



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS
INGENIERÍA ELÉCTRICA EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE
POTENCIA

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN DE CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS EN
SUBESTACIONES ELÉCTRICAS DE MEDIA Y ALTA TENSIÓN

Proyecto de Investigación presentado previo a la obtención del Título de Ingenieros Eléctricos
en Sistemas Eléctricos de Potencia.

Autores:

Minchala Lligüi Néstor Patricio

Velasco Sarabia Carol Lizbeth

Tutor Académico:

Ing. Guamán Cuenca Wilian Patricio Ms.C

LATACUNGA – ECUADOR

Marzo - 2021

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Nosotros **MINCHALA LLIGÜI NÉSTOR PATRICIO** y **VELASCO SARABIA CAROL LIZBETH** declaramos ser autores del presente proyecto de investigación: “**ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN DE CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS EN SUBESTACIONES ELÉCTRICAS DE MEDIA Y ALTA TENSIÓN**”, siendo el Ing. **GUAMÁN CUENCA WILIAN PATRICIO** el tutor del presente trabajo; y eximo expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Además, certifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de nuestra exclusiva responsabilidad.



.....
Minchala Lligüi Néstor Patricio
C.C. 0302224704



.....
Velasco Sarabia Carol Lizbeth
C.C. 18052878901

AVAL DEL TUTOR DE PROYECTO DE TITULACIÓN

En calidad de Tutor del Trabajo de Investigación sobre el título:

“ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN DE CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS EN SUBESTACIONES ELÉCTRICAS DE MEDIA Y ALTA TENSIÓN”, de **MINCHALA LLIGÜI NÉSTOR PATRICIO** y **VELASCO SARABIA CAROL LIZBETH**, de la carrera de Ingeniería Eléctrica, considero que dicho Informe Investigativo cumple con los requerimientos metodológicos y aportes científico-técnicos suficientes para ser sometidos a la evaluación del Tribunal de Validación de Proyecto que el Honorable Consejo Académico de la Facultad de la Ingeniería y Aplicadas de la Universidad Técnica de Cotopaxi designe, para su correspondiente estudio y calificación.

Latacunga, marzo 2021

El Tutor


.....
Ing. Guaman Cuenca Wilian Patricio MSc.
C.C. 0603578956

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN

En calidad de Tribunal de Lectores, aprueban el presente Informe de Investigación de acuerdo a las disposiciones reglamentarias emitidas por la Universidad Técnica de Cotopaxi, y por la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas; por cuanto, los postulantes **MINCHALA LLIGÜI NÉSTOR PATRICIO** y **VELASCO SARABIA CAROL LIZBETH** con el título de Proyecto de titulación “**ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN DE CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS EN SUBESTACIONES ELÉCTRICAS DE MEDIA Y ALTA TENSIÓN**”, han considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometido al acto de Sustentación de Proyecto.

Por lo antes expuesto, se autoriza realizar los empastados correspondientes, según la normativa institucional.

Latacunga, marzo 2021

Para constancia firman:


.....
Ing. Carlos Quinatoa Caiza
C.C. 0503287864


.....
Ing. Xavier Proaño Maldonado
C.C. 0502656424


.....
Ing. Gabriel Pesántez Palacios
C.C. 0301893889

AGRADECIMIENTO

Expreso mi infinito agradecimiento a Dios por permitirme poder terminar de manera exitosa la carrera, a la Virgen de Piquil que me ha dado la fortaleza para continuar cuando a punto de caer he estado. A mis padres María y Horlando por su gran amor y apoyo durante mi carrera universitaria, por el apoyo incondicional en todas y cada una de mis decisiones, por demostrarme que con esfuerzo y dedicación se puede lograr grandes cosas sin importar los obstáculos.

A mi abuelito, a mis hermanos Cesar, Brayan, Anahí, y a mi primo Paul por su cariño y palabras de aliento para no darme por vencida durante el desarrollo de este trabajo. A Christian por la ayuda que me ha brindado y por estar siempre a mi lado en los momentos y situaciones más tormentosas sin esperar nada a cambio.

A mi familia por estar siempre presentes, acompañándome, a amigos en especial a Darwin Romero por el apoyo moral que me ha brindado a lo largo de esta etapa.

A mi compañero de tesis Néstor Minchala por la confianza que depositó en mí para la realización de nuestro trabajo de titulación, gracias por su por su ayuda incondicional, su paciencia y su cariño.

A la Universidad Técnica de Cotopaxi y a los docentes de la Carrera de Ingeniería Eléctrica por haber compartido sus conocimientos a lo largo de la preparación de nuestra profesión, de manera especial, al Ing. Wilian Guamán tutor de nuestro proyecto quien nos ha guiado con su paciencia, y su rectitud como docente, de igual manera agradezco al Ing. John Morales.

Carol Velasco.

AGRADECIMIENTO

Al terminar este proyecto de titulación y con ello el fin de mis estudios de pregrado, expreso mis infinitos y sinceros sentimientos de agradecimiento a mi mamá, Edilma Beatriz Minchala, que me ha formado como un hombre de sueños y valores, por ser el pilar fundamental en mi vida y que con gran esfuerzo me ha dado los estudios y permitirme obtener un título universitario.

Mi agradecimiento a la Universidad Técnica de Cotopaxi que me abrió las puertas para emprender mis estudios de tercer nivel, mis sentimientos de gratitud a la Carrera de Ingeniería Eléctrica mención Sistemas Eléctricos de Potencia y los docentes que me han formado profesionalmente y con valores.

Agradezco a mis compañeros, amigos y familiares que me han ayudado y motivado a seguir adelante y no declinar durante esta travesía universitaria, a mi compañera de tesis Carol Lizbeth, quien con paciencia, esmero y cariño ha sido el ingrediente perfecto para sobrellevar mis estudios y este trabajo.

Al Ing. Wilian Guamán con su valerosa tutoría y exigencia nos ha guiado para realizar el presente trabajo de la mejor manera, de igual forma agradezco al Ing. John Morales por su ayuda.

A todos, infinitas gracias.

Néstor Minchala.

DEDICATORIA

*“Nosotros somos como los granos de quinua si
estamos solos, el viento lleva lejos. Pero si
estamos unidos en un costal nada hace el
viento. Bamboleará, pero no nos hará caer”*
D.C.

A mis padres María y Horlando.

A mi abuelito Luis.

DEDICATORIA

*“Somos como la paja de páramo que se
arranca y vuelve a crecer... y de paja del
páramo sembraremos el mundo” D.C.*

A mi madre, Beatriz Minchala.

RESUMEN:

Al existir un flujo de potencia desde la generación hasta el consumidor final, todos los elementos de un sistema eléctrico de potencia (SEP) están siendo atravesados por una carga eléctrica en movimiento, es por esta razón que se convierten en una fuente de constante generación de campo eléctrico y campo magnético (CEM).

En este proyecto se realiza un estudio de la distribución de campos electromagnéticos en subestaciones eléctricas de media y alta tensión. En primera instancia, se realizó una recopilación bibliográfica del campo eléctrico, campo magnético, y los CEM en los sistemas eléctricos de potencia. Luego, se consolidó una base de datos de las mediciones de CEM y las características técnicas de las subestaciones pertenecientes al Sistema Nacional de Transmisión. A continuación, mediante el método de imágenes reflejadas se calcula de manera analítica los campos electromagnéticos para las líneas entrantes y salientes, barras de una subestación y empleando lo propuesto por la normativa UNE-CLC/TR 50453 IN para el transformador de potencia, con este cálculo propuesto se procede a la creación de una interfaz utilizando la herramienta GUI de Matlab para visualizar la distribución de los CEM en la subestación Tena.

Finalmente, utilizando el software QuickField versión estudiantil se simula la distribución de los campos electromagnéticos de los elementos principales de la subestación (líneas, barras y transformador), para realizar un análisis comparativo entre los datos obtenidos de la simulación con los resultados del cálculo y contrastarlos con la información disponible en la base de datos.

Palabras Clave: campo eléctrico, campo magnético, subestaciones eléctricas, transformador, sistemas eléctricos de potencia.

ABSTRACT

THEME:

“STUDY OF THE DISTRIBUTION IN ELECTROMAGNETIC FIELDS IN MEDIUM AND HIGH VOLTAGE ELECTRICAL SUBSTATIONS”

Authors:

Minchala Lligüi Néstor Patricio

Velasco Sarabia Carol Lizbeth

When there is a flow of power from the generation to the final user, all the elements of an electrical power system (EPS) are being traversed by a moving electrical charge, for this reason that becomes a source of constant generation of the electric and magnetic field (EMF).

In this project is done a study of the distribution in electromagnetic fields in medium and high voltage electrical substations. First of all, it was made a bibliographic compilation of the electric field, magnetic field, and (EMF) in electrical power systems. Then, a database of EMF measurements and technical characteristics of the substations belonging to the National Transmission System was consolidated. Next, through the method of the reflected images was calculated analytically the electromagnetic fields for the incoming and outgoing lines, bars of a substation and using what is proposed by the standard UNE-CLC / TR 50453 IN for the power transformer, with this proposed calculation, an interface is created using the Matlab GUI tool to visualize the distribution of EMF in the Tena substation.

Finally, by using the student version QuickField software simulates the distribution of the electromagnetic fields of the main elements of the substation (lines, bars, and transformer), to perform a comparative analysis between the data obtained from the simulation with the results of the calculation and contrast them with the available information in the data base.

Keywords: electric field, magnetic field, electrical substations, transformer, electrical power systems.



Universidad
Técnica de
Cotopaxi

CENTRO DE IDIOMAS

AVAL DE TRADUCCIÓN

En calidad de Docente del Idioma Inglés del Centro de Idiomas de la Universidad Técnica de Cotopaxi; en forma legal **CERTIFICO** que: La traducción del resumen al Idioma Inglés presentado por los estudiantes Minchala Lligüi Néstor Patricio y Velasco Sarabia Carol Lizbeth de la Carrera de Ingeniería Eléctrica, de la **FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS**, cuyo título versa “**Estudio de la distribución de campos electromagnéticos en subestaciones eléctricas de media y alta tensión.**”, lo realizaron bajo mi supervisión y cumple con una correcta estructura gramatical del Idioma.

Es todo cuanto puedo certificar en honor a la verdad y autorizo al peticionario hacer uso del presente certificado de la manera ética que estimare conveniente.

Latacunga marzo 1, 2021

Atentamente,



Firmado digitalmente por:
**DARWIN AURELIO
VALLEJO MOSQUERA**

M.Sc. Darwin Vallejo Mosquera
DOCENTE CENTRO DE IDIOMAS
C.C. 1802263549

1803027935 Firmado
digitalmente por
1803027935
VICTOR HUGO
ROMERO GARCIA
ROMERO GARCIA
Fecha: 2021.03.05
10:34:22 -05'00'

ÍNDICE DE CONTENIDO

1.	INFORMACIÓN GENERAL	1
2.	INTRODUCCIÓN	2
2.1.	El problema:.....	2
2.1.1.	Situación Problémica:	2
2.1.2.	Formulación del problema:.....	2
2.2.	Objeto y campo de acción.....	3
2.3.	Beneficiarios:	3
2.3.1.	Beneficiarios directos	3
2.3.2.	Beneficiarios indirectos	3
2.4.	Justificación:	3
2.5.	Hipótesis	4
2.6.	Objetivos:.....	4
2.6.1.	General:.....	4
2.6.2.	Específicos:.....	4
2.7.	Sistema de tareas.....	5
3.	FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	6
3.1.	Antecedentes.....	6
3.2.	Subestaciones.....	8
3.2.1.	Clasificación	8
3.2.2.	Elementos	10
3.3.	Campos Electromagnéticos	11
3.3.1.	Campo Eléctrico	13
3.3.2.	Campo Magnético.....	18
3.3.3.	Ecuaciones de Maxwell	24
3.4.	Campos electromagnéticos en Sistemas Eléctricos de Potencia.....	25

4.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	30
4.1.	Métodos de investigación	30
4.2.	Materiales e Instrumentos.....	30
4.2.1.	Normativas.....	30
4.2.2.	Software	31
4.3.	Campos electromagnéticos en subestaciones	31
4.3.1.	Medición de CEM.....	31
4.3.2.	Cálculo de CEM	37
4.3.3.	Simulación de CEM.....	48
5.	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	53
5.1.	Aspectos generales.....	53
5.2.	Cálculo y simulación de Campo Eléctrico y Magnético.....	57
5.2.1.	Entradas y salidas de SE	57
5.2.2.	Barras de una SE.....	60
5.2.3.	Validación de Resultados	62
5.2.4.	Transformador	63
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	68
6.1.	Conclusiones.....	68
6.2.	Recomendaciones	69
7.	BIBLIOGRAFÍA	70
8.	ANEXOS	74

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1. Subestación de seccionamiento Pucará.	8
Figura 3. 2. Clasificación de las subestaciones tomando en cuenta otras características [10]. ..	9
Figura 3. 3. Sección transversal de una subestación [12].	10
Figura 3.4. Estructura y partes del átomo [16].	12
Figura 3.5. Interacciones entre cargas [16].	12
Figura 3. 6. Campo producido por cargas puntuales [16].	14
Figura 3. 7. Superposición de campo eléctricos [16].	15
Figura 3. 8. La dirección del campo eléctrico [16].	16
Figura 3. 9. Comportamiento de las líneas de campo de acuerdo al signo de la carga [16].	16
Figura 3. 10. Campo magnético de una carga [21].	18
Figura 3. 11. Dirección de la fuerza magnética sobre una partícula [16].	19
Figura 3. 12. Líneas de campo magnético [16].	20
Figura 3. 13. Flujo magnético a través de un elemento [16].	20
Figura 3. 14. El elemento de corriente dl , produce una aportación al campo magnético $d\mathbf{B}$ en el punto P [23].	22
Figura 3. 15. Dirección del campo magnético $d\mathbf{B}$ en el plano X, Y, Z producido en un alambre conductor [23].	23
Figura 3. 16. La trayectoria de integración es un círculo centrado en el conductor [23].	23
Figura 3. 17. Montaje del rotor de un generador [27].	26
Figura 3. 18. Infraestructura de una línea de transmisión [29].	27
Figura 4. 1. Procedimiento para la medición de CEM en una subestación [25]. [38].	33
Figura 4. 2. Medición del perfil lateral; (S_0 , h_1 , S_{12} , etc) representan la altura de los conductores y espaciamiento entre ellos [37].	34
Figura 4. 3. Perfiles para la medición de CEMs [37].	34
Figura 4. 4. Recorridos efectuados en una subestación [6].	35
Figura 4. 5. Mapa de contorno de campo magnético de una subestación [6].	35

Figura 4. 6. Los conductores y su imagen [32].....	38
Figura 4. 7. Componentes del campo eléctrico en el punto de cálculo M [34].	40
Figura 4. 8. Configuración escalonada de una línea de transmisión	42
Figura 4. 9. Imagen de la fase C respecto al resto de fases.	43
Figura 4. 10. Configuración Vertical de una línea de transmisión.	44
Figura 4. 11. Imagen de la fase C respecto al resto de fases.	45
Figura 4. 12. Distancias consideradas para el cálculo del CEM emitido por el Transformador [41].....	46
Figura 4. 13. Consideraciones para el cálculo de campo eléctrico [41].	47
Figura 4. 14. Proceso de ejecución de la interfaz.	48
Figura 4. 15. Ventanas de ingreso de datos y botón de cálculo.....	48
Figura 4. 16. Logotipo del software y su versión.	49
Figura 4. 17. Procedimiento para la simulación de la distribución de CEM [42].	49
Figura 4. 18. Ventanas para crear un archivo para la simulación.....	50
Figura 4. 19. Gráfico de una circunferencia que representa a un conductor.	50
Figura 4. 20. En la ventana <i>Blok Label Properties</i> se introducen los valores solicitados	51
Figura 4. 21. La versión estudiantil resuelve mallas con un máximo de 255 nodos.	51
Figura 4. 22. Distribución del campo eléctrico de un conductor.....	52
Figura 5. 1. Graficas de los perfiles de campo eléctrico.....	54
Figura 5. 2. Graficas de los perfiles de campo magnético.....	54
Figura 5. 3. Graficas de los perfiles de campo eléctrico propuestos.	55
Figura 5. 4. Graficas de los perfiles de campo magnético propuestos.	55
Figura 5. 5. Graficas resultantes de la línea de 138 kV en la interfaz.	58
Figura 5. 6. CEM bajo la entrante de la línea de 138 kV.	58
Figura 5. 7. Graficas resultantes de la línea de 69 kV en la interfaz.	59
Figura 5. 8. Distribución de CEM bajo la salida de 69kV.....	59
Figura 5. 9. Graficas resultantes de la barra de 138 kV en la interfaz.....	60
Figura 5. 10. Graficas resultantes de la barra de 69 kV en la interfaz.....	60

Figura 5. 11. Distribución de CEM debajo las barras de 138Kv	61
Figura 5. 12. Distribución de CEM debajo la barra de 69 kV.	62
Figura 5. 13. Curvas de CEM para el lado de 138 kV del transformador.	64
Figura 5. 14 Curvas de CEM para el lado de 69 kV del transformador.	64
Figura 5. 15. Distribución del CEM en los bushings del transformador.	65
Figura 5. 16. Distribución de Campo Eléctrico.	66
Figura 5. 17. Distribución de Campo Magnético.	66
Figura 5. 18. Distribución de CEM en la S/E	67

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3. 1. Niveles típicos de campos magnéticos para líneas de transmisión [28].	27
Tabla 3. 2. Ancho de la franja de servidumbre de acuerdo con el nivel de tensión del sistema.	28
Tabla 4. 1. Valores de máxima exposición a frecuencia industrial (60 Hz).	36
Tabla 4. 2. Niveles de referencia para la exposición a campos eléctricos y magnéticos de 60 Hz.	37
Tabla 5. 1. Subestaciones que constan en el estudio ambiental realizado por CELEC.	53
Tabla 5. 2. Características de la Subestación Tena.	56
Tabla 5. 3. Distancias consideradas para el cálculo y simulación	56
Tabla 5. 4. Datos de la Intensidad de Campo Eléctrico.	62
Tabla 5. 5. Datos de la Intensidad de Campo Magnético.	63

1. INFORMACIÓN GENERAL

Título:

Estudio de la distribución de campos electromagnéticos en subestaciones eléctricas de media y alta tensión.

Fecha de inicio:

Lunes 16 de noviembre del 2020

Fecha de finalización:

Viernes 12 de marzo del 2021

Lugar de ejecución:

Latacunga

Facultad que auspicia:

Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas (CIYA)

Carrera que auspicia:

Ingeniería Eléctrica en Sistemas Eléctricos de Potencia

Proyecto de investigación vinculado:

Estudios de campos electromagnéticos en sistemas eléctricos de potencia: caso provincia de Cotopaxi.

Equipo de Trabajo:

Tutor: Guamán Cuenca Wilian Patricio,

Estudiantes: Velasco Sarabia Carol Lizbeth,

Minchala Lligüi Néstor Patricio.

Área de Conocimiento:

07 ingeniería, Industria y Construcción / 071 Ingeniería y Profesiones Afines / 0713 Electricidad y Energía.

Línea de investigación:

Energías Alternativas y renovables, eficiencia energética y protección ambiental.

Sub líneas de investigación de la Carrera:

Diseño de redes y explotación de sistema eléctricos de Potencia.

2. INTRODUCCIÓN

2.1. EL PROBLEMA:

2.1.1. Situación Problémica:

Un Sistema Interconectado comprende todo el sistema eléctrico de potencia de un país, para transferirse la energía del sistema de transmisión dispone de una serie de subestaciones de transformación que alimentan las diferentes cargas siendo estos los usuarios finales e industrias, a través de los sistemas de subtransmisión y distribución, por esta razón las subestaciones se convierten en un elemento fundamental para el suministro de energía al consumidor final.

Al existir un flujo de potencia desde la generación hasta el consumidor final, todos los elementos del SEP están siendo atravesados por una carga eléctrica en movimiento, es por esta razón que se convierten en una fuente de constante generación de campo eléctrico y campo magnético. Recientemente se ha incrementado el interés por establecer los límites máximos de campos electromagnéticos a los cuales pueden exponerse los equipos y los operarios de una subestación, pudiéndose así designar los valores que puedan ser potencialmente peligrosos para la salud de las personas, esta inquietud ha llevado a desarrollar múltiples estudios que evalúan esta influencia.

Estas infraestructuras de a poco están quedando dentro del casco urbano, rodeadas de domicilios y no se dispone de datos respecto a la magnitud y distribución del campo magnético y del campo eléctrico asociado a dichos equipos.

En la actualidad no existen trabajos en el Ecuador, que profundicen en el estudio y simulación de los CEM generados por las subestaciones, así como tampoco se cuenta con una herramienta que permita determinar de manera analítica los campos eléctricos y magnéticos de subestación eléctrica.

2.1.2. Formulación del problema:

La existencia de una subestación implica la presencia de campos electromagnéticos, los cuales requieren ser evaluados en función de reglamentaciones impuestas por instituciones nacionales y/o internacionales.

2.2. OBJETO Y CAMPO DE ACCIÓN

330000 Ciencias Tecnológicas / 3306 Ingeniería y Tecnología Eléctricas / 3306.09 Transmisión y Distribución

2.3. BENEFICIARIOS:

2.3.1. Beneficiarios directos

Empresas eléctricas distribuidoras del Ecuador y CELEC EP unidad de negocio TRANSELECTRIC.

2.3.2. Beneficiarios indirectos

Personal operativo que labora en las subestaciones, la ciudadanía que se encuentra dentro de la zona de influencia de esta infraestructura eléctrica

2.4. JUSTIFICACIÓN:

La presente investigación se encuentra anclada al proyecto generativo “Estudios de campos electromagnéticos en Sistemas Eléctricos de Potencia: Caso Provincia de Cotopaxi” de la carrera de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Técnica de Cotopaxi del grupo de investigación de Sistemas Eléctricos de Potencia y en el marco de dicha investigación se considera pertinente estudiar los campos eléctricos y magnéticos que generan las subestaciones de media y alta tensión.

Las subestaciones eléctricas que conforman el SEP son un punto de enlace entre el sistema de transmisión y distribución, estas transfieren gran cantidad de energía a las industrias, comercios y residencias, cuentan con elementos que en la actualidad se desconocen los datos del campo eléctrico y magnético que estos producen, de ahí la necesidad de obtener las magnitudes de estos fenómenos los cuales permitan conocer el riesgo que se encuentran expuestos los equipos y las personas que trabajan en dicho lugar.

En el Ecuador, la presencia de una norma técnica ambiental que rige a instituciones dentro del territorio nacional, incluyendo a las entidades que administran los elementos del SEP, disponen cumplir con los niveles establecidos de emisión de CEM originados por fuentes de muy baja frecuencia, mediante la simulación de estos campos generados por una subestación previo a su construcción, permitirá evaluar los niveles y distribución de los CEM, compararlo con la normativa dispuesta por el ministerio de ambiente y tomar acciones correctivas para su cumplimiento.

2.5. HIPÓTESIS

El cálculo y simulación de los CEM en S/E permitirá determinar si su magnitud se encuentra dentro de los niveles aceptados por la regulación nacional y/o internacional.

2.6. OBJETIVOS:

2.6.1. General:

Estudiar los campos electromagnéticos en subestaciones eléctricas de media y alta tensión mediante el cálculo y simulación para determinar la distribución de estos.

2.6.2. Específicos:

Estudiar el origen, distribución e impacto de los campos electromagnéticos en sistemas eléctricos de potencia.

Evaluar el comportamiento de los campos electromagnéticos en subestaciones eléctricas de media y alta tensión.

Modelar la distribución del campo eléctrico y magnético asociados a los elementos de subestaciones eléctricas.

2.7. SISTEMA DE TAREAS

Objetivos específicos	Actividad (tareas)	Resultados esperados	Técnicas, Medios e Instrumentos
<p>Estudiar el origen, distribución e impacto de los campos electromagnéticos en sistemas eléctricos de potencia.</p>	<p>- Investigación bibliográfica de trabajos referentes a Campo Magnético y Campo Eléctrico en Subestaciones.</p> <p>- Recopilación información técnica de las subestaciones.</p>	<p>Información: definición, unidades, cálculo y antecedentes referente a campos electromagnéticos.</p> <p>Datos técnicos de las subestaciones de media y alta tensión.</p>	<p>Investigación bibliográfica: Libros Tesis Artículos Revistas tecnológicas. Normativas Informes Técnicos</p>
<p>Evaluar el comportamiento de los campos electromagnéticos en subestaciones eléctricas de media y alta tensión.</p>	<p>Procesamiento de los datos obtenidos en la investigación.</p> <p>Creación de una herramienta para el cálculo de los CEM.</p>	<p>Gráficas de comportamiento de los CEM en diferentes subestaciones.</p> <p>Metodología para el cálculo del CEM producidos por subestaciones de acuerdo con lo que plantea el libro EPRI.</p> <p>Herramienta para el cálculo analítica del campo eléctrico y magnético.</p>	<p>Excel Matlab</p>
<p>Modelar la distribución del campo eléctrico y magnético asociados a los elementos de subestaciones eléctricas.</p>	<p>Aplicación de un software para modelar los elementos que conforman una subestación.</p> <p>Determinación de la distribución de los CEM en las subestaciones.</p> <p>Validación de los datos calculados, medidos y simulados.</p>	<p>Simulación del campo eléctrico y magnético del de los elementos generadores de CEM en la subestación.</p> <p>Evaluación de la distribución de los CEM.</p> <p>Análisis de los datos obtenidos.</p>	<p>Simulación Excel Normativas</p>

3. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

3.1. ANTECEDENTES

En varias ciudades del mundo se han realizado estudios del impacto provocado por el campo eléctrico y campo magnético a la salud de las personas, sin embargo, dentro del país no se ha hecho un estudio profundo de este fenómeno, razón por la cual esta investigación busca evaluar la distribución de los campos electromagnéticos procedentes de subestaciones eléctricas de media y alta tensión.

Los niveles de los CEM provenientes de las fuentes artificiales se han incrementado continuamente en el lapso de los 50 a 100 años pasados. La mayoría de las exposiciones a los CEM vienen con el incremento del uso de la electricidad y las nuevas tecnologías. En las décadas pasadas, los efectos potenciales adversos provenientes de la exposición a los CEM sobre la salud humana han sido un tema importante de investigación. Sin embargo, se ha publicado poco acerca del impacto de los CEM sobre el medio ambiente natural terrestre y acuático [1].

En el año 2010, Red Eléctrica de España [2] emite un resumen sobre los campos eléctricos y magnéticos generados por las instalaciones eléctricas de alta tensión donde da a conocer aspectos teóricos de campos electromagnéticos, los efectos en la salud de las personas, aspectos epidemiológicos, aspectos biofísicos, además da a conocer datos de mediciones en redes de 400 kV, en el punto más aproximado a los conductores, oscilan entre 3-5 kV/m y 1-15 μ T para el campo eléctrico y campo magnético respectivamente, a medida que aumenta la distancia a los conductores la intensidad de campo disminuye muy rápidamente tal es el caso que a una separación entre el conductor y el punto de medida superior a 100 m los niveles de campo eléctrico y magnético oscilan entre 0,2 kV/m y 0,3 μ T respectivamente.

Por otra parte, la Subdirección de Salud Pública de Bizkaia [3] señala que las exposiciones típicas a los CEM justo debajo de las líneas de transmisión son: 40 μ T bajo una línea de 400 kV, 22 μ T bajo una línea de 275 kV y 7 μ T bajo una línea de 132 kV; además indica que las exposiciones a 25 metros de distancia de estas mismas líneas serían de 8,4 y 0,5 μ T, respectivamente. Entre 50 m y 100 m de distancia la intensidad de los campos es normalmente equivalente a la de zonas alejadas de las líneas eléctricas de alta tensión.

Los campos electromagnéticos producen alteraciones en la transcripción y traducción en el ADN, las síntesis de ácido ribonucleico (ARN) y proteínas, por otra parte, influyen en la

producción de hormonas, la respuesta inmune y el grado de crecimiento y diferenciación celular [4].

En el trabajo titulado “Estudio de los campos magnéticos producidos por subestaciones de distribución a 13,2 kV” [5] se entrega información teórica para y los problemas que ocasionan en equipos electrónicos y personas, para el desarrollo de dicho estudio se realizó una clasificación de las distintas técnicas para proteger los equipos electrónicos de los campos magnéticos así también se buscó información de estudios realizados en otros países de los efectos que puede causar estos campos en la salud humana

En [6] se presenta los resultados de mediciones de campo magnético realizadas en subestaciones eléctricas con niveles de tensión comprendidos entre los 115 kV y 230 kV, así como los que se presentan durante los trabajos que se realizan sobre el sistema energizado en circuitos de 13,2 kV de la Empresa de Energía del Pacífico S.A. EPSA. Igualmente hace un análisis de los valores de campo medidos, comparándolos con los niveles que a hasta ese entonces se consideraban como no peligrosos.

LABE [7] plasma el informe final respecto a la simulación de campos eléctricos y magnéticos en la subestación terminal propiedad de CONDESA S.A. en este proyecto se encontró los niveles de campo electromagnético al interior de la subestación para verificar el cumplimiento de los límites establecidos en el reglamento técnico de instalaciones eléctricas, para la ejecución de mencionado trabajo se hizo uso del software EMF Workstation con él se pudo obtener una exactitud aceptable para las zonas donde se encuentran personas, es decir a decímetros de los componentes energizados.

La Corporación eléctrica del Ecuador, CELEC EP unidad de negocio TRANSELECTRIC en el año 2012 realizó un estudio de impacto ambiental que producen las subestaciones eléctricas para determinar los niveles de campos eléctricos y magnéticos a los que están expuestos los trabajadores de cada una de las S/E y los alrededores de las mismas, se realizó la medición de la Intensidad de Campo Eléctrico, Intensidad de Campo Magnético y Densidad de Flujo Magnético de acuerdo a lo estipulado en la Norma de Radiaciones No Ionizantes de Campos Electromagnéticos, se seleccionaron puntos ubicados en los linderos, vértices de los predios y cerca de las fuentes emisoras. Para la medición de campo eléctrico se tomó a una altura de 1,5 m con relación al suelo y una distancia mínima de 2,5 m de las fuentes generadoras mientras que para el campo magnético el equipo de medición se instaló a un metro de altura y a una distancia de 2,5 m de la fuente generadora [8].

3.2. SUBESTACIONES

En los sistemas eléctricos, la energía eléctrica suele generarse de diversas formas, pero siempre se transmite al centro de carga. En la mayoría de los casos, la potencia transmitida a estos puntos supera los miles de voltios, condición necesaria para el empleo de centros de enlace entre el sistema de transmisión y la carga, a estas infraestructuras del SEP se denomina Subestaciones.

Se define a una subestación como un conjunto de dispositivos eléctricos, que forman parte de un sistema eléctrico de potencia; sus funciones principales son: transformar tensiones y derivar circuitos de potencia [9] o también para realizar alguna de las siguientes funciones transformación de la tensión, de la frecuencia, del número de fases, rectificación, compensación del factor de potencia y conexión de 2 o más circuitos [10].



Figura 3.1. Subestación de seccionamiento Pucará.

3.2.1. Clasificación

De acuerdo a [11] las subestaciones pueden clasificarse en tres tipos, estas deben cumplir con requisitos de confiabilidad, seguridad y flexibilidad.

a. Subestación de generación

La subestación de generación se utiliza como punto de conexión entre la central generadora con el sistema interconectado. Generalmente, si una planta de energía tiene importancia, que su retiro del sistema causará suspensión, inestabilidad y problemas operativos, la subestación de la planta de energía requiere un alto grado de seguridad.

b. Subestaciones de maniobra

Es un sistema que se utiliza para interconectar sistemas, o un sistema que distribuye energía a las subestaciones de transformación dentro del sistema. En este caso el principal requisito es la flexibilidad.

c. Subestaciones de transformación

Su objetivo principal es suministrar energía a sistemas con diferentes niveles de voltaje. Cuando el voltaje de salida es más alto que el voltaje de entrada, se puede llamar una subestación elevadora, de lo contrario será una subestación reductora, de distribución o para alimentar una carga.

