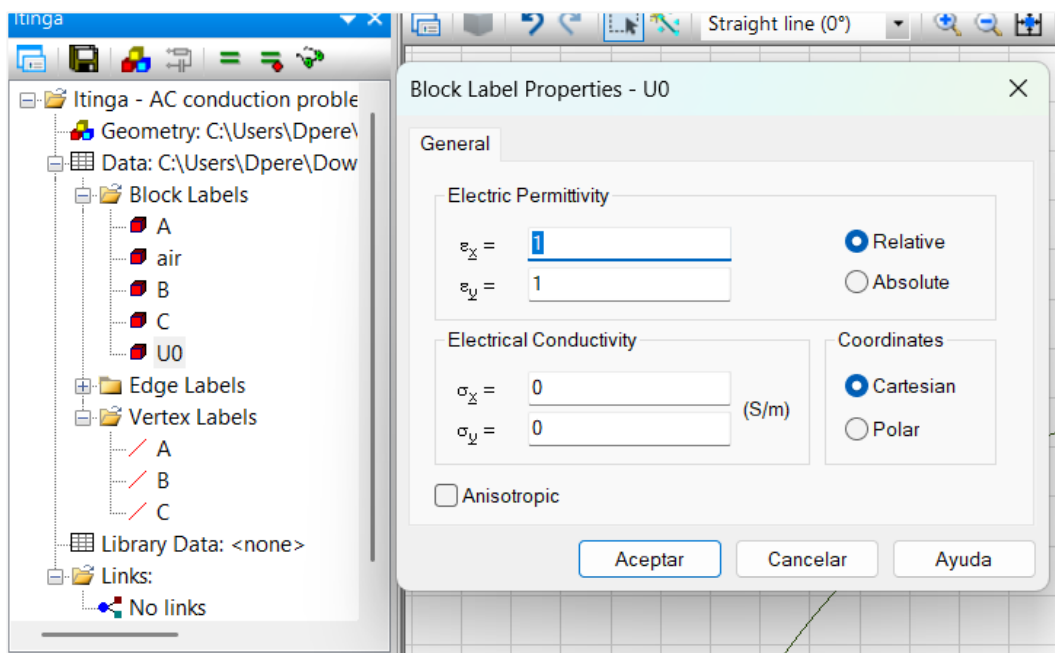
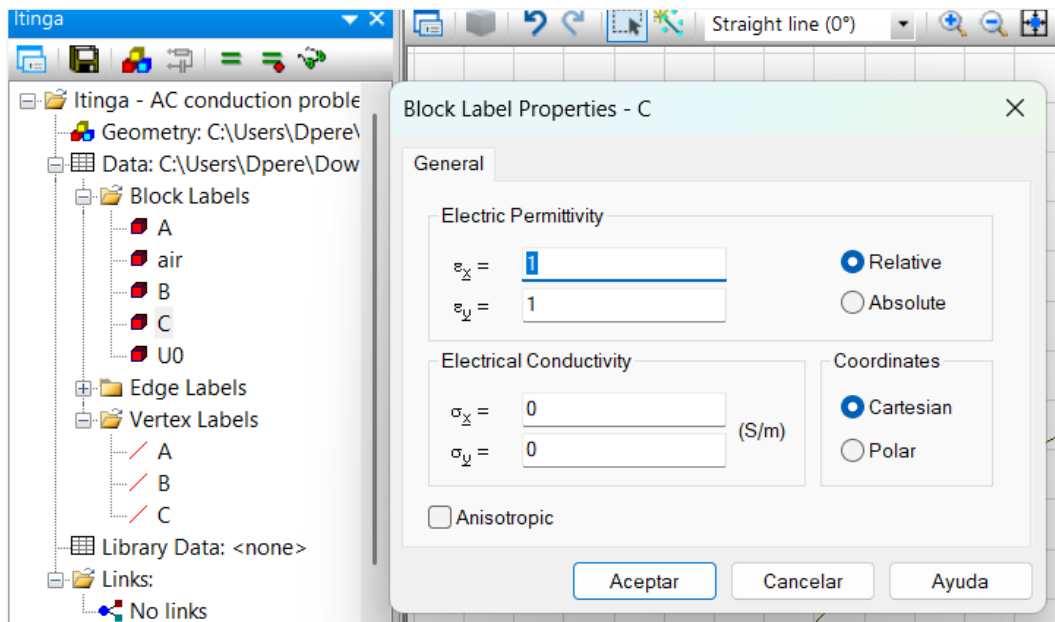
Paso 4: Una vez definidos los nombres se procede a parametrizar las condiciones de borde. Para lo cual, en el área de problemas se observa lo siguiente:



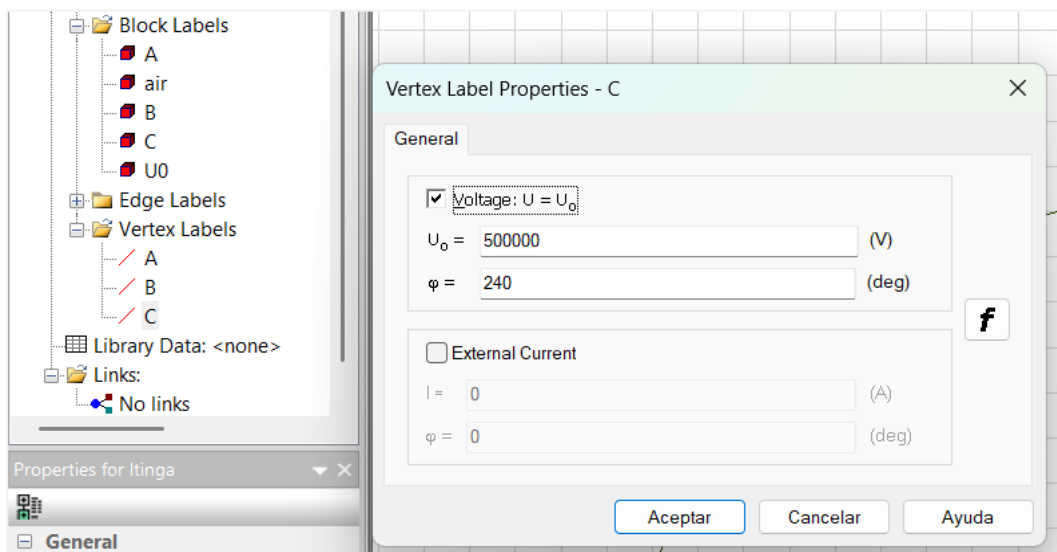
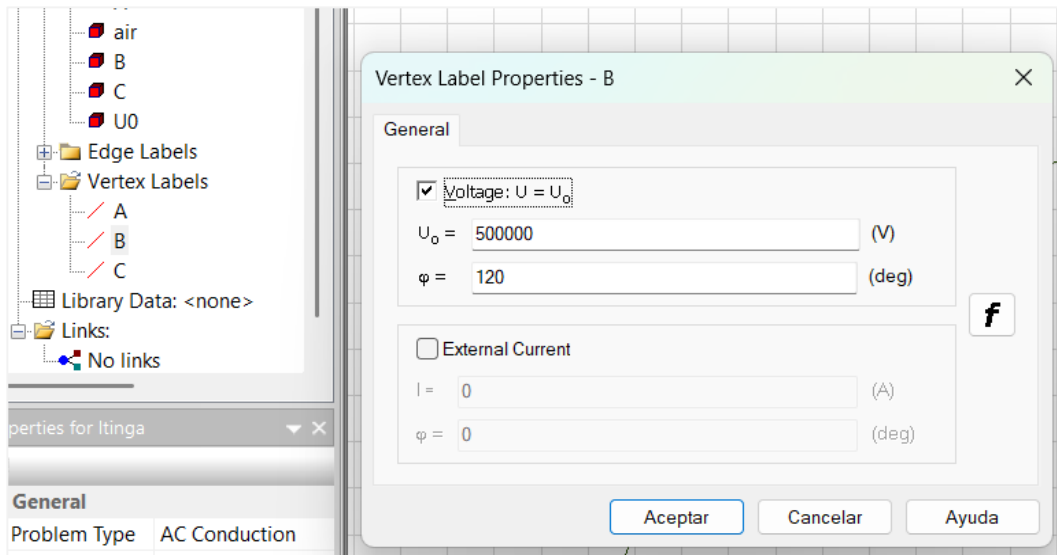
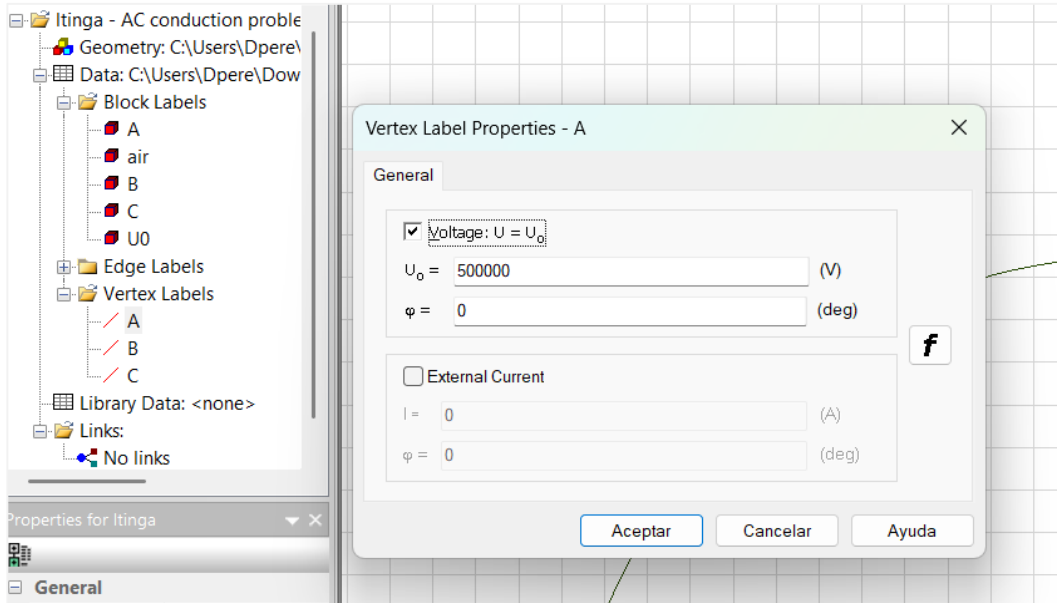
En cada una de las fases (A, B, C), el medio circundante (air) y el medio de referencia, que se refiere a la base del medio circundante (U0), se parametrizan conforme a la permitividad eléctrica.



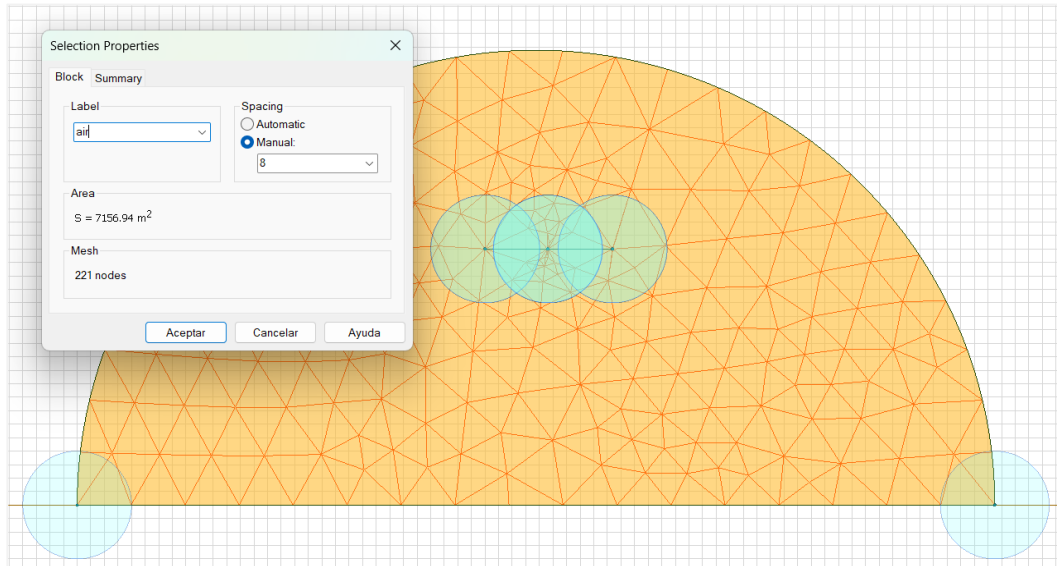




Por otro lado, se debe parametriza el nivel de tensión en cada uno de los vértices. En este caso son 3 (A, B, C).

