

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA, INFORMÁTICA Y
MECÁNICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



TESIS

**ANALISIS DE LA RADIACION ELECTROMAGNETICA EN LAS LINEAS DE
TRANSMISIÓN EN 66 KV, MEDIANTE EL USO DEL METODO DE
ELEMENTOS FINITOS**

PRESENTADO POR:

Br. EFRAIN PEREIRA PANCCAHUA

Br. WILLIAM MAMANI CHOQUETAPE

**PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL
DE INGENIERO ELECTRICISTA**

ASESOR:

Ing. PABLO APAZA HUANCA

CUSCO – PERÚ

2025



Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco

INFORME DE SIMILITUD

(Aprobado por Resolución Nro.CU-321-2025-UNSAAC)

El que suscribe, el Asesor Pablo Apaza Huanca.....
..... quien aplica el software de detección de similitud al
trabajo de investigación/tesis titulada: ANÁLISIS DE LA RADIACIÓN
ELECTROMAGNÉTICA EN LAS LINEAS DE TRANSMISIÓN EN
66KV, MEDIANTE EL USO DEL MÉTODO DE
ELEMENTOS FINITOS.....

Presentado por: Efraín Pereira Pancahva..... DNI N° 44784027 ;
presentado por: William Mamani Choquetape..... DNI N°: 46724014 ;
Para optar el título Profesional/Grado Académico de INGENIERO
ELECTRICISTA.....

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 3 veces, mediante el
Software de Similitud, conforme al Art. 6° del **Reglamento para Uso del Sistema Detección de**
Similitud en la UNSAAC y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 5 %.

Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grado académico o título profesional, tesis

Porcentaje	Evaluación y Acciones	Marque con una (X)
Del 1 al 10%	No sobrepasa el porcentaje aceptado de similitud.	<input checked="" type="checkbox"/>
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las subsanaciones.	<input type="checkbox"/>
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, conforme al reglamento, quien a su vez eleva el informe al Vicerrectorado de Investigación para que tome las acciones correspondientes; Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	<input type="checkbox"/>

Por tanto, en mi condición de Asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y adjunto las primeras páginas del reporte del Sistema de Detección de Similitud.

Cusco, 17 de diciembre..... de 2025.....

Pablo Apaza Huanca
Firma
Post firma Pablo Apaza Huanca
Nro. de DNI 23842746
ORCID del Asesor 0000-0002-3941-1347

Se adjunta:

- Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
- Enlace del Reporte Generado por el Sistema de Detección de Similitud: oid: 27259:540758772

Efraín PEREIRA PANCCAHUA

ANALISIS DE LA RADIACION ELECTROMAGNETICA EN LAS LINEAS DE TRANSMISIÓN EN 66 KV, MEDIANTE EL USO DEL ...



Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::27259:540758772

Fecha de entrega

15 dic 2025, 8:14 a.m. GMT-5

Fecha de descarga

15 dic 2025, 8:46 a.m. GMT-5

Nombre del archivo

ANALISIS DE LA RADIACION ELECTROMAGNETICA EN LAS LINEAS DE TRANSMISION EN 66 KV, M....docx

Tamaño del archivo

20.1 MB

149 páginas

27.352 palabras

155.740 caracteres

5% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...




Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 12 palabras)

Exclusiones

- N.º de coincidencias excluidas

Fuentes principales

- 4%  Fuentes de Internet
- 0%  Publicaciones
- 4%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Dedicatoria

A mis padres, fuente inagotable de amor, fortaleza y ejemplo, por enseñarme el valor del esfuerzo, la constancia y la fe en cada paso de la vida. Gracias por su apoyo incondicional, por estar presentes aun en la distancia y por ser la inspiración que me impulsó a alcanzar mis metas. A mis hermanos, por su cariño sincero, por acompañarme en cada desafío y por confiar en mí cuando más lo necesitaba. A mi familia, por su presencia constante, sus palabras de ánimo y por recordarme siempre que los sueños se logran con dedicación y esperanza. A la universidad, por ser el espacio donde pude crecer, aprender y dar forma a mis aspiraciones profesionales y personales. Y a los docentes, por su guía paciente, su entrega y el ejemplo que dejaron grabado en mí, inspirándome a continuar con pasión y compromiso. Este logro también les pertenece, porque cada avance en este camino fue posible gracias a su amor, apoyo y confianza.

Efrain Pereira Panccahua

Dedicatoria

Ante todo, a Dios todopoderoso, fuente de toda bendición. A Él agradezco por la salud para trabajar, el amor para seguir adelante y la paz que guió mis pensamientos en los momentos de mayor dificultad. A mi amada Oshin, mi compañera de vida, por tu apoyo inquebrantable, tu paciencia infinita y por ser mi refugio seguro. Gracias por cada sacrificio y por motivarme a ser mejor; este triunfo lo construimos juntos. A mi hijo, Benjamín, quien es la razón más grande de mi esfuerzo y mi alegría constante. Eres mi motor de vida y mi mayor inspiración. A mis padres, por haberme inculcado el valor del esfuerzo, la educación y la fe. Su amor incondicional y su confianza fueron el cimiento sobre el que pude levantar mi carrera. Finalmente, a toda mi familia, por su apoyo moral y sus oraciones a lo largo de este camino.

William Mamani Choquetaipe

Resumen

La presente tesis, titulada “Análisis de la radiación electromagnética en las líneas de transmisión en 66 kV, mediante el uso del método de elementos finitos”, se centra en el estudio de la radiación electromagnética generada por la red de transmisión eléctrica de alta tensión en el tramo Combapata–Sicuani, operando específicamente a 66 kV, así como en su posible repercusión sobre la salud. En este contexto, se evaluaron variables como la intensidad de los campos eléctrico y magnético, junto con la disposición de las líneas de transmisión. El propósito central de la investigación fue determinar la magnitud y la distribución de dichos campos electromagnéticos a través de la aplicación del método de elementos finitos (FEM).

La metodología consistió en la simulación de diversas configuraciones de líneas de transmisión dentro de la red eléctrica. Para ello, se utilizó el software FEMM (Finite Element Method Magnetics), un programa de acceso libre que permitió examinar los niveles de radiación electromagnética bajo diferentes condiciones. Los principales resultados demostraron que tanto la disposición de los conductores como los factores atmosféricos inciden de manera significativa en la intensidad y en la distribución de los campos electromagnéticos. Asimismo, se realizó una comparación de los niveles de radiación obtenidos con los límites establecidos en las normas internacionales de seguridad.

En conclusión, los resultados de este estudio proporcionaron información relevante para el diseño de medidas de mitigación que reduzcan los riesgos asociados a la exposición a campos electromagnéticos en áreas pobladas y ocupacionales dentro de la zona de estudio.