También se puede clasificar una subestación desde otras perspectivas, estas son:

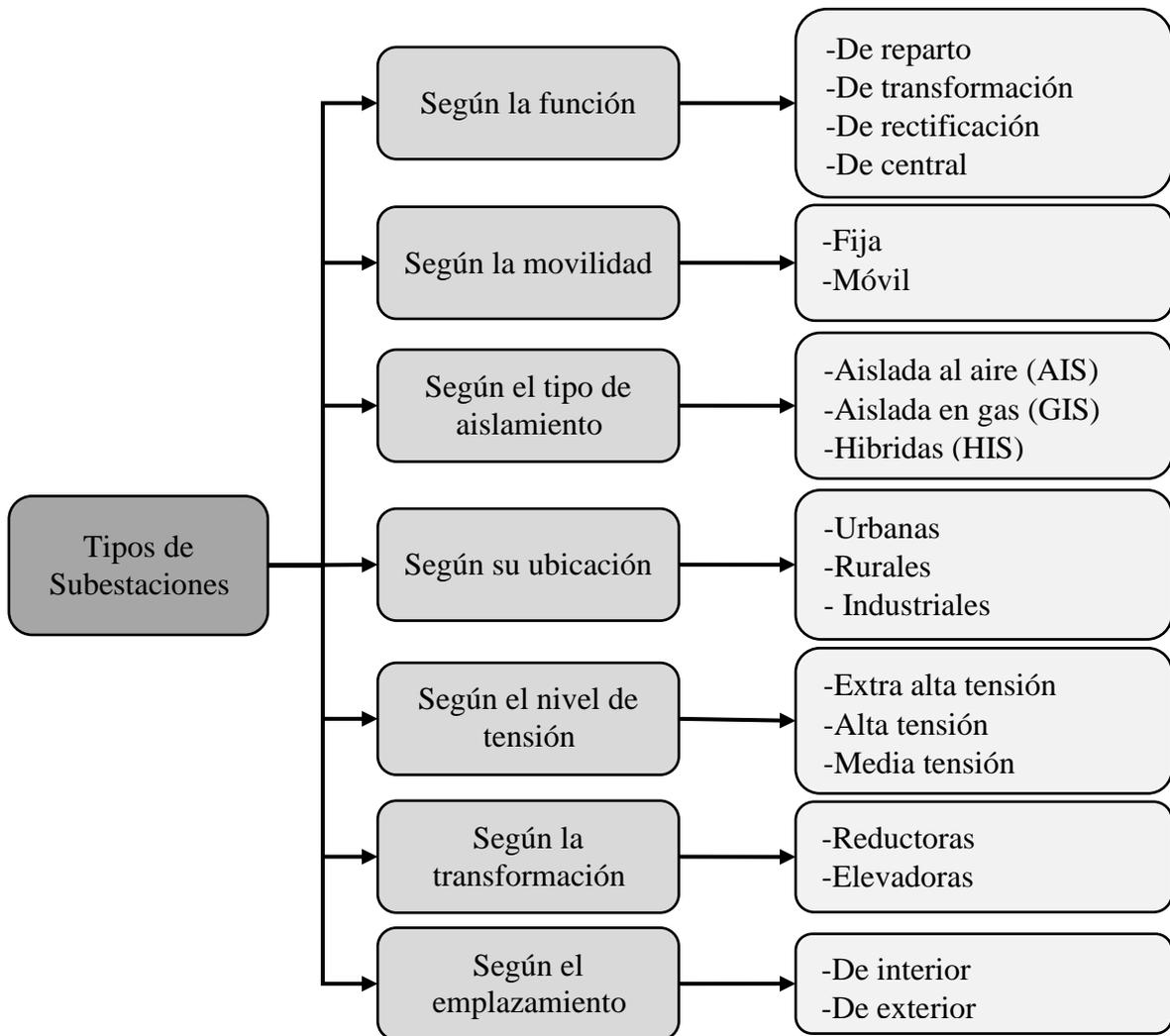


Figura 3. 2. Clasificación de las subestaciones tomando en cuenta otras características [10].

3.2.2. Elementos

Todos los elementos que conforman la subestación son importantes para su normal operación.

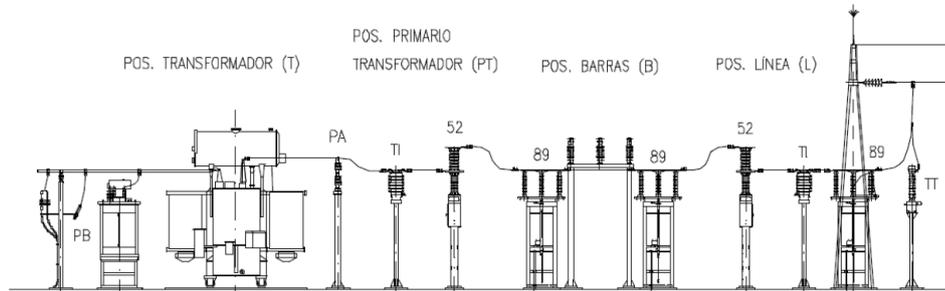


Figura 3. 3. Sección transversal de una subestación [12].

a. Transformador de potencia

Es una máquina electrostática a gran escala con la función de transferir energía eléctrica del devanado primario al devanado secundario. Bajo el principio de inducción electromagnética, puede mantener la frecuencia, y su circuito está ligado magnética y eléctricamente aislado. Los transformadores de potencia se han convertido en un componente importante de las subestaciones debido a su función, las fallas en este equipo serán muy costosas de reparar y aún más si se lo desea reemplazar [13].

b. Transformadores de medida

Están diseñados para tomar las señales del circuito de potencia y transformarla a valores estandarizados para alimentar instrumentos de medida, control o protección que requieren señales de corriente o tensión, por lo que requieren muy buena precisión en el rango cercano a la corriente nominal. Existen dos tipos de transformadores de medida: transformador de corriente TC y el transformador de potencial TP [14] [10] .

c. Disyuntores o interruptores

Un interruptor es el elemento cuya función es interrumpir el circuito en las condiciones de corriente nominal, vacío o cortocircuito, es decir, en condiciones normales o anormales [13].

d. Seccionadores

Son dispositivos que pueden abrir la continuidad de la corriente en el circuito y suelen funcionar sin carga. Su función es brindar garantías de seguridad en el aislamiento físico y visible del circuito antes de realizar trabajos (reparación o mantenimiento) [15].

e. Relés de protección

Es un dispositivo electrónico que puede ordenar la desconexión de un determinado interruptor y emitir una señal de alarma en caso de condiciones normales de funcionamiento o mal funcionamiento para proteger al sistema eléctrico [15].

f. Pararrayos

Los Pararrayos de línea son dispositivos diseñados y construidos para descargar las sobretensiones producidas por causas externas al sistema eléctrico al cual protegen [15].

g. Aisladores

Las líneas eléctricas suelen constar de conductores sin revestimiento, es decir, a través de conductores desnudos. Por lo tanto, es necesario utilizar un elemento que sirva de soporte a la línea y que tenga excelentes propiedades dieléctricas al mismo tiempo para aislar los cables de la estructura de soporte (postes, torres, etc.) que lo sostiene [15].

h. Tableros de control

Se trata de una colección de armarios modulares utilizados para instalar diferentes equipos de mecanismo de medida, protección y control de subestaciones, y además cuenta con un sistema de control instalado para realizar manualmente diferentes operaciones de control de la subestación cuando sea necesario [15].

3.3. CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS

En la antigüedad, los griegos descubrieron que cuando frotaban ámbar sobre lana, el ámbar atraía otros objetos, demostrando que hay exactamente dos tipos de carga eléctrica a las cuales Benjamín Franklin sugirió llamar carga negativa y positiva. Actualmente, decimos que, a través de esta fricción, el ámbar obtiene una carga eléctrica neta [16].

La carga eléctrica una propiedad auténtica de la materia, porque está constituida esencialmente de átomos, y estos están compuestos de electrones, protones y neutrones. Los electrones tienen carga negativa mientras que los protones tienen carga positiva y los neutrones carecen de carga [16].

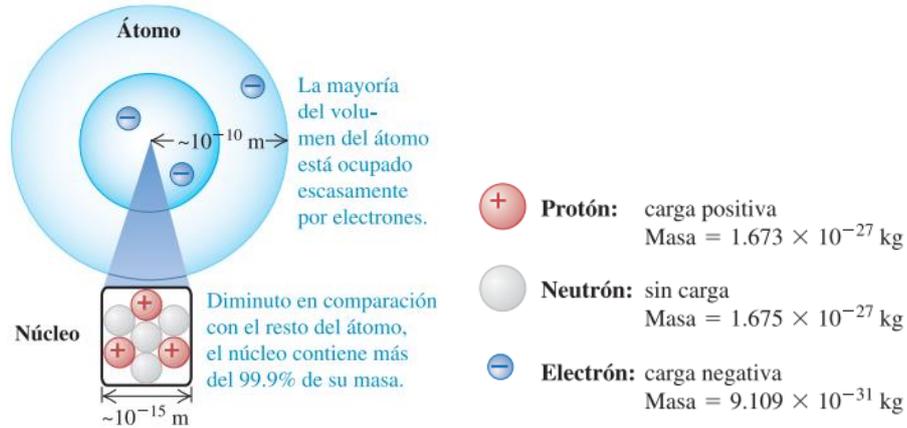
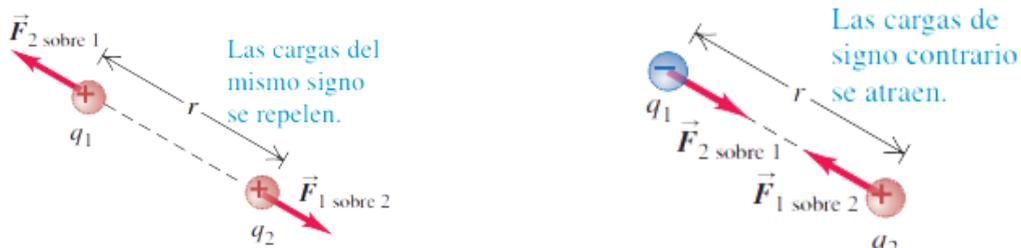


Figura 3.4. Estructura y partes del átomo [16].

Al existir una carga positiva y una carga negativa se dice que estas se atraen, mientras que si son dos cargas iguales, ya sean positivas o negativas, estas tienden a repelerse, sin embargo, hay que tener en cuenta que al mencionar cargas iguales no significa que ambas cargas sean idénticas, sino solamente comparten el mismo signo algebraico, la expresión cargas opuestas señala que los ambos objetos tienen carga eléctrica de signos distintos [16].



(a) Cargas de igual signo se repelen.

(b) Cargas de diferente signo se atraen.

Figura 3.5. Interacciones entre cargas [16].

En 1785 Charles Augustin Coulomb midió por primera vez cuantitativamente las atracciones y repulsiones eléctricas utilizando la balanza de torsión, donde llegó a la siguiente ley: La magnitud de la fuerza eléctrica entre dos cargas puntuales es directamente proporcional al producto de las cargas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que los separa, actualmente es conocida como Ley de Coulomb [16].

$$F = k \frac{|q_1 q_2|}{r^2} \quad (3.1)$$

donde \mathbf{F} es la fuerza eléctrica, q_1 , q_2 son las cargas eléctricas, k es constante de proporcionalidad o constante eléctrica y r es la distancia de separación.

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \quad (3.2)$$

ϵ_0 es la permitividad del espacio libre y su valor es:

$$\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \left[\frac{\text{C}^2}{\text{Nm}^2} \right] \quad (3.3)$$

Finalmente, la ley de Coulomb se expresa de la siguiente manera:

$$\mathbf{F} = \frac{|q_1 q_2|}{4\pi\epsilon_0 \cdot r^2} \text{ [N]} \quad (3.4)$$

La unidad de fuerza eléctrica en el sistema internacional de unidades es el Newton (N)

3.3.1. Campo Eléctrico

El concepto de campo eléctrico surge de la necesidad de explicar el fenómeno de la fuerza a distancia entre dos o más partículas, por lo que el campo eléctrico se define como el área del espacio donde se produce la magnitud física y eléctrica. Por tanto, el campo eléctrico es una fuerza exhibida por la repulsión o atracción de un cuerpo cargado. Proporciona un concepto de la intensidad de potencia que sufrirá la carga en una ubicación determinada [17].

Cualquier punto donde un cuerpo cargado se coloque sobre otro cuerpo cargado mostrará una fuerza de campo eléctrico. Si las cargas son diferentes, el campo eléctrico puede ser atraído, y si las cargas son iguales, el campo eléctrico se repele [16]. El campo eléctrico generado por la carga en cualquier punto del espacio se llama intensidad de campo y se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_0}{q_0} \left[\frac{N}{C} \right] \quad (3.5)$$

donde \vec{E} representa la intensidad de campo eléctrico, \vec{F}_0 es la fuerza eléctrica y q la carga, en el sistema internacional de unidades (S.I.) la unidad de es el Newton por Coulomb.

Matemáticamente, el campo eléctrico se describe como un vector que existe en todos los puntos del espacio. Puede definirse como la fuerza por unidad de carga sobre la carga de prueba (positiva o negativa), ecuación (3.5) [18].

Al campo eléctrico lo compararemos con la fuerza de gravedad del planeta, puesto el planeta ejerce una fuerza gravitatoria a todo el espacio que lo rodea y los individuos vivos o inertes que en ella se albergan responden a esta fuerza.

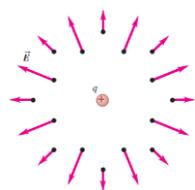
Las fuentes de campo eléctrico pueden originarse debido a varios tipos de cargas.

A. Carga Puntual Aislada

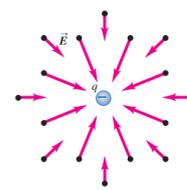
Se calcula el campo eléctrico alrededor de una carga puntual a través de la siguiente ecuación:

$$\vec{E} = \frac{|q_1 q_2|}{4\pi\epsilon_0 \cdot r^2} \quad (3.6)$$

Se denomina punto de origen a la ubicación de la carga y punto de campo donde se determina en campo es decir el punto P. En la ecuación (3.6) se introduce el vector unitario \hat{r} que indica la dirección de la recta que une cada carga. El campo producido por una carga puntual positiva apunta en una dirección que se aleja de la carga mientras el campo producido por una carga puntual negativa apunta hacia la carga.



(a) Carga puntual positiva



(b) Carga puntual negativa

Figura 3. 6. Campo producido por cargas puntuales [16].

B. Carga no Puntual

El campo eléctrico de una carga no puntual se calcula imaginando una distribución de carga subdividida en muchos elementos de carga, teniendo en cuenta las diferentes distancias desde el punto desde el que se va a calcular el campo [18].

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \int \frac{dq}{r^2} \hat{r} \quad (3.7)$$

C. Sistemas de cargas distribuidas

Cuando existe un sistema de cargas distribuidas en el espacio el campo eléctrico resultante es la suma vectorial de los campos eléctricos individuales [18].

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_0}{q_0} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \dots \quad (3.8)$$

a esto se denomina principio de superposición de campos eléctricos.

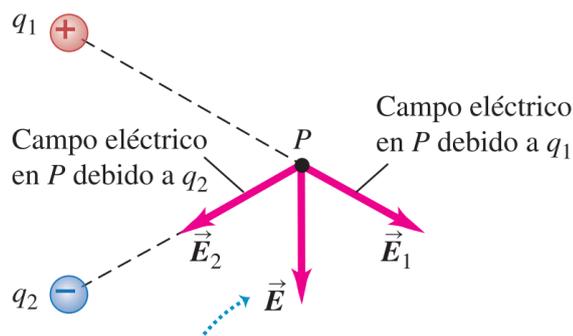


Figura 3. 7. Superposición de campo eléctricos [16].

La carga q_0 puede ser positiva o negativa. Si q_0 es positiva, la fuerza \vec{F}_0 experimentada por la carga tiene la misma dirección que \vec{E} si q_0 es negativa, \vec{F}_0 y \vec{E} tienen direcciones opuestas [16].

Debido a que un campo eléctrico no se lo puede visualizar directamente, para hacerlos parecer más reales y su interpretación son de gran ayuda las líneas de campo eléctrico. Estas son curvas imaginarias trazadas a través de una región del espacio, la dirección del campo eléctrico en cualquier punto es tangente a la línea de campo que pasa por ese punto. La dirección que tiene la curva se representa por medio de la punta de la flecha.

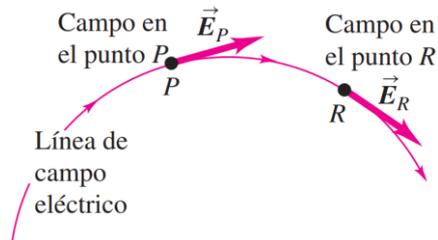
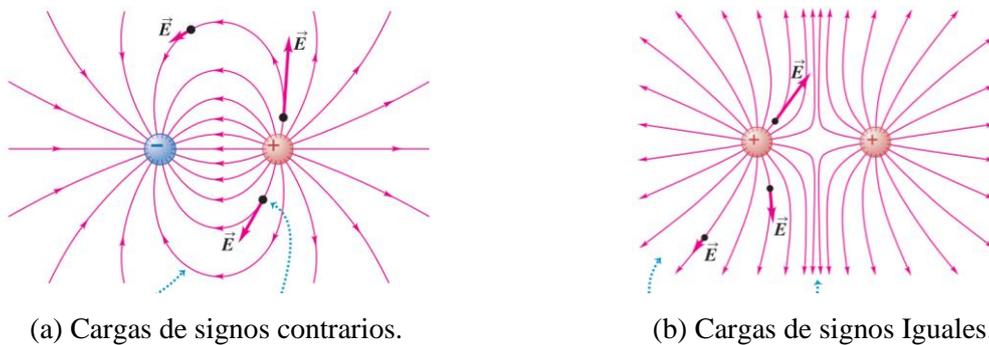


Figura 3. 8. La dirección del campo eléctrico [16].

El número de líneas por unidad de área que pasan a través de una superficie perpendicular a estas líneas es proporcional a la magnitud del campo eléctrico en dicha región, es decir las líneas de campo estarán más cerca entre sí donde el campo eléctrico es más fuerte y más separadas donde el campo eléctrico es más débil [18].

Para cargas de signos opuestos las líneas de campo se dirigen desde la carga positiva hacia la carga negativa mientras que para cargas de signos iguales las líneas de campo se rechazan [19].



(a) Cargas de signos contrarios.

(b) Cargas de signos Iguales.

Figura 3. 9. Comportamiento de las líneas de campo de acuerdo al signo de la carga [16].

Para evaluar el flujo del campo eléctrico a través de una superficie se emplea el término flujo eléctrico y es igual al producto de un elemento de área por la componente perpendicular de E , integrada sobre una superficie [16].

$$\Phi_E = E \cdot A \left[\frac{Nm^2}{C} \right] \quad (3.9)$$

donde Φ_E representa al flujo eléctrico, A mientras tanto a la superficie. la unidad de flujo en SI (Sistema Internacional de Unidades) es Newtons por metro cuadrado sobre Coulomb.

Por lo tanto, el flujo de campo eléctrico es el número de líneas de campo que pasan a través de una superficie, y el número total de líneas de campo magnético que pasan a través de la superficie es proporcional a la carga neta dentro de la superficie. Si el campo no es uniforme a la superficie se lo divide en elementos diferenciales donde el campo se pueda considerar uniforme, por tanto:

$$\Phi_E = E \cdot dS \quad (3.10)$$

$$\Phi_E = \int E \cdot dS \left[\frac{Nm^2}{C} \right] \quad (3.11)$$

El flujo de campo eléctrico que pasa a través de una superficie cerrada (llamada superficie gaussiana) es igual a la carga neta dividida por ϵ_0 , a esto se denomina Ley de Gauss.

$$\Phi_E = \int E \cdot dS = \frac{q_{int}}{\epsilon_0} \quad (3.12)$$

Cuando el flujo que atraviesa la superficie encerrada es proporcional a la carga q encerrada en ella, si la carga es positiva, el flujo es positivo, y si la carga es negativa, el flujo es negativo.

3.3.2. Campo Magnético

El magnetismo es un fenómeno que muestra fuerza de atracción o repulsión que producen los imanes y corrientes eléctricas, estos imanes poseen dos zonas opuestas que son el polo norte y sur, la fuerza de atracción se produce entre polos opuestos y la fuerza de repulsión en polos iguales [20].

Se sabe desde hace tiempo que la corriente eléctrica genera un campo magnético a su alrededor, dentro de la materia debido al movimiento de los electrones contenidos en el átomo, cada una de ellas origina un microscópico imán o también conocido como dipolo. Cuando estos pequeños imanes se orientan en todas las direcciones, sus efectos se anulan. Por otro lado, si todos los imanes se alinean actuarán como un solo imán en este caso decimos que la materia se ha magnetizado. Con el avance tecnológico muchos dispositivos y equipos poseen materiales magnéticos como generadores eléctricos, transformadores, motores eléctricos, TV, entre otros [20].

Un campo magnético es la representación matemática que describe la cantidad de fuerza ejercida en una carga en movimiento, permite describir la distribución de una fuerza magnética en el espacio, todas las fuentes del campo magnético son bipolares por naturaleza, tienen un polo norte y un polo sur [18].

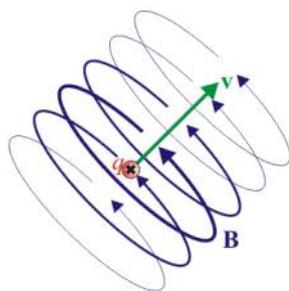


Figura 3. 10. Campo magnético de una carga [21].

Al existir una fuente de energía, habrá a su alrededor un campo magnético, que describe cómo actúan estas fuerzas magnéticas, el campo magnético es un campo vectorial, por lo que tiene módulo, dirección y sentido, el origen de este campo son las corrientes eléctricas, que se generan cuando están en movimiento, y su fuerza se mide en amperios (A / m). El estudio de los campos electromagnéticos suele utilizar la magnitud relacionada con la densidad de flujo magnético o campo magnético B , en Tesla (T) [22].

Las interacciones magnéticas pueden ser dos: una carga o corriente móvil crea un campo magnético en el espacio circundante (además de su campo eléctrico) y el campo magnético ejerce una fuerza F sobre cualquier otra carga o corriente en movimiento presente en el campo [16].

La fuerza magnética ejercida sobre una carga en movimiento tiene cuatro características esenciales, la primera es que su magnitud es proporcional a la magnitud de la carga, la segunda es que la magnitud de la fuerza también es proporcional a la intensidad del campo, la tercera es que la fuerza magnética depende de la velocidad de la partícula y cuarta indica que la fuerza magnética no tiene la misma dirección que el campo magnético, sino que siempre es perpendicular tanto al campo como a la velocidad [16].

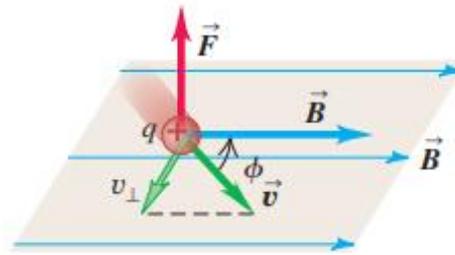


Figura 3. 11. Dirección de la fuerza magnética sobre una partícula [16].

La dirección de \vec{F} siempre es perpendicular al plano que contiene \vec{v} y \vec{B} , es decir la fuerza sobre una carga que se movería con velocidad en un campo magnético se define de la siguiente manera [16].

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B} \quad (3.13)$$

donde \vec{F} es la fuerza magnética, q la carga eléctrica, \vec{v} es la velocidad y \vec{B} es el campo magnético.

Usando líneas de campo magnético, podemos representar cualquier campo magnético, así como campo eléctrico, por lo que la línea se dibuja de manera que sea tangente al vector B en cualquier punto. Si las líneas están muy cerca, la fuerza del campo magnético es mayor, y viceversa. Las líneas convergen en la posición donde la fuerza magnética es más fuerte y si se

separan la fuerza magnética es más débil. Las dos líneas nunca se cruzan, y la dirección del campo magnético en cada punto Todos son únicos. Las líneas salen del Polo Norte y fluyen en dirección al Polo Sur [16].

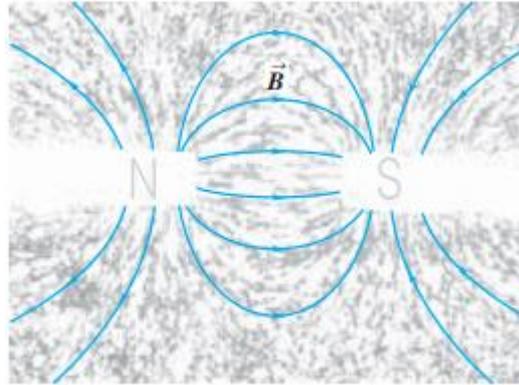


Figura 3. 12. Líneas de campo magnético [16].

Las líneas de campo magnético no son líneas de fuerza. La fuerza sobre una partícula cargada no se ejerce a lo largo de la dirección de una línea de campo [16].

De la misma manera que el campo eléctrico, el flujo magnético representa el número de líneas que cruzan la superficie en la dirección del vector que representa la superficie.

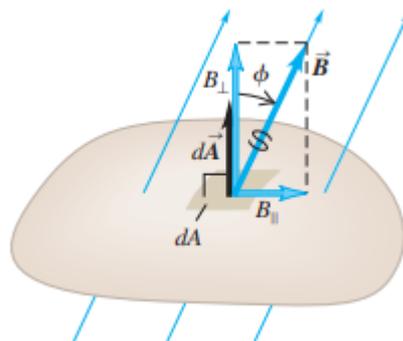


Figura 3. 13. Flujo magnético a través de un elemento [16].

El flujo magnético total a través de la superficie es la suma de las contribuciones desde los elementos de área individual:

$$\Phi_B = \int B \cdot dA = \int B \cdot \cos\phi \, dA = \int \vec{B} \cdot d\vec{A} \quad (3.14)$$

Se puede expresar en forma escalar, en el caso en que \vec{B} es uniforme sobre la superficie de un plano con área total B_{\perp} , A , y ϕ son los mismos en todos los puntos

$$\Phi_B = B_{\perp} \cdot A \cdot \cos\phi \quad (3.15)$$

donde Φ_B es el flujo magnético, B_{\perp} la densidad de flujo magnético, A es la superficie, ϕ es el ángulo entre la dirección \vec{B} y una recta perpendicular a la superficie.

En el SI la unidad para el flujo magnético es igual a la unidad del campo magnético: Un Tesla por unidad de área, a esta unidad se ha denominado Weber [Wb] en honor al físico francés Wilhel Weber.

Las ecuaciones de campo magnético se establecen de acuerdo a la siguiente ley:

a. Ley de Biot-Savart

Biot-Savart encontró una relación entre el la densidad de flujo magnético y la corriente, para calcular el campo magnético B en un punto cualquiera debido a una distribución arbitraria de corrientes, dividimos la distribución de corrientes en elementos de corriente y aplicando la ley de Biot-Savart calculamos las contribuciones dB al campo aportados por cada elemento de corriente en el punto considerado. Encontramos el campo B en ese punto, integrando las contribuciones al campo para toda la distribución [23].

En la Figura 3. 14 cogemos un diferencial de longitud $d\mathbf{l}$ sobre el alambre conductor que lleva una corriente i ; esta corriente en el diferencial $d\mathbf{l}$ produce un diferencial de campo magnético $d\mathbf{B}$ en el punto p a una distancia r , su dirección es tangente a la trayectoria circular aplicando el criterio del producto cruz entre los vectores $d\mathbf{l} \times \hat{u}$ [23].

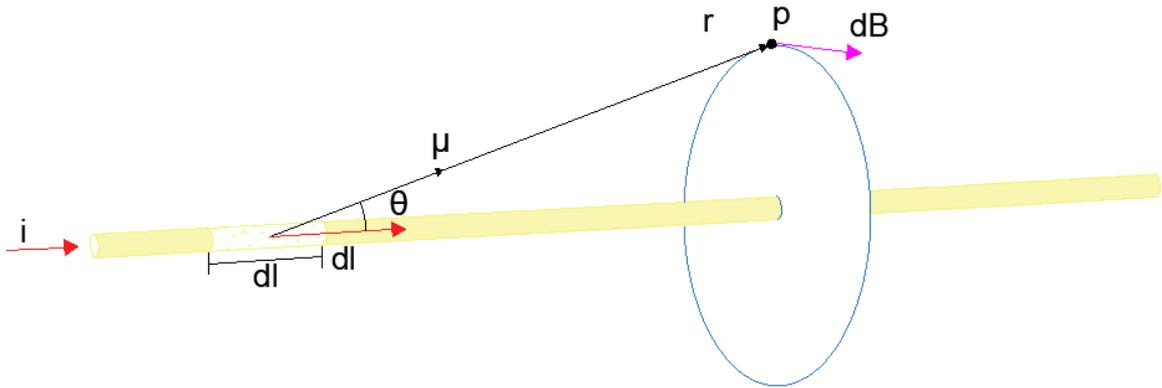


Figura 3. 14. El elemento de corriente dl , produce una aportación al campo magnético dB en el punto P [23].

Para calcular el diferencial del campo magnético $d\mathbf{B}$ en el punto p utilizamos la fórmula de la ley de Biot-Savart que se muestra a continuación:

$$d\mathbf{B} = \frac{\mu_0 i}{4\pi} \cdot \frac{d\mathbf{l} \times \boldsymbol{\mu}}{r^2} \quad (3.16)$$

Siendo $\boldsymbol{\mu}$ un vector unitario que va dirigido desde el diferencial de longitud de dl hasta el punto p en el cual se requiere calcular $d\mathbf{B}$ y θ es el ángulo entre el vector unitario y el dl . La dirección $d\mathbf{B}$ es el vector de $d\mathbf{l} \times \boldsymbol{\mu}$. En la **Figura 3. 14** el vector $d\mathbf{B}$ forma un ángulo de 90° con el vector $\boldsymbol{\mu}$. El vector $d\mathbf{B}$, siempre forman un ángulo recto entre $\boldsymbol{\mu}$ y $d\mathbf{l}$ tal como se muestra en la **Figura 3. 15**. La magnitud de $d\mathbf{B}$ está dada por la siguiente expresión [23]:

$$d\mathbf{B} = \frac{\mu_0 i}{4\pi} \cdot \frac{dl \sin\theta}{r^2} \quad (3.17)$$

el vector unitario $\boldsymbol{\mu}$ está en la misma dirección y sentido que el vector r , entre estos dos vectores forman un ángulo θ . El campo resultante en el punto p se encuentra integrado en esta ecuación, es decir [23]:

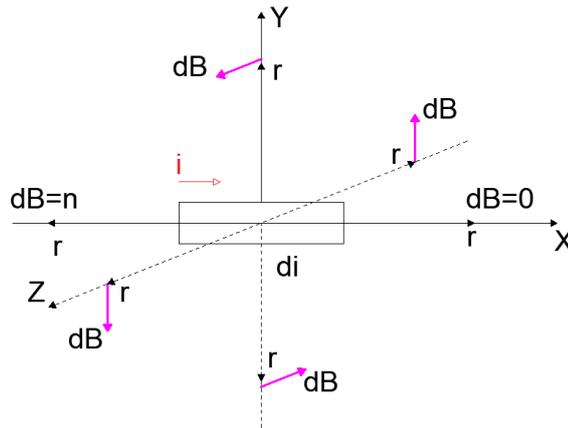


Figura 3. 15. Dirección del campo magnético dB en el plano X, Y, Z producido en un alambre conductor [23].

b. Ley de Ampere

Para el campo eléctrico en situaciones en las que había una distribución de carga con un alto grado de simetría era más fácil utilizar la ley de Gauss para encontrar \vec{E} , así mismo, mismo para obtener con más facilidad los campos magnéticos generados por distribuciones de corriente existe una ley denominada Ley de Ampere. La Ley de Ampere esta formulada no en términos del flujo magnético, si no de la integral de línea de \vec{B} alrededor de una trayectoria cerrada [16]:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} \tag{3.18}$$

Para evaluar esta integral, la trayectoria se divide en segmentos infinitesimales $d\vec{l}$, para cada uno de los cuales se calcula el producto escalar de $\vec{B} \cdot d\vec{l}$ y se suman los resultados.

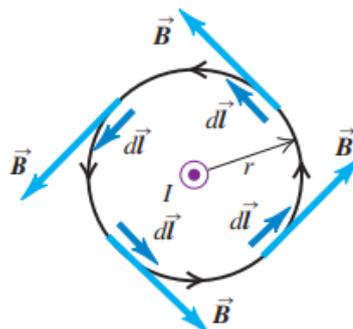


Figura 3. 16. La trayectoria de integración es un círculo centrado en el conductor [23].

La ley de Ampere establece que la integral de línea de $\vec{\mathbf{B}}$ alrededor de cualquier trayectoria cerrada es igual a μ_0 multiplicado por la corriente neta a través del área encerrada por la trayectoria, el sentido positivo de la corriente se determina mediante la regla de la mano derecha.

$$\oint \vec{\mathbf{B}} \cdot d\vec{\mathbf{l}} = \mu_0 I_{\text{enc}} \quad (3.19)$$

3.3.3. Ecuaciones de Maxwell

Evidentemente, utilizando las ecuaciones de Maxwell, propuesta por James Clerck Maxwell en 1873, podemos resumir las leyes correspondientes a Gauss, Coulomb, Ampere y Faraday desde otra perspectiva. A partir de las mismas se describen los fenómenos electromagnéticos tales como [24]:

a. Densidad de carga y campo eléctrico

La ley de carga estática de Coulomb en el vacío corresponde a la primera ecuación de Maxwell, que describe el comportamiento del campo eléctrico debido a la carga estática.

$$\oint \vec{\mathbf{D}} \cdot d\vec{\mathbf{A}} = Q_{\text{encerrada}} \quad (3.20)$$

b. Estructura del campo magnético.

La segunda ecuación de Maxwell muestra que es imposible separar los polos magnéticos del imán, en este sentido se ha comprobado que las líneas del campo magnético no divergen de ningún punto ni convergen a ningún punto, es decir, su divergencia es cero.

$$\oint_S \vec{\mathbf{B}} \cdot d\vec{\mathbf{A}} = 0 \quad (3.21)$$

Similar a la forma integral del campo eléctrico, esta ecuación solo es válida cuando la integral se define en una superficie cerrada, lo que significa que el flujo magnético que pasa a través de la superficie cerrada es siempre cero [25].

c. Variación de flujo magnético y campo magnético

La tercera ecuación vincula los campos eléctrico y magnético para producir un voltaje que cambia el flujo magnético a través de una superficie determinada.

$$\oint_C E \cdot dL = -\frac{d}{dt} \oint_S B \cdot dA \quad (3.22)$$

La ecuación anterior corresponde a la ley de inducción electromagnética de Faraday, y su signo menos se explica por la ley de conservación de energía de Lenz [25].

d. La fuente de campo magnético

Inicialmente, la ley de Ampere estableció la relación entre el campo magnético y la corriente que genera el campo magnético. Sin embargo, Maxwell introdujo un término adicional correspondiente a la corriente de desplazamiento. En este sentido, la ley de Ampere-Maxwell establece que un campo eléctrico variable en el tiempo implica la presencia de un campo magnético en el mismo lugar. Esta contribución permitió a las personas predecir la existencia de propagación de ondas electromagnéticas, que luego fue confirmada por Hertz.