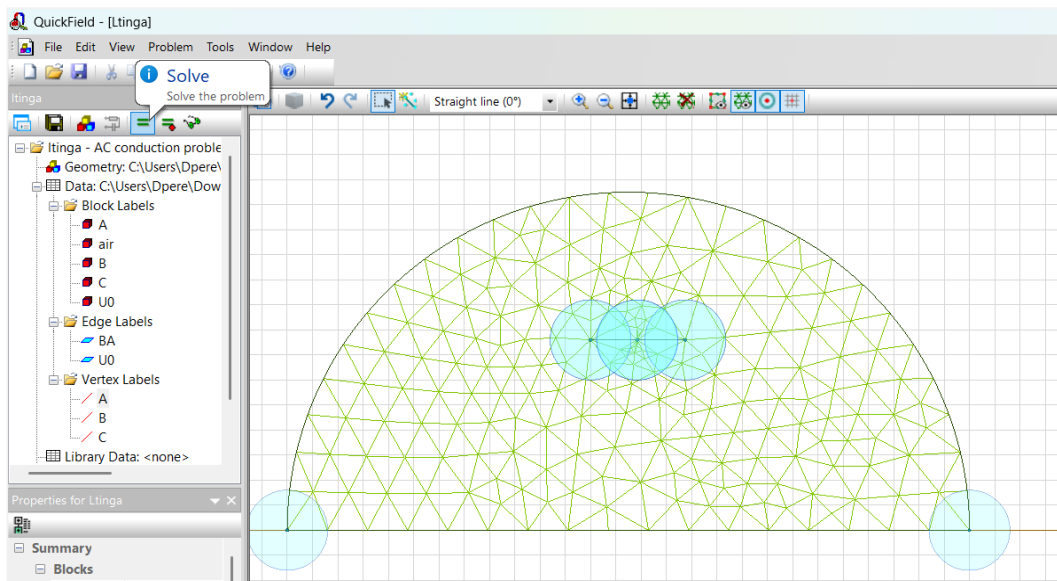


Paso 5: Se debe generar una malla en cada una de las fases y en el medio circundante. Aquí es importante ajustar el tamaño de la malla en cada elemento, puesto que la sumatoria no puede exceder los 255 nodos.

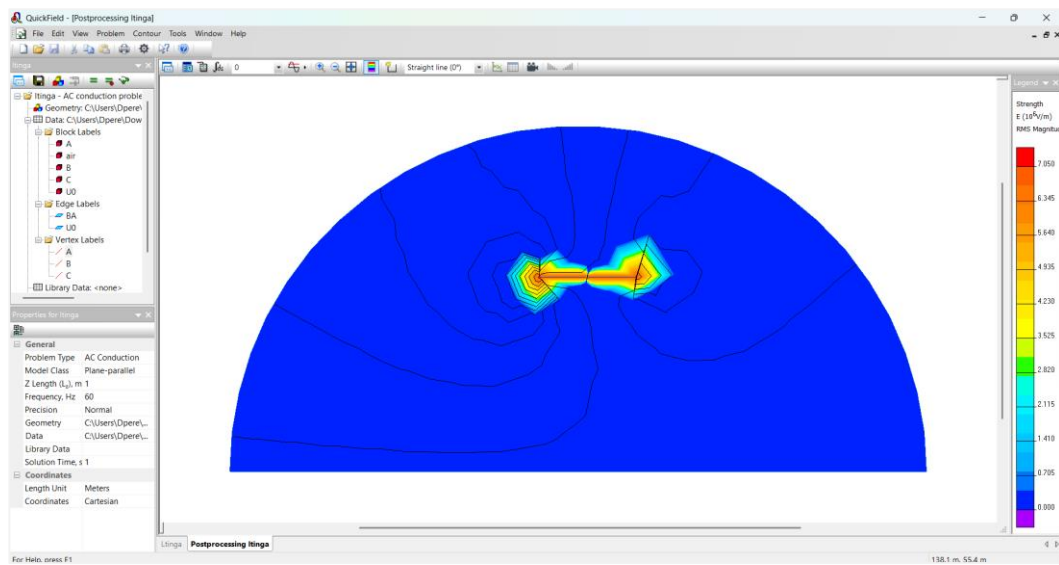


Nota: Fíjese que el espaciamiento es de 8, dando 221 nodos para el espacio circundante que es el aire. Además, la malla de las fases A, B y C serán con un espaciamiento de 8 puesto que están rodeados por aire.

Paso 6: Una vez parametrizado y mallado todo, se procede a la resolución, para lo cual se da un clic en botón solve.



Paso 7: Analiza la distribución de campos eléctricos obtenidos para la barra colectora 1 del patio de 500 kV.



ICNIRP GUIDELINES

FOR LIMITING EXPOSURE TO
ELECTROMAGNETIC FIELDS (100 kHz TO 300 GHz)

PUBLISHED IN: **HEALTH PHYS 118(5): 483–524; 2020**

PUBLISHED AHEAD OF PRINT IN MARCH 2020: **HEALTH PHYS
118(00):000–000; 2020**

Anexo 12. Normativa – Certificado calibración

DocuSign Envelope ID: 88DC6B89-C144-48FD-9499-AC3FC3B37A4C



P&H
The Measure of Quality

P&H CALIBRATION SERVICES LLC.