Palabras clave: Radiación electromagnética, Método de elementos finitos, Líneas de transmisión y Simulación.

Abstract

This thesis, entitled "ANALYSIS OF ELECTROMAGNETIC RADIATION IN 66 KV TRANSMISSION LINES USING THE FINITE ELEMENT METHOD," focuses on the study of electromagnetic radiation generated by the high-voltage electrical transmission grid in the Combapata–Sicuni section, specifically operating at 66 kV, as well as its potential impact on health. In this context, variables such as the intensity of the electric and magnetic fields, along with the layout of the transmission lines, were evaluated. The central objective of the research was to determine the magnitude and distribution of these electromagnetic fields through the application of the finite element method (FEM).

The methodology involved simulating various transmission line configurations within the electrical grid. To do this, the Finite Element Method Magnetics (FEMM) software was used, a freely available program that allowed the examination of electromagnetic radiation levels under different conditions. The main results showed that both the arrangement of conductors and atmospheric factors significantly impact the intensity and distribution of electromagnetic fields. The radiation levels obtained were also compared with the limits established in international safety standards.

In conclusion, the findings provide valuable insights for designing mitigation strategies to reduce risks associated with electromagnetic field exposure in populated and occupational areas within the study area.

Keywords: Electromagnetic radiation, Finite element method, Transmission lines and Simulation

Índice General

Dedicatoria.....	ii
Resumen.....	iii
Abstract.....	iv
Índice General	v
Índice de Tablas	x
Índice de Figuras.....	xii
Glosario y Términos	xvi
CAPÍTULO I: ASPECTOS GENERALES.....	1
1. Introducción	1
1.1. Ámbito Geográfico	1
1.2. Planteamiento del problema.....	3
1.2.1. Descripción de la realidad problemática	3
1.3. Formulación del problema.	7
1.3.1. Problema general.....	7
1.3.2. Problemas específicos	7
1.4. Objetivos	8
1.4.1. Objetivo general.....	8
1.4.2. Objetivos específicos	8
1.5. Justificaciones del estudio.....	8
1.6. Justificación Técnica.....	10
1.7. Justificación Social	10
1.8. Justificación Económica	10
1.9. Justificación Académica	11
1.10. Alcances y limitaciones	11

1.10.1. Alcances	11
1.10.2. Limitaciones	12
1.11. Hipótesis y variables	13
1.11.1. Hipótesis general	13
1.11.2. Hipótesis específicas	13
1.12. Variables e indicadores	14
1.12.1. Tabla de matriz operacionalización de las variables	15
1.13. Metodología de Investigación	16
1.13.1. Tipo de investigación	16
1.13.2. Nivel de investigación	16
1.14. Población y muestra	17
1.14.1. Muestra	17
1.15. Técnica de recolección de datos	18
1.16. Instrumentos de recolección de datos	19
1.17. Instrumentos de medición	19
1.18. Técnicas y procesamiento de datos	23
1.18.1. Organización de los datos recolectados	24
1.18.2. Ingreso de datos al software de simulación	24
1.18.3. Simulación Computacional	24
1.18.4. Procesamiento y análisis de resultados	24
1.18.5. Validación de resultados	24
1.19. Matriz de Consistencia	25
CAPÍTULO II : MARCO TEÓRICO Y NORMATIVO	26
2.1. Antecedentes	26
2.1.1. Internacionales	26

2.1.2.	Nacionales	32
2.2.	Marco Teórico Conceptual	33
2.2.1.	Definición de campo eléctrico	33
2.2.2.	Campo Eléctrico debido a una carga puntual.....	34
2.2.3.	Campo Eléctrico debido a una carga no puntual.....	35
2.2.4.	Campo Eléctrico debido a un sistema de cargas distribuidas	35
2.2.5.	Líneas de Campo Eléctrico	36
2.2.6.	Flujo Eléctrico.....	37
2.2.7.	Ley de Gauss.....	38
2.2.8.	Definición de campo magnético.	38
2.2.9.	Campo magnético debido a un conductor recto largo.....	39
2.2.10.	Campo magnético debido a múltiples conductores.....	39
2.2.11.	Ley de Biot – Savart Distribución de corriente.....	40
2.2.12.	Flujo magnético.....	40
2.2.13.	Definición campos electromagnéticos.	41
2.2.14.	Campos electromagnéticos en Líneas de Transmisión de baja frecuencia	42
2.2.15.	Definición Líneas de Transmisión de Alta Tensión.....	43
2.2.16.	Ecuaciones de Maxwell.	45
2.2.17.	Ondas Electromagnéticas en el Vacío.....	50
2.2.18.	Campos Eléctricos y Magnéticos de Baja Frecuencia	51
2.2.19.	Método de Elementos Finitos	52
2.2.20.	Métodos de simulación con modelo de elementos finitos	54
2.2.21.	Normativa y estándares de seguridad.....	59
CAPÍTULO III : ANALISIS Y PROCESAMIENTO DE DATOS		64
3.1.	Introducción	64

3.2.	Ubicación geográfica	65
3.3.	UBICACIÓN ELECTRICA	66
3.3.1.	Generalidades del Sistema Eléctrico	67
3.3.2.	Descripción Técnica de la S.E. Combapata	67
3.3.3.	Descripción Técnica de la S.E. Sicuani	67
3.3.4.	Descripción Técnica de la línea de transmisión L-6001	67
3.3.5.	Descripción Técnica de Postes.....	68
3.4.	Registro de datos en software de simulación	69
3.5.	Mediciones en la línea de transmisión	77
3.6.	Distribución espacial de la radiación	81
3.7.	Validación de la simulación mediante el software FEMM.....	86
3.7.1.	Simulación de la radiación electromagnética en máxima demanda	89
3.7.2.	Simulación de la radiación electromagnética en mínima demanda	96
CAPÍTULO IV : ANALISIS DE RESULTADOS DE SIMULACIONES		104
4.1.	Introducción	104
4.2.	Resultados de las Simulaciones con FEMM.....	104
4.2.1.	Configuraciones Geométricas simuladas	104
4.2.2.	Distribución del Campo Eléctrico.....	105
4.2.3.	Distribución del Campo Magnético	106
4.2.4.	Comparación con las normativas	108
4.3.	Validación con mediciones en Campo.....	110
4.3.1.	Descripción de las Mediciones	110
4.3.2.	Análisis Comparativo.....	111
4.3.3.	Validación comparativa de resultados	111
4.4.	Discusión de Resultados	113

4.5. Evaluación estratégica de mitigación.....	114
CONCLUSIONES.....	116
RECOMENDACIONES.....	118
BIBLIOGRAFÍA.....	120
ANEXOS.....	126
EVIDENCIAS FOTOGRAFICAS	132