3.4. CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

Toda carga eléctrica genera un campo eléctrico y toda carga eléctrica en movimiento un campo magnético [25]. Al generar, transportar, distribuir o utilizar la electricidad se producen campos eléctricos y campos magnéticos a muy baja frecuencia, es decir a frecuencia industrial (50 Hz o 60 Hz). El campo eléctrico está relacionado con la tensión del sistema, este no cambia significativamente con el tiempo, su variación se produce únicamente entre una distancia y la fuente, mientras que el campo magnético varía tanto en el tiempo como en el espacio, al estar relacionado con la corriente [6].

En los componentes SEP, debido a las características de las ondas de radiación electromagnética, sus CEM pueden superponerse o cancelarse entre sí. Cuando la radiación de

dos fuentes está en fase, los picos de cada ciclo aparecen al mismo tiempo, y estos campos se suman, pero si las fuentes están desfasadas, una fuente alcanzará su máxima intensidad en una dirección en un instante, y la otra fuente Alcanza su máxima fuerza en la dirección opuesta. Si la fuerza de los campos magnéticos de las dos fuentes es la misma, estos campos magnéticos se cancelarán entre sí y la medición del campo magnético será cero [25].

A. CEM en Centrales de Generación

En las centrales el generador convierte energía mecánica en energía eléctrica, la energía mecánica proviene del movimiento de una turbina, accionada dependiendo del tipo de central por vapor de agua, aire o agua. Para generar una corriente eléctrica se hace girar una espira dentro de un campo magnético y con ello se produce una variación del flujo de dicho campo a través de la espira, por lo que entre los bornes de la máquina aparece una diferencia de potencial o fuerza electromotriz inducida, a esto se denomina ley de Faraday [26].



Figura 3. 17. Montaje del rotor de un generador [27].

Además de los principios electromagnéticos aplicados para la generación de potencia, los sistemas de autoexcitación y sistemas auxiliares de las centrales constan de transformadores, barras, conductores que ayuda al funcionamiento adecuado del conjunto turbina-generador, conjuntamente con los elementos conductores que evacúan la potencia desde los bornes de la máquina hasta los transformadores de la subestación de generación son también elementos que emiten campos electromagnéticos.

B. CEM en Líneas de Transmisión

El voltaje y corriente en los conductores de una línea de transmisión implica la presencia de campos eléctricos y magnéticos alrededor del conductor a frecuencias bajas de 50 Hz o 60 Hz,

el campo eléctrico puede variar dependiendo de las características de la línea, esto es, número de conductores por fase, diámetro del conductor, número de circuitos, disposición geométrica del conductor, entre otros. Por otro lado, la intensidad del campo magnético dependiendo de la magnitud de corriente que pasa por los conductores [18] [20].

Las exposiciones típicas a los CEM justo debajo de las líneas de transmisión son:

Tabla 3. 1. Niveles típicos de campos magnéticos para líneas de transmisión [28].

Niveles típicos de campos magnéticos en μT para líneas de transmisión.						
Tipo de línea.	Medida	Niveles máximos	Distancia desde las líneas			
			15	30	60	90
115 kV	Promedio	3	0,7	0,2	0,04	0,02
	Peak	6,3	1,4	0,4	0,09	0,04
230 kV	Promedio	5,8	2	0,7	0,18	0,08
	Peak	11,8	4	1,5	0,36	0,16
500 kV	Promedio	8,7	2,9	1,3	0,32	0,14
	Peak	18,3	6,2	2,7	0,67	0,3



Figura 3. 18. Infraestructura de una línea de transmisión [29].

En el Ecuador las empresas públicas que presentan el servicio público de energía eléctrica podrán establecer servidumbre destinadas a la construcción de líneas de transmisión, las distancias de franja de servidumbre¹ varían en función del voltaje de la línea [30]:

¹ Es la proyección sobre el suelo de la faja ocupada por los conductores más la distancia de seguridad [30].

Tabla 3. 2. Ancho de la franja de servidumbre de acuerdo con el nivel de tensión del sistema.

Voltaje [kV]	Ancho de la franja [m]
69	16
138	20
230	30
500	60

La disminución con la distancia es importante, la exposición decrece con el cuadrado de la distancia [31].

En los hogares que no están situados cerca de líneas de conducción eléctrica la intensidad de este campo de fondo puede ser de $0,2 \mu\text{T}$ y la intensidad de campo eléctrico suele ser menor de 30 V/m .

C. CEM en Subestaciones

La subestación es un componente clave en la operación y confiabilidad del sistema eléctrico de potencia y es utilizado como punto de conexión y conmutación para líneas de transmisión, alimentadores de distribución, circuitos de generación de energía y transformadores, sin embargo, estos elementos producen campos eléctricos y magnéticos de frecuencia industrial, su magnitud dependerá de varios factores como son los geométricos, su diseño, voltaje de trabajo, potencia, transporte, disposición de elementos, número de conductores, distancia entre conductores entre otros [25].

Las subestaciones están conformadas por elementos importantes que necesitan de una inspección y mantenimiento de forma periódica, los operarios que realizan estas labores están expuestos a campos eléctricos y magnéticos significativos, los CEM en el exterior de las subestaciones eléctricas comúnmente son más intensos. Las fuentes que provocan campo magnético de valores significativos son los barrajes. Las líneas áreas o subterráneas, entrantes y salientes, los transformadores de potencia y los equipos de patio [6].

Valores típicos para subestaciones de transmisión, para subestaciones de 245 kV a 400 kV tienen un valor típico de $10 \mu\text{T}$, mientras que, para subestaciones de distribución, con valor de voltaje de 11 kV , tienen un valor de $1,6 \mu\text{T}$ [28].

El cálculo de los valores de los campos eléctricos y magnéticos de baja frecuencia en redes e instalaciones eléctricas suele estar limitado por la configuración, para las cuales las fuentes de un campo pueden ser bastante simplificadas. Por lo general, al calcular, se observan todas las emisiones relevantes de varios suplementos para estimar su contribución al campo de

producción [32]. Debido a la distinta naturaleza de los elementos y ya sea por su construcción o por la función que desempeñan, se clasifican en 3 categorías de elementos emisores de CEMs, la primera categoría son las líneas aéreas y circuitos que conectan a transformadores de potencia y embarrados, en segundo lugar, están las líneas o conducciones subterráneas, finalmente aparecerán los transformadores de potencia. De esta clasificación no se toma en cuenta cables de medida y de protección pues no se considerarlos como principales generadores de campo magnético debido a que la magnitud de la corriente que circula por ellos está en el orden de 100 a 300 veces inferior a las corrientes por los componentes mencionados anteriormente [33].

La influencia del campo eléctrico en la subestación es del mismo tipo que la influencia del campo eléctrico cerca de la línea de transmisión. Al diseñar una nueva subestación, el campo eléctrico de las subestaciones existentes es una referencia útil. El campo eléctrico a un metro sobre el suelo se puede describir fácilmente mediante la línea de contorno del campo eléctrico dibujada en el plano de la subestación. El mapa de contorno es una forma conveniente de mostrar la distribución del campo eléctrico de tierra en el área de la subestación [34].

El área de trabajo tiende a tener un campo eléctrico más bajo. Por ejemplo, si el cabezal del interruptor está desactivado para mantenimiento, el área alrededor del cabezal del interruptor se hará más pequeña a menos que estén cerca de un bus eléctrico. El campo eléctrico cerca de la subestación es desigual. Todas las estructuras de soporte están al potencial de tierra y protegen áreas cercanas al suelo. El campo eléctrico máximo se produce a una distancia de varios metros de la fase exterior. Al diseñar una subestación con una altura de bus más alta, se puede reducir el campo eléctrico [34].

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN

Para poder realizar este proyecto se requiere aplicar el método de investigación deductivo, este método se usará para el análisis de metodologías y procedimientos para el cálculo de los CEMs en S/E de media y alta tensión, además con la ayuda del método descriptivo se realizará la recolección, tabulación y posterior análisis de los datos, a través de una investigación bibliográfica mediante el análisis de fuentes bibliográficas, se apoya teóricamente, a partir de información de fuentes secundarias, utilizando textos, libros, guías, folletos, revistas, artículos, tesis y normativa consolidada, para el cálculo, medición y simulación de campos eléctricos y magnéticos presentes en una subestación.

4.2. MATERIALES E INSTRUMENTOS

4.2.1. Normativas

Para el desarrollo del presente proyecto se utilizó diferentes normas técnicas las cuales han sido elaboradas por organismos competentes aplicados tanto a líneas de transmisión y subestaciones de media y alta tensión.

a) ICNIRP

Es un organismo vinculado con la Organización Mundial de la Salud, cuya finalidad es investigar los peligros que se pueden asociar con las radiaciones no ionizantes, sugerencias y recomendaciones basadas en diversos resultados de laboratorio y estudios epidemiológicos estableciendo así los criterios básicos de exposición.

b) IEEE Std 644-1994

Esta normativa tiene el propósito de aplicar el procedimiento para la medición de campos eléctricos y magnéticos sobre las líneas de transmisión, también puede ser aplicado a mediciones en las cercanías de otros conductores y en subestaciones eléctricas. La norma indica que las mediciones pueden realizarse en dos perfiles, uno longitudinal y lateral.

c) TULSMA

La normativa para el Sector de Infraestructura: Telecomunicaciones y Eléctrico, se contempla en el Anexo 10 y establece: “La Norma de Radiaciones No Ionizantes de Campos Electromagnéticos y Requerimientos mínimos de seguridad para exposición a campos eléctricos y magnéticos de 60 Hz” se constituye en el Libro VI de la Calidad Ambiental del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente, además forman parte

de la Normativa Técnica Ambiental para la prevención y control de la contaminación. Se ha determinado que debe aplicarse a subestaciones, sistemas de transmisión de energía, edificios, torres, postes, cables, transformadores de potencia y cualquier otro componente que se utilice para la generación, transmisión, distribución y uso de energía eléctrica; con el fin de asegurar al público y en el territorio nacional Salud y seguridad de los trabajadores expuestos a radiaciones no ionizantes.

d) Informe UNE-CLC/TR 50453 IN

El informe denominado “Evaluación de los campos electromagnéticos alrededor de los transformadores de potencia” proporciona una guía del procedimiento utilizado para el cálculo del campo eléctrico y campo magnético que se ha tenido en cuenta para los transformadores de potencia, separando a su vez el origen de estos en dos fuentes distintas, conexiones a las bornas de alta y baja tensión y los arrollamientos internos. El documento empieza relacionando las corrientes trifásicas para comenzar con el cálculo para el caso del campo magnético y la tensión más elevada del sistema para el campo eléctrico.

4.2.2. Software

A partir de ecuaciones matemáticas se desarrollará una herramienta utilizando el editor de interfaces de usuario del software MATLAB, este usa el lenguaje de programación M, este lenguaje es interpretado, y puede ejecutarse tanto en el entorno interactivo, como a través de un archivo de script (archivos *.m). Permite operaciones de vectores y matrices, funciones, etc., con el objetivo de obtener la magnitud del campo eléctrico y campo magnético.

La simulación se la desarrollará mediante uso del software *QuickField Student Edition 6.4*, el cual permite mediante su paquete de Análisis de Elementos Finitos la simulación visual de procesos electromagnéticos, con respecto a la visualización de resultados, *QuickField*, permite un análisis en diferentes formas gráficas como líneas de campo, mapas multicolores, entre otros.

4.3. CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS EN SUBESTACIONES

4.3.1. Medición de CEM

La sociedad en general está expuesta a varios campos eléctricos y magnéticos complejos de diferentes frecuencias, los efectos que provocan estos campos sobre la salud de las personas han sido un tema importante que la empresas eléctricas deben responder a las inquietudes de la sociedad y están relacionados principalmente con la transmisión y el uso de energía eléctrica en frecuencias de 50/60 Hz y son motivo de preocupación debido a lo perjudicial que pueden ser para la salud [5]. Con la creación del proyecto internacional CEM se estableció que un

efecto biológico que se produce cuando la exposición a las ondas electromagnéticas provoca algún cambio fisiológico perceptible o detectable en el sistema biológico mientras un efecto perjudicial para la salud que se produce cuando el efecto biológico sobrepasa la capacidad normal de compensación del organismo y origina así algún proceso patológico [25]. Los principales efectos biológicos que producen los CEMs son calentamiento, alteración de las reacciones químicas o inducción de corrientes eléctricas en los tejidos, sin embargo se estima que estas corrientes son inferiores a las producidas naturalmente por el cerebro, los nervios y el corazón [35] [21].

Las subestaciones eléctricas están en la obligación de realizar mediciones de los CEM que producen los diferentes elementos, para poder medir campos eléctricos y magnéticos se deben seguir procedimientos para asegurarse de que los valores medidos no sean incorrectos. Existen estándares internacionales que hacen referencia a métodos apropiados para medir estos campos como *IEEE Standard 644-1994 Procedures for Measurement of Power Frequency Electric and Magnetic Fields From AC Power Lines*, esta considera que la medición de la intensidad del campo eléctrico y magnético debe realizarse a una altura de 1 metro sobre el suelo y trazándose un perfil lateral y otro longitudinal [36] [37].

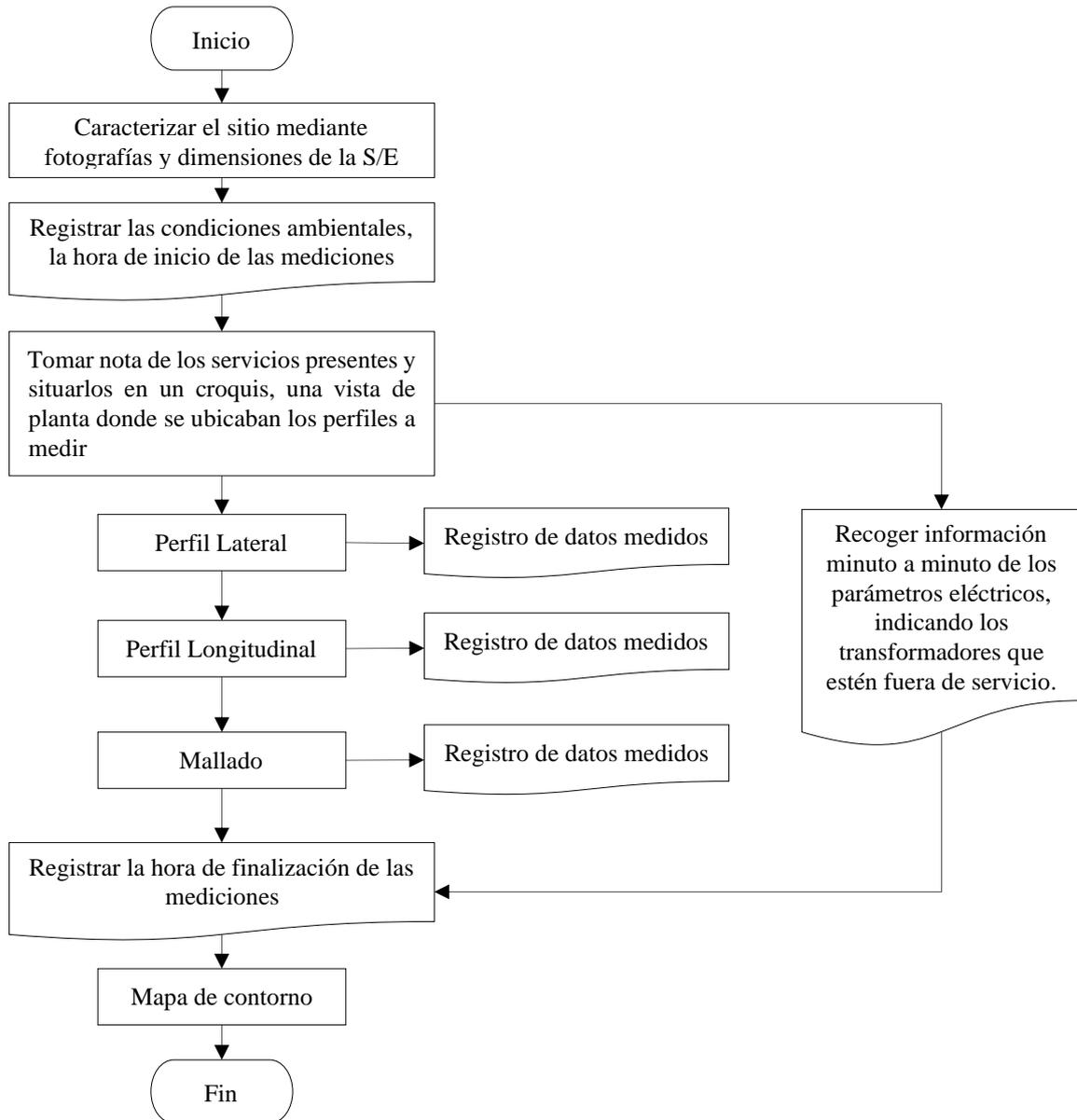


Figura 4. 1. Procedimiento para la medición de CEM en una subestación [25]. [38].

a) Perfil Lateral

El perfil lateral de la intensidad de campo eléctrico deberá medirse en intervalos seleccionados, en una dirección perpendicular a la línea, a un metro sobre el nivel del suelo, las mediciones de los perfiles laterales deberán empezar desde el centro de la línea en el área de interés y deberán realizarse a una distancia lateral de por lo menos 30 metros de la ubicación del último conductor. Igualmente deberán realizarse por lo menos cinco mediciones espaciadas debajo de los conductores. Es recomendable que el perfil sea graficado en el campo para determinar si se ha obtenido un detalle adecuado de la intensidad de campo eléctrico [36] [37].

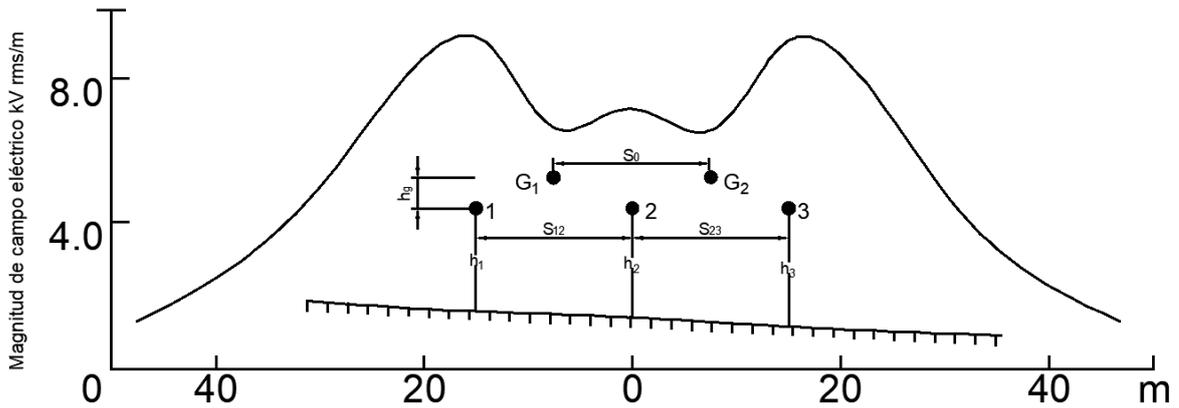


Figura 4. 2. Medición del perfil lateral; (S_0 , h_1 , S_{12} , etc) representan la altura de los conductores y espaciamiento entre ellos [37].

b) Perfil Longitudinal

El perfil longitudinal de la intensidad de campo deberá medirse en el punto donde se obtuvo la máxima lectura durante la medición previa en el perfil lateral. Las mediciones se realizarán a un metro sobre el nivel del suelo y al menos en cinco incrementos consecutivos separados de igual manera [36] [37].

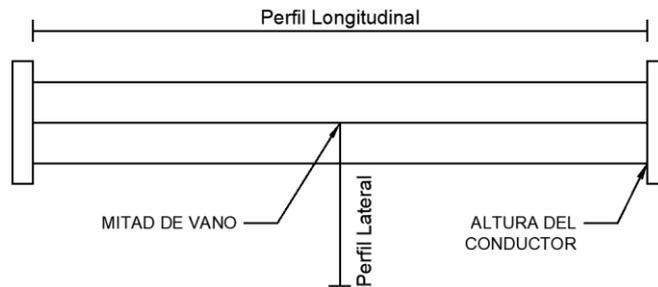


Figura 4. 3. Perfiles para la medición de CEMs [37].

c) Mallado

Por ser la subestación un lugar donde se encuentran una gran cantidad de equipos eléctricos, la variación espacial del campo magnético es una de las características más importantes a determinar. Para conocer su variación en el espacio se emplea el método del mapeo, que consiste en realizar un recorrido a lo largo y ancho del sitio, identificando las zonas con iguales valores de campo [6].

En las zonas de abundancia de elementos eléctricos (bajo embarrados, cerca de los transformadores de potencia y apartamento, etc.), se debe tomar al menos, una medida cada 5 m. formando una malla mientras que en las zonas exteriores o interiores con baja densidad- el criterio es el mismo, pero ampliando a una toma cada 10 m (malla de 10 x 10) [38].

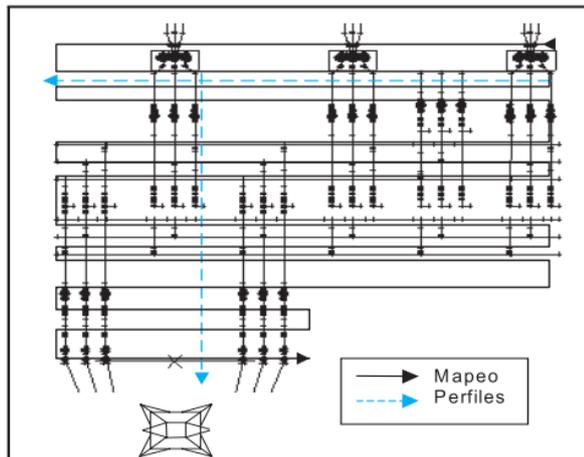


Figura 4. 4. Recorridos efectuados en una subestación [6].

d) Mapa de contorno

Muestra líneas que incluyen puntos con iguales valores de campo y separan puntos de valor más alto de puntos de valor más bajo [6].

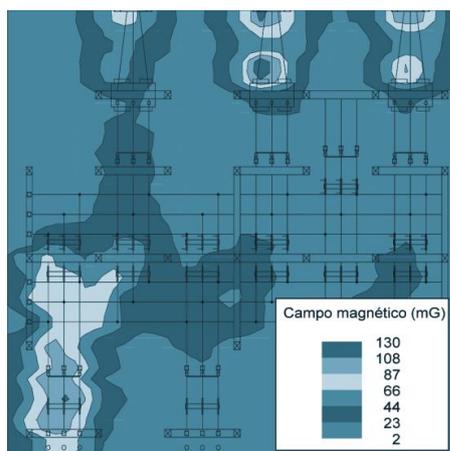


Figura 4. 5. Mapa de contorno de campo magnético de una subestación [6].

La distancia entre el medidor de intensidad de campo eléctrico y el operador deberá ser de por lo menos 2,5 m. Esta distancia reducirá los efectos de proximidad (sombra del campo

eléctrico) entre el 1,5% y 3%, considerando un operador de 1,8 m de altura, para realizar la medición se debe considerar las horas de exposición poblacional/ocupacional mínima, además se debe tomar en cuenta los límites físicos de una subestación, y en que se encuentren viviendas o asentamientos humanos [36] [39].

a. Regulación Internacional

La Comisión Internacional para la Protección contra la Radiación No Ionizante (ICNIRP), es un organismo vinculado a la Organización Mundial de la Salud (OMS), cuya función es la de investigar los peligros que se pueden asociar con las diferentes formas de radiaciones no ionizantes (RNI). Mediante la publicación de recomendaciones internacionales para limitar la exposición a campos eléctricos, magnéticos y electromagnéticos (CEM) en el rango de 0 a 300 GHz [25].

En la Tabla 4. 1 se presentan las normas y regulaciones más reconocidas, sobre los niveles de máxima exposición a campos magnéticos a frecuencia industrial (60 Hz), recomendados para ambientes ocupacionales y para el público en general [6].

Tabla 4. 1. Valores de máxima exposición a frecuencia industrial (60 Hz).

Estándar	Campo [mG]	Comentario
International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, 1998	4167,7	Ocupacional
	833,3	Público
European Prestandar ENV 50166-1 (1995)	1 333,33	Ocupacional
	5 333,33	Público
International Radiation Protection Association (IRPA)	5 000	Ocupacional
	1 000	Público
(National Resources Planning Board) NRPB, Reino Unido	16 000	Ocupacional
	16 000	Público
American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH)	10 000	Ocupacional

b. Regulación Nacional

El Ministerio del Ambiente en coordinación con el Consejo Nacional de Electricidad como Autoridad Ambiental de Aplicación Responsable, conforme lo establece la Ley de Régimen del Sector Eléctrico y el Reglamento Ambiental para Actividades Eléctricas; publicó en el Registro Oficial No. 41, emitido el 14 de mayo del 2007, el Reglamento con las Normas Técnicas

Ambientales para la Prevención y Control de la Contaminación Ambiental para los Sectores de Infraestructura: Eléctrico, Telecomunicaciones y Transporte (Puertos y Aeropuertos) (Ministerio del Ambiente). Estas normativas se constituyen en anexos del Libro VI de la Calidad Ambiental del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente (TULSMA) donde se establecen los niveles de referencia para la exposición a campos eléctricos y magnéticos de 60Hz [25].

Tabla 4. 2. Niveles de referencia para la exposición a campos eléctricos y magnéticos de 60 Hz.

Tipo de Exposición	Intensidad Campo Eléctrico (E) [$V \cdot m^{-1}$]	Intensidad Campo Magnético (H) [$A \cdot m^{-1}$]	Densidad de Flujo Magnético (B) [μT]
Público en General	4 167	67	83
Personal Ocupacionalmente Expuesto	8 333	333	417

4.3.2. Cálculo de CEM

Para el cálculo de los campos eléctricos dentro de la subestación se tomará los elementos que mayor campo generaran:

4.3.2.1. Líneas entrantes, salientes y embarrados.

a) Configuración plana

En general el campo eléctrico generado por las por las líneas se pueden calcular mediante un análisis bidimensional simplificado basando su análisis en que las cargas solo están en las superficies de los conductores, los conductores de las líneas pueden simularse como un conjunto de conductores cilíndricos paralelos entre sí, el medio dieléctrico entre los conductores y la tierra es igual a la permeabilidad del espacio libre. Las cargas distribuidas en la superficie de un conductor son simuladas por una carga colocada en el centro del conductor. Las cargas en la superficie de la tierra son simuladas por cargas de imagen de igual magnitud, pero con polaridad opuesta a las cargas en los conductores. Estas cargas de imagen se colocan debajo de la superficie de la tierra como si la tierra fuera un espejo perfecto que refleja los conductores[34].

Cada fase se reduce a un solo conductor equivalente cuyo diámetro equivalente se calcula con la siguiente ecuación:

$$d_{eq} = d_b \cdot \sqrt[n]{\frac{n \cdot d}{d_b}} \quad (4.1)$$

$$d_b = \frac{s}{\text{sen}\left(\frac{\pi}{n}\right)} \quad (4.2)$$

donde d_b es el diámetro del haz de conductores, n es el número de subconductores del paquete, d es el diámetro del haz y d_{eq} es el diámetro equivalente.

Los coeficientes de potencial para un sistema de conductores paralelos tienen expresiones simples:

$$P_{AA} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \cdot \ln \frac{4H_A}{d_{eq}} \quad (4.3)$$

Los coeficientes de potencia mutuo se calculan utilizando la siguiente ecuación:

$$P_{AB} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \cdot \ln \frac{S'_{AB}}{S_{AB}} \quad (4.4)$$

donde P_{aa} es el coeficiente de potencial propio del conductor A, P_{AB} es el coeficiente de potencial mutuo entre los conductores A y B, d_{eq} diámetro equivalente del conductor A, H_A es la altura sobre el suelo y el conductor A, S_{AB} es la distancia entre el conductor A y el conductor B y S'_{AB} es la distancia entre el conductor A y la imagen del conductor AV véase la Figura 4. 6.

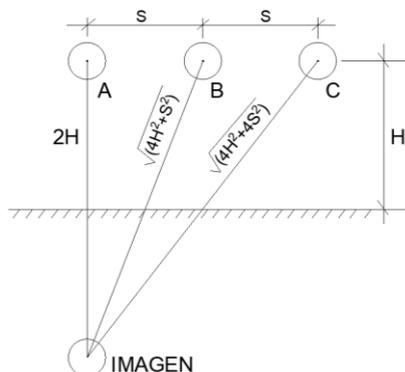


Figura 4. 6. Los conductores y su imagen [32].

$$P_{AA} = P_{BB} = P_{CC} \quad (4.5)$$

$$P_{AB} = P_{BA} = P_{BC} = P_{CB} \quad (4.6)$$

$$P_{AC} = P_{CA} \quad (4.7)$$

Los coeficientes de potencial forman una matriz cuadrada denominada P [34]:

$$[P] = \begin{bmatrix} P_{AA} & P_{AB} & P_{AC} \\ P_{BA} & P_{BB} & P_{BC} \\ P_{CA} & P_{CB} & P_{CC} \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

El campo eléctrico en un punto del espacio puede ser calculado a partir de las cargas. Las cargas se calculan conociendo el voltaje, V_k , aplicado a cada conductor. Se requiere para resolver la ecuación matricial [34] [40]:

$$[Q_r] = [P]^{-1} \cdot [V_r] \quad \text{y} \quad [Q_i] = [P]^{-1} \cdot [V_i] \quad (4.9)$$

$$[C] = [P]^{-1} \quad (4.10)$$

Los componentes reales e imaginarios de los voltajes que se utilizarán en la ecuación **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, donde se evalúan suponiendo que los voltajes trifásicos están separados 120° referidos al ángulo de fase a los del voltaje de fase central [34]:

$$v_r(t) = \sqrt{2} \cdot V_{3\phi} \cdot \cos(\varphi) \cos(\omega t) \quad (4.11)$$

$$v_i(t) = \sqrt{2} \cdot V_{3\phi} \cdot \sin(\varphi) \cos(\omega t + 90) \quad (4.12)$$

El campo eléctrico se calcula sumando las contribuciones de todas las cargas. Con referencia a la Figura 4. 7, el campo eléctrico \vec{E}_k , en el punto M causado por la carga de la línea \tilde{Q}_k , en el conductor k, es la suma vectorial de los campos, \vec{E}_{k1} , debido a \tilde{Q}_k , y debido a la imagen, \vec{E}_{k2} , $-\tilde{Q}_k$ de \tilde{Q}_k del interior de la tierra [34].

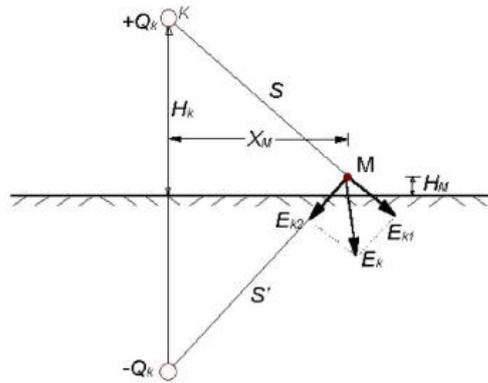


Figura 4. 7. Componentes del campo eléctrico en el punto de cálculo M [34].