ISO/IEC 17025 - 2017 Accredited
406 N. M RD, Edinburg, TX 78542

Contact Name: Carlos Hernandez Phone: 956-215-6688

CERTIFICATE OF CALIBRATION

Customer: IPGM Servicios Ambientales S.A. Date: 8/9/2024
Address: Quitumbe, Condor Nan y Lira Nan ID: 10738
City, State Zip: Quito-Ecuador Certificate Num: P&H03092024301

Mfg	Model	Serial Number	PO Number	RANGE	Graduation
AARONIA AG	Spectran NF-5035S	10738		SEE DATA SHEET	SEE DATA SHEET

Contact	Test Date	Due Date	DESCRIPTION	Status	Temperature	Humidity
Sra. Ximena Carvajal	August 9, 2024	See Comments	Spectrum Analyzer-EMF Analyzed	Active	70.1°F	46.5%

Location	Uncertainty	Cal Interval days	Environmental Condition:	Acceptable	Unacceptable
Unknown	See Data Sheet	366		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Shift Test		Equipment Conditions										
Shift	Shift Tol	Shift Results Found		Shift Results as left		Shift	Working	Non-working	Clean	Dirty	Placed In Service	Returned to Service
		Pass	Fail	Pass	Fail							
N/A	SEE DATA SHEET	X		X		N/A	X		OK		X	X

Hardware Option List

Device: Spectran NF-5035 S Serial: 10738

The following options are already installed and ready to use:

Hardware Options:	Includes	
001	<input type="checkbox"/> Yes	<input checked="" type="checkbox"/> No
005	<input checked="" type="checkbox"/> Yes	<input type="checkbox"/> No
006	<input type="checkbox"/> Yes	<input checked="" type="checkbox"/> No
008	<input type="checkbox"/> Yes	<input checked="" type="checkbox"/> No
009	<input type="checkbox"/> Yes	<input checked="" type="checkbox"/> No
010	<input type="checkbox"/> Yes	<input checked="" type="checkbox"/> No

SPECTRAN-Settings during calibration

Center Frequency (Hz)	Atten (dB)	Detec	RBW (Hz)	SPAN	DIM	Sweep Time	Tolerance
40-240	0	RMS	30	30	1D	30000	± 3%
320-640	20	RMS	100	200	1D	10000	± 3%
960-7680	20	RMS	300	600	1D	3000	± 3%
10240-30720	20	RMS	1k	5000	1D	1000	± 3%
40960-983040	20	RMS	3k	20000	1D	1000	± 3%
(Option 008)							
1310720-26214440	20	RMS	3k	20000	1D	1000	± 3%
3932160-15728640	0	RMS	3k	20000	1D	1000	± 3%
(Option 010)							
2091520-31457280	0	RMS	3k	20000	1D	1000	± 3%

MEAS:	S-Amp	M-Amp	Result
40	7.00E-07	6.947E-07	Pass
60	7.00E-07	6.975E-07	Pass
80	7.00E-07	6.965E-07	Pass
120	7.00E-07	6.948E-07	Pass
160	7.00E-07	6.954E-07	Pass
240	7.00E-07	6.944E-07	Pass
320	7.00E-07	6.976E-07	Pass
480	7.00E-07	6.965E-07	Pass
640	7.00E-07	6.923E-07	Pass
1280	7.00E-07	6.964E-07	Pass
1920	7.00E-07	6.954E-07	Pass
2560	7.00E-07	6.963E-07	Pass
3840	7.00E-07	6.938E-07	Pass
5120	7.00E-07	6.945E-07	Pass
7680	7.00E-07	6.978E-07	Pass
10240	7.00E-07	6.986E-07	Pass
15360	7.00E-07	6.942E-07	Pass
20480	7.00E-07	6.955E-07	Pass
30720	7.00E-07	6.974E-07	Pass
40960	7.00E-07	6.978E-07	Pass
61440	7.00E-07	6.965E-07	Pass
81920	7.00E-07	6.978E-07	Pass
122880	7.00E-07	6.954E-07	Pass
163840	7.00E-07	6.966E-07	Pass
245760	7.00E-07	6.972E-07	Pass
327680	7.00E-07	6.986E-07	Pass
491520	7.00E-07	6.922E-07	Pass
655360	7.00E-07	6.950E-07	Pass
983040	7.00E-07	7.010E-07	Pass

Description:
 MEAS: Freq. =Hertz
 S-Amp. = Should be amplitude
 M-Amp. = Measurement amplitude
 S-Amp & M-Amp = Tesla

Measurement result Y-axis

MEAS:	S-Amp	M-Amp	Result
40	7.00E-07	6.990E-07	Pass
60	7.00E-07	7.014E-07	Pass
80	7.00E-07	7.022E-07	Pass
120	7.00E-07	6.995E-07	Pass
160	7.00E-07	6.986E-07	Pass
240	7.00E-07	6.978E-07	Pass
320	7.00E-07	6.964E-07	Pass
480	7.00E-07	6.993E-07	Pass
640	7.00E-07	7.015E-07	Pass
1280	7.00E-07	7.010E-07	Pass
1920	7.00E-07	7.014E-07	Pass
2560	7.00E-07	7.005E-07	Pass
3840	7.00E-07	6.978E-07	Pass
5120	7.00E-07	6.990E-07	Pass
7680	7.00E-07	6.985E-07	Pass
10240	7.00E-07	6.965E-07	Pass
15360	7.00E-07	6.974E-07	Pass
20480	7.00E-07	6.958E-07	Pass
30720	7.00E-07	6.963E-07	Pass
40960	7.00E-07	6.978E-07	Pass
61440	7.00E-07	6.979E-07	Pass
81920	7.00E-07	6.981E-07	Pass
122880	7.00E-07	6.985E-07	Pass
163840	7.00E-07	6.986E-07	Pass
245760	7.00E-07	6.984E-07	Pass
327680	7.00E-07	6.972E-07	Pass
491520	7.00E-07	6.968E-07	Pass
655360	7.00E-07	6.960E-07	Pass
983040	7.00E-07	6.984E-07	Pass

Description:
 MEAS: Freq. =Hertz
 S-Amp. = Should be amplitude
 M-Amp. = Measurement amplitude
 S-Amp & M-Amp = Tesla

MEAS:	S-Amp	M-Amp	Result
40	7.00E-07	7.006E-07	Pass
60	7.00E-07	6.996E-07	Pass
80	7.00E-07	6.988E-07	Pass
120	7.00E-07	6.994E-07	Pass
160	7.00E-07	6.958E-07	Pass
240	7.00E-07	6.983E-07	Pass
320	7.00E-07	6.978E-07	Pass
480	7.00E-07	6.985E-07	Pass
640	7.00E-07	6.974E-07	Pass
1280	7.00E-07	6.976E-07	Pass
1920	7.00E-07	7.012E-07	Pass
2560	7.00E-07	6.992E-07	Pass
3840	7.00E-07	7.010E-07	Pass
5120	7.00E-07	7.008E-07	Pass
7680	7.00E-07	6.986E-07	Pass
10240	7.00E-07	6.976E-07	Pass
15360	7.00E-07	6.985E-07	Pass
20480	7.00E-07	6.954E-07	Pass
30720	7.00E-07	6.976E-07	Pass
40960	7.00E-07	7.008E-07	Pass
61440	7.00E-07	6.984E-07	Pass
81920	7.00E-07	6.986E-07	Pass
122880	7.00E-07	6.984E-07	Pass
163840	7.00E-07	7.016E-07	Pass
245760	7.00E-07	6.982E-07	Pass
327680	7.00E-07	6.986E-07	Pass
491520	7.00E-07	6.992E-07	Pass
655360	7.00E-07	6.985E-07	Pass
983040	7.00E-07	6.989E-07	Pass