Índice de Tablas

Tabla 1	<i>Límites de Exposición a Campos Eléctricos y Magnéticos en el Ámbito Eléctrico</i>	<i>5</i>
Tabla 2	<i>Límites de exposición de campos</i>	<i>5</i>
Tabla 3	<i>Variables e indicadores de la investigación.....</i>	<i>14</i>
Tabla 4	<i>Matriz de operacionalización de variables</i>	<i>15</i>
Tabla 5	<i>Técnicas de recolección de datos</i>	<i>18</i>
Tabla 6	<i>Instrumentos de recolección de datos</i>	<i>19</i>
Tabla 7	<i>Especificaciones equipo de medición BENETECH GM3120.</i>	<i>20</i>
Tabla 8	<i>Especificaciones equipo de medición LUTRON EMF-827.</i>	<i>22</i>
Tabla 9	<i>Resumen artículos internacionales.....</i>	<i>30</i>
Tabla 10	<i>Franjas de servidumbre.....</i>	<i>45</i>
Tabla 11	<i>Cuadro comparativo de límites de exposición a 60 Hz.....</i>	<i>62</i>
Tabla 12	<i>Cuadro comparativo de límites de exposición con otros países</i>	<i>63</i>
Tabla 13	<i>Características de la Línea L-6001</i>	<i>67</i>
Tabla 14	<i>Características de los postes</i>	<i>68</i>
Tabla 15	<i>Parámetros técnicos del conductor eléctrico.</i>	<i>76</i>
Tabla 16	<i>Resumen de mediciones de campo eléctrico y magnético en condiciones de máxima demanda.....</i>	<i>80</i>
Tabla 17	<i>Resumen de mediciones de campo eléctrico y magnético en condiciones de mínima demanda.</i>	<i>81</i>
Tabla 18	<i>Resumen de mediciones configuración vertical en condiciones de máxima demanda</i>	<i>89</i>
Tabla 19	<i>Resumen de mediciones en configuración horizontal en condiciones de máxima demanda.....</i>	<i>93</i>

Tabla 20 <i>Resumen de mediciones configuración vertical en condiciones de mínima demanda.</i>	96
Tabla 21 <i>Resumen de mediciones configuración vertical en condiciones de mínima demanda.</i>	100
Tabla 22 <i>Comparación entre valores medidos en campo, simulados y límites normativos internacionales y nacionales del campo eléctrico.</i>	109
Tabla 23 <i>Comparación entre valores medidos en campo, simulados y límites normativos internacionales y nacionales del campo magnético.</i>	109
Tabla 24 <i>Comparación de resultados medidos de campo eléctrico</i>	112
Tabla 25 <i>Comparación de resultados medidos de campo magnético</i>	113

Índice de Figuras

Figura 1 <i>Ubicación Geográfica de la línea de transmisión L-6001</i>	2
Figura 2 <i>BENETECH GM3120</i>	21
Figura 3. <i>LUTRON EMF-827</i>	23
Figura 4 <i>Esquema que representa la dirección del campo eléctrico debido a una carga puntual positiva y una carga puntual negativa</i>	34
Figura 5 <i>Campo eléctrico debido a un sistema de cargas distribuidas</i>	36
Figura 6 <i>Líneas de campo causadas por una carga positiva y una negativa</i>	36
Figura 7 <i>Propagación de un campo eléctrico y un campo magnético</i>	42
Figura 8 <i>Idea general del método de elementos finitos</i>	54
Figura 9 <i>Ubicación Geografía de la línea L-6001</i>	65
Figura 10 <i>Diagrama Unifilar SET Combapata - Sicuani</i>	66
Figura 11 <i>Armado poste de concreto armado configuración horizontal</i>	69
Figura 12 <i>Armado de poste concreto armado configuración vertical</i>	69
Figura 13 <i>Selección de problema en software FEMM</i>	70
Figura 14 <i>Definición de problema</i>	71
Figura 15 <i>Modelamiento de los conductores eléctricos</i>	72
Figura 16 <i>Registro de nivel de tensión en operación en la línea en máxima demanda</i> 73	
Figura 17 <i>Registro de corriente de operación en máxima demanda</i>	73
Figura 18 <i>Registro de nivel de tensión en operación en la línea en mínima demanda</i> .74	
Figura 19 <i>Registro de corriente de operación en mínima demanda</i>	74
Figura 20 <i>Generación de triángulos y nodos configuración horizontal</i>	75
Figura 21 <i>Generación de triángulos y nodos configuración vertical</i>	76
Figura 22 <i>Distribución del campo magnético configuración vertical.</i>	82
Figura 23 <i>Distribución del campo magnético configuración horizontal</i>	83

Figura 24 <i>Distribución del campo eléctrico configuración vertical</i>	84
Figura 25 <i>Distribución campo eléctrico configuración horizontal</i>	85
Figura 26 <i>Estructura del algoritmo para el Cálculo de Campos Eléctricos y Magnéticos en Líneas de Transmisión.</i>	87
Figura 27 <i>Distribución del campo eléctrico configuración vertical debajo de la línea de transmisión.</i>	90
Figura 28 <i>Distribución del campo eléctrico configuración vertical a 8 metros hacia el lado derecho del eje.</i>	90
Figura 29 <i>Distribución del campo eléctrico configuración vertical a 8 metros hacia el lado izquierdo del eje.</i>	91
Figura 30 <i>Cálculo de campo magnético configuración vertical debajo de la línea de transmisión</i>	91
Figura 31 <i>Cálculo de campo magnético configuración vertical a 8 hacia el lado derecho del eje.</i>	92
Figura 32 <i>Cálculo de campo magnético configuración vertical a 8 metros hacia el lado izquierdo del eje.</i>	92
Figura 33 <i>Distribución del campo eléctrico configuración horizontal debajo de la línea de transmisión.</i>	93
Figura 34 <i>Cálculo de campo eléctrico configuración horizontal a 8 metros eje del derecho.</i>	94
Figura 35 <i>Cálculo de campo eléctrico configuración horizontal a 8 metros eje del izquierdo.</i>	94
Figura 36 <i>Distribución del campo magnético configuración horizontal debajo de la línea de transmisión.</i>	95