La distancia horizontal del conductor k y la altura sobre el suelo del punto de medición, M, se indican con X_M y H_M , respectivamente, mientras que H_K indica la altura desde el suelo y el conductor. La magnitud de las componentes horizontales y verticales del campo eléctrico causado por las cargas en el conductor k, y, vienen dadas por las siguientes ecuaciones [34] [25]:

$$\vec{E}_{kx} = \frac{(\tilde{Q}_{rk} + j\tilde{Q}_{ik})}{2\pi\epsilon} \cdot \left[\frac{X_M}{X_M^2 + (H_K - H_M)^2} - \frac{X_M}{X_M^2 + (H_K + H_M)^2} \right] \quad (4.13)$$

$$\vec{E}_{ky} = \frac{(\tilde{Q}_{rk} + j\tilde{Q}_{ik})}{2\pi\epsilon} \cdot \left[\frac{X_M - H_K}{X_M^2 + (H_K - H_M)^2} - \frac{X_M - H_K}{X_M^2 + (H_K + H_M)^2} \right] \quad (4.14)$$

Las componentes del vector de campo eléctrico vertical y horizontal se calculan sumando las contribuciones de todos los conductores [34].

$$\vec{E}_x = \sum_k \vec{E}_{kx} = E_{rx} + jE_{ix} \quad (4.15)$$

$$\vec{E}_y = \sum_k \vec{E}_{ky} = E_{ry} + jE_{iy} \quad (4.16)$$

El valor eficaz de las componentes real e imaginaria, horizontal y vertical, E_{rx} , E_{ix} , E_{ry} y E_{iy} , caracterizan plenamente el campo vectorial. Por ejemplo, el valor eficaz del campo eléctrico viene dado por [34]:

$$E_{rms} = \sqrt{E_{rx} + E_{ix} + E_{ry} + E_{iy}} \quad (4.17)$$

Para calcular el campo magnético bajo el alimentador de distribución y la barra colectora del sistema de transmisión, similar al método de simulación de carga, se propone un método de simulación. Entre ellos, la fuente del campo magnético es directamente la corriente del conductor, el suelo ya no es un conductor magnético, las líneas de fuerza magnética atraviesan el suelo y el plano de referencia es bastante profundo [34].

$$B_{xi} = \frac{\mu_0 \cdot I_k}{2\pi} \left[\frac{-(h_M - h_k)}{(X_M - H_K)^2 + (h_M - h_k)^2} - \frac{(h_M + h_k)}{(X_M - H_K)^2 + (h_M - h_k)^2} \right] \quad (4.18)$$

$$B_{yi} = \frac{\mu_0 \cdot I_k}{2\pi} \left[\frac{X_M - H_K}{(X_M - H_K)^2 + (h_M - h_k)^2} - \frac{X_M - H_K}{(X_M - H_K)^2 + (h_M + h_k)^2} \right] \quad (4.19)$$

Las componentes del vector de campo magnético vertical y horizontal se calculan sumando las contribuciones de todos los conductores [34].

$$\widetilde{B}_x = \sum_k \widetilde{B}_{kx} = B_{rx} + jB_{ix} \quad (4.20)$$

$$\widetilde{B}_y = \sum_k \widetilde{B}_{ky} = B_{ry} + jB_{iy} \quad (4.21)$$

El valor de las componentes real e imaginaria, horizontal y vertical, caracterizan plenamente el campo vectorial. El campo magnético resultante es [34] [40]:

$$B = \sqrt{B_{rx} + B_{ix} + B_{ry} + B_{iy}} \quad (4.22)$$

El método habitual para calcular el campo magnético producido por una línea eléctrica consiste en calcular el campo causado por cada fase por separado y luego sumar las contribuciones de todas las fases. Para diseñar líneas de bajo campo o reducir el campo de las líneas existentes, conviene examinar la estructura del campo magnético producido por disposiciones sencillas de conductores. El campo magnético varía aproximadamente en

proporción inversa con el cuadrado de la distancia desde el centro de la configuración del conductor:

$$B = 3,46 \frac{I \cdot P}{D^2} \quad (4.23)$$

donde I es la corriente, P es la separación de fases y D es la distancia entre el punto de medición y el centro de fase.

b) Configuración escalonada

En la mayoría de los casos las líneas que ingresan y salen de una subestación no tienen una configuración plana, partiendo del ejemplo expuesto por *Electrical Power Research Institute* (EPRI) se procede al cálculo de CEM en pórticos y barras de la subestación a partir de la configuración de los conductores:

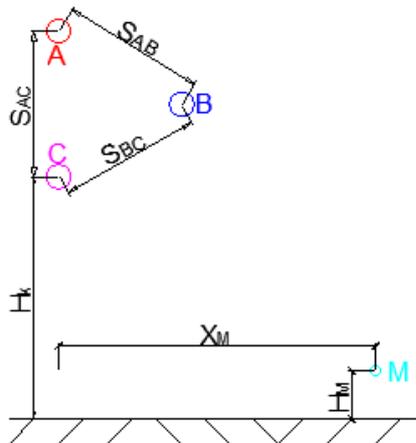


Figura 4. 8. Configuración escalonada de una línea de transmisión

Al igual que en una configuración plana cada fase se reduce a un solo conductor equivalente, ecuación (4. 1).

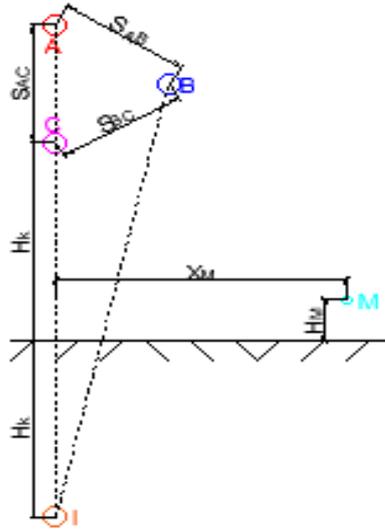


Figura 4. 9. Imagen de la fase C respecto al resto de fases.

Los coeficientes de potencial propio se obtendrán a partir de la ecuación (4. 3) , el coeficiente del conductor A, B y C para este tipo de configuración no son iguales y se obtendrán con las siguientes ecuaciones:

$$P_{AA} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \ln \frac{2 \cdot (2 \cdot H_K + 2 \cdot S_{AC})}{d_{eq}} \quad (4. 24)$$

$$P_{BB} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \ln \frac{2 \cdot (2 \cdot H_K + S_{AC})}{d_{eq}} \quad (4. 25)$$

$$P_{CC} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \ln \frac{2 \cdot (2 \cdot H_K)}{d_{eq}} \quad (4. 26)$$

Los coeficientes de potencial mutuo se calculan para cada conductor utilizando las siguientes expresiones:

$$a = \sqrt{\left(\frac{S_{AC}}{2} + 2H_K + S_{AC}\right)^2} \quad ; \quad b = \sqrt{S_{AB}^2 - \left(\frac{S_{AC}}{2}\right)^2} \quad (4. 27)$$

$$P_{AB} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \cdot \ln \frac{S'_{AB}}{S_{AB}} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \cdot \ln \frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{S_{AB}} = P_{BA} \quad (4. 28)$$

$$P_{BC} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \cdot \ln \frac{S'_{BC}}{S_{BC}} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \cdot \ln \frac{\sqrt{\left(2H_K + \frac{S_{AC}}{2}\right)^2 + b^2}}{S_{BC}} = P_{CB} \quad (4. 29)$$

$$P_{AC} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \cdot \ln \frac{S'_{AI}}{S_{AC}} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \cdot \ln \frac{2H_k + S_{AC}}{S_{AB}} = P_{CA} \quad (4.30)$$

Los coeficientes de potencial propio y mutuo forman una matriz cuadrada de 3 por 3, posteriormente se determinarán las cargas en función de el voltaje de cada conductor, para el cálculo de las componentes real e imaginaria del voltaje se utilizarán las ecuaciones (4. 11) y (4. 12) respectivamente.

Con los resultados de las cargas se calculará los componentes del campo eléctrico en el eje x y en el eje y tomando en cuenta para cada conductor las distancias de acuerdo con la configuración delta, para este proceso se usarán las ecuaciones (4. 13) y (4. 14), finalmente, luego de determinar los parámetros descritos anteriormente sujetos a la configuración de la línea, se establece la resultante del campo eléctrico empleando la ecuación (4. 17).

Para el cálculo del campo magnético en una configuración escalonada se utilizará el mismo procedimiento propuesto anteriormente por el EPRI para una configuración plana teniendo en cuenta las distancias existentes entre los conductores, la distancia del suelo y el punto de medición y la distancia entre los conductores y el suelo. Teniendo en cuenta que la corriente que circula a lo largo de los conductores de la subestación es trifásica y perfectamente equilibrada desechando la presencia de las corrientes de tierra.

c) Configuración vertical

Otra de la configuración que pueden presentar las líneas es una configuración vertical como se muestra en la Figura 4. 10.

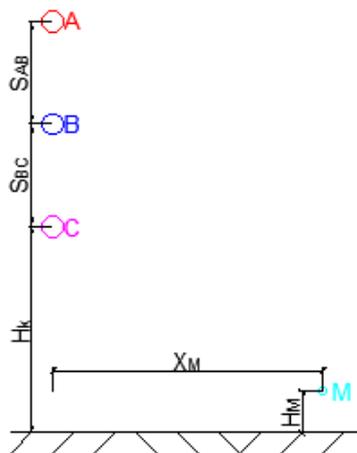


Figura 4. 10. Configuración Vertical de una línea de transmisión.

La metodología descrita para el cálculo de los campos eléctricos y magnéticos planteado por el libro EPRI y al igual que en el procedimiento de la configuración anterior serán usadas para el proceso de cálculo en una configuración vertical, pero en el caso de las distancias, serán diferentes. Para el cálculo de los coeficientes de potencial se tomará la distancia de cada conductor hasta el conductor imagen como se muestra en la Figura 4. 11.

$$P_{AA} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \cdot \ln \frac{4 \cdot (H_K + S_{BC} + S_{AB})}{d_{eq}} \quad (4.31)$$

$$P_{BB} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \cdot \ln \frac{2 \cdot (2 \cdot H_K + 2S_{BC})}{d_{eq}} \quad (4.32)$$

$$P_{CC} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \cdot \ln \frac{2 \cdot (2 \cdot H_K)}{d_{eq}} \quad (4.33)$$

Las ecuaciones utilizadas para determinar S'_{AB} , S'_{BC} y S'_{AC} se muestran a continuación:

$$S'_{AB} = 2H_K + 2S_{BC} + S_{AB} \quad (4.34)$$

$$S'_{BC} = 2H_K + S_{BC} \quad (4.35)$$

$$S'_{CA} = 2H_K + S_{BC} + S_{AB} \quad (4.36)$$

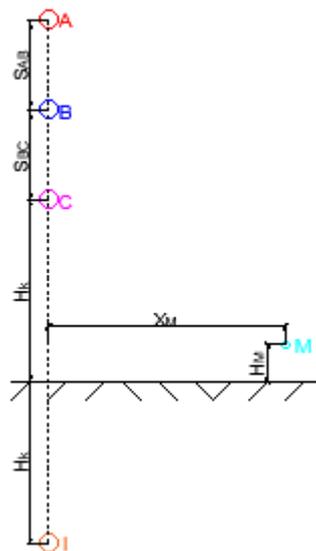


Figura 4. 11. Imagen de la fase C respecto al resto de fases.

4.3.2.2. Transformador de potencia

El informe Evaluación de los campos electromagnéticos alrededor de los transformadores de potencia (UNE-CLC/TR 50453 IN) proporciona una guía para la evaluación de campos electromagnéticos alrededor de dichos transformadores, separando a su vez el origen del campo magnético en dos fuentes distintas. Las dos causas de la producción de campo magnético en un transformador pueden desvincularse entre sí en: conexiones a las bornas de alta y baja tensión del transformador y los arrollamientos internos de alta y baja tensión del transformador [41] [33].

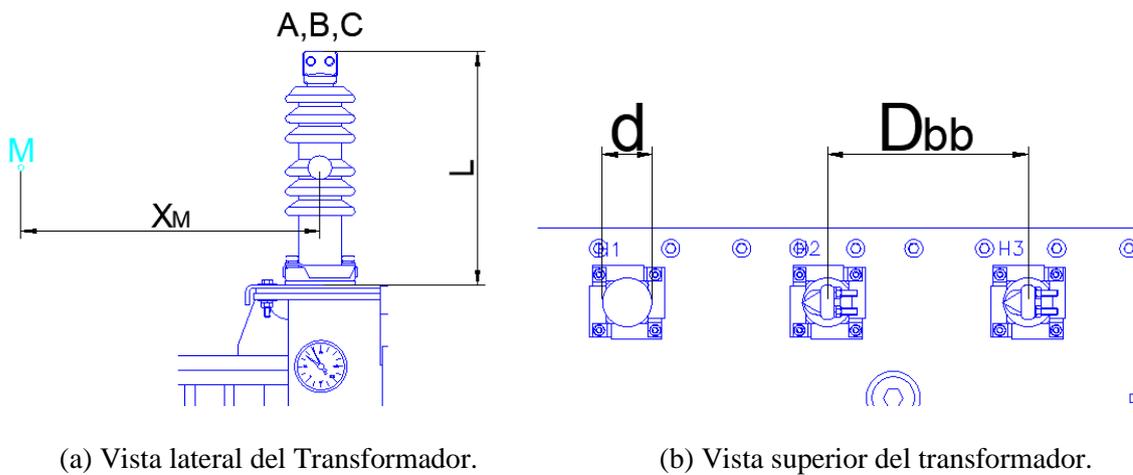


Figura 4. 12. Distancias consideradas para el cálculo del CEM emitido por el Transformador [41].

La norma UNE comienza relacionando las corrientes simétricas trifásicas que circulan por los bushings del transformador que crean el campo magnético de este, así para el punto de medida M el campo magnético tiene un valor:

$$B_{TOT} = 2 \cdot 10^{-7} \sqrt{(B_x)^2 + (B_y)^2} \quad (4.37)$$

$$B_x = \frac{y \cdot I_A}{(x + d)^2 + y^2} + \frac{y \cdot I_B}{x^2 + y^2} + \frac{y \cdot I_C}{(x - d)^2 + y^2} \quad (4.38)$$

$$B_y = \frac{(x + d) \cdot I_A}{(x + d)^2 + y^2} + \frac{y \cdot I_B}{x^2 + y^2} + \frac{(x - d) \cdot I_C}{(x - d)^2 + y^2} \quad (4.39)$$

Donde x y y son el valor de las coordenadas del punto de medida M, I el valor eficaz de la corriente por cada bushing y d la distancia entre los bushings, en el caso que las barras

asumiesen una longitud determinada, el campo magnético viene dado por la siguiente expresión:

$$B_{Tot} = 2 \cdot 10^{-7} \cdot I \cdot \left(\frac{\sqrt{3} \cdot d}{1 + d^2} \right) \cdot \text{sen}(\alpha) \quad (4.40)$$

El cálculo del campo eléctrico en la mayor parte de los casos se requiere de un software, los cálculos analíticos únicamente pueden ser realizados en algunos casos, cuando se considera un conductor de forma cilíndrica con una longitud infinita y de un diámetro d , el cálculo se lo realiza utilizando el método de imagen eléctrica equivalente (UNE).

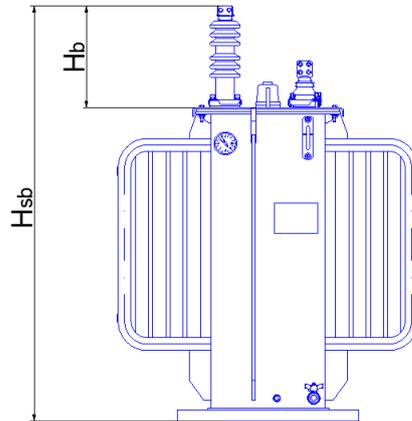


Figura 4.13. Consideraciones para el cálculo de campo eléctrico [41].

$$E = \frac{2 \cdot V}{\sqrt{3} \cdot h} \cdot \frac{1}{\ln\left(\frac{4h}{d}\right)} \quad (4.41)$$

Este procedimiento ha sido implementado en una interfaz que cuenta con ventanas que permiten el ingreso de datos de acuerdo con la configuración de las barras, transformadores, entrada y salida de los alimentadores, dando click a un botón de cálculo muestra las gráficas obtenidas en un perfil lateral, en la Figura 4.14 se muestra un diagrama de entradas y salidas de la herramienta, mientras que, en el Anexo C y Anexo D se muestran el diagrama de flujo para obtener las gráficas y las ventanas implementadas.

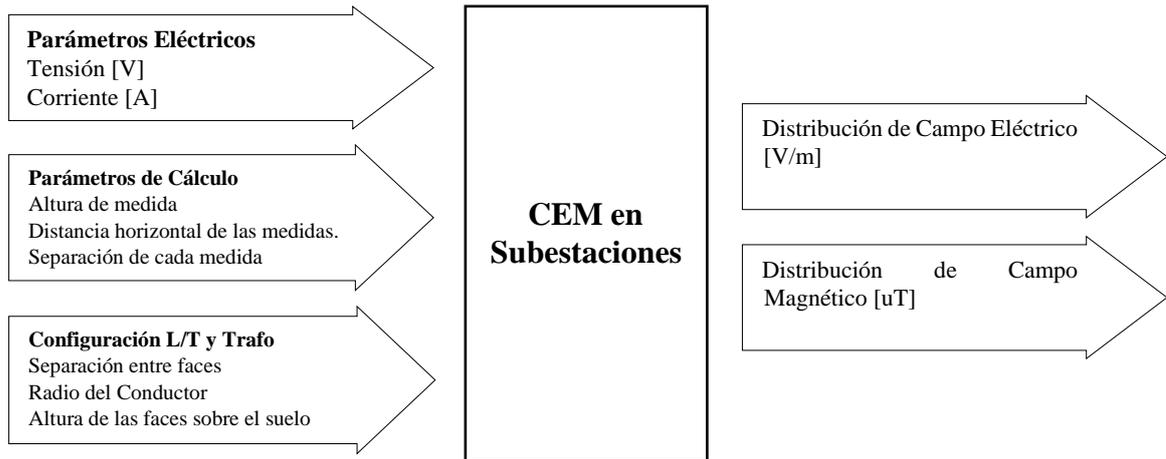


Figura 4. 14. Proceso de ejecución de la interfaz.

(a) Barras y Alimentadores

(b) Transformador

Figura 4. 15. Ventanas de ingreso de datos y botón de cálculo

4.3.3. Simulación de CEM

El software QuickField es un programa que permite simular y analizar problemas electromagnéticos, térmicos, y deformaciones en sólidos empleando Elementos Finitos. El modelado de un problema se realiza a través de sus herramientas de trazado o a su vez permite importar archivos de un sistema CAD [42].

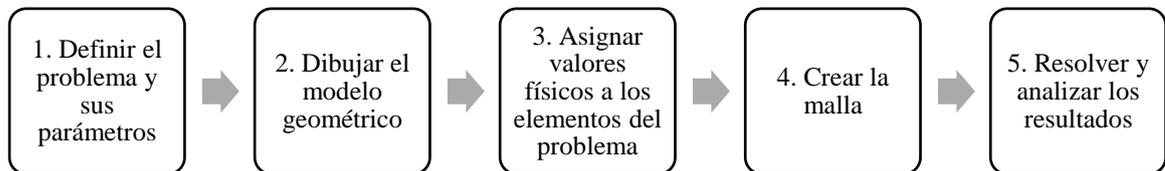
QuickField cuenta con licencia gratuita para estudiantes, tiene un límite de tamaño de malla con 255 nodos, cuenta con opciones de análisis. Para el desarrollo de este proyecto se utilizará la versión que se muestra en la Figura 4. 16.



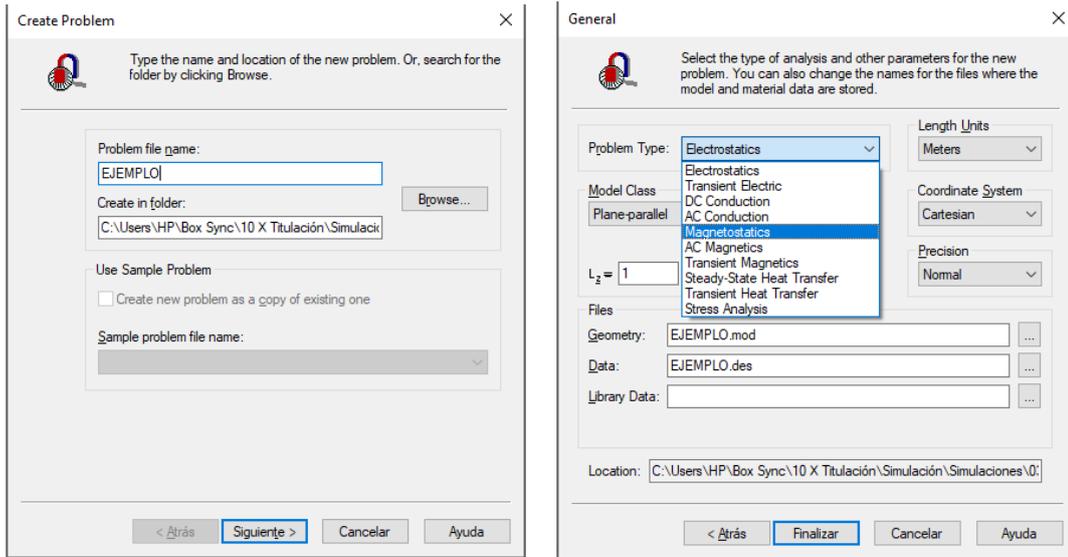
QuickField Student 6.4

Figura 4. 16. Logotipo del software y su versión.

Este software cuenta con una interfaz gráfica donde se puede interactuar con el programa por medio de herramientas de dibujo, selección, asignación de propiedades, contornos y gráficos. Para definir y resolver un problema hay que seguir 5 pasos básicos:

**Figura 4. 17.** Procedimiento para la simulación de la distribución de CEM [42].

Para la simulación se empieza creando un documento, para esto en la pestaña *File* se escoge *New Problem*, aparecerá una ventana emergente denominada *Create Problem* donde se nombra el archivo a crear y el directorio donde guardará, finalmente en *Siguiente*, seguido aparecerá la ventana *General* donde se debe elegir el tipo de problema a resolver, en esta investigación se usará el problema electrostático para determinar el campo eléctrico y el problema magnetostático para el campo magnético.

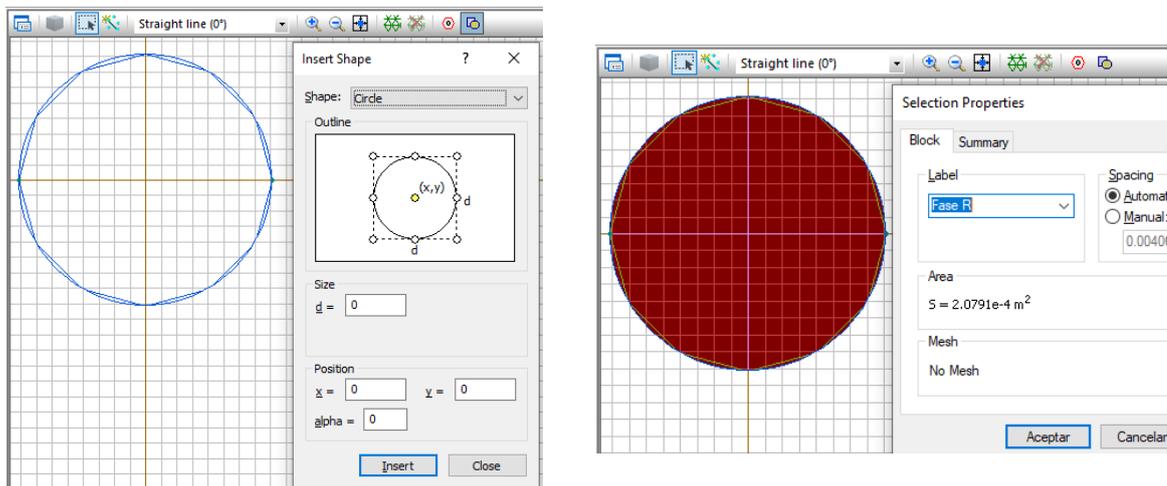


(a) Crear problema

(b) Elegir el tipo de problema

Figura 4. 18. Ventanas para crear un archivo para la simulación.

La ventana de modelado (*Model Editor*) permite definir el modelo geométrico de manera rápida y sencilla con sus botones y herramientas geométricas. En ella se definen los elementos básicos del modelo: bloques, bordes y vértices.



(a) Inserción de una figura

(a) Asignar el nombre a la figura

Figura 4. 19. Gráfico de una circunferencia que representa a un conductor.

Las ventanas de edición de datos (*Data Editor*). Estas ventanas surgen cuando se quieren editar las propiedades de un elemento del modelo. En ellas se introducen los valores físicos necesarios para definir las fuentes del campo, las condiciones de contorno del problema y las

propiedades físicas de los materiales involucrados [42]. Para el problema electrostático se debe insertar valores correspondientes al diámetro de los conductores, la permitividad del aire, de los conductores y tensiones de cada fase, mientras que para los problemas magnetostático es necesario insertar la permeabilidad del suelo, del aire y de los conductores, las corrientes de cada uno de estos.

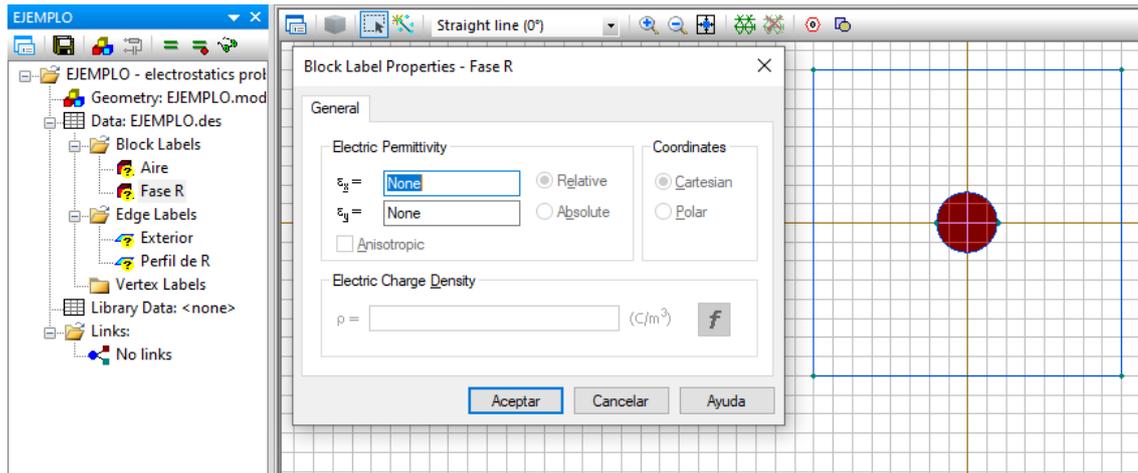
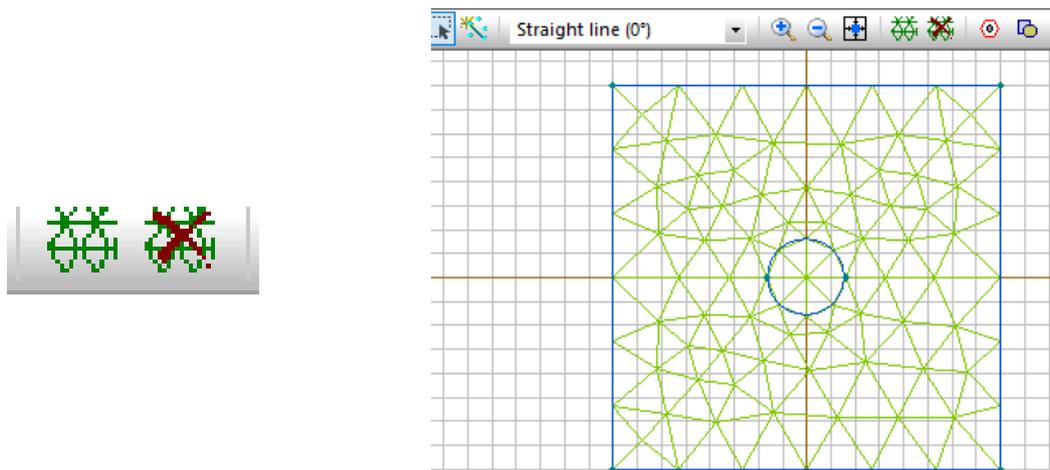


Figura 4. 20. En la ventana *Blok Label Properties* se introducen los valores solicitados

El mallado consiste en segmentar la región de solución con una gran cantidad de triángulos. Esto lo realiza mediante el uso del botón *Build Mesh*.



(a) Iconos para insertar y quitar el mallado

(b) Ejemplo del mallado

Figura 4. 21. La versión estudiantil resuelve mallas con un máximo de 255 nodos.

Por último, se tiene la ventana de post-procesado (*Postprocessor*). En ella se pueden ver de manera gráfica los resultados del análisis que QuickField ha realizado.

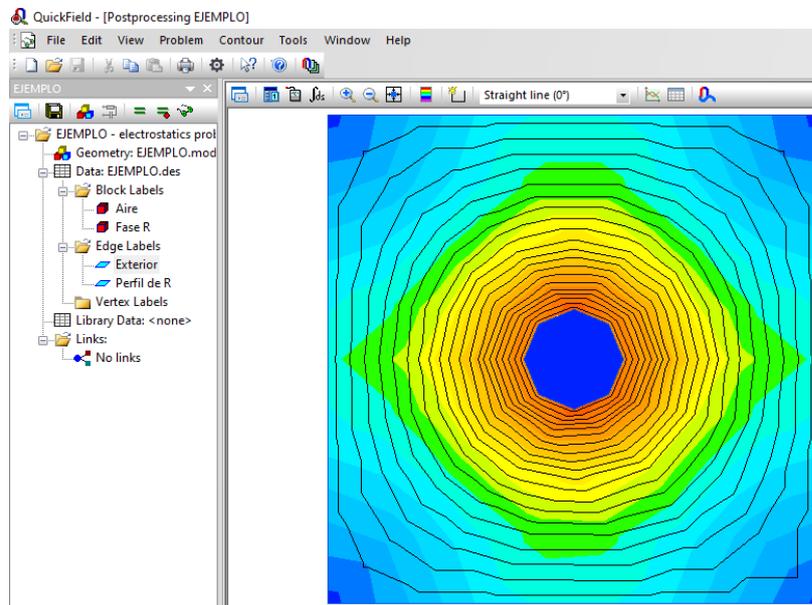


Figura 4. 22. Distribución del campo eléctrico de un conductor.

5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En el presente capítulo se detallan los resultados obtenidos en el cálculo y la simulación de los elementos propuestos, estos datos son validados con los datos disponibles de una medición previa a subestaciones del sistema nacional de transmisión, administradas por CELEC EP.

Para realizar los cálculos de CEM se desarrolló una interfaz en GUI de Matlab, la herramienta muestra los datos a ser ingresados por el usuario de forma manual que posteriormente se utilizarán para el cálculo a diferentes distancias obteniendo como resultado la gráfica de la magnitud de los campos electromagnéticos emitidos por la líneas entrantes, salientes y barras de la subestación, tomando como base un ejemplo propuesto por *EPRI AC Transmission Line Reference Book—200 kV and Above, Third Edition* mientras que para los transformadores de potencia se ha tomado como ejemplo el informe de la UNE-CLC/TR 50453 IN.

5.1. ASPECTOS GENERALES

En el año 2012 la Corporación Eléctrica del Ecuador CELEC EP unidad de negocios Transelectric realiza el Estudio de Impacto Ambiental Definitivo Expost, en Subestaciones Eléctricas del Sistema Nacional de Transmisión, en este estudio se realizan mediciones de campo eléctrico y campo magnético en varios puntos ubicados en los linderos, y cerca de las fuentes emisoras. Las mediciones fueron tomadas a una altura de 1 m con relación al suelo y una distancia mínima de 2,5 m de las fuentes generadoras, a continuación, se muestran gráficas de los CEM de las subestaciones de acuerdo con su potencia y sus niveles de tensión.

Tabla 5. 1. Subestaciones que constan en el estudio ambiental realizado por CELEC.

Grupo	Subestación	Potencia [MVA]	Tensión [Kv]
<50	Coca ²	33,3	138/69
	Tena	33,3	138/69
	Tulcán	33,3	138/69
	Ambato	43	138/69
50,1-75	Chone	60	138/69
	Mulaló	66,6	138/69
75,1-100	Dos Cerritos	100	230/69
125,1-150	Vicentina	148	138/46
	Esmeraldas	150	138/69
150,1-199	Ibarra	183,2	138/69-138/34,5
200-225	Policentro	200	138/69
	Santo Domingo	222	230/138/69
375-400	Pascuales	375	230/138
>400	Santa Rosa	500	230/138/69
S/T	Pucará	-	138
	San Idelfonso	-	138

² Denominada también S/E Orellana [8].

Los datos de las mediciones se muestran en el Anexo A, las subestaciones han sido clasificadas de acuerdo con su potencia en diferentes rangos, siendo estos los que se muestran en la Tabla 5. 1. Para el análisis de la distribución del campo eléctrico y magnético se considera el trazo de un perfil a lo largo de las subestaciones y verificando que dichos puntos de medida coincidan de acuerdo con la configuración y disposición de las infraestructuras a comparar.

A continuación, se presentan los valores de los CEM del grupo de subestaciones cuyas potencias son inferiores 50 MVA, la Figura 5. 1 y Figura 5. 2 representan las gráficas de las curvas correspondientes al campo eléctrico y magnético.

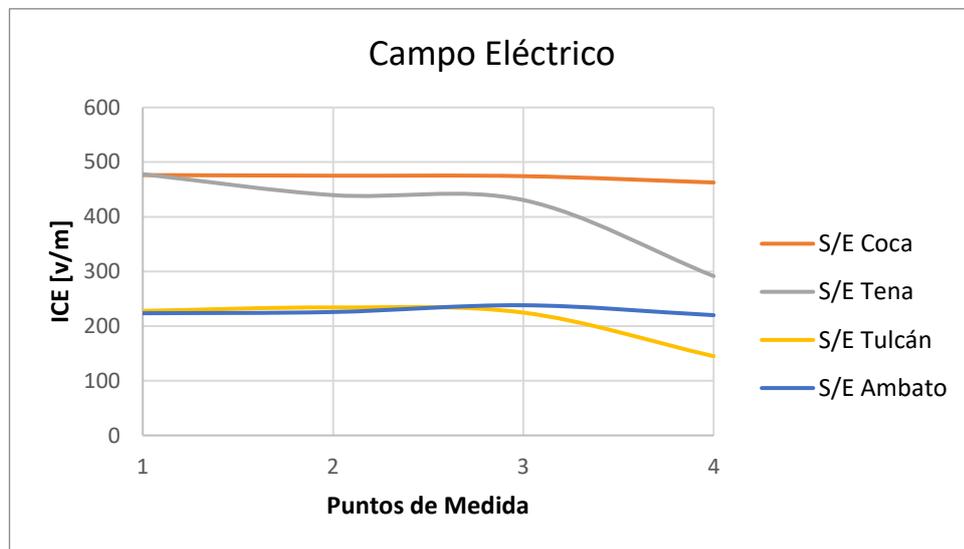


Figura 5. 1. Graficas de los perfiles de campo eléctrico.