Description:
 MEAS: Freq. =Hertz
 S-Amp. = Should be amplitude
 M-Amp. = Measurement amplitude
 S-Amp & M-Amp = Testa

Sensor	Gain	Frequency	Nominal Value	Reading	Tolerance	Uncert.
X-Msta	10	60.0 Hz	2000 µT	1999.7 µT	± 3%	17.1 µT
X-Msta	10	60.0 Hz	70.00 µT	69.8 µT	± 3%	0.606 µT
X-Msta	10	60.0 Hz	10.00 µT	10.2 µT	± 3%	0.087 µT
X-Msta	10	420.0 Hz	1000 nT	999.5 nT	± 3%	8.71 nT
X-Msta	10	5.0 kHz	100 nT	99.4 nT	± 3%	0.864 nT
X-Msta	100	60.0 Hz	2000 µT	1999.1 µT	± 3%	17.3 µT
X-Msta	100	60.0 Hz	70.00 µT	69.8 µT	± 3%	0.608 µT
X-Msta	100	60.0 Hz	10.00 µT	10.1 µT	± 3%	0.088 µT
X-Msta	100	420.0 Hz	100.00 µT	99.7 µT	± 3%	0.859 µT
X-Msta	100	5.0 kHz	1000 nT	999.9 nT	± 3%	8.62 nT
X-Msta	1000	60.0 Hz	2000 µT	1999.8 µT	± 3%	17.4 µT
X-Msta	1000	60.0 Hz	70.00 µT	69.6 µT	± 3%	0.609 µT
X-Msta	1000	60.0 Hz	1000 nT	999.2 nT	± 3%	8.65 nT
X-Msta	1000	420.0 Hz	1000 nT	999.5 nT	± 3%	8.71 nT
X-Msta	1000	5.0 kHz	1000 nT	999.7 nT	± 3%	8.69 nT
X-Msta	10000	60.0 Hz	2000 µT	1999.6 µT	± 3%	17.4 µT
X-Msta	10000	60.0 Hz	70.00 µT	69.5 µT	± 3%	0.609 µT
X-Msta	10000	60.0 Hz	10.00 µT	10.1 µT	± 3%	0.086 µT
X-Msta	10000	420.0 Hz	1000 nT	999.8 nT	± 3%	8.66 nT
X-Msta	10000	5.0 kHz	100 nT	99.7 nT	± 3%	0.87 nT
Y-Msta	10	60.0 Hz	2000 µT	1999.6 µT	± 3%	17.2 µT
Y-Msta	10	60.0 Hz	70.00 µT	70.2 µT	± 3%	0.608 µT
Y-Msta	10	60.0 Hz	10.00 µT	10.1 µT	± 3%	0.084 µT
Y-Msta	10	420.0 Hz	100.00 µT	99.6 µT	± 3%	0.861 µT
Y-Msta	10	5.0 kHz	1000 nT	999.5 nT	± 3%	8.58 nT
Y-Msta	100	60.0 Hz	2000 µT	1999.7 µT	± 3%	17.3 µT
Y-Msta	100	60.0 Hz	70.00 µT	69.5 µT	± 3%	0.612 µT
Y-Msta	100	60.0 Hz	1000 nT	999.6 nT	± 3%	8.62 nT
Y-Msta	100	420.0 Hz	1000 nT	999.4 nT	± 3%	8.68 nT
Y-Msta	100	5.0 kHz	1000 nT	999.5 nT	± 3%	8.66 nT
Y-Msta	1000	60.0 Hz	2000 µT	1999.2 µT	± 3%	17.4 µT
Y-Msta	1000	60.0 Hz	70.00 µT	69.9 µT	± 3%	0.609 µT
Y-Msta	1000	60.0 Hz	10.00 µT	9.9 µT	± 3%	0.085 µT
Y-Msta	1000	420.0 Hz	1000 nT	999.4 nT	± 3%	8.71 nT
Y-Msta	1000	5.0 kHz	100 nT	99.8 nT	± 3%	0.865 nT
Y-Msta	10000	60.0 Hz	2000 µT	1999.6 µT	± 3%	17.4 µT
Y-Msta	10000	60.0 Hz	70.00 µT	69.5 µT	± 3%	0.610 µT
Y-Msta	10000	60.0 Hz	10.00 µT	10.2 µT	± 3%	0.083 µT
Y-Msta	10000	420.0 Hz	100.00 µT	99.7 µT	± 3%	0.865 µT
Y-Msta	10000	5.0 kHz	1000 nT	999.5 nT	± 3%	8.63 nT
Z-Msta	10	60.0 Hz	2000 µT	1999.6 µT	± 3%	17.3 µT
Z-Msta	10	60.0 Hz	70.00 µT	69.8 µT	± 3%	0.610 µT
Z-Msta	10	60.0 Hz	10.00 µT	9.9 nT	± 3%	0.087 nT