Figura 37 <i>Distribución del campo magnético configuración horizontal a 8 metros del eje derecho.....</i>	95
Figura 38 <i>Distribución del campo magnético configuración horizontal a 8 metros del eje izquierdo.</i>	96
Figura 39 <i>Distribución del campo eléctrico configuración vertical debajo de la línea de transmisión</i>	97
Figura 40 <i>Distribución del campo eléctrico configuración vertical a 8 metros hacia el lado derecho del eje.....</i>	97
Figura 41 <i>Distribución del campo eléctrico configuración vertical a 8 metros hacia el lado izquierdo del eje.</i>	98
Figura 42 <i>Cálculo de campo magnético configuración vertical debajo de la línea de transmisión</i>	98
Figura 43 <i>Cálculo de campo magnético configuración vertical a 8 hacia el lado derecho del eje.....</i>	99
Figura 44 <i>Cálculo de campo magnético configuración vertical a 8 metros hacia el lado izquierdo del eje.</i>	99
Figura 45 <i>Distribución del campo eléctrico configuración horizontal debajo de la línea de transmisión.</i>	100
Figura 46 <i>Cálculo de campo eléctrico configuración horizontal a 8 metros eje del derecho.</i>	101
Figura 47 <i>Cálculo de campo eléctrico configuración horizontal a 8 metros eje del izquierdo.</i>	101
Figura 48 <i>Distribución del campo magnético configuración horizontal debajo de la línea de transmisión.</i>	102

Figura 49 <i>Distribución del campo magnético configuración horizontal a 8 metros del eje derecho.....</i>	102
Figura 50 <i>Distribución del campo magnético configuración horizontal a 8 metros del eje izquierdo.</i>	103
Figura 51 <i>Sistema Eléctrico Interconectado Nacional. Actualizado: enero 2023</i>	126
Figura 52 <i>Código script de simulación en MATLAB con FEMM</i>	127

Glosario y Términos

ABREVIACIÓN	TÉRMINO
AT	Línea de Transmisión de Alta Tensión
ANSI	American National Standards Institute
CEM	Campos Electromagnéticos
CNE	Código nacional de electricidad
CNN	Red Neuronal Convolucional
COES	Comité de Operación Económica del Sistema Interconectado Nacional
EPP	Equipo de Protección Personal
FEM	Método de Elementos Finitos
FEMM	Finite Element Method Magnetics
GIS	Sistema de Información Geográfica
Hz	Hertz (Unidad de Frecuencia)
IARC	International Agency for Research on Cancer
ICNIRP	International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection
IEEE	Institute of Electrical and Engineers
ISA REP	Red de energía del Perú
MATLAB	MATrix LABorator
OIEA	International Atomic Energy Agency
SEIN	Sistema Eléctrico Interconectado Nacional
SEP	Subestación Eléctrica de Potencia
SET	Subestación de transformación
SS.AA.	Sistemas Aislados
VRS	Voltaje entre fase R y S
VST	Voltaje entre fase S y T
VTR	Voltaje entre fase T y R

CAPÍTULO I : ASPECTOS GENERALES

1. Introducción

La preocupación constante por los posibles efectos que producen las radiaciones electromagnéticas de las líneas de transmisión de alta tensión ha motivado diversas investigaciones orientadas a evaluar su influencia en la salud, en particular en las viviendas ubicadas en las proximidades de estas instalaciones, donde la exposición a campos eléctricos y magnéticos es permanente. En este contexto, el presente estudio se centra en la línea de transmisión Combapata–Sicuani L-6001, situada en la provincia de Canchis, región Cusco, considerando como variables principales la intensidad de los campos eléctrico y magnético.

Para llevar a cabo el análisis se aplicó el método de elementos finitos (FEM) mediante el software libre FEMM (Finite Element Method Magnetics), herramienta que permite reproducir distintos escenarios y calcular con exactitud la magnitud y la distribución espacial de los campos electromagnéticos. Los hallazgos obtenidos representan un insumo relevante para la propuesta de medidas de mitigación, tales como modificar la disposición geométrica de los conductores, ampliar las distancias de seguridad o incorporar barreras de protección.

Asimismo, la investigación resalta la importancia de fortalecer la conciencia social respecto a los posibles riesgos y de impulsar normativas de seguridad más rigurosas, con el propósito de proteger la salud de las comunidades expuestas en mayor grado.