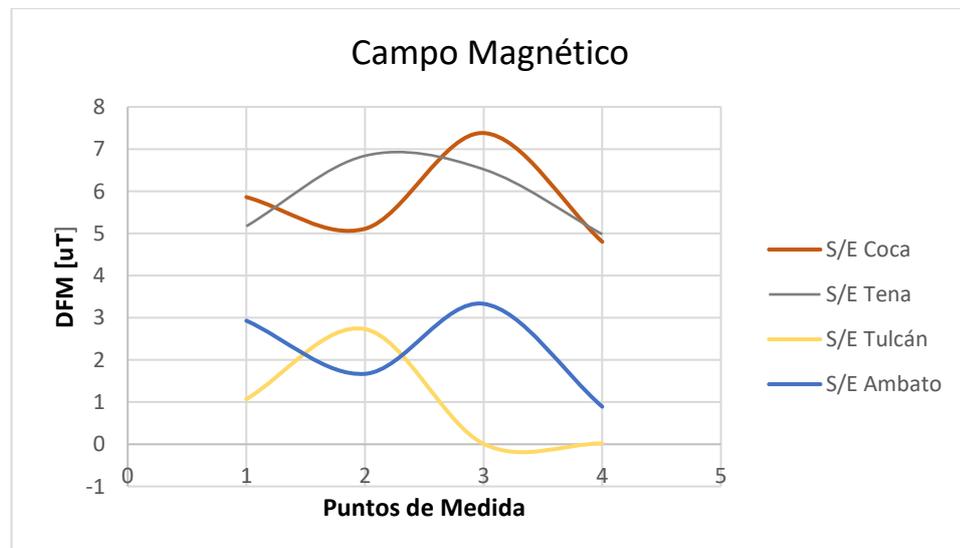


Figura 5. 2. Graficas de los perfiles de campo magnético.

En Figura 5. 1 y Figura 5. 2 muestra que las curvas de CEM correspondientes a las subestaciones Coca y Tena se localizan por encima de las curvas de las subestaciones Ambato y Tulcán debido a que estas subestaciones se localizan en regiones naturales distintas, en el oriente y la serranía respectivamente, implicando que el campo eléctrico también incrementa a medida que la humedad y la temperatura incrementan [18].

Las siguientes figuras corresponden al grupo cuya potencia comprende entre 51,1 MVA y 75 MVA y su nivel de voltaje es 138/69 kV.

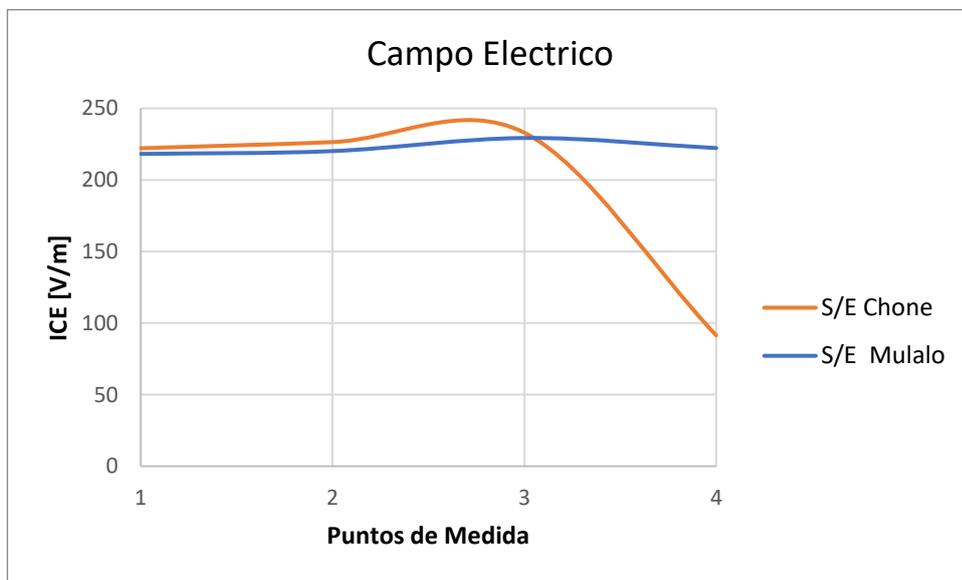


Figura 5. 3. Graficas de los perfiles de campo eléctrico propuestos.

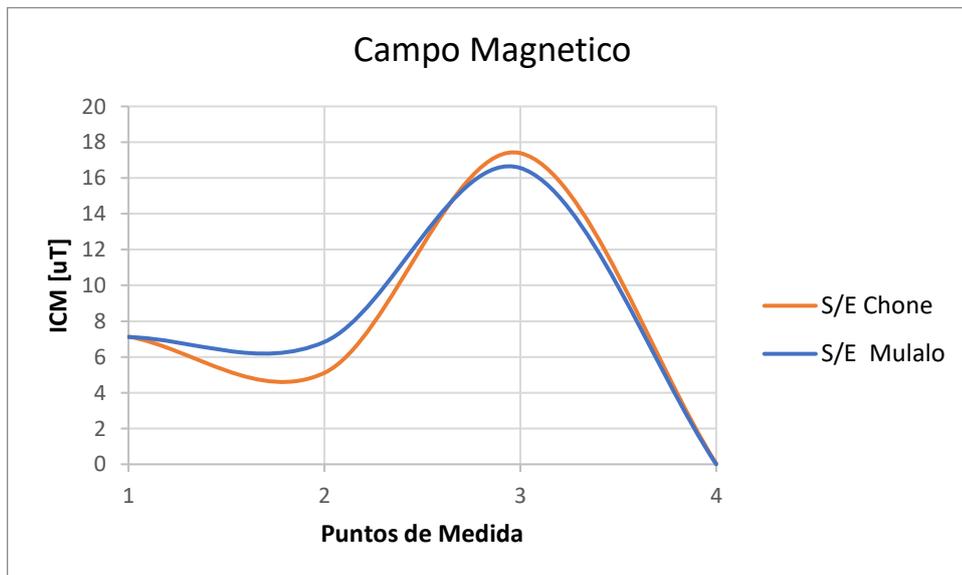


Figura 5. 4. Graficas de los perfiles de campo magnético propuestos.

En Figura 5. 4 se puede apreciar de mejor manera la distribución del campo magnético y magnético en una subestación siendo el campo magnético inferior tanto en las entradas como en las salidas de las líneas de transmisión mientras que la intensidad incrementa en el centro de la infraestructura de la subestación.

Para el cálculo de CEM, se toma como referencia la subestación Tena, en Tabla 5. 2 se presentan sus principales características.

Tabla 5. 2. Características de la Subestación Tena

CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES						
S/E TENA						
<i>Tensión [Kv]</i>	138	69				
Patio de Transformadores				Patio		
<i>Tipo</i>	<i>U1 [kV]</i>	<i>U2 [kV]</i>	<i>P [MVA]</i>	<i>U[kV]</i>	<i>Bahías</i>	<i>Barras</i>
Autotransformador	138	69	33,3	138	3	1
				69	3	1

Para realizar los cálculos y la simulación de los elementos propuestos se toman en cuenta los datos presentados en la siguiente tabla.

Tabla 5. 3. Distancias consideradas para el cálculo y simulación

	Entrada L/T	Barra 138kV	Barra 69kV	Salida EEASA
Tensión [kV]	138	138	69	69
Corriente asumida [A]	250	250	210	210
Altura (h_M)	1	1	1	1
Distancia (x_m)	16	16	16	16
Pasos	0,5	0,5	0,5	0,5
Disposición de C.	Escal.	Horiz.	Horiz.	Horiz.
S_{ab}	3,3	1,25	1	2,2
S_{bc}	3,3	1,25	1	2,2
S_{ca}	2,7	-	-	-
H_k	11,4	8,5	6,3	9
Número de Haces	1	1	1	1
Sep. Entres Haces	-	-	-	-
Conductor	Partridge	Partridge	300 MCM	300 MCM
Diámetro del Conductor [mm]	16,3	16,3	15,97	15,97
Corriente nominal [A]	475	475	470	470

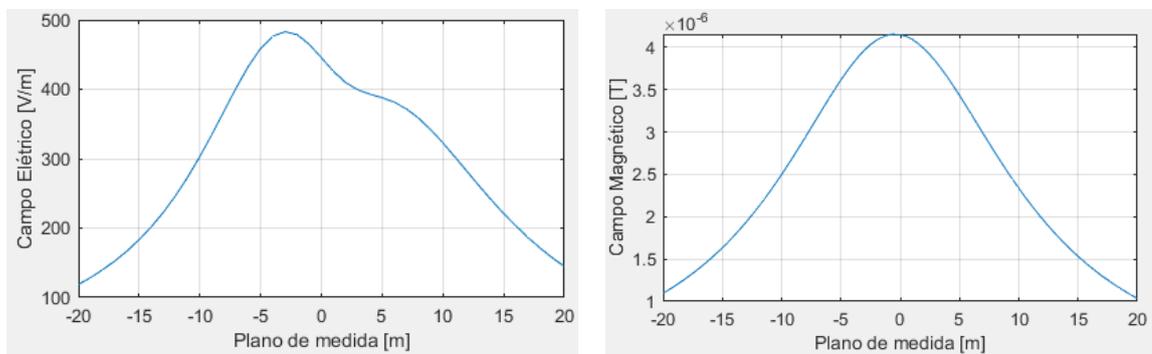
5.2. CÁLCULO Y SIMULACIÓN DE CAMPO ELÉCTRICO Y MAGNÉTICO

5.2.1. Entradas y salidas de SE

La alimentación de la subestación Tena se lo realiza desde la subestación Puyo a 138 kV, mientras que en 69 kV posee una salida a la subestación Tena de la Empresa Eléctrica Ambato y cuenta también con una reserva, los datos mostrados en la Tabla 5. 3 se introducen en la interfaz elaborada para obtener la magnitud de campo eléctrico y campo magnético a las entradas y salidas de la subestación.

Debido a que no se cuenta con los parámetros eléctricos cuando fue realizada la medida se procede a calcular la magnitud del CEM a partir de la tensión nominal y de la corriente nominal del conductor que llega hasta la subestación, puesto que la tensión es un parámetro que no varía considerablemente en el tiempo, el campo eléctrico se calcula a partir de los 138 kV, por otra parte la corriente varía en función de la potencia, se varía la corriente de entrada a la interfaz, hasta obtener un valor cercano al campo magnético medido y finalmente determinar su magnitud a lo largo del perfil propuesto.

A partir de esto, se han obtenido los valores de la línea de 138 kV que ingresa a la subestación y se muestran en la



(a) Campo Eléctrico

(b) Campo Magnético

Figura 5. 5. se puede observar como el campo eléctrico toma su mayor valor a poca distancia lateral de los conductores A y C, a medida que el punto de cálculo aumenta el campo eléctrico disminuye. Con el cálculo realizado se puede determinar que a 2,5 m se tiene un valor de 403,772 V/m correspondiente al campo eléctrico y mientras que para el campo magnético con la corriente asumida 250 A se obtuvo un valor de 3,914 uT.

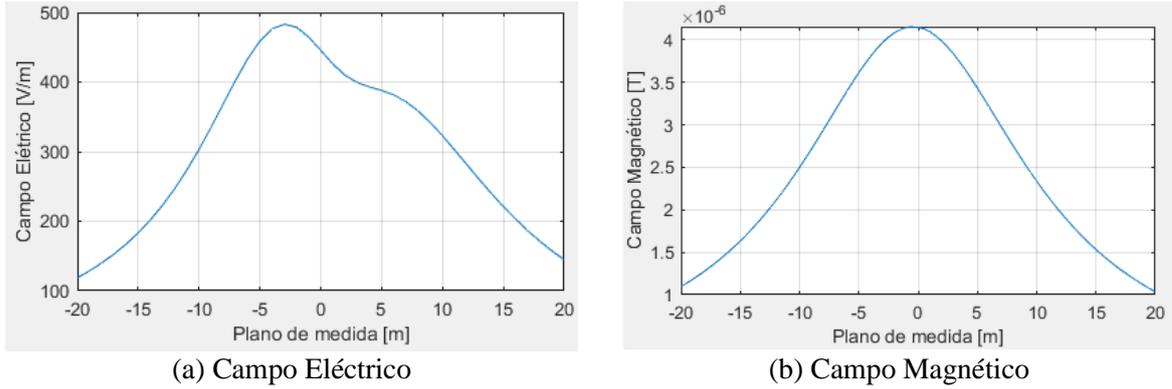


Figura 5. 5. Graficas resultantes de la línea de 138 kV en la interfaz.

En la Figura 5. 6 se muestra la distribución del campo eléctrico y magnético, estos son más intensos alrededor de los conductores y a medida que se aleja de ellos los CEMs disminuyen, se sitúa un punto de medición a 2,5 m y a 1 m sobre el suelo, en este punto se obtiene valores de 401,48 V/m y 3 ,91 uT respectivamente.

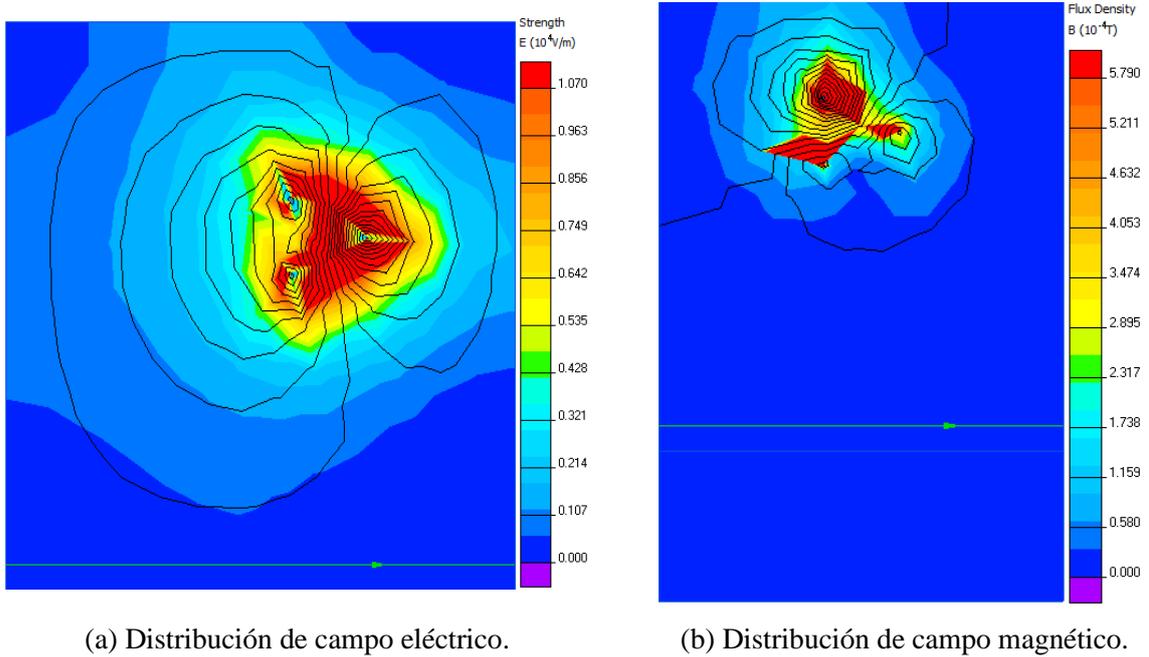
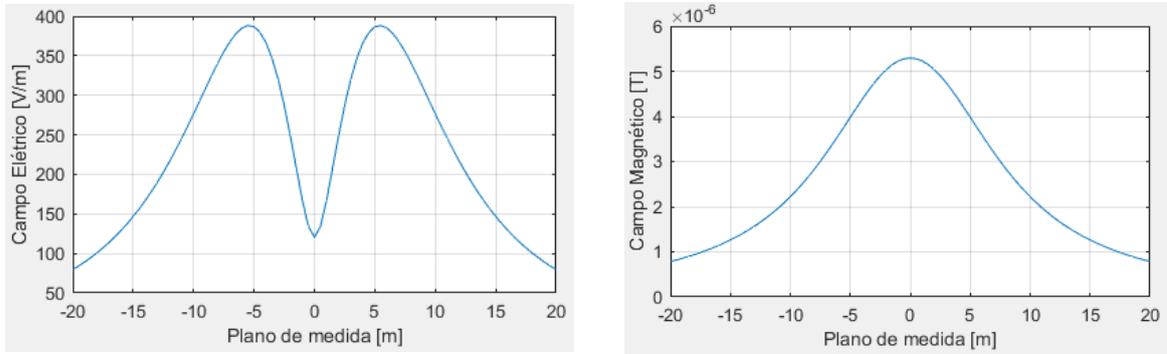


Figura 5. 6. CEM bajo la entrante de la línea de 138 kV.

Para la línea saliente de la subestación se considera el procedimiento anterior, teniendo en cuenta que la configuración de los conductores ahora es plana, en la Figura 5. 7 se muestra la gráfica del comportamiento del campo eléctrico y magnético a un metro sobre el nivel del suelo.

Los valores obtenidos para la línea son 287,121 V/m para el campo eléctrico y 4,901 uT para el campo magnético.

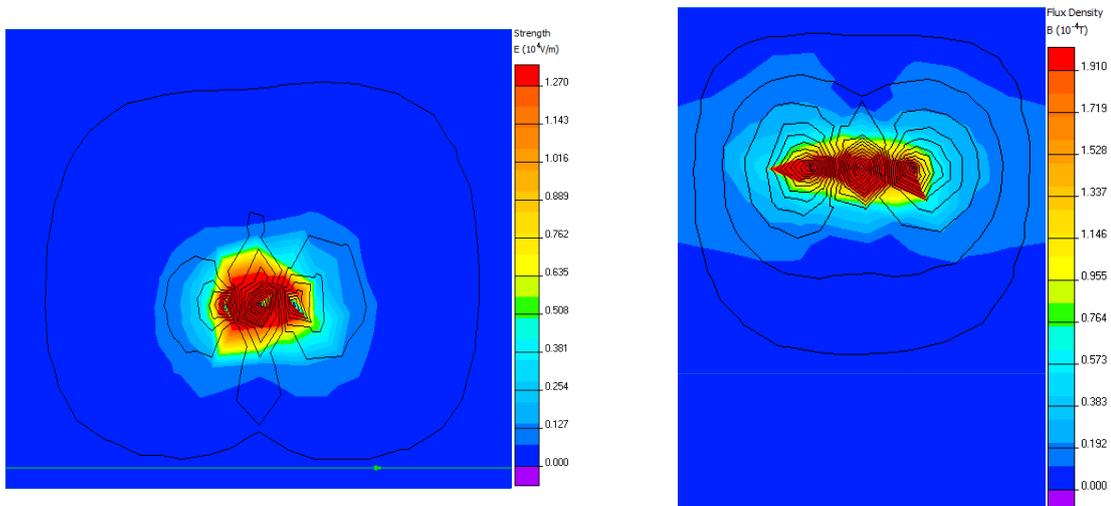


(a) Campo Eléctrico

(b) Campo Magnético

Figura 5. 7. Graficas resultantes de la línea de 69 kV en la interfaz.

Con el fin de tener mejor visión de la distribución del campo eléctrico y magnético se simula la línea introduciendo valores de acuerdo con su configuración, en la Figura 5. 8 se puede observar el espectro de los CEMs, los valores que alcanzan en el contorno de los conductores son muy alto mientras que en la parte baja de los mismos el campo va disminuyendo notablemente, obteniendo un valor de 302,54 V/m para el campo eléctrico y 4,97 uT para el campo magnético, estos valores se obtuvieron a una distancia de 2,5 m y a un punto de medición de 1 m sobre el suelo.



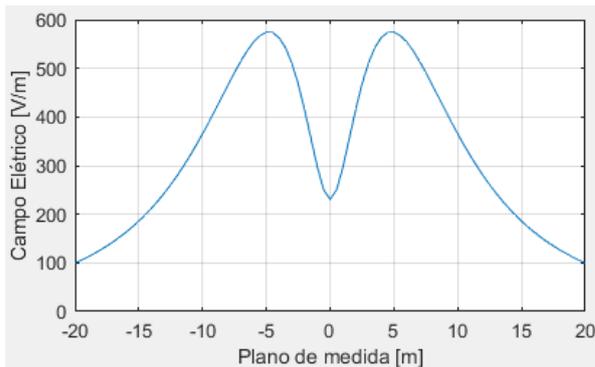
(a) Distribución de campo eléctrico.

(b) Distribución de campo magnético.

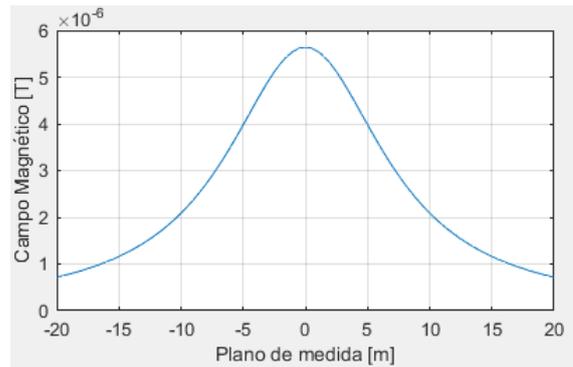
Figura 5. 8. Distribución de CEM bajo la salida de 69kV

5.2.2. Barras de una SE

Para el cálculo y la simulación se ha considerado un procedimiento similar al utilizado para las líneas entrantes y salientes, las barras que conforman la subestación tienen una configuración horizontal, en la Figura 5. 9 y Figura 5. 10 se indican los graficas del campo eléctrico y magnético obtenidos en cálculo a 1 metro sobre el nivel del suelo para la barra de 138 kV y la barra de 69 kV respectivamente.

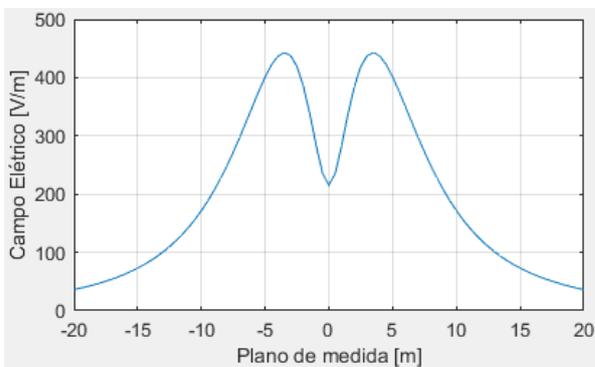


(a) Campo Eléctrico

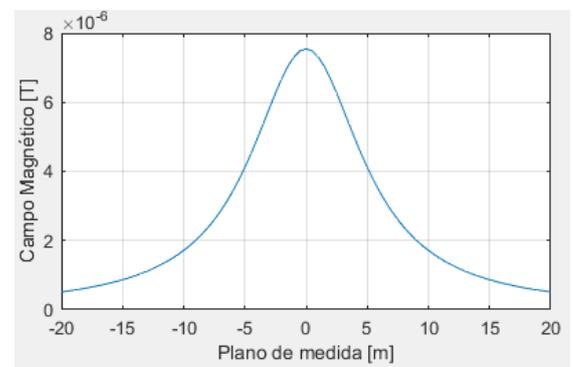


(b) Campo Magnético

Figura 5. 9. Graficas resultantes de la barra de 138 kV en la interfaz.



(a) Campo Eléctrico



(b) Campo Magnético

Figura 5. 10. Graficas resultantes de la barra de 69 kV en la interfaz.

Se observa que, en los puntos de medida más cercanos a las barras, tanto el campo eléctrico como el campo magnético alcanzan su mayor valor, a medida que este punto se aleja del centro los CEMs disminuyen, en un punto de medida de 2,5 m el valor para la barra de 138 kV es 467,421 V/m para el campo eléctrico y 5,113 uT para el campo magnético. Para la barra de 69 kV, los valores obtenidos para el campo eléctrico es 418,652 V/m mientras que para el campo magnético 6,267 uT, a pesar de las dos barras poseen la misma configuración los resultados

tienen una diferencia significativa debido a que los parámetros a ingresados en la interfaz para el cálculo son diferentes, empezando por el nivel de tensión, corriente, entre otros aspectos que influyen directamente a los resultados.

Según se muestra en Figura 5. 11 y Figura 5. 12 se creó un modelo para la simulación del campo eléctrico y magnético de las barras, esto con el objetivo de observar con claridad la intensidad de los CEMs que existente alrededor del espacio que rodea los conductores. Analizando la gráfica, podemos ver que al igual que en las líneas entrantes y salientes el campo eléctrico y magnético toman su mayor valor cuando más cerca esta de las fuentes emisoras que son los conductores. Para el caso de la barra de 138 kV se tienen valores de 474,35 V/m y 4,90 uT.

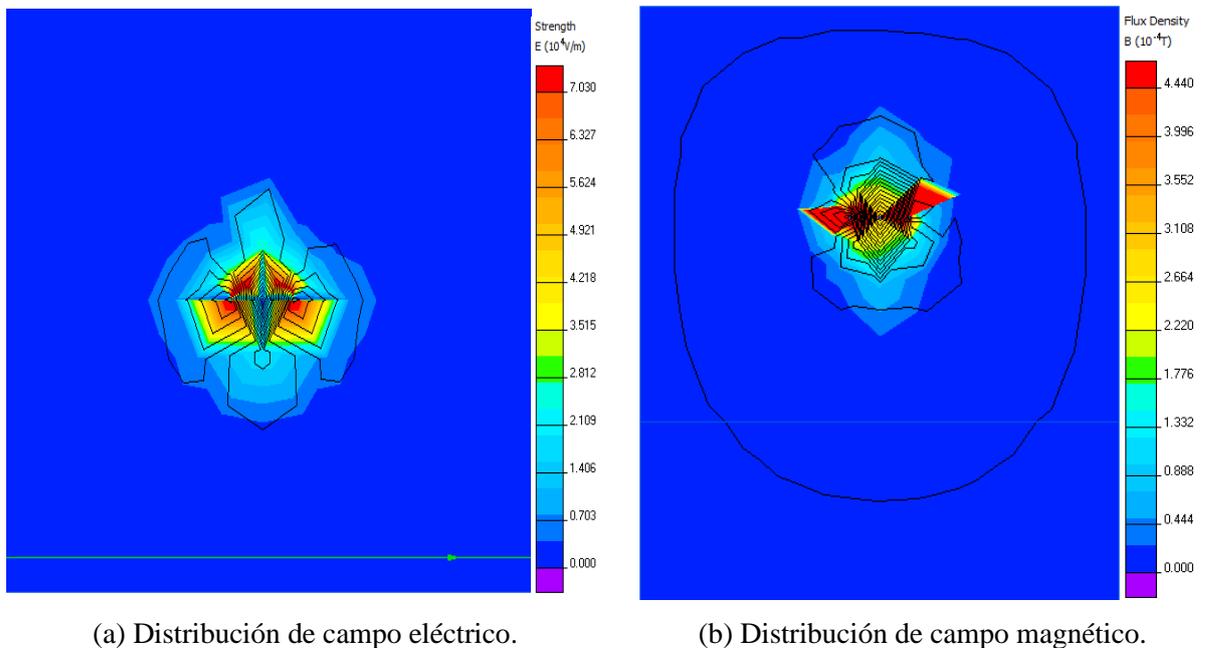


Figura 5. 11. Distribución de CEM debajo las barras de 138Kv

Con respecto a la barra de 69 kV se obtuvo valores de 430,19 V/m y 6,34 uT para una distancia de 2,5 m, el espectro de la distribución de los campos se puede observar en la siguiente figura:

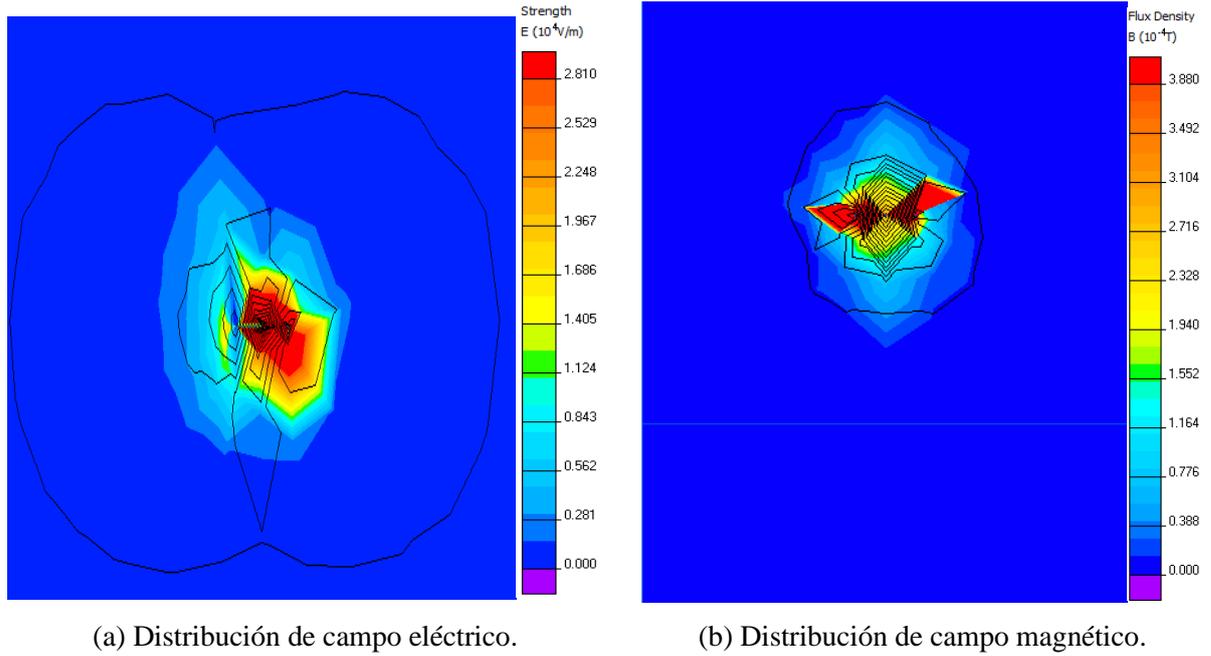


Figura 5. 12. Distribución de CEM debajo la barra de 69 kV.

5.2.3. Validación de Resultados

Para validar los datos que se han obtenido en el cálculo y la simulación, se procede a compararlos con los datos disponibles de las mediciones realizadas en el estudio de impacto ambiental ejecutado por CELEC EP con esto se puede determinar el error existente entre los datos medidos y calculados y los datos medidos y simulados en la Tabla 5. 4 y Tabla 5. 5 se hace la comparación.

Tabla 5. 4. Datos de la Intensidad de Campo Eléctrico.

	<i>ICE [V/m]</i>				
	<i>Med.</i>	<i>Cal.</i>	<i>% Error</i>	<i>Sim</i>	<i>% Error</i>
Entrada L/T	401,91	403,772	0,463	401,48	0,107
Barra 138kV	477,9	467,421	2,193	474,35	0,743
Barra 69kV	430,59	418,652	2,772	430,02	0,132
Salida EEASA	291,49	287,121	1,499	302,54	3,791

Tabla 5. 5. Datos de la Intensidad de Campo Magnético.

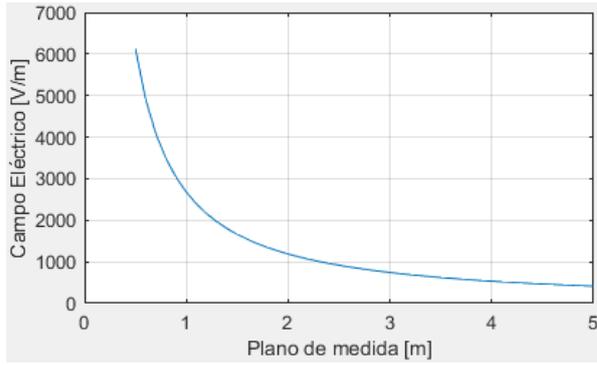
	<i>DFM [μT]</i>				
	<i>Med.</i>	<i>Cal. Asumida</i>	<i>% Error</i>	<i>Sim</i>	<i>% Error</i>
Entrada L/T	4,07	3,914	3,833	3,91	3,833
Barra 138kV	5,17	5,113	1,103	4,90	5,222
Barra 69kV	6,52	6,267	3,880	6,34	2,761
Salida EEASA	4,98	4,90	1,586	4,97	0,201

A comparar los datos disponibles se puede verificar y que existen errores inferiores al 10% esto debido a que para el cálculo se utiliza el método de imágenes reflejadas mientras que en la simulación el software utiliza el método de elementos finitos. Por otra parte, los resultados obtenidos en el cálculo y la simulación están por debajo de los límites que establece la normativa, por lo que podemos considerar a la subestación como una instalación segura desde el punto de los campos eléctricos y magnéticos generados por los diferentes elementos.

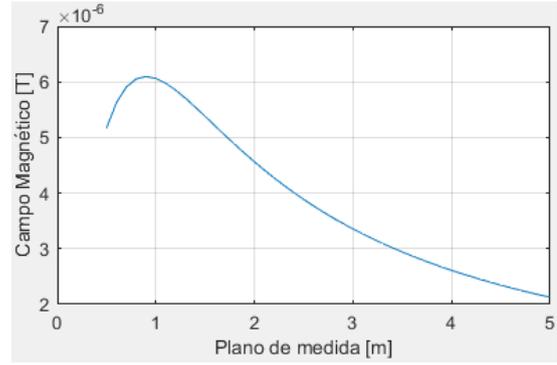
5.2.4. Transformador

Como ya se mencionó, el transformador es un elemento importante dentro de la subestación, sin embargo, existen dos factores principales que influyen en el decremento del campo eléctrico y magnético, el primero se debe a que el transformador está diseñado de la manera más óptima posible para reducir los costes de explotación por lo que la cantidad de CEM que se dispersa del núcleo es muy reducida, la segunda se debe al efecto de apantallamiento por el cual el campo que atraviesa la cuba metálica del transformador se ve reducida significativamente [33].