Sensor	Gain	Frequency	Nominal Value	Reading	Tolerance	Uncert.
Z-Msta	1000	60.0 Hz	2000 µT	1999.9 µT	± 3%	17.1 µT
Z-Msta	1000	60.0 Hz	70.00 µT	69.9 µT	± 3%	0.608 µT
Z-Msta	1000	420.0 Hz	100.00 µT	99.9 nT	± 3%	0.861 nT
Z-Msta	10000	60.0 Hz	2000 µT	1999.7 µT	± 3%	17.3 µT
Z-Msta	10000	60.0 Hz	70.00 µT	69.9 µT	± 3%	0.609 µT
Z-Msta	10000	5.0 KHZ	1000 nT	999.8 nT	± 3%	8.62 nT
E-Fki	10	60.0 Hz	10.000 kV/m	10.001 kV/m	± 3%	0.884 kV/m
E-Fki	10	60.0 Hz	100.0 V/m	100.2 V/m	± 3%	0.84 V/m
E-Fki	10	60.0 Hz	1000.0 V/m	1001.5 V/m	± 3%	8.58 V/m
E-Fki	10	420.0 Hz	100.0 V/m	101.0 V/m	± 3%	0.852 V/m
E-Fki	10	5.0 KHZ	10.0 V/m	10.00 V/m	± 3%	0.881 V/m
E-Fki	100	60.0 Hz	10.000 kV/m	10.001 kV/m	± 3%	0.884 kV/m
E-Fki	100	60.0 Hz	100.0 V/m	100.1 V/m	± 3%	0.86 V/m
E-Fki	100	60.0 Hz	5.000 kV/m	5.005 kV/m	± 3%	0.440 kV/m
E-Fki	100	420.0 Hz	100.0 V/m	99.9 V/m	± 3%	0.857 V/m
E-Fki	100	5.0 KHZ	100.0 V/m	99.8 V/m	± 3%	0.862 V/m
E-Fki	1000	60.0 Hz	10.000 kV/m	10.002 kV/m	± 3%	0.883 kV/m
E-Fki	1000	60.0 Hz	100.0 V/m	100.2 V/m	± 3%	0.83 V/m
E-Fki	1000	60.0 Hz	100.0 V/m	99.8 V/m	± 3%	0.874 V/m
E-Fki	1000	420.0 Hz	100.0 V/m	99.9 V/m	± 3%	0.864 V/m
E-Fki	1000	5.0 KHZ	1000.0 V/m	1002.4 V/m	± 3%	8.62 V/m
E-Fki	10000	60.0 Hz	10.000 kV/m	10.001 kV/m	± 3%	0.883 kV/m
E-Fki	10000	60.0 Hz	100.0 V/m	99.9 V/m	± 3%	0.84 V/m
E-Fki	10000	60.0 Hz	100.0 V/m	100.1 V/m	± 3%	0.857 V/m
E-Fki	10000	420.0 Hz	10.0 V/m	10.0 V/m	± 3%	0.887 V/m
E-Fki	10000	5.0 KHZ	5.000 kV/m	5.006 kV/m	± 3%	0.339 kV/m
M-Fki	10	60.0 Hz	500.0 A/m	499.9 A/m	± 3%	4.2 A/m
M-Fki	10	60.0 Hz	50.00 A/m	49.9 A/m	± 3%	0.42 A/m
M-Fki	10	60.0 Hz	7.958 A/m	7.968 A/m	± 3%	0.064 A/m
M-Fki	10	420.0 Hz	795.8 mA/m	795.5 mA/m	± 3%	6.846 mA/m
M-Fki	10	5.0 KHZ	79.58 mA/m	79.84 mA/m	± 3%	0.685 mA/m
M-Fki	100	60.0 Hz	500.0 A/m	499.9 A/m	± 3%	4.3 A/m
M-Fki	100	60.0 Hz	50.00 A/m	49.9 A/m	± 3%	0.41 A/m
M-Fki	100	60.0 Hz	7.958 A/m	7.965 A/m	± 3%	0.065 A/m
M-Fki	100	420.0 Hz	79.58 mA/m	79.58 mA/m	± 3%	0.688 mA/m
M-Fki	100	5.0 KHZ	795.8 mA/m	795.8 mA/m	± 3%	6.890 mA/m
M-Fki	1000	60.0 Hz	500.0 A/m	499.9 A/m	± 3%	4.3 A/m
M-Fki	1000	60.0 Hz	50.00 A/m	49.9 A/m	± 3%	0.44 A/m
M-Fki	1000	60.0 Hz	795.8 mA/m	795.8 mA/m	± 3%	6.889 mA/m
M-Fki	1000	420.0 Hz	795.8 mA/m	795.3 mA/m	± 3%	6.889 mA/m
M-Fki	1000	5.0 KHZ	795.8 mA/m	795.5 mA/m	± 3%	6.891 mA/m
M-Fki	10000	60.0 Hz	500.0 A/m	499.6 A/m	± 3%	4.2 A/m
M-Fki	10000	60.0 Hz	50.00 A/m	49.9 A/m	± 3%	0.43 A/m
M-Fki	10000	60.0 Hz	7.958 A/m	7.969 A/m	± 3%	0.066 A/m
M-Fki	10000	420.0 Hz	795.8 mA/m	795.8 mA/m	± 3%	6.886 mA/m
M-Fki	10000	5.0 KHZ	79.58 mA/m	79.62 mA/m	± 3%	0.687 mA/m

This is to certify the equipment referenced has been calibrated, and verified to meet the defined specifications. This calibration was performed using equipment with results that are traceable through National Institute of Standards and Technology (NIST) and to the International System of Units (SI). The basis of compliance stated is a comparison of the measurement parameters to the specified or required calibration process. The expanded uncertainties use a coverage factor of K=2 to approximate the 95% confidence level of the measurement, unless otherwise noted. This calibration certificate applies only to the item described and shall not be reproduced other than in full, without written approval from P&H Calibration Services LLC. If not included, the uncertainty of calibrations are available upon request and were taken into account when determining pass or fail. P&H Calibration Services LLC, is accredited to ISO/IEC 17025:2017 for calibration by Perry Johnson Laboratory Accreditation. P&H Calibration Services LLC, responsibility shall in no event, nor for any cause whatsoever, exceed the purchase price of this certificate. Decisions are based on data from measurements made, procedures used, professional experience, and not the effect of the uncertainty on the assessment of compliance.

Standard/s Used :	Testing Location:	On Site	In House	X
Traceability Certificate Number:	5522A FLUKE MULTIPRODUCT CALIBRATOR			
Standard/s Used :	F3172438	Cal Date:	12/29/2023	Recal Date:
Traceability Certificate Number:	Agilent 3458A 3.5 DigiR Digital Multimeter			
Standard/s Used :	06241817F	Cal Date:	06/17/2024	Recal Date:
Traceability Certificate Number:	Power Sensor NRP-Z31			
Standard/s Used :	04241947F	Cal Date:	04/17/2024	Recal Date:
Traceability Certificate Number:	Helmholtz coil HHS1			
Source for pass or fail ?	975518	Cal Date:	09/04/2023	Recal Date:
Customers Required Accuracy (as Found)?	PROCEDURE	Yes	X	No
Customers Required Accuracy (as Left)?		Yes	X	No

Comments / Notes: The calculation and interval of calibration is the responsibility of the user of the equipment or Customer.