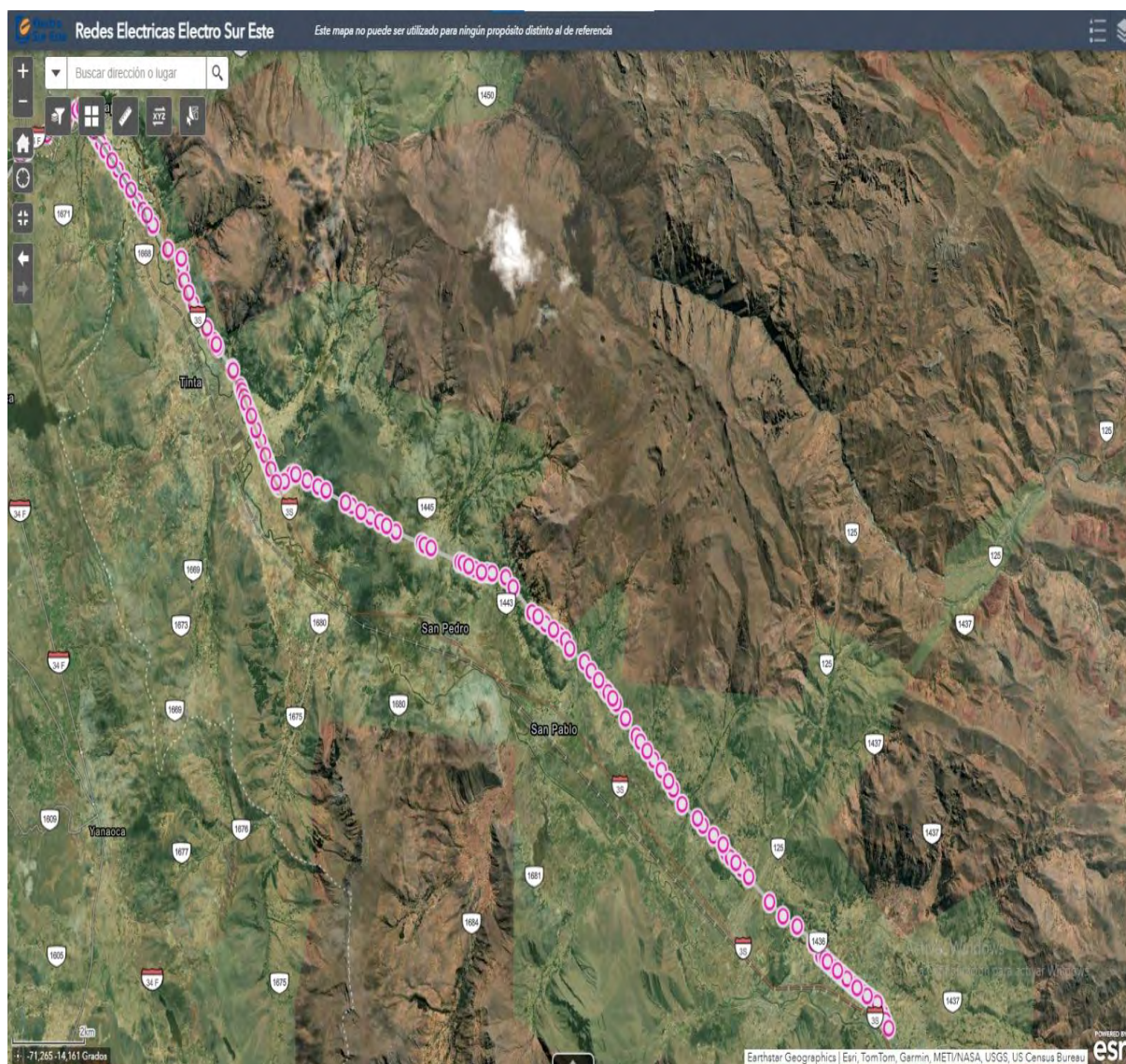
1.1. Ámbito Geográfico

La investigación se desarrolló en la línea de transmisión L-6001, que se origina en la subestación de Combapata, administrada por la empresa ISA REP (Red de Energía del Perú). Dicha instalación dispone de un transformador de potencia de 15/7/8 MVA, con tensiones de operación de 138/60/22.9 kV. Desde allí, la línea se extiende hasta la subestación de Sicuani, la cual cuenta con un transformador de 18/12/12 MVA y niveles de servicio de 60/22.9/10.5 kV.

El recorrido de la línea abarca aproximadamente 29.129 km, atravesando los distritos de Combapata, Tinta, San Pedro, San Pablo y Sicuani, todos localizados en la provincia de Canchis, región Cusco, como se aprecia en la figura 1.

Figura 1

Ubicación Geográfica de la línea de transmisión L-6001.



Fuente: Centro de control Electro Sur Este, 2024

1.2. Planteamiento del problema

1.2.1. Descripción de la realidad problemática

A nivel mundial, la población se encuentra expuesta a diversos factores que contribuyen a la contaminación ambiental; muchos de ellos pasan desapercibidos al ser invisibles, aunque tienen un impacto significativo en la salud pública. La exposición prolongada a campos de baja frecuencia puede generar efectos adversos, vinculados con síntomas como cefaleas, ansiedad, depresión, tendencias suicidas, náuseas y fatiga. Por ejemplo, el estudio de Vargas (2005), los campos eléctricos y magnéticos, fundamentales en física e ingeniería, presentan variaciones en su intensidad en función de múltiples condiciones, entre las cuales las atmosféricas desempeñan un papel relevante. Factores como la presión barométrica, la humedad relativa, la temperatura ambiente y la altitud influyen directamente en la magnitud de estos campos.

Según Arrieta (2012), señala que la presión atmosférica modifica la densidad del aire, incidiendo en la intensidad de los campos electromagnéticos; la humedad afecta la conductividad del medio y, por ende, la interacción de los campos; la temperatura condiciona la velocidad de movimiento de las partículas cargadas; y la altitud, al variar tanto la presión como la humedad, produce efectos indirectos sobre el comportamiento de dichos campos.

Además de las condiciones climáticas, influyen características propias de las instalaciones eléctricas. Elementos como la ubicación de los conductores, su configuración geométrica, la separación entre fases, el diámetro de los cables o la altura de montaje determinan la generación y propagación de campos eléctricos y magnéticos, modificando su intensidad.

Las infraestructuras eléctricas en sus distintas etapas (generación, transmisión, transformación, distribución y consumo) están continuamente expuestas a campos electromagnéticos, los cuales pueden tener repercusiones no solo en la salud de las personas, sino también en la actividad agrícola. Las líneas aéreas, subestaciones y equipos asociados

forman parte esencial del proceso de transmisión de energía y son fuente constante de CEM. En los últimos años, la cercanía de estas instalaciones a zonas habitadas ha despertado preocupación en la población, ante la posible relación con efectos negativos en la salud. Por ello, diversos autores (Alonso et al., 2011). resaltan la importancia de realizar evaluaciones exhaustivas de los niveles de campo magnético y aplicar medidas de mitigación específicas según el caso.

El crecimiento tecnológico y la creciente demanda energética han impulsado la expansión de la infraestructura de transmisión. Sin embargo, la falta de respeto a las distancias mínimas de seguridad y el uso inadecuado de franjas de servidumbre incrementan el riesgo de exposición directa de las personas a campos electromagnéticos. Según la Defensoría del Pueblo, (2010), esta situación genera un mayor grado de vulnerabilidad y exige un control más riguroso sobre la operación y localización de estas instalaciones.

En el contexto peruano, los límites de exposición a campos eléctricos y magnéticos se encuentran regulados por el Código Nacional de Electricidad – Suministro (2011), sustentado en las recomendaciones de la International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) y la International Agency for Research on Cancer (IARC). Esta normativa establece umbrales diferenciados para ambientes laborales (exposición ocupacional) y para espacios de uso público (exposición poblacional), con la finalidad de garantizar la seguridad sanitaria. Así en la **tabla 1**, se dispone que los trabajadores puedan estar expuestos hasta un máximo de 10 kV/m, mientras que para la población en general el límite se fija en 5 kV/m, otorgando un mayor margen de protección dado que los ciudadanos no cuentan con la capacitación ni con el equipamiento adecuado para enfrentar los riesgos asociados a la radiación electromagnética.

Tabla 1

Límites de Exposición a Campos Eléctricos y Magnéticos en el Ámbito Eléctrico

Tipo de Campo	Frecuencia	Exposición Ocupacional (Trabajadores)	Exposición Poblacional (Público General)
Campo Eléctrico (E)	60 Hz	10 kV/m	5 kV/m
Campo Magnético (B)	60 Hz	200 μ T	100 μ T

Nota: Campo Eléctrico (E): La unidad de medida es kilovoltios por metro (kV/m). Campo Magnético (B): La unidad de medida es micro teslas (μ T).

Fuente: ICNIRP 2020 Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic field.

Según lo dispuesto en el Código Nacional de Electricidad – Suministro (2011), se establecen valores máximos permitidos tanto para la intensidad del campo eléctrico, expresada en kilovoltios por metro (kV/m), como para la densidad de flujo magnético, medida en microteslas (μ T). Estos parámetros tienen como finalidad proteger la salud frente a los efectos de la exposición, evitando posibles alteraciones en procesos biológicos o incrementos de temperatura en los tejidos. Los valores límite definidos para la población en general y para trabajadores expuestos se detallan en la **Tabla 2**.

Tabla 2

Límites de exposición de campos

Tipo de exposición	Intensidad de Campo Eléctrico (kV/m)	Densidad de Flujo Magnético (μ T)
Poblacional	4.2	83.3
Ocupacional	8.3	416.7

Fuente. Ministerio de energías y Minas. (2011). Código Nacional de Electricidad-Suministro

La normativa vigente en el Código Nacional de Electricidad – Suministro (2011) establece límites de exposición a campos eléctricos y magnéticos, considerados adecuados para resguardar la salud frente a los efectos producidos por las redes de transmisión de alta tensión.