El valor destacable de campo magnético es el que se genera es en los bushings de baja, debido a que la corriente que en estos fluye es superior en comparación al lado de alta. El campo magnético generado por la corriente a través del devanado puede ignorarse de acuerdo con lo mencionado en el párrafo anterior. El campo eléctrico, por otro lado, hace referencia al nivel de tensión que se tiene en el lado de alta, en la Figura 5. 13 y Figura 5. 14 se puede observar las gráficas obtenidas.

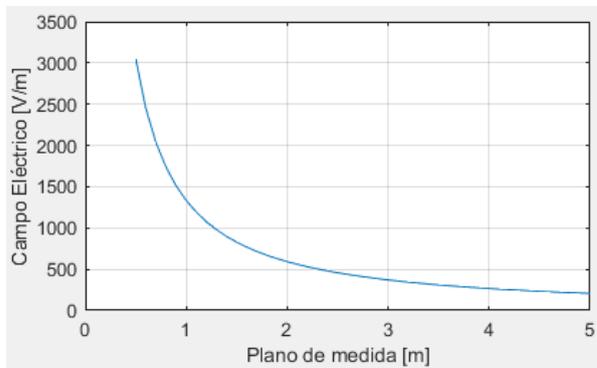


(a) Campo Eléctrico

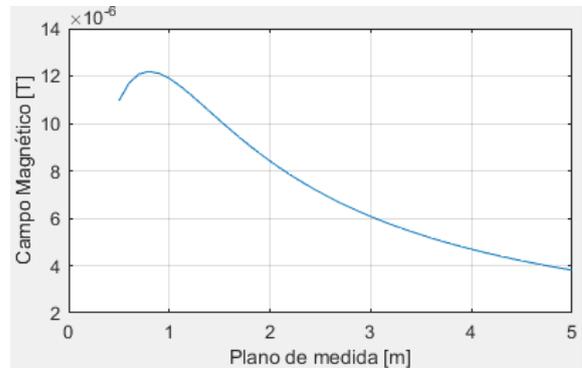


(b) Campo Magnético

Figura 5.13. Curvas de CEM para el lado de 138 kV del transformador.



(a) Campo Eléctrico

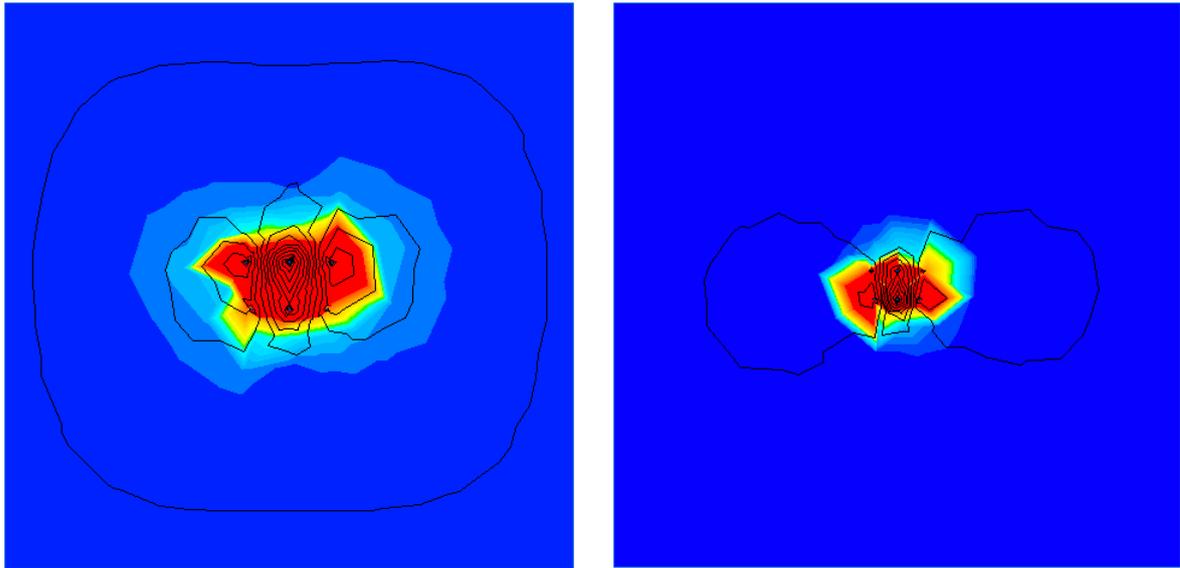


(b) Campo Magnético

Figura 5.14 Curvas de CEM para el lado de 69 kV del transformador.

En las gráficas se muestran de manera separada el cálculo de la magnitud de CEM emitidos por los bushings de 138 kV y 69 kV, puesto la metodología usada no permite el cálculo unificado, para este procedimiento se toma una vista lateral del transformador, y el punto de cálculo va incrementando a pasos de 0,1 m perpendicularmente a la fase b, donde se suman las magnitudes influyentes de cada bushing y se determina la magnitud total.

Por otra parte, para la simulación de la distribución de CEM se modelan los bushings tanto del lado de 138 kV y 69 kV en una vista superior del transformador, en este caso debido a las limitaciones que presenta la versión estudiantil del software usado, tales el número limitado de nodos para realizar el mallado, se procede solamente a la visualización de la distribución y no se obtiene su magnitud



(a) Distribución de campo eléctrico.

(b) Distribución de campo magnético.

Figura 5. 15. Distribución del CEM en los bushings del transformador.

Mediante la interfaz propuesta para el cálculo, se procede a estimar la distribución de campo eléctrico y magnético a través de toda la superficie de la subestación, para lo cual se realiza un mallado cuyas separaciones son de 5 metros, de esta manera se distribuyen 9 separaciones en un perfil longitudinal y 19 separaciones en un perfil lateral, en base a esto se han obtenido las gráficas siguientes.

En la Figura 5. 16 se muestra la distribución de campo eléctrico a través de la subestación, se puede apreciar que en el patio correspondiente al sistema de 138 kV la intensidad es mayor al patio de 69 kV, sin embargo, presenta gran incremento a medida que se acerca al transformador de potencia, esto debido a que este equipo tiene sus partes energizadas más cercanas al suelo, y evidentemente al punto de cálculo.

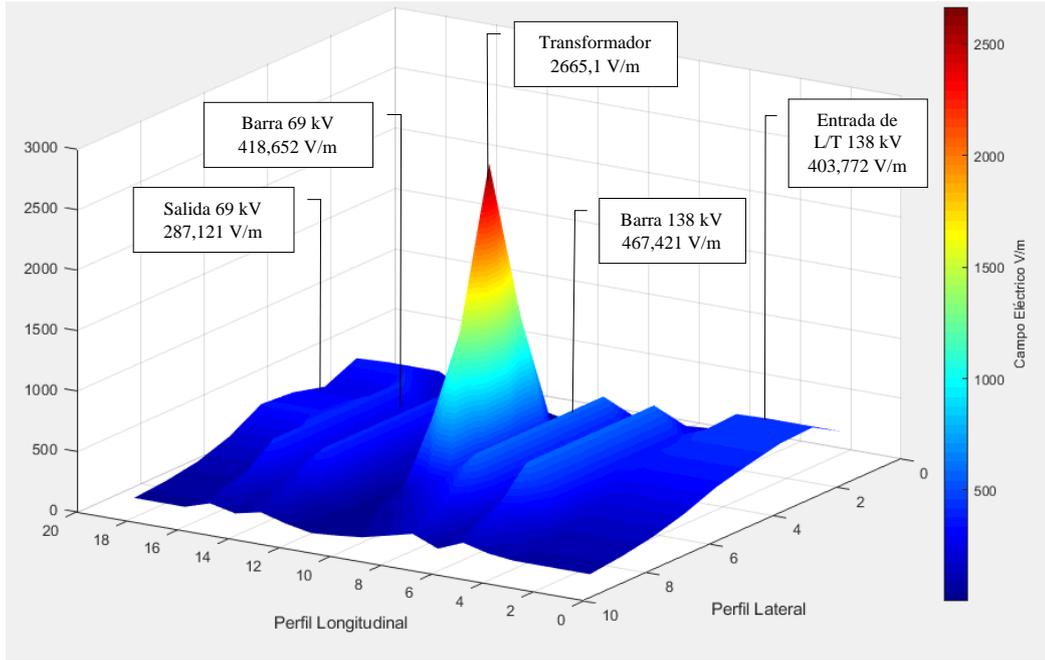


Figura 5. 16. Distribución de Campo Eléctrico.

En tanto que en la Figura 5. 17 se muestra la distribución de campo magnético, en el patio de 69 kV es donde la magnitud incrementa en comparación al patio de 138 kV, contrario a lo que se aprecia con la distribución de campo eléctrico, por otra parte, el transformador sigue siendo el elemento donde incrementa la magnitud en la distribución.

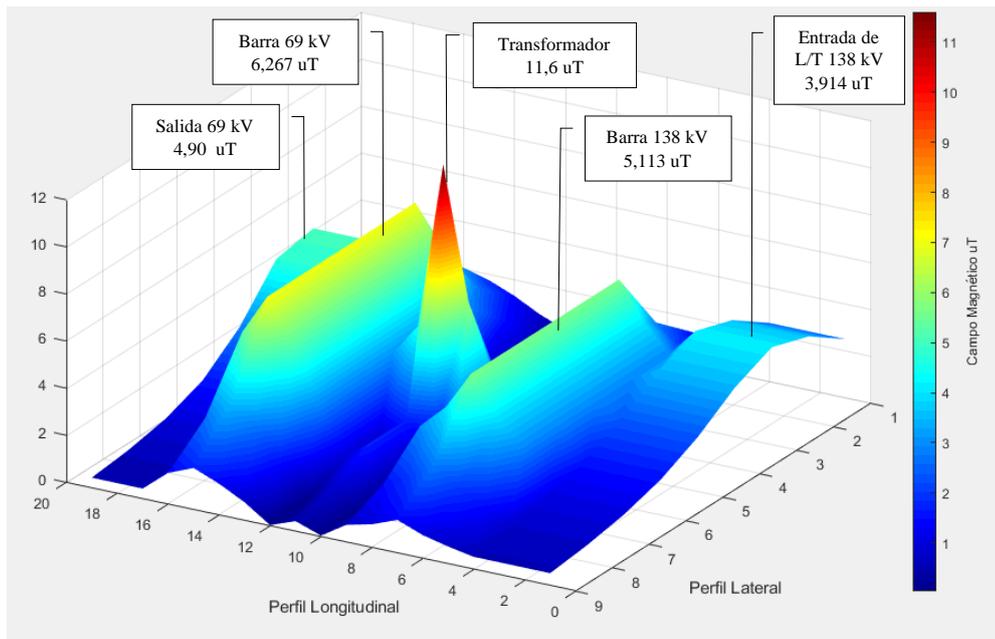
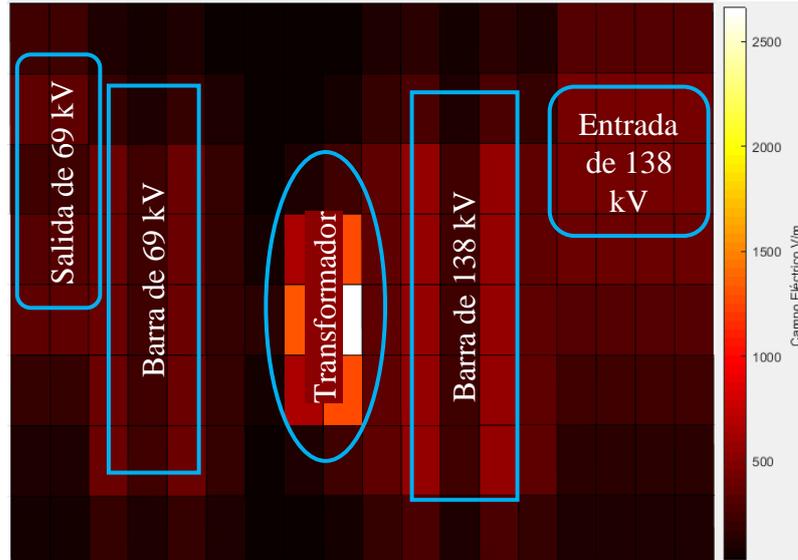
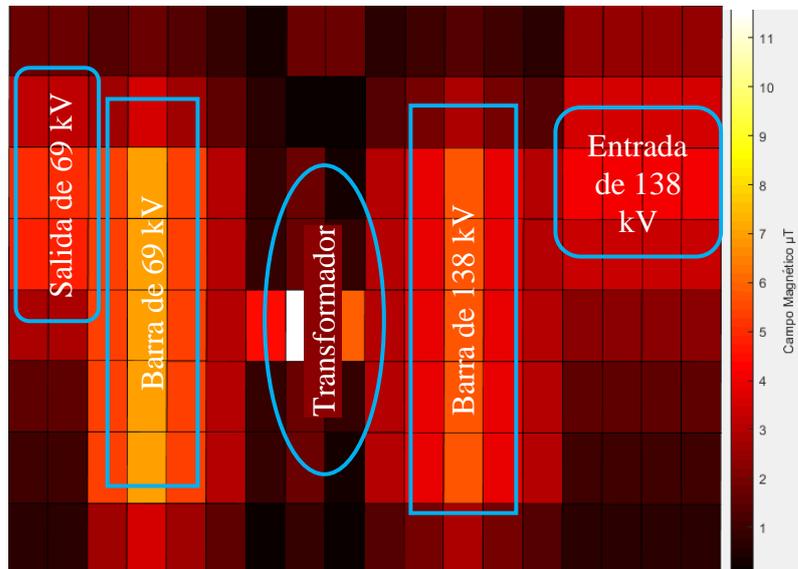


Figura 5. 17. Distribución de Campo Magnético.



(a) Campo Eléctrico



(b) Campo Magnético

Figura 5. 188. Distribución de CEM en la S/E

La Figura 5. 18 muestra todas las áreas mencionadas en diferentes colores, y también indica la fuerza del campo eléctrico y campo magnético en cada área de acuerdo con la representación del patrón térmico.

Los CEM se encuentran distribuidos de acuerdo con la configuración de la Subestación, en el Anexo G se muestra el diagrama de planta, considerando los elementos que en el presente documento han sido tomados en cuenta para el estudio, además se muestran las corrientes asumidas que circulaban en el momento de la medición.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. CONCLUSIONES

Las magnitudes de CEM medidos, simulados y calculados no sobrepasan lo establecido por la Normativa Técnica Ambiental para la Prevención y Control de la Contaminación Ambiental para los Sectores de Infraestructura: Eléctrico, Telecomunicaciones y Transporte, y por las normativas internacionales *International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection*, los valores permitidos del campo eléctrico deben estar por debajo de 8333 V/m y para el campo magnético deben ser inferiores a 417 uT, presentándose en las subestaciones estudiadas valores de máximos de 940,8 V/m en el campo eléctrico y 34,85 uT en el campo magnético .

Se comprobó la validez de la herramienta desarrollada en GUI de Matlab mediante su contraste con lo propuesto por el EPRI. El campo eléctrico calculado con la herramienta es similar al obtenido en las mediciones, comprobando que el campo eléctrico tiene una relación directa con la tensión y el campo magnético con la corriente. Sin embargo, ya que no se dispone de los parámetros eléctricos con los que fueron realizadas las mediciones es necesario variar la corriente de ingreso para ajustar los datos calculados a los datos medidos asumiendo que para la línea entrante de 138 kV el día del estudio circulaba una corriente aproximada de 250 A obteniendo un error promedio entre datos calculados y medidos de 4,52%.

Los campos electromagnéticos en una subestación se distribuyen de forma radial con una elevada intensidad en la fuente de CEM y decrecen conforme se alejan. De los elementos analizados en este trabajo, se evidenció que el transformador es el principal emisor de CEM, esto debido a que sus partes energizadas están más cercanas al suelo, en la estimación realizada a la subestación Tena se pudo apreciar que el campo magnético producido por el transformador es aproximadamente 39,153% superior al mayor valor registrado en el patio de 69 kV y 51,371% más que el registro más alto en el patio de 138 kV. Por otra parte, el campo eléctrico que en el transformador se genera es 84,947% y 78,452% superior al campo producidos en los sistemas de 69 kV y 138 kV respectivamente.

6.2. RECOMENDACIONES

Tanto para el cálculo como para la simulación se deben considerar las tensiones y corrientes particulares a cada línea, para aplicar la metodología de imágenes reflejadas en el cálculo se debe tener especial atención a la geometría de las líneas, un error en este cálculo conllevaría a obtener valores erróneos de la magnitud de CEM.

Si bien es cierto la simulación y el cálculo permiten obtener valores aproximados a la realidad, es necesario que las empresas eléctricas realicen mediciones periódicamente para evaluar la Intensidad de los CEM a la que están expuestos los trabajadores y domicilios colindantes a líneas y subestaciones, se recomienda seguir lo establecido en la normativa *IEEE Standard 644-1994* y realizar las mediciones si es posible en el momento en el que el sistema eléctrico está trabajando a su máxima capacidad, esto permitirá conocer los valores máximos que se producirán en una infraestructura.

En el presente trabajo la tensión y la corriente no están en función del tiempo y no se consideraron parámetros ambientales, se recomienda que como trabajos complementarios se realicen los cálculos en función del tiempo, introducir los parámetros ambientales e incrementar a la interfaz un sistema que permita evaluar los cambios producidos en los CEM al variar la potencia, también se podría incrementar las configuraciones de las barras, puesto en la actual interfaz lo puede realizar pero de forma separada, finalmente se pone en consideración para futuros trabajos modelar el transformador mediante elementos finitos para determinar los CEM que este emite, de tal manera que se obtenga el aporte de toda la máquina.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] V. Cruz and U. Cangahuala, “Campos Electromagnéticos y Salud Pública: Efectos de los CEM sobre el Ambiente,” 2005. [Online]. Available: https://www.who.int/peh-emf/publications/facts/efectosambiente_hojainfoespanol.pdf.
- [2] R. E. de España, “Resumen sobre los campos eléctricos y magnéticos generados por las instalaciones eléctricas de alta tensión.,” *Red Eléctrica de España*, vol. 1. pp. 1–8, 2010.
- [3] F. Vargas, A. Úbeda, M. Azanza, and L. Ferrero, “Campos Electromagnéticos Y Salud Pública.” [Online]. Available: <https://sanidadambiental.com/wp-content/uploads/2009/04/cemysaludpublica.pdf>.
- [4] M. Revueltas Agüero, I. Avila Roque, R. Baqués Merino, and R. C. Beltrán Reguera, “Los campos electromagnéticos de frecuencia extremadamente baja y su impacto sobre la salud de los seres humanos,” *Revista Cubana de Higiene y Epidemiología*, vol. 52, no. 2, pp. 210–227, 2014.
- [5] O. Burgos and A. Lobelo, “Estudio de los campos magnéticos producidos por subestaciones de distribución a 13.2 kV y los problemas que ocasionan en equipos electrónicos y personas.,” UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLIVAR, 2004.
- [6] G. Aponte, A. Escobar, H. Bolaños, and A. Mora, “Evaluación del campo magnético al que están expuestos los trabajadores de subestaciones y circuitos energizados de las empresas de energía,” *Revista CIER*, vol. 53, pp. 15–21, 2009.
- [7] LADE, “Evaluacion mediante simulacion de los CEM en la SE Terminal CONDESA.pdf,” 2018.
- [8] C. E. TRANSELECTRIC, “Estudio de Impacto Ambiental Definitivo Expost, EIAD Expost Subestaciones Eléctricas del Sistema Nacional de Transmisión que No Intersecan con el Sistema Nacional de Áreas Protegidas, Bosques y Vegetación Protectora y Patrimonio Forestal del Estado.” Quito, p. 388, 2012.
- [9] J. R. Martín, *Diseño de Subestaciones Eléctricas*. 1992.
- [10] J. Trashorras, *Subestaciones Electricas*, Paraninfo. Madrid, 2015.
- [11] C. Ramirez, *Subestaciones de Alta y Extra Alta Tensión*, Segunda Ed. Colombia, 1991.
- [12] A. Ramos, “Proyecto Subestación De Distribución 132/20 kV,” Universidad PPolitecnica de Madrid, 2017.

- [13] E. Harper, “Elementos de diseño de subestaciones eléctricas Harper,” 1983. .
- [14] M. Salazar, “SUBESTACIONES ELÉCTRICAS - RELSAMEX,” *Subestaciones eléctricas*. <https://www.relsamex.com/subestaciones-electricas/> (accessed Dec. 18, 2020).
- [15] EmelNorte, “Manual de operación subestación Alpachaca 69 kV,” *EmelNoerte*, vol. 1. Ibarra, p. 99, 2013.
- [16] Y. Hung and R. Freedman, *Física universitaria, con física moderna volumen 2*, Decimisequ. Naucalpan de Juárez, 2009.
- [17] A. R. Castaño, *Corriente Eléctrica Y Circuitos Eléctricos*. 2008.
- [18] K. D. Cabezas Rubio and P. Jiménez Corrales, “Modelación, simulación y medición de los campos electromagnéticos en una línea de extra alto voltaje mediante el método de elementos finitos, caso de aplicación a línea de transmisión de 500 kV San Rafael-El Inga.,” 2019.
- [19] J. Goñi Galarza, *Física General*, Novena Edi. Lima: Editorial Ingeniería E.I.R.L.
- [20] E. G. Amendaño and R. S. Inachonta, “Análisis del campo magnético generado por líneas de distribución cercanas al sector domiciliario.,” *Tesis*, p. 272, 2013, [Online]. Available: <http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/5081/1/UPS-CYT00109.pdf>.
- [21] A. Menor and H. Christian, “Campo Magnético y Fuerzas Magnéticas.” 2017.
- [22] E. Alonso Fustel, R. Garcia Vázquez, and C. Onaindia Olade, *Campos electromagnéticos y efectos en salud*. 2011.
- [23] P. M. Infante, *Electromagnetismo básico e introducción a los circuitos eléctricos*. Riobamba, 2016.
- [24] D. Cheng, *Fundamentos de electromagnetismo para ingeniería*. Mexico D.F., 1998.
- [25] J. Morales and P. Gavela, *Determinación de campos electromagnéticos en sistemas eléctricos.*, Primera Ed., vol. 1. Quito, 2015.
- [26] T. Martín and F. Serrano, “Inducción magnética. Generador eléctrico.” <http://www2.montes.upm.es/dptos/digfa/cfísica/magnet/generador.html> (accessed Dec. 18, 2020).
- [27] Isinergmin, “Generacion.” <http://assets.osinergmin.gob.pe/ImagenesEmpresa/ELECTRICIDAD/Proyectos/genera>

- cion.jpg (accessed Dec. 19, 2020).
- [28] G. Andrés Concha Vielma, “Interacción De Campos Electromagnéticos De Extra Baja Frecuencia Interacción De Campos Electromagnéticos De Extra Baja Frecuencia,” *Univ. Chile*, p. 130, 2010.
- [29] S. Electricidad, “Modelado de líneas de transmisión (Parte 1) | Sector Electricidad | Profesionales en Ingeniería Eléctrica.” <http://www.sectorelectricidad.com/8548/modelado-de-lineas-de-transmision-parte-1/> (accessed Dec. 18, 2020).
- [30] ARCONEL, “RESOLUCIÓN Nro. ARCONEL-018/18,” pp. 1–13, 2018.
- [31] M.-O. Mattsson, A. Ahlbom, and J. Bridges, “Health Effects of Exposure to EMF,” *Heal. Eff. Expo. to Radon*, no. January, 1994, doi: 10.17226/4777.
- [32] H. Salkic, A. Softic, A. Muharemovic, I. Turkovic, and M. Klaric, “Calculation and Measurement of Electromagnetic Fields,” *Electromagn. Radiat.*, 2012, doi: 10.5772/37631.
- [33] R. Leveque, “Método de cálculo y cumplimiento de normativa de campos magnéticos en subestaciones eléctricas,” 2019.
- [34] Electric Power Research Institute, “AC Transmission Line Reference Book--200 kV and Above, Third Edition,” pp. 1–1074, 2005.
- [35] E. RAPID, “Campos eléctricos y magnéticos relacionados con el uso de la energía eléctrica,” 2004, p. 11.
- [36] R. Oficial 41, “Tribunal Constitucional,” vol. 41. p. 79, 2007.
- [37] D. Committee, *IEEE Standard Procedures for Measurement of Power Frequency Electric and Magnetic Fields From AC Power Lines*, vol. 644. 1994.
- [38] J. Coble and R. Escobar, “Anexo i. estudio de contaminación electromagnética.” pp. 1–43, 2006.
- [39] M. de E. y M. MEM, “Protocolo de Medición En Subestaciones y Líneas de Transmisión de Energía Eléctrica en Guatemala.”
- [40] J. A. Morales, P. Gavela, and A. S. Bretas, “Electromagnetic fields in distribution feeders and electrical substations analysis: A study case in Ecuador,” *2015 North Am. Power Symp. NAPS 2015*, 2015, doi: 10.1109/NAPS.2015.7335084.

- [41] N. UNE, “Evaluación de los campos electromagnéticos alrededor de los transformadores de potencia,” 2008.
- [42] Caesoft, “QuickField.”
https://www.caesoft.es/productos/quickfield/Caracteristicas/caracteristicas_quickfield.htm (accessed Feb. 09, 2021).

8. ANEXOS

Anexo A. Tablas De mediciones de CEM

Tabla A.1. Datos de mediciones realizadas en la subestación Ambato.

NIVELES DE CAMPOS ELÉCTRICOS Y MEGNÉTICOS S/E AMBATO				
CODIGO	UBICACIÓN	ICEE[V/m]	ICM [A/m]	DFM [Ut]
R1	Entrada Subestación	35,76	0,28	0,35
R2	Lindero Norte	176,93	0,86	1,08
R3	Lindero Noroeste	19,74	0,36	0,45
R4	Lindero Oeste (Junto a Vivienda)	67,47	0,49	0,62
R5	Lindero Oeste (Junto a Viviendas)	85,8	0,32	0,4
R6	Lindero Suroeste	37,39	0,19	0,24
R7	Lindero Sur (Salida L/T)	219,99	0,72	0,89
R8	Lindero Sureste	59,61	0,4	0,5
R9	Lindero Este (Junto a Vivienda)	101,95	0,35	0,44
R10	Lindero Este (Junto a Viviendas)	56,17	0,19	0,24
R11	Cuarto de Control	6,74	0,77	0,96
R12	Patio 138 kV (Bahía Totoras)	225,93	7,77	9,71
R13	Patio 138 kV (Bahía AT1)	223,49	2,34	2,93
R14	Patio 138 kV (Bahía Pucará)	219,9	8,95	11,19
R15	Patio 69 kV (Bahía Ambato 2)	170,18	1,23	1,54
R16	Patio 69 kV (Bahía Latacunga)	238,16	2,66	3,33
R17	Transformador de Potencia	225,78	1,38	1,67

Tabla A. 2. Datos de mediciones realizadas en la subestación Chone.

NIVELES DE CAMPOS ELÉCTRICOS Y MEGNÉTICOS S/E CHONE				
CODIGO	UBICACIÓN	ICEE[V/m]	ICM [A/m]	DFM [Ut]
R1	Entrada Subestación	226,08	0,34	0,43
R2	Lindero Oeste (Cerca de Edificación)	229,55	0,24	0,31
R3	Lindero Oeste	103,9	0,13	0,17
R4	Lindero Sur	221,92	0,15	0,19
R5	Lindero Sureste	227,75	0,06	0,07
R6	Lindero Este	77,28	0,04	0,06
R7	Lindero Noreste	91,43	0,03	0,04
R8	Patio 69 kV (Bahía Tosagua)	216,46	6,42	8,02
R9	Patio 69 kV (Bahía ATQ)	233	13,91	17,39
R10	Transformador de Potencia	226,46	4,09	5,11
R11	Patio de 138 kV	222,17	5,71	7,14

Tabla A. 3. Datos de mediciones realizadas en la subestación Coca.

NIVELES DE CAMPOS ELÉCTRICOS Y MEGNÉTICOS S/E COCA				
CODIGO	UBICACIÓN	ICEE[V/m]	ICM [A/m]	DFM [Ut]
R1	Entrada Subestación	132,62	3,92	4,9
R2	Lindero Suroeste	69,79	2,12	2,65
R3	Lindero Noroeste	472,32	3,58	4,47
R4	Lindero Noreste	462,73	3,84	4,8
R5	Patio de 69 kV	474,35	5,91	7,38
R6	Transformador de Potencia	475,19	4,08	5,11
R7	Patio de 138 kV	476,33	4,68	5,86
R8	Cuarto de Control	35,64	3,65	4,56

Tabla A. 4. Datos de mediciones realizadas en la subestación Dos Cerritos.

NIVELES DE CAMPOS ELÉCTRICOS Y MEGNÉTICOS S/E DOS CERRITOS				
CODIGO	UBICACIÓN	ICEE[V/m]	ICM [A/m]	DFM [Ut]
R1	Entrada Subestación	199,21	0,18	0,23
R2	Lindero Suroeste	100,81	0,09	0,12
R3	Lindero Sureste	327,94	0,47	0,59
R4	Lindero Noreste	326,82	3,43	4,29
R5	Lindero (Frente a Patio de 230 kV)	323	2,24	2,8
R6	Cuarto de Control	1,95	0,76	0,95
R7	Entre Transformadores No. 1 y 2	329,36	5	6,26
R8	Entre Transformadores No. 3 y 4	325,43	2,94	3,68
R9	Patio de 230 kV	327,37	3,38	4,22
R10	Patio de 138 kV	327,5	16,47	20,58

Tabla A.5. Datos de mediciones realizadas en la subestación Esmeraldas.

NIVELES DE CAMPOS ELÉCTRICOS Y MEGNÉTICOS S/E ESMERALDAS				
CODIGO	UBICACIÓN	ICEE[V/m]	ICM [A/m]	DFM [Ut]
R1	Entrada Subestación	227,76	0,1	0,12
R2	Lindero Suroeste	5,31	0,04	0,05
R3	Lindero Sureste	224,13	0,22	0,28
R4	Lindero Noreste	228,03	0,2	0,24
R5	Lindero Noroeste	229,57	0,67	0,84
R6	Transformador No. 1	230,34	3,16	3,95
R7	Transformador No. 2	231,98	2,55	3,2
R8	Patio 138 kV (Bahía Santo Domingo 2)	225,5	4,93	6,16
R9	Patio 138 kV (Bahía ATQ)	219,32	4,67	5,83

Tabla A. 6. Datos de mediciones realizadas en la subestación Ibarra.

NIVELES DE CAMPOS ELÉCTRICOS Y MEGNÉTICOS S/E IBARRA				
CODIGO	UBICACIÓN	ICEE[V/m]	ICM [A/m]	DFM [Ut]
R1	Entrada Subestación	163	0,12	0,15
R2	Lindero Sureste	64,98	0,02	0,03
R3	Lindero Noreste	71,58	0,04	0,05
R4	Lindero Noroeste	235,43	0,84	1,05
R5	Patio Trafo No. 1 (A)	227,46	3,23	4,05
R6	Patio Trafo No. 1 (B)	232,24	3,18	3,98
R7	Patio Trafo No. 2	220,06	1,1	1,37
R8	Patio 138 kV (Capacitores)	225,08	0,42	0,53
R9	Patio 138 kV (Bahía Pomasqui 1)	224,51	4,71	5,89
R10	Patio 138 kV (Bahía ATQ)	226,15	4,94	6,18
R11	Patio 69 kV (Bahía Alpachaca)	218,68	2,82	3,53
R12	Patio 69 kV (Bahía ATQ)	226,05	8,74	10,93
R13	Cuarto de Control	7,54	0,16	0,21

Tabla A. 7. Datos de mediciones realizadas en la subestación San Idelfonso.

NIVELES DE CAMPOS ELÉCTRICOS Y MEGNÉTICOS S/E SAN IDELFONSO				
CODIGO	UBICACIÓN	ICEE[V/m]	ICM [A/m]	DFM [Ut]
R1	Entrada Subestación	228,65	1,22	1,53
R2	Lindero Vértice 2	14,15	0,98	1,22
R3	Patio 138 Kv	229,95	12,55	15,69
R4	Patio 138 Kv	223,99	11,78	14,73
R5	Cuarto de Control	5,56	0,85	1,06

Tabla A. 8. Datos de mediciones realizadas en la subestación Mulalo.

NIVELES DE CAMPOS ELÉCTRICOS Y MEGNÉTICOS S/E MULALÓ				
CODIGO	UBICACIÓN	ICEE[V/m]	ICM [A/m]	DFM [Ut]
1	Cuarto de Control	2,29	0,32	0,4
2	Lindero Noroeste	8,39	0,12	0,15
3	Lindero Suroeste	16,27	0,15	0,19
4	Lindero Sureste	228,26	1,38	1,73
5	Lindero Noreste	222,28	0,72	0,9
6	Bahía Novacero	224,15	3,17	3,96
7	Patio 138 kV (Barra Principal)	220,33	1,41	1,76
8	Patio 138 kV (Bahía Pucará)	224,92	9,66	12,08
9	Patio 138 kV (Bahía Vicentina)	218,21	5,69	7,11

Tabla A. 9. Datos de mediciones realizadas en la subestación Policentro.