Calibrated By: Carlos Hernandez *Carlos Hernandez* Date: 8/9/2024

Acknowledged By: Miguel Ramirez Telephone Number: (956)215-6638 Date: 8/9/2024

Results Only Relate to Item Calibrated
End Of Report



LABORATORIO DE CALIBRACIÓN ACREDITADO
ISO/IEC 17025:2017
Accredited Calibration Laboratory ISO/IEC 17025:2017



Escanee este QR para descargar informe original con firma electrónica en pdf

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN
Certificate of Calibration
N° CGC-6978-001-23

Cliente:
Customer IPGMSERVICIOS AMBIENTALES CIA. LTDA.

Dirección:
Address AV. CONDOR ÑAN Y AV. LLIRA ÑAN

Teléfono:
Phone Number 2236188

Persona de Contacto:
Contact Person Ximena Carvajal

Objeto:
Item TERMOHIGROMETRO

Este certificado de calibración documenta la trazabilidad a los estándares nacionales, que realizan las unidades de medida de acuerdo con el Sistema Internacional de Unidades (SI)

Con el fin de asegurar la calidad de sus mediciones, el usuario está obligado a recalibrar sus instrumentos a intervalos apropiados.



Escanee este QR y encuentre:
 Etiqueta electrónica
 Certificados originales en pdf
 Histórico de intervenciones
 Documentos relevantes, manuales, fotografías

This calibration certificate documents the traceability to national standards, which realize the units of measurement according to the international System of Units (SI)

Marca:
Manufacturer ELC

Modelo:
Model TH-0510

No. de Serie⁽¹⁾:
Serial Number NO ESPECIFICA

Identificación:
Identification E-29074

Ubicación del Objeto⁽¹⁾:
Item Location NO ESPECIFICA

Fecha de Recepción:
Date of Receipt 2023-11-21

Fecha de Calibración:
Calibration Date 2023-11-22

Próxima Fecha de Calibración:
Due Date -

Técnico Responsable:
Responsible Technician Sharly Perez

In order to ensure the quality of their measurements, the user is obliged to have the object recalibrated at appropriate intervals.

Persona que Autoriza / Fecha de Emisión:
Person authorizing / Date of issue Ing. Savino Pineda / 2023-11-22

Gerente Técnico

Autorizado y firmado electrónicamente por SAVINO ENRIQUE PINEDA GONZALEZ
 Nombre de reconocimiento (DN): cn=SAVINO ENRIQUE PINEDA GONZALEZ, serialNumber=D90623155159, ou=ENTIDAD DE CERTIFICACION DE INFORMACION, o=SECURITY DATA S.A. 2, c=EC
 Fecha: 2023-11-22 14:45:58



LABORATORIO DE CALIBRACIÓN ACREDITADO
ISO/IEC 17025:2017
Accredited Calibration Laboratory ISO/IEC 17025:2017



Escanee este QR para descargar informe original con firma electrónica en pdf

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN
Certificate of Calibration
N° CGC-6978-001-23



Este certificado no podrá reproducirse excepto en su totalidad sin la aprobación escrita del laboratorio Elicrom-Calibración. Los resultados contenidos en este certificado son válidos únicamente para el ítem aquí descrito, en el momento y bajo las condiciones en que se realizó la calibración.

La versión en inglés del certificado de calibración no es una traducción vinculante. Si algún asunto da lugar a controversia, se debe utilizar el texto original en español.

This certificate may not be reproduced other than in full except with the written approval of the Elicrom-Calibration laboratory. The results contained in this certificate relate only to the item calibrated, at the time and under the conditions in which the calibration was performed.

The English version of the calibration certificate is not a binding translation. If any matter gives rise to controversy, the Spanish original text must be used.

Incertidumbre de medida

Measurement Uncertainty

La incertidumbre expandida de medición reportada (intervalo de confianza), se evaluó con base en el documento JCGM 100:2008 (GUM 1995 with minor corrections) "Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement", multiplicando la incertidumbre típica combinada por el factor de cobertura k, que para una distribución t (de Student) corresponde a un nivel de confianza de aproximadamente el 95,45%.

The reported expanded uncertainty of the measurement (confidence interval), was evaluated based on the document JCGM 100:2008 (GUM 1995 with minor corrections) "Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement", and is stated as the combined standard uncertainty of the measurement multiplied by the coverage factor k, which for a t (Student's) distribution corresponds to a confidence level of approximately 95.45%.

Equipamiento Utilizado

Equipment Used

Identificación <i>ID Number</i>	Nombre <i>Name</i>	Marca <i>Manufacturer</i>	Modelo <i>Model</i>	No. de Serie <i>Serial Number</i>	Vence Cal. <i>Due Date</i>	N° Certificado <i>N° Certificate</i>
EL.PT.773	TERMÓMETRO DIGITAL	CONTROL COMPANY	6412	181228173	2023-12-27	CC-6664-015-22
EL.PC.033	TERMÓHIGROMETRO PATRÓN	VAISALA	MI70/HMP76B	M1530040/M2130075	2024-10-19	2022007380
EL.PT.696	CÁMARA DE ESTABILIDAD	KAMBIC	KK-105 CHLT	17075513	2024-11-15	CGC-6690-018-23
EL.PT.365	TERMOHIGRÓMETRO	CENTER	342	190601459	2024-03-27	CC-1298-004-23



Escanee este QR
para descargar
informe original
con firma
electrónica en pdf

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN
Certificate of Calibration
N° CGC-6978-001-23