Sin embargo, aunque dichos valores se reconocen como seguros de acuerdo con la evidencia científica actual, resulta indispensable que las autoridades mantengan un monitoreo constante de los avances en este campo. La validez de esta regulación depende tanto de su correcta aplicación como de su actualización periódica, de manera que incorpore los nuevos hallazgos sobre los posibles efectos a largo plazo de la exposición continua.

Es importante señalar que el estudio de la radiación electromagnética en líneas eléctricas difiere del enfoque utilizado en telecomunicaciones. Mientras que en telecomunicaciones se analizan frecuencias muy elevadas, en el ámbito eléctrico predominan frecuencias bajas (como los 60 Hz), con dinámicas y comportamientos distintos en los campos eléctricos y magnéticos, así como impactos diferenciados en la salud. Por ello, las normativas y marcos conceptuales deben diseñarse específicamente para este contexto, en lugar de adoptar únicamente estándares provenientes del sector de telecomunicaciones.

A esto se suma la falta de estadísticas nacionales, lo que hace aún más relevante contar con estudios que permitan dimensionar los niveles de radiación presentes en el país. En el caso peruano, la red principal es el Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN), cuya infraestructura enlaza centrales de generación, subestaciones y líneas de transmisión de alta tensión a lo largo del territorio (MINEM, 2006). Gracias a esta interconexión, se aprovecha la diversidad geográfica y climática, permitiendo transportar energía a grandes distancias de manera segura y eficiente desde los centros de generación hasta los de consumo (ATRIA, 2022). Asimismo, los sistemas aislados (SS.AA.) cuentan con líneas, torres y subestaciones que aseguran la continuidad del servicio.

En esta investigación se aborda específicamente la línea de transmisión ubicada entre los distritos de Sicuani y Combapata, en la provincia de Canchis, región Cusco. Esta infraestructura, situada a una altitud promedio de 3 548 msnm, tiene una longitud aproximada de 29.129 km.

El valor de realizar estudios sobre campos eléctricos y magnéticos radica en su capacidad de evidenciar los impactos potenciales en la salud humana, dado que la exposición prolongada o de alta intensidad puede ocasionar efectos negativos. Dichas investigaciones permiten identificar las fuentes emisoras y estimar su alcance, lo cual resulta esencial para diseñar medidas de protección en entornos urbanos e industriales (Tarko et al., 2021). No obstante, uno de los principales retos para llevar a cabo estas evaluaciones es la limitación de recursos técnicos y financieros. En muchos casos, la falta de prioridad en las políticas públicas impide asignar financiamiento suficiente para implementar metodologías avanzadas de medición directa.

En ese sentido, la simulación computacional se presenta como una alternativa eficiente, ya que permite reproducir con precisión las condiciones de exposición a los campos electromagnéticos sin necesidad de equipamiento costoso. A través de modelos matemáticos, es posible identificar zonas de mayor riesgo y plantear estrategias de mitigación que salvaguarden la salud pública, a un costo menor y con mayor flexibilidad que los métodos tradicionales de medición.

1.3. Formulación del problema.

1.3.1. Problema general

¿En qué medida los niveles de radiación electromagnética generados por las líneas de transmisión de alta tensión en 66 kV, simulados a través del método de los elementos finitos, representan un riesgo potencial para la salud de los seres humanos?

1.3.2. Problemas específicos

PE1. ¿Cómo afecta la proximidad de las líneas de transmisión a las áreas pobladas, en términos de niveles de radiación electromagnética simulados por el método de elementos finitos?

PE2. ¿De qué manera influye el diseño geométrico de las líneas de transmisión en la intensidad de la radiación electromagnética simulada y su impacto en el entorno?

PE3. ¿Cuáles son los límites de exposición a radiación electromagnética en comparación con los resultados de las simulaciones, y cómo estos límites afectan a la salud?

1.4. Objetivos

1.4.1. *Objetivo general*

Evaluar los niveles de radiación electromagnética generados por las líneas de transmisión de alta tensión en 66 kV, mediante simulaciones realizadas con el método de los elementos finitos, con el fin de determinar su impacto potencial en la salud de los seres humanos, identificando las áreas de mayor riesgo y proponiendo medidas de mitigación.

1.4.2. *Objetivos específicos*

OE1. Analizar cómo la proximidad de las líneas de transmisión de alta tensión en 66 kV, afecta los niveles de radiación electromagnética simulados mediante el método de los elementos finitos.

OE2. Determinar cómo el diseño geométrico de las líneas de transmisión influye en la intensidad y distribución de la radiación electromagnética en el entorno.

OE3. Comparar los resultados de las simulaciones con los límites de exposición establecidos en las normativas nacionales e internacionales para evaluar los riesgos para la salud.

1.5. Justificaciones del estudio

Las líneas de transmisión y las subestaciones eléctricas son generadoras de campos electromagnéticos, los cuales han sido ampliamente estudiados por su posible relación con efectos en la salud de las personas. Un ejemplo es la investigación de Sert et al. (2024) en la

ciudad de Şanlıurfa, Turquía, donde se analizó la exposición a campos electromagnéticos (CEM) y se identificaron síntomas como ansiedad y depresión en los individuos evaluados. Aunque los resultados no son concluyentes y dependen de múltiples factores, los autores sugieren que en entornos con mayores niveles de CEM podrían observarse efectos más significativos. Este hecho resalta la importancia de cuantificar y contrastar los niveles de exposición en distintos contextos, como se plantea en el presente trabajo.

En respuesta a estas inquietudes, se realizan investigaciones periódicas tanto en el ámbito internacional como nacional, centradas en los efectos de los CEM sobre los seres humanos. Algunos resultados apuntan a posibles alteraciones biológicas, como las descritas por Dong et al. (2024), quienes reportaron modificaciones en la membrana celular y en las mitocondrias de ratones sometidos a campos eléctricos estáticos. A partir de estas evidencias, diversas compañías han comenzado a implementar estrategias de diseño que buscan reducir la emisión de campos electromagnéticos, especialmente en instalaciones de alta tensión.

Sin embargo, estos aspectos no siempre son considerados en la fase de construcción de las líneas de transmisión. Por ello, se vuelve imprescindible que el análisis y la evaluación de la radiación generada por los campos electromagnéticos en la línea L-6001 Combapata – Sicuani se efectúen en concordancia con los límites establecidos por las normativas nacionales e internacionales para campos eléctricos y magnéticos de baja frecuencia (60 Hz) (Electro Sur Este, 2019). Con ello se pretende garantizar que la población situada en las cercanías de subestaciones y líneas de transmisión permanezca expuesta a niveles que no representen riesgos para su salud.