NIVELES DE CAMPOS ELÉCTRICOS Y MEGNÉTICOS S/E POLICENTRO				
CODIGO	UBICACIÓN	ICEE[V/m]	ICM [A/m]	DFM [Ut]
R1	Entrada Subestación	183	1,05	1,31
R2	Lindero Suroeste	325,45	1,08	1,34
R3	Lindero Sur	326,18	1,65	2,06
R4	Lindero Sureste	331	1,15	1,44
R5	Lindero Norte	321	2,9	3,63
R6	Lindero (Frente a Capacitores)	327	8,18	10,23
R7	Entre Transformadores No. 1 y 2	323	14,66	18,33
R8	Patio 69 kV	327,53	14,78	18,48
R9	Patio 138 kV	343	11,26	14,08
R10	Cuarto de Control	156,87	1,37	1,71

Tabla A. 10. Datos de mediciones realizadas en la subestación Pascuales.

NIVELES DE CAMPOS ELÉCTRICOS Y MEGNÉTICOS S/E PASCULAES				
CODIGO	UBICACIÓN	ICEE[V/m]	ICM [A/m]	DFM [Ut]
1	Patio Transformadores (1)	171	1,57	1,96
2	Patio Transformadores (2)	300,1	1,28	1,6
3	Autotransformador	50,67	2,12	2,65
4	Punto 1 Patio 69 kV	940,8	7,23	9,04
5	Punto 2 Patio 69 kV	463,5	1,33	1,66
6	Punto 3 Patio 69 kV	114,44	1,53	1,91
7	Punto 4 Patio 69 kV	87,6	0,37	0,46
8	Punto 1 Patio 138 kV	174,58	1,19	1,49
9	Punto 2 Patio 138 kV	321,5	0,86	1,08
10	Punto 3 Patio 138 kV	12,77	0,89	1,11
11	Punto 4 Patio 138 kV	49,93	0,21	0,27
12	Punto 1 Patio 230 kV	51,43	2,29	2,86
13	Punto 2 Patio 230 kV	420,3	0,42	0,53
14	Punto 3 Patio 230 kV	420,2	0,31	0,39
15	Punto 4 Patio 230 kV	32,15	0,27	0,34

Tabla A. 11. Datos de mediciones realizadas en la subestación Portoviejo.

NIVELES DE CAMPOS ELÉCTRICOS Y MEGNÉTICOS S/E PORTOVIEJO				
CODIGO	UBICACIÓN	ICEE[V/m]	ICM [A/m]	DFM [Ut]
R1	Entrada Subestación	99,16	0,05	0,07
R2	Lindero Sur	47,39	0,05	0,06
R3	Lindero Sureste	221,28	0,06	0,07
R4	Lindero Este	226,72	3,29	4,11
R5	Lindero Norte	230,27	0,26	0,32
R6	Lindero Oeste	223,93	0,98	1,22
R7	Lindero Suroeste	221,96	1,01	1,26
R8	Patio de 69 kV	222,47	22,57	28,21
R9	Transformador No.1	228,25	12,8	16,01
R10	Transformador No.2	223,5	8,47	10,58
R11	Cuarto de Control	7,41	0,41	0,52
R12	Banco de Capacitores	223,67	0,86	1,08
R13	Patio de 138 kV	228,1	2,85	3,47

Tabla A. 12. Datos de mediciones realizadas en la subestación Pucará.

NIVELES DE CAMPOS ELÉCTRICOS Y MEGNÉTICOS S/E PUCARÁ				
CODIGO	UBICACIÓN	ICEE[V/m]	ICM [A/m]	DFM [Ut]
1	Entrada Subestación	31,12	0,15	0,19
2	Lindero Sureste	122,77	0,01	0,02
3	Lindero Noreste	68,61	0,18	0,23
4	Lindero Noroeste	3,97	0,01	0,02
5	Patio 138 kV (Bahía Mulaló)	680,25	10,6	13,26
6	Patio 138 kV (Barra Principal)	723,06	2,47	3,09
7	Patio 138 kV (Bahía Ambato)	726,95	7,61	9,52

Tabla A. 13. Datos de mediciones realizadas en la subestación Santa Rosa.

NIVELES DE CAMPOS ELÉCTRICOS Y MEGNÉTICOS S/E SANTA ROSA				
CODIGO	UBICACIÓN	ICEE[V/m]	ICM [A/m]	DFM [Ut]
R1	Entrada Subestación	76,54	0,14	0,17
R2	Lindero Noreste	217,43	1,66	2,08
R3	Reactores	229,83	9,96	12,45
R4	Lindero este	225,22	5,71	7,14
R5	Patio 138 kV	230,76	23,4	29,26
R6	Patio 138 kV	230,45	21,95	27,43
R7	Lindero Sureste	231,99	0,21	0,27
R8	Lindero Sur	229,54	0,68	0,85
R9	Patio de Transformadores entre A y B	223,31	8,73	10,92
R10	Patio de Transformadores entre D y E	223,13	30,28	37,85
R11	Patio de 230 kV (Barra No.2)	222,97	8,93	10,48
R12	Patio de 230 kV (Bahía Santo Domingo 2)	222,38	3,22	4,02
R13	Patio de 230 kV	221,78	1,66	2,08
R14	Patio de 230 kV	224,36	2,27	5,33
R15	Lindero Noreste	230,14	1,21	1,51
R16	Patio de 230 kV	223,76	5,13	6,41
R17	Patio de 230 kV	228,64	7,88	9,85
R18	Lindero Suroeste	83,04	0,07	0,09
R19	Fuera de edificio de oficinas	235,45	0,12	0,15

Tabla A. 14. Datos de mediciones realizadas en la subestación Santo Domingo.

NIVELES DE CAMPOS ELÉCTRICOS Y MEGNÉTICOS S/E SANTO DOMINGO				
CODIGO	UBICACIÓN	ICEE[V/m]	ICM [A/m]	DFM [Ut]
R1	Entrada Subestación	40,71	0,02	0,03
R2	Lindero Norte No,1	43,89	0,02	0,03
R3	Lindero Norte No,2	216,69	0,93	1,17
R4	Lindero Noroeste	152,58	0,08	0,1
R5	Lindero Suroeste	223,65	0,41	0,51
R6	Lindero Sur No,1	221,03	0,36	0,45
R7	Lindero Sur No,2	238,76	0,56	0,7
R8	Lindero Sur No,3	227,86	0,66	0,82
R9	Lindero Sureste	152,5	0,04	0,05
R10	Lindero Noreste	94,54	0,07	0,09
R11	Patio de Transformadores No, 1 (Entre Patio 69 y 138 kV)	226,28	3,41	4,26
R12	Patio de Transformadores No, 1 (Entre Patio 138 y 230 kV)	224,15	2,21	2,76
R13	Patio de 69 kV (Bahía ATQ)	227,79	27,08	33,87
R14	Patio de 138 kV (Bahía ATR)	230,78	12,87	16,09
R15	Patio de 230 kV (Bahía Quevedo1)	223,65	5,99	7,49

Tabla A. 15. Datos de mediciones realizadas en la subestación Tena.

NIVELES DE CAMPOS ELÉCTRICOS Y MEGNÉTICOS S/E TENA				
CODIGO	UBICACIÓN	ICEE[V/m]	ICM [A/m]	DFM [uT]
R1	Lindero Inferior Izquierdo	223,23	3,77	4,71
R2	Lindero Superior Izquierdo	291,49	3,98	4,98
R3	Lindero Superior	442,36	3,82	4,77
R4	Lindero Superior Derecho	401,91	3,25	4,07
R5	Lindero Inferior Derecho	181,31	3,68	4,6
R6	Entrada Subestación	403,4	3,44	4,3
R7	Transformador de Potencia	439,6	5,47	6,84
R8	Patio de 69 kV	430,59	5,22	6,52
R9	Patio de 138 kV	476,62	3,82	4,77
R10	Patio de 138 kV	477,9	4,13	5,17
R11	Cuarto de Control	5,13	3,79	4,74

Tabla A. 16. Datos de mediciones realizadas en la subestación Tulcán.

NIVELES DE CAMPOS ELÉCTRICOS Y MEGNÉTICOS S/E TULCAN				
CODIGO	UBICACIÓN	ICEE[V/m]	ICM [A/m]	DFM [Ut]
R1	Entrada Subestación	17,29	0,03	0,04
R2	Lindero Superior	28,05	0	0
R3	Lindero Superior Izquierdo	144,9	0,01	0,02
R4	Lindero Inferior Izquierdo	16,15	0	0
R5	Lindero Inferior Derecho	221,86	1,82	2,27
R6	Patio 138 kV Bahía Rumichaca	226,63	0,06	0,08
R7	Patio 138 kV Bahía ATQ	227,82	0,86	1,07
R8	Patio Transformadores	234,09	2,18	2,73
R9	Patio 69 Bahía ATQ	224,65	0,01	0,01
R10	Cuarto de Control	12,43	0,11	0,15

Tabla A. 17. Datos de mediciones realizadas en la subestación Vicentina.

NIVELES DE CAMPOS ELÉCTRICOS Y MEGNÉTICOS S/E VICENTINA				
CODIGO	UBICACIÓN	ICEE[V/m]	ICM [A/m]	DFM [Ut]
1	Entrada a Subestación	30,76	1,18	1,47
2	Lindero Norte	120,45	0,87	1,09
3	Lindero Norte	223,1	0,2	0,25
4	Lindero Noreste	740,04	0,43	0,53
5	Lindero Sureste	54,28	0,05	0,07
6	Lindero Sur	497,51	0,65	0,81
7	Bahía AT2 – Patio 138 kV	709,17	3,97	4,97
8	Bahía Santa Rosa Patio 138 kV	523,84	1,73	2,16
9	Bahía Mulaló – Patio 138 kV	705,43	1,63	2,04
10	Barra de Transferencia – Patio 138 kV	688,7	1,59	1,99
11	Lindero Este - Bajo Salida L/T St. Rosa	686,92	0,76	0,96
12	Lindero Este - Entre L/T Mulaló y Pomasqui	720,97	2,3	2,87
13	Lindero Suroeste	98,77	0,86	1,08
14	Transformador No. 1	737,53	1,46	1,83
15	Transformador No. 2	702,67	3,19	3,98
16	Cuarto de Control	2,25	0,52	0,65
17	Cuarto de Control (Tableros)	4,33	0,81	1,01

Anexo B. Resolución del ejercicio EPRI

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 20m de la línea central, y a 2 m sobre el suelo

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

$$d_b = \frac{s}{\operatorname{sen}\left(\frac{\pi}{n}\right)} = \frac{0,45}{\operatorname{sen}\left(\frac{\pi}{3}\right)} = 0,52 \text{ m}$$

$$d_{eq} = d_b * \sqrt[n]{\frac{n \cdot d}{d_b}} = 0,52 \cdot \sqrt[3]{\frac{3(0,033)}{0,52}} = 0,3 \text{ m}$$

Los coeficientes de potencial se calculan:

$$P_{aa} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \ln \frac{4H_A}{d_{eq}} = \frac{1}{2\pi(8,85 \cdot 10^{-12})} \ln \frac{4(10,6)}{0,3} = 8,9039 \cdot 10^{10} \text{ m/F}$$

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

Los coeficientes de potencial mutuo se calculan:

$$P_{ab} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \ln \frac{S'_{ab}}{S_{ab}} = \frac{1}{2\pi(8,85 \cdot 10^{-12})} \ln \frac{23,44}{10} = 1,53 \cdot 10^{10} \text{ m/F}$$

$$P_{AB} = P_{BC}$$

$$P_{ac} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \ln \frac{S'_{ac}}{S_{ac}} = \frac{1}{2\pi(8,85 \cdot 10^{-12})} \ln \frac{29,1451}{20} = 6,77 \cdot 10^9 \text{ m/F}$$

Los coeficientes de potencial forman una matriz cuadrada:

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

$$[P] = \begin{bmatrix} 8,91 & 1,53 & 0,68 \\ 1,53 & 8,91 & 1,53 \\ 0,68 & 1,53 & 8,91 \end{bmatrix} \cdot 10^{10} \text{ m/F}$$

$$[P]^{-1} = \begin{bmatrix} 11,6 & -1,90 & -0,56 \\ -1,90 & 11,9 & -1,90 \\ 0,56 & -1,90 & 11,6 \end{bmatrix} \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$$

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

$$V_{ra} = -0,5 \cdot \frac{525}{\sqrt{3}} = -151,6 \text{ kV}$$

$$V_{rb} = \frac{525}{\sqrt{3}} = -303,1 \text{ kV}$$

$$V_{rc} = -0,5 \cdot \frac{525}{\sqrt{3}} = -15,6 \text{ kV}$$

$$V_{ia} = -0,5 (525) = 262,5 \text{ kV}$$

$$V_{ib} = 0$$

$$V_{ic} = 0,5 (525) = 262,5 \text{ kV}$$

$$[Q_r] = \begin{bmatrix} 11,6 & -1,90 & -0,56 \\ -1,90 & 11,9 & -1,90 \\ 0,56 & -1,90 & 11,6 \end{bmatrix} \cdot 10^{-12} \cdot \begin{bmatrix} -151,6 \\ -303,1 \\ -151,6 \end{bmatrix}$$

$$Q_{ra} = -2,25 \cdot 10^{-6} \text{ C/m}$$

$$Q_{rb} = 4,18 \cdot 10^{-6} \text{ C/m}$$

$$Q_{rc} = -2,25 \cdot 10^{-6} \text{ C/m}$$

$$Q_{ia} = 3,19 \cdot 10^{-6} \text{ C/m}$$

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

$$Q_{ic} = -3,19 \cdot 10^{-6} \text{ C/m}$$

Los componentes horizontal y vertical del vector de campo en un punto de medición M.

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

$$\vec{E}_{ax} = \frac{(-2,25 \cdot 10^{-6} + j3,19 \cdot 10^{-6})}{2\pi(8,85 \cdot 10^{-12})} \cdot \left[\frac{30}{30^2 + (10,6 - 2)^2} - \frac{30}{30^2 + (10,6 + 2)^2} \right]$$

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

$$\vec{E}_{bx} = \frac{(4,18 \cdot 10^{-6} + j0)}{2\pi(8,85 \cdot 10^{-12})} \cdot \left[\frac{20}{20^2 + (10,6 - 2)^2} - \frac{20}{20^2 + (10,6 + 2)^2} \right]$$

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

$$\vec{E}_{cx} = \frac{(-2,25 \cdot 10^{-6} - 3,19 \cdot 10^{-6}j)}{2\pi(8,85 \cdot 10^{-12})} \cdot \left[\frac{10}{10^2 + (10,6 - 2)^2} - \frac{10}{10^2 + (10,6 + 2)^2} \right]$$

$$\vec{E}_{cx} = -762 - 1080j \text{ v/m}$$

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

$$\vec{E}_{ay} = \frac{(-2,25 \cdot 10^{-6} + j3,19 \cdot 10^{-6})}{2\pi(8,85 \cdot 10^{-12})} \cdot \left[\frac{30 - 10,6}{30^2 + (10,6 - 2)^2} - \frac{30 + 10,6}{30^2 + (10,6 + 2)^2} \right]$$

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

$$\vec{E}_{by} = \frac{(4,18 \cdot 10^{-6} + j0)}{2\pi(8,85 \cdot 10^{-12})} \cdot \left[\frac{20 - 10,6}{20^2 + (10,6 - 2)^2} - \frac{20 + 10,6}{20^2 + (10,6 + 2)^2} \right]$$

$$\vec{E}_{by} = -3055 \text{ V/m}$$

$$\vec{E}_{by} = \frac{(-2,25 \cdot 10^{-6} - 3,19 \cdot 10^{-6}j)}{2\pi(8,85 \cdot 10^{-12})} \cdot \left[\frac{10 - 10,6}{10^2 + (10,6 - 2)^2} - \frac{10 + 10,6}{10^2 + (10,6 + 2)^2} \right]$$

$$\vec{E}_{by} = 3967 + j5927 \text{ V/m}$$

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

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

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

Anexo C. Diagramas de flujo del algoritmo propuesto

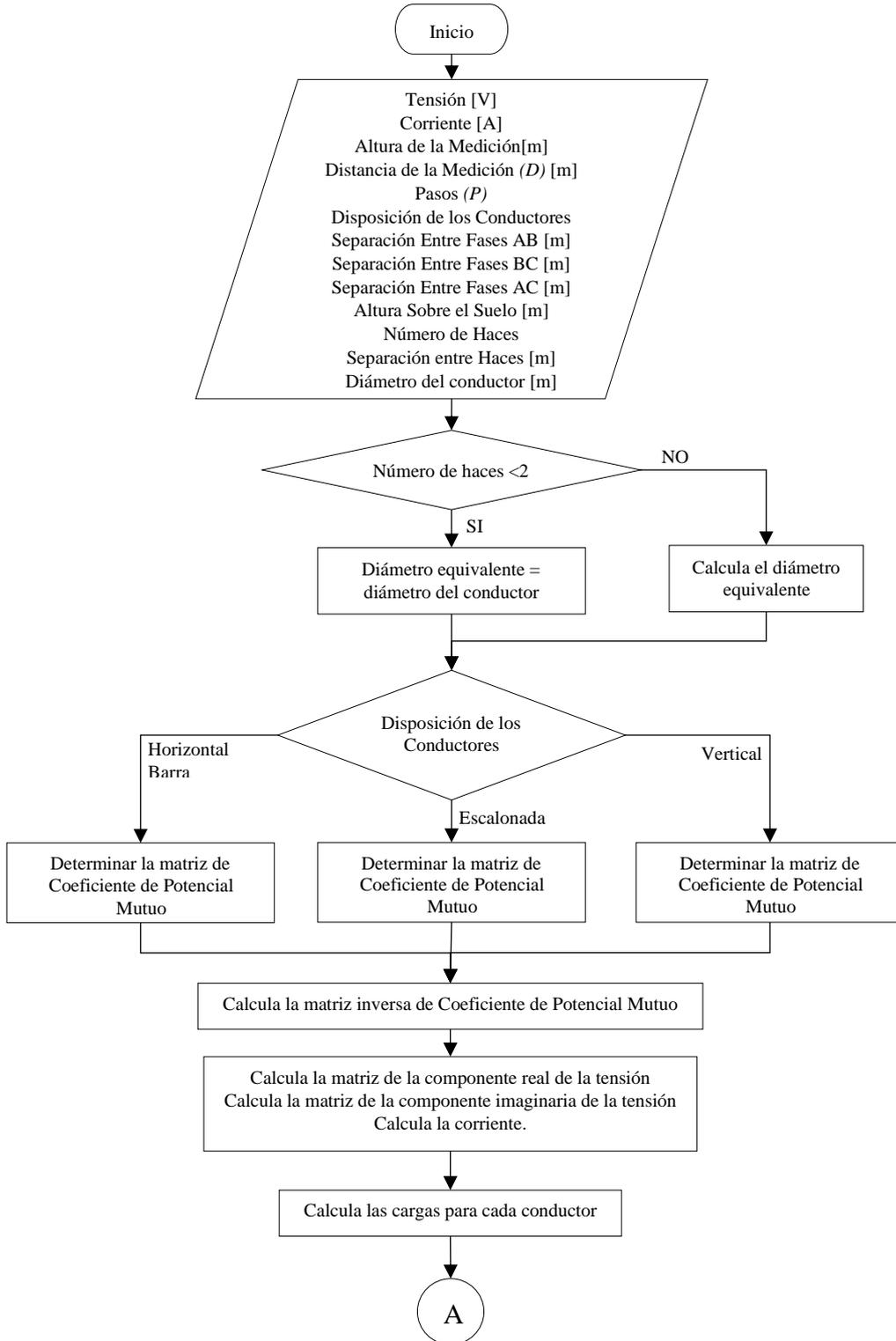


Figura C. 1. Diagrama de flujo correspondiente al cálculo para líneas y barras.

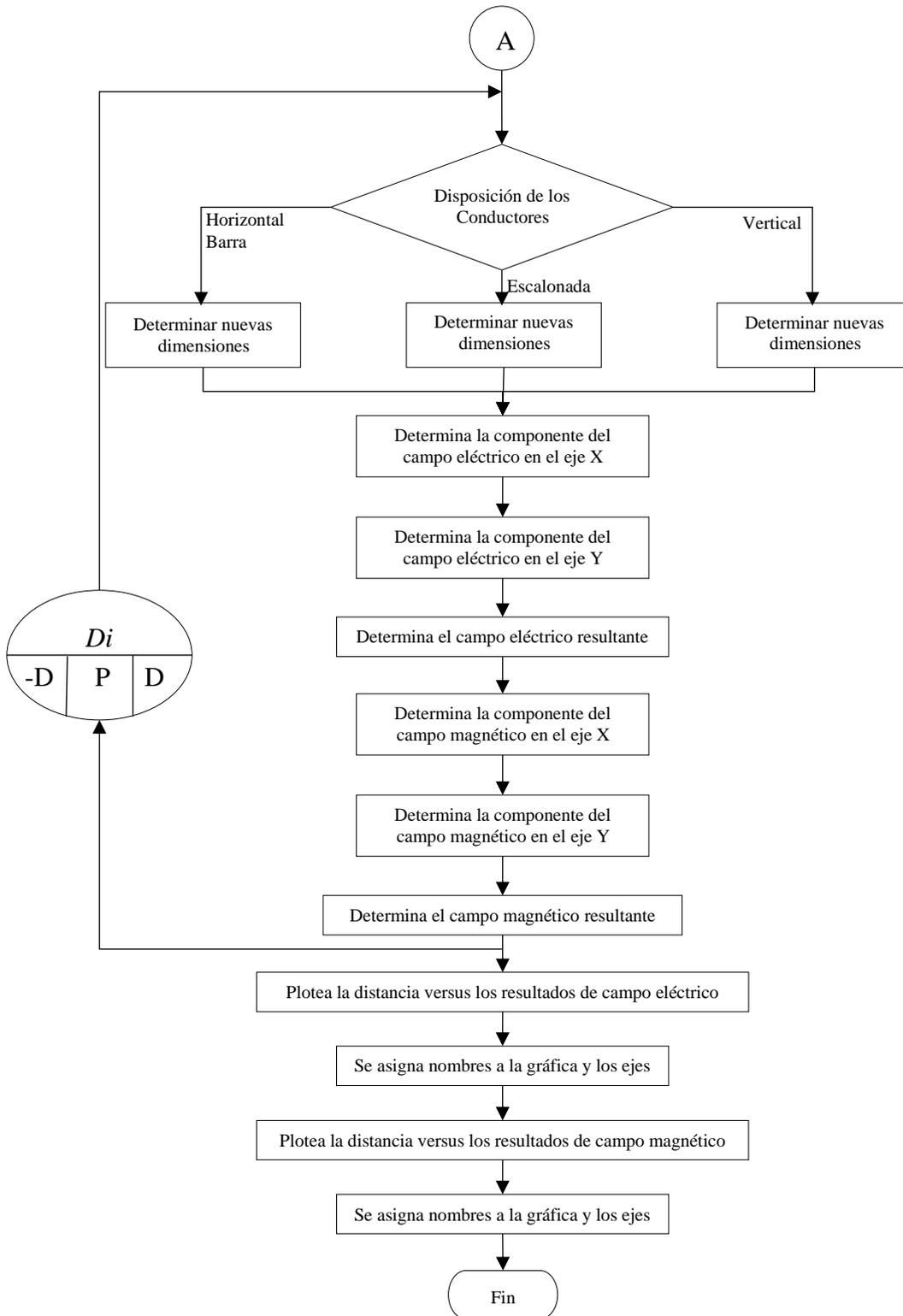


Figura C. 2. Diagrama de flujo correspondiente al cálculo para líneas y barras.

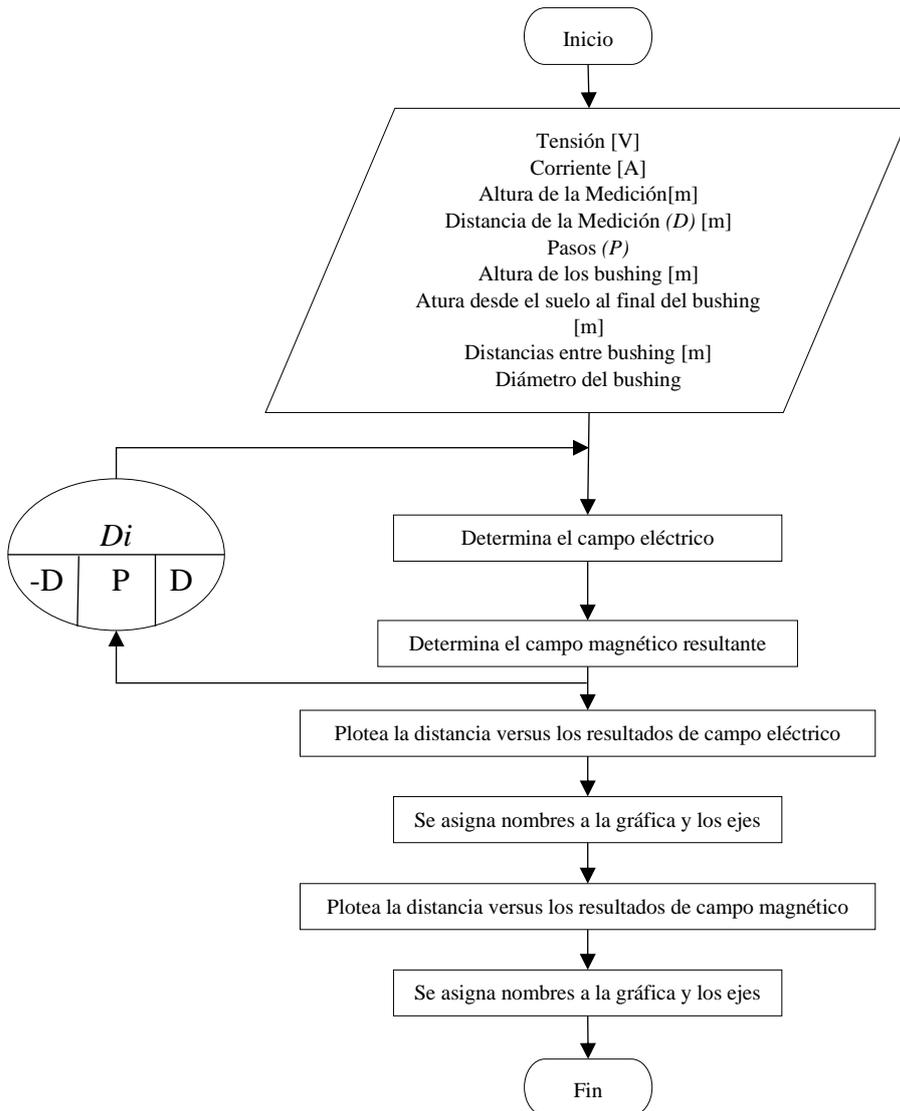


Figura C. 3. Diagrama de flujo correspondiente al cálculo para el transformador.

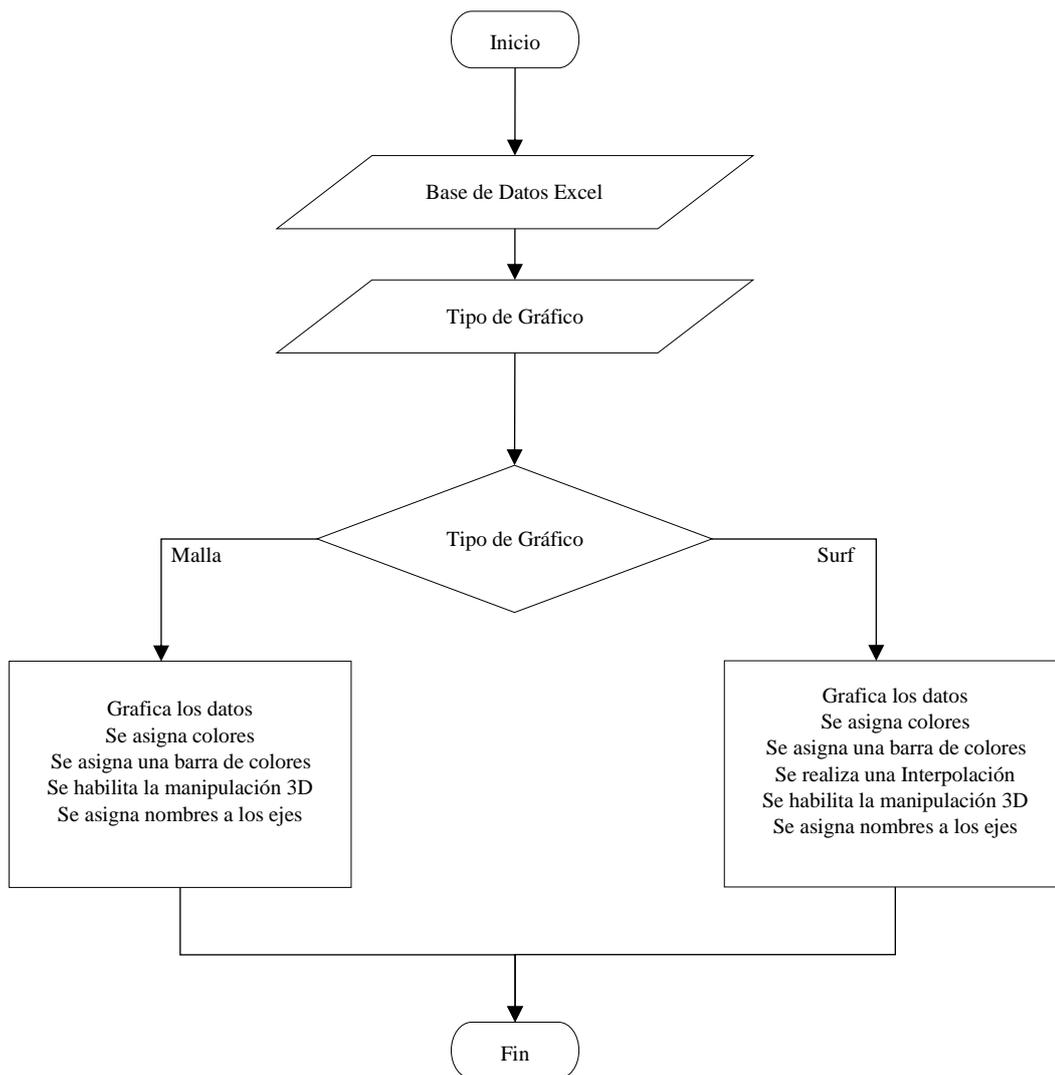


Figura C. 4. Diagrama de flujo correspondiente a la herramienta graficadora.

Anexo D. Interfaz de Matlab

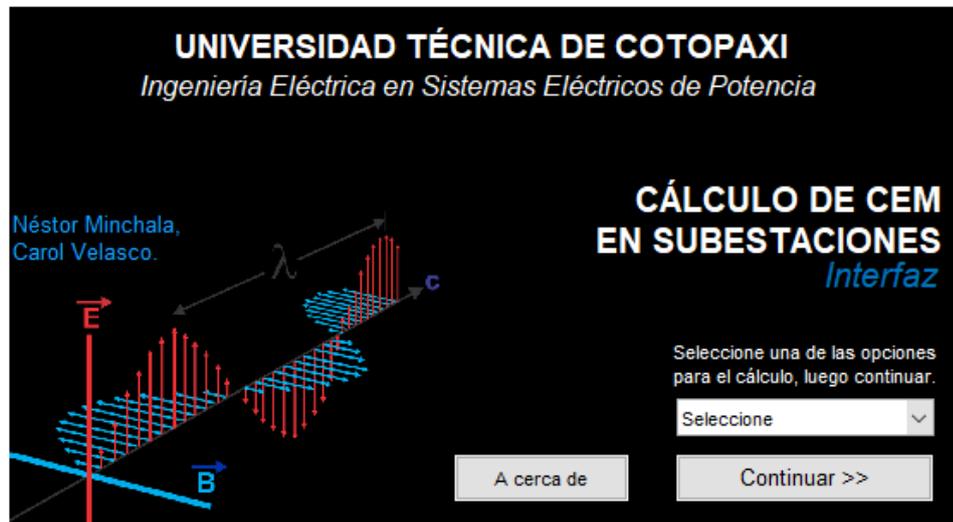


Figura D. 1. Ventana de Inicio.



Figura D. 2. Ventana de Información de la Interfaz.

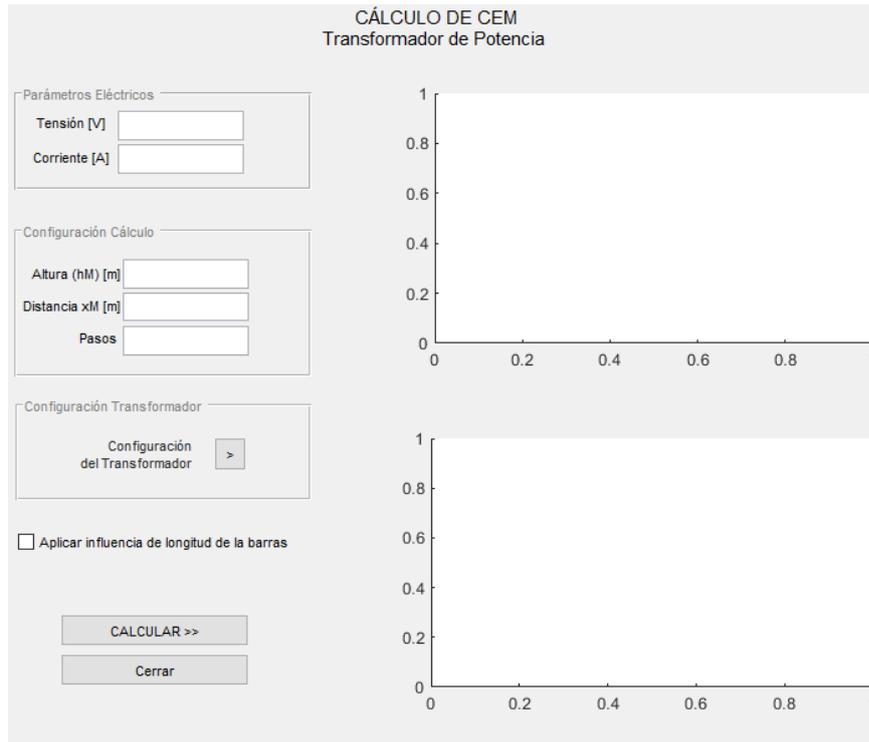


Figura D. 3. Ventana para ingreso de datos y salida de gráficos de CEM del transformador.