Calibración

Calibration

Unidad de Medida (Temperatura): <i>Unit of Measurement (Temperature)</i>	°C				
Intervalo de Medición (Temperatura) ⁽²⁾ : <i>Measurement Range (Temperature)</i>	(0 a 50) °C				
Resolución (Temperatura): <i>Resolution (Temperature)</i>	0,1 °C				
Unidad de Medida (Humedad): <i>Unit of Measurement (Humidity)</i>	%hr				
Intervalo de Medición (Humedad) ⁽²⁾ : <i>Measurement Range (Humidity)</i>	(20 a 99,9) %hr				
Resolución (Humedad): <i>Resolution (Humidity)</i>	0,1 %hr				
Lugar de Calibración: <i>Calibration Site</i>	Lab. Temperatura Y Humedad (Elicrom)				
Método de Calibración: <i>Calibration Method</i>	Comparación Directa Con Termohigrómetro Patrón Y Cámara De Estabilidad				
Documento de Referencia: <i>Reference Document</i>	PC-026:2019 "Procedimiento para la calibración de Higrómetros y Termómetros ambientales"				
Procedimiento de Calibración: <i>Calibration Procedure</i>	PEC.EL.04				
Condiciones Ambientales: <i>Environmental Conditions</i>	<table border="0"> <tr> <td>Temperatura del Aire <i>Air Temperature</i></td> <td>23,2 °C ± 0,7 °C</td> </tr> <tr> <td>Humedad Relativa del Aire <i>Air Relative Humidity</i></td> <td>50,8 %hr ± 1,8 %hr</td> </tr> </table>	Temperatura del Aire <i>Air Temperature</i>	23,2 °C ± 0,7 °C	Humedad Relativa del Aire <i>Air Relative Humidity</i>	50,8 %hr ± 1,8 %hr
Temperatura del Aire <i>Air Temperature</i>	23,2 °C ± 0,7 °C				
Humedad Relativa del Aire <i>Air Relative Humidity</i>	50,8 %hr ± 1,8 %hr				

Observaciones

Observations

- ⁽¹⁾ Información proporcionada por el cliente. Elicrom no es responsable de dicha información.
⁽²⁾ Información tomada de las especificaciones del objeto de calibración (proporcionada por el fabricante).

⁽¹⁾ *Information provided by the customer. Elicrom is not responsible for such information.*
⁽²⁾ *Information taken from the specifications of the calibration item (provided by the manufacturer).*



LABORATORIO DE CALIBRACIÓN ACREDITADO
ISO/IEC 17025:2017
Accredited Calibration Laboratory ISO/IEC 17025:2017



Escanee este QR
para descargar
informe original
con firma
electrónica en pdf

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN
Certificate of Calibration
N° CGC-6978-001-23



Declaración de Trazabilidad Metrológica

Statement of Metrological Traceability

Los resultados de calibración contenidos en este certificado son trazables al Sistema Internacional de Unidades (SI) por medio de una cadena ininterrumpida de calibraciones a través del NIST (National Institute of Standards and Technology - Estados Unidos) o de otros Institutos Nacionales de Metrología (INMs).

The calibration results contained in this certificate are traceable to the International System of Units (SI) through an unbroken chain of calibrations through NIST (National Institute of Standards and Technology - United States) or other National Metrology Institutes (NMIs).

Resultados de la Calibración en Temperatura

Temperature Calibration Results

Valor de Prueba <i>Test Value</i>	Indicación Ítem <i>Item Reading</i>	Indicación Patrón <i>Standard Reading</i>	Error de Medición (e) <i>Measurement Error (e)</i>	Incertidumbre (U) <i>Uncertainty (U)</i>	Factor de Cobertura (k) <i>Coverage Factor</i>	Humedad Relativa <i>Relative Humidity</i>
°C	°C	°C	°C	°C		%hr
23	23,2	23,02	0,18	0,21	2,00	50,60

El valor de humedad relativa reportado corresponde al de la cámara climática durante la calibración del ítem.

The relative humidity value reported corresponds to that of the climatic chamber during the calibration of the item.

Resultados de la Calibración en Humedad Relativa

Relative Humidity Calibration Results

Valor de Prueba <i>Test Value</i>	Indicación Ítem <i>Item Reading</i>	Indicación Patrón <i>Standard Reading</i>	Error de Medición (e) <i>Measurement Error (e)</i>	Incertidumbre (U) <i>Uncertainty (U)</i>	Factor de Cobertura (k) <i>Coverage Factor</i>	Temperatura <i>Temperature</i>
%hr	%hr	%hr	%hr	%hr		°C
30	31,5	30,33	1,17	0,81	2,00	23,00
50	51,9	50,15	1,75	0,84	2,00	23,00
75	76,1	75,3	0,8	1,2	2,00	23,00

El valor de temperatura reportado corresponde al de la cámara climática durante la calibración del ítem.

The temperature value reported corresponds to that of the climatic chamber during the calibration of the item.

Nota

Note

- La indicación del patrón y el error de medición (mejor estimación del valor verdadero) se muestran con la misma cantidad de decimales que la incertidumbre reportada (véase 7.2.6 de la GUM).

- The standard reading and the measurement error (best estimate of the true value) are shown with the same number of digits as the reported uncertainty (see GUM 7.2.6).

FO.PEC.04-02 Rev. 27

CERTIFICADO DE ACREDITACIÓN

IPGM SERVICIOS AMBIENTALES CÍA. LTDA.



Acreditación Nº SAE LEN 10-015
LABORATORIO DE ENSAYOS

QUITO - ECUADOR

Se encuentra acreditado por el Servicio de Acreditación Ecuatoriano en cumplimiento con los requisitos establecidos en la:

Norma NTE – INEN ISO/IEC 17025:2018 “Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración”, equivalente a la Norma ISO/IEC 17025:2017.

Esta acreditación demuestra la competencia técnica para la ejecución de los ensayos detallados en el Alcance de Acreditación *, que se realizan en las localizaciones identificadas en el mismo.



Mg. Carlos Echeverría Cueva
DIRECTOR EJECUTIVO
SERVICIO DE ACREDITACIÓN ECUATORIANO

ACREDITACIÓN INICIAL:	2010/11/17
RENOVACIÓN 1:	2015/08/19 (Oficio Nº SAE DE 15-417)
RENOVACIÓN 2:	2019/08/20 (Resolución Nº SAE-ACR-0235-2019)

EXPIRA:	2015/11/16
EXPIRA:	2020/08/18
EXPIRA:	2024/08/19

La acreditación está condicionada al cumplimiento continuo por parte del laboratorio con los requisitos de acreditación, por lo que la vigencia del presente certificado de acreditación debe ser consultada en la página web del SAE, www.acreditacion.gob.ec.

El SAE es firmante de los Acuerdos de Reconocimiento Mutuo firmado entre Organismos Nacionales de Acreditación con IAAC e ILAC

* El presente certificado solo tiene validez con su correspondiente Alcance de Acreditación

*Este certificado reemplaza al certificado Nº OAE LE C 10-015.

Ley del Sistema Ecuatoriano de la Calidad Art. 21

F PO11 04 R04

19058/LE069.2/19.08.20