1.6. Justificación Técnica

Las líneas de transmisión de energía producen campos electromagnéticos (CEM) que pueden representar un riesgo para la salud de quienes habitan en las proximidades, especialmente cuando no se respetan las distancias mínimas de seguridad. En este sentido, resulta indispensable llevar a cabo el análisis y la evaluación de la radiación asociada a los CEM en la línea de transmisión L-6001 (Combapata – Sicuani), a fin de verificar que se mantenga dentro de los valores límite establecidos por las normativas nacionales e internacionales. Este procedimiento es clave para reducir la exposición a niveles elevados de CEM y garantizar condiciones de mayor seguridad para la población.

1.7. Justificación Social

La investigación realizada por Sert et al. (2024) identificó la presencia de síntomas de ansiedad y depresión en personas expuestas a campos electromagnéticos (CEM) en entornos urbanos. Si bien estos hallazgos no son concluyentes, ponen de relieve la necesidad de profundizar en el análisis de los posibles efectos sobre la salud en áreas con mayores niveles de exposición, como ocurre en la línea de transmisión objeto de este estudio. En este contexto, asegurar que la exposición a CEM se mantenga en rangos que no generen impactos negativos en la salud resulta fundamental para preservar el bienestar y la tranquilidad de las poblaciones cercanas.

1.8. Justificación Económica

La implementación de técnicas de diseño orientadas a reducir la emisión de CEM en líneas eléctricas de alta tensión representa una inversión estratégica que puede generar ahorros significativos a largo plazo. Prevenir posibles afectaciones a la salud pública disminuye la probabilidad de incurrir en costos derivados a tratamientos médicos, indemnizaciones o demandas legales. Asimismo, el cumplimiento de las normas nacionales e internacionales en materia de exposición a CEM no solo evita sanciones y multas regulatorias, sino que también

fortalece la imagen corporativa de las empresas operadoras, incrementando su credibilidad ante la comunidad y los entes fiscalizadores.

Asimismo, la optimización en el diseño de las líneas de transmisión permite disminuir las pérdidas técnicas, incrementar la eficiencia del sistema eléctrico y extender la vida útil de los equipos, lo que se refleja en una reducción de los costos de operación y mantenimiento. En su conjunto, estas acciones no solo resguardan la salud de la población, sino que también fortalecen la sostenibilidad económica y la operatividad del servicio eléctrico.

1.9. Justificación Académica

La presente investigación aporta al conocimiento existente sobre los efectos de los campos electromagnéticos (CEM) en la salud. Mediante el análisis de los CEM generados por las líneas de transmisión de alta tensión en la región del Cusco, se generan datos relevantes que pueden ser aprovechados por investigadores y estudiantes interesados en comprender el impacto de estas infraestructuras eléctricas. Asimismo, los resultados constituyen un punto de partida para futuras investigaciones orientadas al desarrollo de tecnologías más seguras y eficientes en los procesos de transmisión de energía.

1.10. Alcances y limitaciones

1.10.1. Alcances

El presente proyecto está orientado a la evaluación de la radiación electromagnética generada por las líneas de transmisión de alta tensión de 66 kV. La investigación se desarrolla en el área de influencia de la línea que une los distritos de Combapata y Sicuani, en la provincia de Canchis, región Cusco. El análisis considera tanto los aspectos técnicos relacionados con la infraestructura eléctrica como los posibles efectos sobre la salud de la población. Con ello, el estudio busca abordar la problemática vinculada a la radiación electromagnética en este tipo de instalaciones y proponer recomendaciones y alternativas que contribuyan a salvaguardar la seguridad de las comunidades cercanas.

1.10.2. Limitaciones

El presente estudio enfrenta ciertas limitaciones. En primer lugar, el acceso a la subestación y al trazado de la línea de alta tensión representó retos tanto logísticos como de seguridad, lo que exigió coordinar con las autoridades competentes y con los propietarios de las instalaciones a fin de obtener los permisos correspondientes.

En segundo lugar, los resultados aquí expuestos responden a una zona específica, por lo que no pueden generalizarse de manera directa a otros entornos con condiciones ambientales distintas. Aspectos como el clima, la topografía, la infraestructura existente o la presencia de estructuras metálicas cercanas pueden modificar los niveles de campo eléctrico y magnético obtenidos en mediciones o simulaciones, tal como sostienen Ouyang & Abed-Meraim (2022), en relación con las interferencias ferromagnéticas.

Una tercera limitación está vinculada con la comparación de los resultados frente a otros estudios, la cual depende de contar con datos confiables y de la aplicación estricta de normas y protocolos de medición reconocidos internacionalmente, como los definidos por el Organismo Internacional de Energía Atómica – OIEA (2014). La adopción de estándares internacionales de seguridad es indispensable para evaluar de manera adecuada los riesgos y establecer medidas que mantengan la exposición dentro de niveles aceptables.

Finalmente, la falta de registros nacionales sistematizados sobre los niveles de radiación electromagnética dificulta la comprensión global de esta problemática en el contexto peruano. Como señala El banco mundial (2023), las deficiencias en la recopilación y gestión de datos técnicos limitan la capacidad del país para formular políticas y estrategias eficaces en materia de seguridad eléctrica y protección de la salud pública.

1.11. Hipótesis y variables

1.11.1. Hipótesis general

El análisis mediante el método de los elementos finitos, al simular los niveles de radiación electromagnética generados por una línea de transmisión de alta tensión de 66 kV, permite obtener información esencial sobre su magnitud y distribución espacial, facilitando la evaluación de como factores como la proximidad de las áreas pobladas y el diseño geométrico de las líneas influyen en el grado de exposición y el cumplimiento de los límites establecidos por las normativas de seguridad.

1.11.2. Hipótesis específicas

- H.1.** La cercanía de áreas pobladas a las líneas de transmisión de alta tensión de 66 kV aumenta el riesgo de exposición a niveles de radiación electromagnética superiores a los límites recomendados por las normativas internacionales.
- H.2.** El diseño geométrico de las líneas de transmisión, como la separación de los conductores y la altura de las estructuras, afecta directamente la distribución de los campos electromagnéticos en el entorno circundante.
- H.3.** El análisis mediante el método de los elementos finitos revela que la magnitud de los campos electromagnéticos generados por líneas de alta tensión de 66 kV varía en función de la distancia de los conductores.