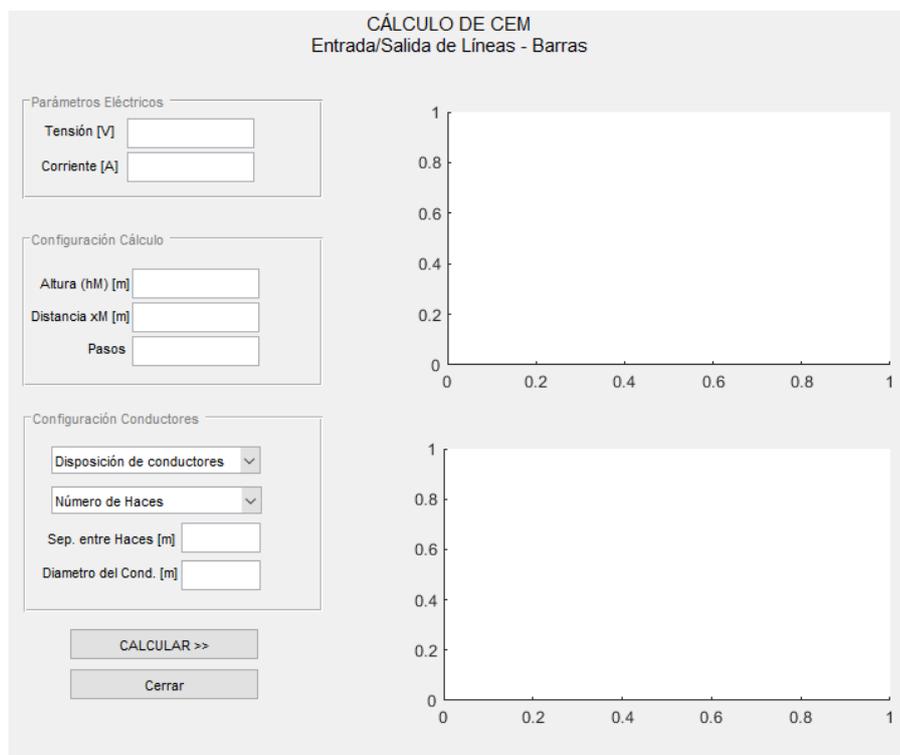


Figura D. 4. Ventana para ingreso de datos y salida de gráficos de CEM de las líneas y barras.

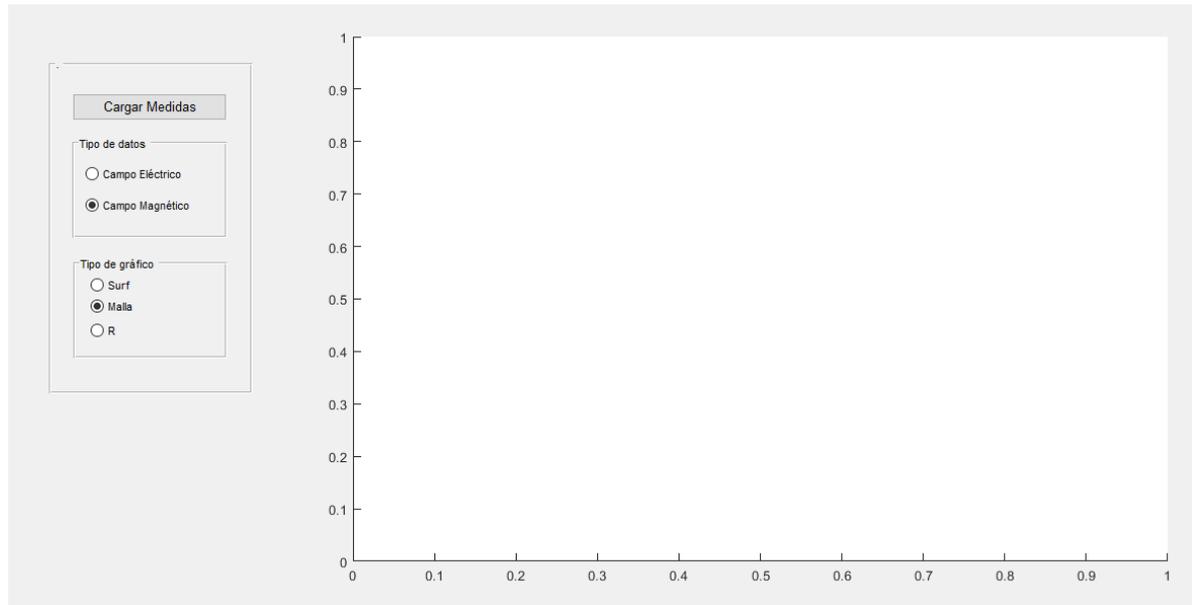


Figura D. 5. Ventana para cargar datos y salida de gráficos de distribución de CEM.

Anexo E. Tablas comparativas entre lo calculado y simulado**Tabla E. 1.** Datos de CEM obtenidos del cálculo y simulación en la línea de 138 kV.

Entrada de 138						
<i>Dist.</i>	<i>Ec (V/m)</i>	<i>Es (V/m)</i>	<i>Error (%)</i>	<i>Bc (uT)</i>	<i>Bs (uT)</i>	<i>Error (%)</i>
-8	369,03	151,01	59,08	2,94	2,43	17,35
-7,5	385,91	187,38	51,44	3,06	2,41	21,11
-7	402,48	220,87	45,12	3,17	2,44	23,03
-6,5	418,44	256,69	38,65	3,29	2,49	24,20
-6	433,43	292,50	32,52	3,40	2,52	25,84
-5,5	447,08	325,62	27,17	3,51	2,66	24,19
-5	459,02	358,05	22,00	3,62	2,84	21,44
-4,5	468,87	387,86	17,28	3,72	3,05	17,92
-4	476,30	415,34	12,80	3,81	3,28	13,89
-3,5	481,08	438,95	8,76	3,90	3,47	10,91
-3	483,06	462,81	4,19	3,97	3,58	9,82
-2,5	482,20	480,49	0,36	4,03	3,71	8,03
-2	478,66	494,04	3,21	4,09	3,85	5,75
-1,5	472,71	501,69	6,13	4,12	3,99	3,23
-1	464,81	509,88	9,70	4,15	4,05	2,34
-0,5	455,50	508,68	11,68	4,16	4,12	0,87
0	445,43	503,36	13,01	4,15	4,15	0,00
0,5	435,27	491,10	12,83	4,13	4,18	1,24
1	425,63	479,43	12,64	4,10	4,16	1,59
1,5	417,00	456,64	9,51	4,05	4,11	1,56
2	409,67	431,01	5,21	3,99	4,07	2,11
2,5	403,77	401,48	0,57	3,91	3,97	1,43
3	399,20	371,08	7,04	3,83	3,87	0,99
3,5	395,69	331,58	16,20	3,74	3,70	1,12
4	392,90	292,15	25,64	3,64	3,51	3,68
4,5	390,42	254,42	34,83	3,54	3,41	3,67
5	387,88	225,50	41,86	3,43	3,29	4,14
5,5	384,95	194,12	49,57	3,32	3,17	4,55
6	381,37	163,34	57,17	3,21	3,01	6,17
6,5	376,98	107,40	71,51	3,09	2,90	6,27
7	371,68	80,14	78,44	2,98	2,81	5,70
7,5	365,45	61,27	83,23	2,87	2,77	3,38
8	358,34	44,51	87,58	2,76	2,78	0,87

Tabla E. 2. Datos de CEM obtenidos del cálculo y simulación en la línea de 69 kV.

Salida de 69						
<i>Dist.</i>	<i>Ec (V/m)</i>	<i>Es (V/m)</i>	<i>Error (%)</i>	<i>Bc (uT)</i>	<i>Bs (uT)</i>	<i>Error (%)</i>
-8	340,64	280,35	17,70	2,83	2,86	1,10
-7,5	354,98	300,02	15,48	3,00	2,84	5,46
-7	367,62	311,05	15,39	3,19	2,93	8,09
-6,5	377,88	322,13	14,75	3,38	3,10	8,26
-6	385,00	333,25	13,44	3,58	3,40	4,95
-5,5	388,17	346,65	10,70	3,78	3,78	0,05
-5	386,59	360,96	6,63	3,98	4,19	5,25
-4,5	379,48	339,67	10,49	4,18	4,53	8,30
-4	366,20	320,93	12,36	4,38	4,66	6,39
-3,5	346,36	313,21	9,57	4,57	4,87	6,59
-3	319,87	305,54	4,48	4,74	5,13	8,16
-2,5	287,12	285,90	0,43	4,90	5,23	6,71
-2	249,14	265,48	6,56	5,04	5,29	5,04
-1,5	207,93	251,03	20,73	5,15	5,31	3,19
-1	167,23	236,59	41,47	5,23	5,33	1,97
-0,5	134,22	185,27	38,04	5,28	5,30	0,44
0	120,66	131,18	8,72	5,29	5,28	0,26
0,5	134,22	188,78	40,65	5,28	5,33	1,00
1	167,23	246,83	47,60	5,23	5,33	1,97
1,5	207,93	264,28	27,10	5,15	5,25	2,02
2	249,14	281,74	13,09	5,04	5,11	1,47
2,5	287,12	302,54	5,37	4,90	4,97	1,41
3	319,87	324,95	1,59	4,74	4,85	2,26
3,5	346,36	341,18	1,50	4,57	4,70	2,87
4	366,20	350,28	4,35	4,38	4,46	1,83
4,5	379,48	359,43	5,28	4,18	4,18	0,07
5	386,59	360,49	6,75	3,98	3,93	1,28
5,5	388,17	361,02	7,00	3,78	3,69	2,33
6	385,00	359,03	6,74	3,58	3,40	4,95
6,5	377,88	350,07	7,36	3,38	3,13	7,37
7	367,62	341,14	7,20	3,19	2,92	8,41
7,5	354,98	327,62	7,71	3,00	2,73	9,12
8	340,64	309,37	9,18	2,83	2,59	8,45

Tabla E. 3. Datos de CEM obtenidos del cálculo y simulación en la barra de 138 kV.

Barra de 138						
<i>Dist.</i>	<i>Ec (V/m)</i>	<i>Es (V/m)</i>	<i>Error (%)</i>	<i>Bc (uT)</i>	<i>Bs (uT)</i>	<i>Error (%)</i>
-8	466,13	407,65	12,55	2,71	2,85	5,20
-7,5	491,19	441,22	10,17	2,89	2,90	0,24
-7	514,90	470,46	8,63	3,09	2,96	4,18
-6,5	536,30	493,13	8,05	3,30	3,03	8,10
-6	554,24	511,10	7,78	3,52	3,17	9,84
-5,5	567,38	528,68	6,82	3,74	3,36	10,26
-5	574,25	543,20	5,41	3,98	3,50	12,04
-4,5	573,30	549,21	4,20	4,22	3,67	12,97
-4	563,08	540,99	3,92	4,46	3,95	11,34
-3,5	542,36	531,45	2,01	4,69	4,25	9,34
-3	510,44	516,48	1,18	4,91	4,44	9,55
-2,5	467,42	482,64	3,26	5,11	4,67	8,66
-2	414,70	444,09	7,09	5,29	4,97	6,08
-1,5	355,62	415,34	16,79	5,44	5,19	4,58
-1	296,71	396,10	33,50	5,55	5,30	4,50
-0,5	249,60	332,19	33,09	5,62	5,43	3,35
0	230,74	244,19	5,83	5,64	5,62	0,37
0,5	249,60	319,98	28,20	5,62	5,46	2,81
1	296,71	391,93	32,09	5,55	5,36	3,42
1,5	355,62	409,54	15,16	5,44	5,25	3,47
2	414,70	436,93	5,36	5,29	5,05	4,57
2,5	467,42	474,35	1,48	5,11	4,90	4,17
3	510,44	507,06	0,66	4,91	4,72	3,85
3,5	542,36	521,24	3,89	4,69	4,52	3,58
4	563,08	530,14	5,85	4,46	4,20	5,72
4,5	573,30	537,75	6,20	4,22	3,93	6,81
5	574,25	531,53	7,44	3,98	3,73	6,26
5,5	567,38	517,05	8,87	3,74	3,55	5,18
6	554,24	499,59	9,86	3,52	3,34	5,01
6,5	536,30	481,77	10,17	3,30	3,19	3,25
7	514,90	459,44	10,77	3,09	3,11	0,68
7,5	491,19	430,74	12,31	2,89	3,05	5,43
8	466,13	397,80	14,66	2,71	2,99	10,37

Tabla E. 4. Datos de CEM obtenidos del cálculo y simulación en la barra de 69 kV

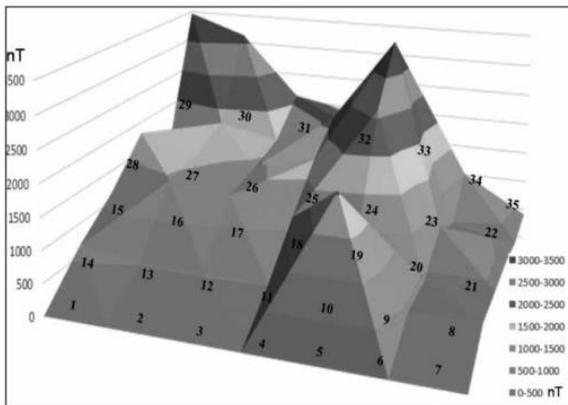
Barra de 69						
<i>Dist.</i>	<i>Ec (V/m)</i>	<i>Es (V/m)</i>	<i>Error (%)</i>	<i>Bc (uT)</i>	<i>Bs (uT)</i>	<i>Error (%)</i>
-8	248,55	265,95	7,00	2,39	1,53	35,85
-7,5	272,12	292,36	7,44	2,60	1,71	34,31
-7	297,22	321,48	8,16	2,85	1,89	33,58
-6,5	323,48	350,22	8,27	3,12	2,12	32,03
-6	350,27	373,77	6,71	3,42	2,36	30,99
-5,5	376,62	403,84	7,23	3,75	2,86	23,79
-5	401,16	436,18	8,73	4,12	3,37	18,16
-4,5	422,02	456,31	8,12	4,51	3,90	13,60
-4	436,88	472,26	8,10	4,94	4,50	8,83
-3,5	443,05	472,80	6,72	5,38	5,10	5,17
-3	437,74	473,45	8,16	5,83	5,55	4,75
-2,5	418,65	447,89	6,98	6,27	6,03	3,80
-2	384,80	420,98	9,40	6,68	6,56	1,75
-1,5	337,76	403,66	19,51	7,03	6,96	1,02
-1	283,59	387,95	36,80	7,31	7,17	1,90
-0,5	235,65	320,93	36,19	7,48	7,37	1,52
0	215,26	240,92	11,92	7,55	7,60	0,73
0,5	235,65	315,57	33,92	7,48	7,48	0,05
1	283,59	390,93	37,85	7,31	7,35	0,56
1,5	337,76	413,01	22,28	7,03	7,19	2,25
2	384,80	422,74	9,86	6,68	6,77	1,39
2,5	418,65	430,02	2,72	6,27	6,34	1,16
3	437,74	437,84	0,02	5,83	5,87	0,74
3,5	443,05	431,77	2,55	5,38	5,36	0,33
4	436,88	423,99	2,95	4,94	4,73	4,17
4,5	422,02	404,28	4,20	4,51	4,11	8,95
5	401,16	385,58	3,88	4,12	3,59	12,82
5,5	376,62	364,64	3,18	3,75	3,07	18,20
6	350,27	342,21	2,30	3,42	2,53	26,02
6,5	323,48	316,10	2,28	3,12	2,12	32,03
7	297,22	285,59	3,91	2,85	1,89	33,58
7,5	272,12	255,80	6,00	2,60	1,71	34,31
8	248,55	231,64	6,80	2,39	1,53	35,85

Anexo F. Validación de herramienta graficadora

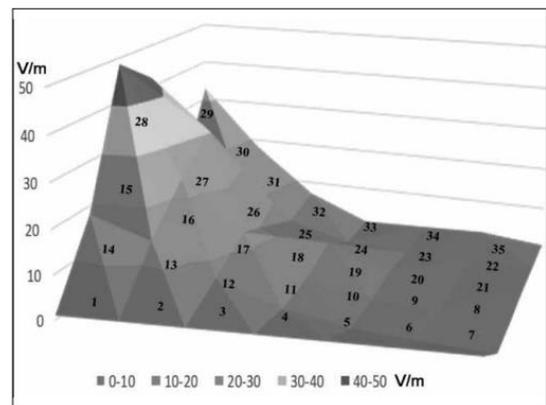
En este apartado, se muestran datos, y graficas de las mediciones de CEM expuestas en [25], con la finalidad de demostrar el correcto funcionamiento de la herramienta graficadora de la distribución de CEM.

Tabla F. 1. Datos Medidos de una Subestación [25].

Campo Magnético					Campo Eléctrico				
3 464,1	1 268,42	1 810,92	1 146,56	652,84	18,1	48,5	42,1	12,3	32,8
3 131,94	1 791,82	1 563	1 463,17	538,83	13,8	23,3	30,5	14,9	18,1
2 100,14	1 593,65	1 443,56	1 350,15	550,63	7,5	12,4	8,7	4,7	7
1 921,28	2 111,4	1 704,63	1 132,98	515,91	2,8	3,4	6,3	1	1,1
2 144,16	3 464,1	2 599,69	9 39,76	2 045,29	0,9	0,7	1,7	0,3	1,5
1 005,98	4 78,12	861,49	437,4	445,33	0,5	0,4	0,4	0,4	2
1 005,98	335,25	439,46	442,42	462,53	0,4	0,4	0,8	0,6	0,5

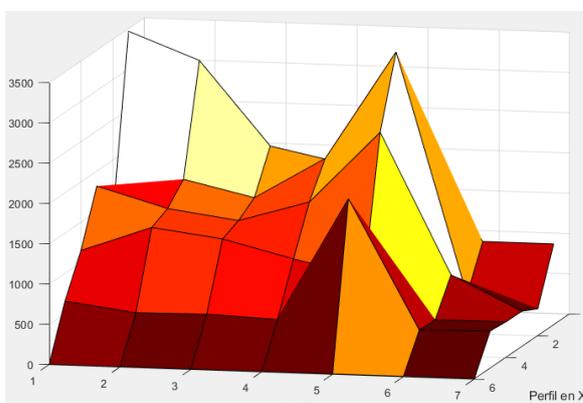


(a) Campo Magnético

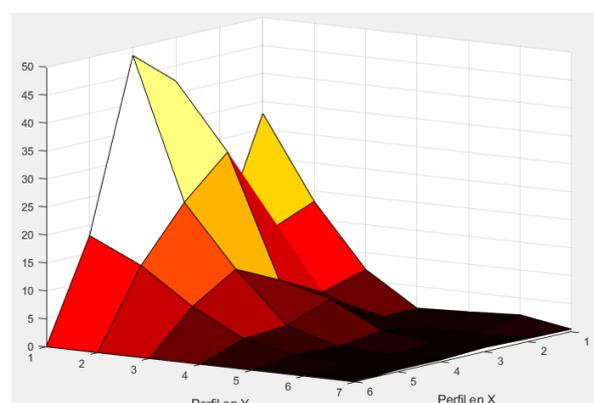


(b) Campo Eléctrico

Figura F. 1. Graficas correspondientes a los datos de la Tabla F. 1 [25].



(a) Campo Magnético



(b) Campo Eléctrico

Figura F. 2. Graficas obtenidas en la interfaz a partir de los datos de la Tabla F. 1

En [33] se muestra una gráfica de la distribución de campo magnético, cuyos datos también se los introducen en la interfaz y comprobar su valides.

La subestación propuesta está constituida por tres líneas de 220 kV que desembocan en un embarrado de 220 kV. De este embarrado salen a su vez dos circuitos que van directamente a los transformadores de 220/66 kV. Las salidas de estos transformadores, ya en 66 kV, acaban en un embarrado de 66 kV. De este segundo embarrado parten tres líneas de 66 kV, dos de ellas destinadas a terminar el transformador de 66/20 kV para pasar a configuración subterránea y salir por la parte inferior de la subestación, mientras que la tercera se mantendrá a la tensión de 66 kV y, tras pasar a configuración subterránea, saldrá por la parte superior de la subestación [33].

Tabla F. 2. Data de las magnitudes de campo magnético con la cual se ha realizado las gráficas [33].

0.712	0.88	1.0227	3.4728	3.6984	3.9679	4.8549	3.0574	3.0574	4.8549	3.9679	3.6984	3.4728
0.748	0.9412	1.1234	3.8457	4.0034	4.3892	5.467	3.415	3.415	5.467	4.3893	4.0034	3.8457
1.1714	1.824	3.2592	13.8217	15.8128	19.2629	36.7431	23.9329	23.9329	36.7431	19.2629	15.8128	13.8217
1.1328	4.804	6.819	13.6431	14.875	18.1114	30.5642	19.9832	19.9832	30.5642	18.1114	14.875	13.6431
3.3012	4.8849	7.0623	11.8001	12.8714	14.5121	21.077	16.039	16.039	21.077	14.5121	12.8714	11.8001
3.4818	5.6765	9.3826	18.1718	19.7641	23.1645	38.2817	26.4332	26.4332	38.2817	23.1645	19.7641	18.1718
2.3199	3.8671	6.57	12.6393	13.1419	14.8591	18.9831	13.8816	13.8816	18.9831	14.8591	13.1419	12.6393
1.4306	2.2537	3.7083	8.5822	9.1673	10.8577	13.4826	9.6954	9.6954	13.4826	10.8577	9.1673	8.5822
2.1656	3.6693	6.3417	8.818	7.8394	7.2447	9.6943	9.7857	9.7857	9.6943	7.2447	7.8394	8.818
3.2852	5.3904	8.9562	13.4339	12.9912	10.9832	15.4601	13.1023	13.1023	15.4601	10.8932	12.9912	13.4339
3.3193	4.9401	7.2688	9.5903	8.7289	7.4927	10.6608	9.8561	9.8561	10.6608	7.4927	8.7289	9.5203
0.7046	4.1148	5.5397	7.0277	6.1433	5.2593	7.9742	7.6306	7.6306	7.9742	5.2593	6.1433	7.0277
1.2621	1.7824	2.5888	6.4051	4.8946	4.111	7.7817	8.2058	8.2058	7.7817	4.111	4.8946	6.4051
0.8352	1.2415	2.0228	12.5351	72.9478	51.9439	19.29	8.9632	8.9632	19.29	51.9439	72.9478	12.5351
1.0249	1.9062	3.0353	14.4766	52.7344	104.16	19.3479	11.3517	11.3517	19.3479	104.16	52.7244	17.4128
1.1938	3.7148	6.3315	11.8353	16.7386	13.6059	15.4704	12.0833	12.0833	15.4704	13.6059	16.738	11.8353
2.1784	3.6617	6.8812	16.57	27.3521	23.2872	24.2562	19.8275	10.4973	24.2562	23.2872	27.3521	16.57
1.5411	2.5798	5.059	12.5419	21.1607	15.7673	22.2172	20.0909	20.0909	22.2172	15.7673	21.1607	12.5916
1.6436	2.5264	4.3466	8.4854	12.521	9.5818	16.766	18.6831	20.4609	20.8594	8.508	15.6075	11.7904
1.3037	2.309	4.7758	16.4544	31.2841	29.4665	36.2517	34.0831	32.6249	37.4667	30.4538	40.3231	20.0967
1.63	2.6887	4.8092	10.9832	18.2069	16.3893	23.1745	21.0069	19.5477	24.3895	17.3766	27.2459	14.6256
0.4055	2.3962	3.7659	10.7646	19.1576	17.3241	24.9298	21.6386	17.7459	18.9532	11.5154	20.7643	11.4831
5.0397	5.0397	6.5846	5.3374	13.2099	12.8653	17.6374	13.6929	13.4309	17.5024	13.3255	23.566	7.8187
15.4431	15.4431	15.4431	15.4431	15.4431	15.4431	9.519	7.6051	2.2569	3.5229	15.9908	14.0067	14.0067
18.1688	18.1688	18.1688	18.1688	18.1688	18.1688	10.0795	7.0464	1.906	2.8107	3.8028	3.8028	3.8028
4.7788	4.7788	4.7788	4.7788	4.7788	4.7788	3.4942	2.3193	1.2424	1.7119	1.4253	1.4253	1.4253

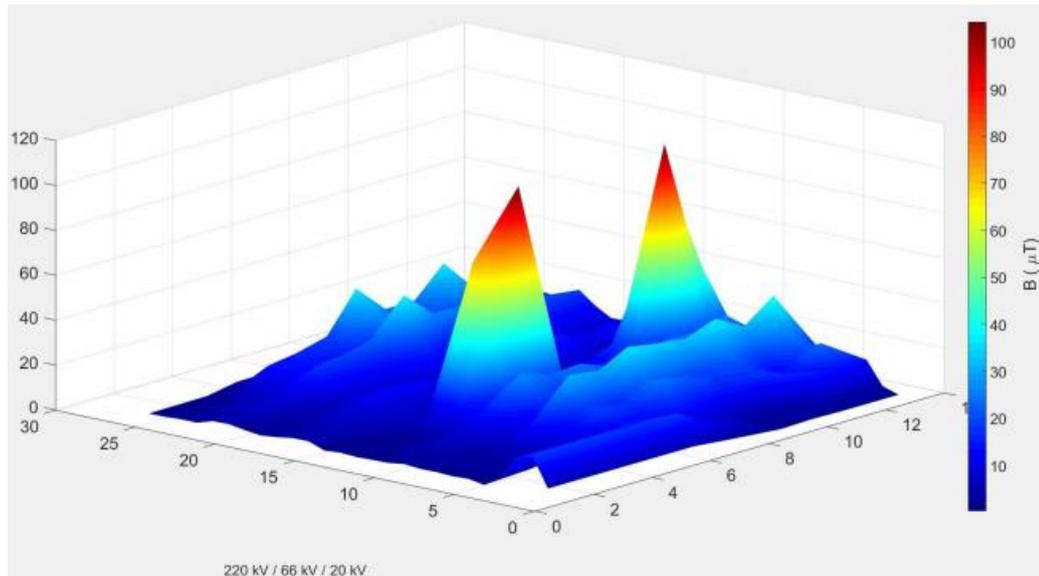


Figura F. 3. Grafica que se muestra en [33].

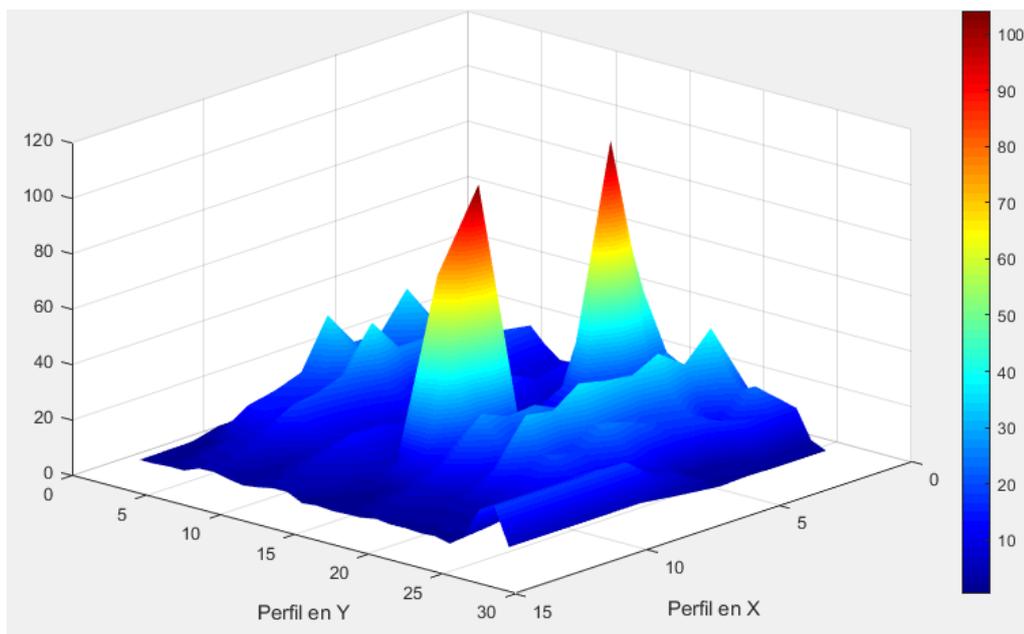


Figura F. 4. Grafica obtenida en la interfaz.

Anexo G. Distribución de los elementos de la S/E Tena tomados en cuenta en esta investigación.

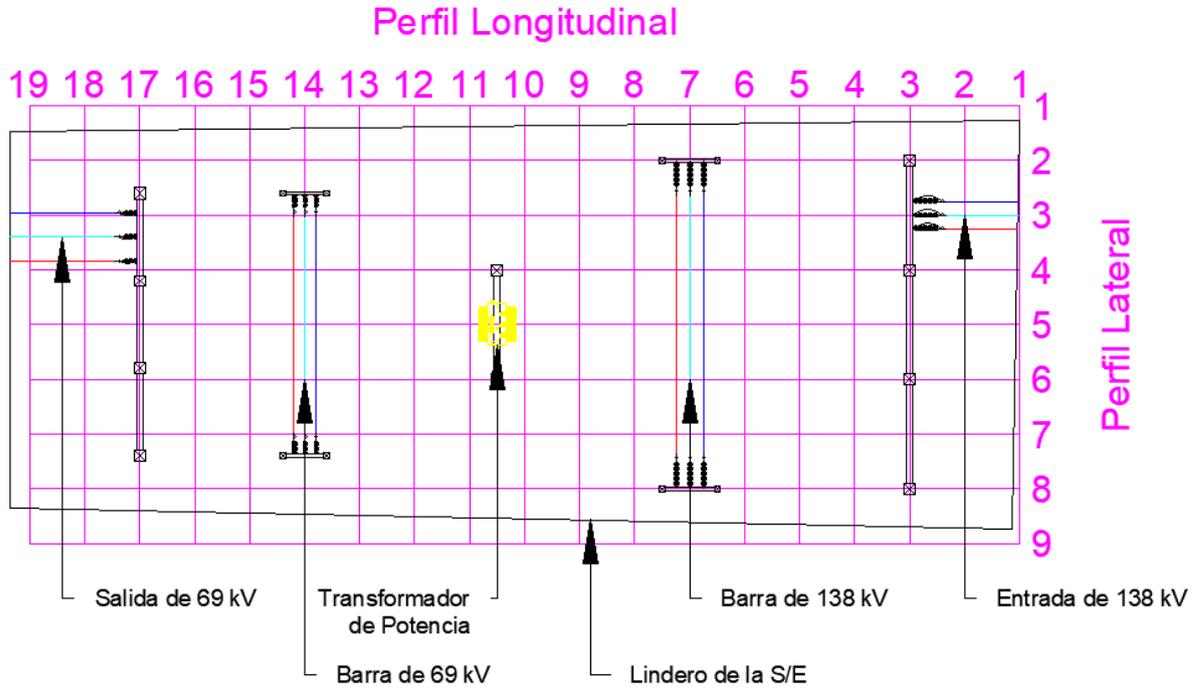


Figura G. 1. Plano de implantación de la S/E Tena, se ha sobrepuesto el mallado con el que se realizó la estimación.

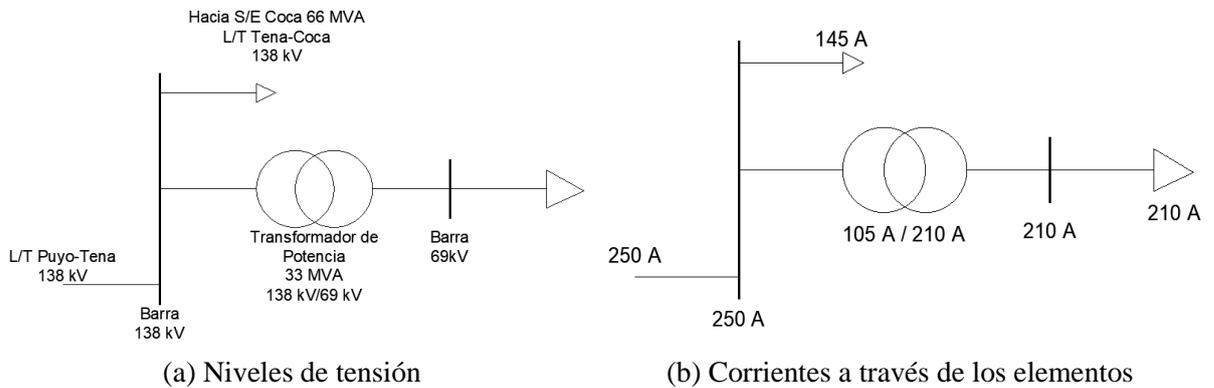


Figura G. 2. Diagrama Unifilar de la S/E Tena