1.12. Variables e indicadores.

Tabla 3 *Variables e indicadores de la investigación*

	Indicador	Variable
Variables Independientes	Tensión Nominal de la Línea.	Tensión Nominal en Kilovoltios (kV).
	Corriente de Operación.	Corriente en amperios (A).
	Geometría de la línea	Altura de los conductores sobre el suelo (m). Configuración geométrica (horizontal y vertical)
Variables Dependientes	Campo Eléctrico (E)	Valor máximo de E en el área de estudio (v/m). Distribución espacial de E en función de distancia al eje de la línea. Comparación con los límites de exposición establecidos por la ICNIRP (2020), CNE-Suministros.
	Campo Magnético (B)	Valor máximo de B en el área de estudio (μ T). Distribución espacial de B en función de distancia al eje de la línea. Comparación con los límites de exposición establecidos por la ICNIRP (2020), CNE-Suministros.

Fuente: Elaboración Propia.

1.12.1. Tabla de matriz operacionalización de las variables

Se presenta en la **tabla 4**, donde se definen las variables claves del estudio y se detallan sus dimensiones, indicadores e instrumentos de medición.

Tabla 4 Matriz de operacionalización de variables

Variable	Dimensión	Indicador	Unidad	Instrumento
Independiente: Líneas de Alta Tensión	Parámetro eléctrico de operación	Tensión de la Línea	kV	Datos técnicos de la línea / parámetros ingresados en FEMM
		Corriente de operación	A	Datos técnicos de la línea / parámetros ingresados en FEMM
	Características constructivas	Configuración geométrica de fases	m	Observación directa / planos de ingeniería
Dependiente: Radicación Electromagnética	Magnitud del campo eléctrico	Campo Eléctrico	V/m	Medidor de campo eléctrico / FEMM
	Magnitud del campo magnético	Campo Magnético	μT	Medidor de campo magnético / FEMM

Fuente: Elaboración Propia.

1.13. Metodología de Investigación

1.13.1. Tipo de investigación

La investigación se enmarca en un enfoque hipotético-deductivo, orientado a describir las características de los componentes que integran las estructuras a modelar en la línea de transmisión del Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN). Para ello, se realizarán diversas simulaciones de los campos eléctricos y magnéticos mediante el software libre FEMM, utilizando modelos de análisis basados en los estándares internacionales establecidos para la medición de campos electromagnéticos. La hipótesis será contrastada evaluando la relación entre los valores obtenidos de los campos eléctrico y magnético, considerando la variación de parámetros como las condiciones atmosféricas, el radio del conductor y su geometría, con el propósito de identificar una configuración óptima que reduzca al mínimo dichos valores.

1.13.2. Nivel de investigación

El presente estudio se enmarca dentro de la investigación aplicada, pues busca resolver un problema concreto y ofrecer alternativas prácticas de solución. Se caracteriza además por ser relacional, ya que pretende identificar y analizar las interacciones entre variables (Hernández-Sampieri & Mendoza, 2018). El uso de un enfoque cuantitativo facilita la obtención y el tratamiento de datos numéricos con precisión (Hernández-Sampieri & Mendoza, 2018). El diseño adoptado es cuasi experimental, desarrollado en condiciones controladas, aunque sin asignación aleatoria de sujetos, lo que permite aproximarse de manera rigurosa a la realidad objeto de estudio. Asimismo, se aplica el método hipotético-deductivo, basado en la formulación de hipótesis y en su verificación o refutación mediante la recolección y el análisis de información empírica Hernández-Sampieri & Mendoza (2018). La investigación es de tipo transversal, al ejecutarse en un único momento del tiempo, lo que posibilita obtener datos específicos en un punto determinado. Finalmente, se recurre tanto a fuentes documentales

como a fuentes de campo, lo que brinda una visión integral del fenómeno, combinando la revisión de documentos con la recopilación directa de información en el área de estudio (Hernández-Sampieri & Mendoza, 2018).

1.14. Población y muestra

La población analizada en esta investigación está constituida por el conjunto de líneas de transmisión de alta tensión que integran el Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN) en el Perú, cuya función esencial es asegurar el transporte eficiente de la energía eléctrica desde las unidades de generación hasta los centros de consumo.

Según datos del SEIN, existen múltiples líneas de transmisión desde 60 kV hasta los 500 kV, distribuidas en diversas regiones del país, conectando áreas urbanas y rurales. Estas líneas son seleccionadas como población del estudio debido a su relevancia en el sistema eléctrico y su proximidad a áreas pobladas, lo que aumenta la necesidad de evaluar su impacto electromagnético.

1.14.1. Muestra

Para el presente estudio se seleccionó la línea de transmisión de alta tensión L-6001, operando a 66 kV, ubicada entre los distritos de Combapata y Sicuani, en la región Cusco. La elección de esta infraestructura se llevó a cabo mediante un muestreo no probabilístico. por conveniencia, el cual es adecuado en investigaciones aplicadas donde el objetivo no es generalizar a una población, sino obtener un análisis profundo y representativo de un caso específico, que cumpla con ciertas condiciones técnicas y contextuales relevantes.

Esta línea fue considerada como unidad de análisis debido a varios factores: su importancia operativa dentro del sistema eléctrico regional, sus características técnicas (tensión nominal, diseño estructural, trayectoria), así como su ubicación geográfica en una zona con particularidades topográficas y climáticas que podrían influir en los fenómenos de interés, como la distribución de campos electromagnéticos.

1.15. Técnica de recolección de datos

La recolección de datos se llevó a cabo a través de la recopilación de información técnica, operativa, fotográfica y documental disponible en internet. En lo referente a los aspectos técnicos, se obtuvieron datos detallados de los postes de la línea de transmisión, incluyendo su ubicación, altura, materiales y estado estructural. Asimismo, se registraron antecedentes sobre la operación del sistema eléctrico en la línea L-6001 de 66 kV, tales como sus parámetros de funcionamiento y capacidad instalada.

De manera complementaria, se efectuó una revisión bibliográfica y el análisis de publicaciones especializadas, así como la consulta del Código Nacional de Electricidad, lineamientos internacionales de la ICNIRP y regulaciones ambientales peruanas vinculadas con la exposición a campos electromagnéticos.

Tabla 5

Técnicas de recolección de datos

Técnica	Instrumento	Aplicación de estudio
Observación directa	Fichas de campo, registro fotográfico	Inspección visual de las estructuras, entorno físico y condiciones de operación.
Revisión documental	Normas técnicas, reportes de empresas	Análisis de planos, características técnicas, manuales u normativa nacional e internacional
Recolección instrumental	Medidor de campos electromagnéticos	Medición de campo eléctrico y magnético

Fuente: Elaboración propia.

Actualmente, el desarrollo de programas que utilizan métodos de elementos finitos facilita el procesamiento y visualización gráfica de problemas electromagnéticos. Para esta investigación, se cargaron los datos al software FEMM, teniendo en cuenta las diferentes

configuraciones geométricas de estructuras de transmisión lineal, proporcionando campos electromagnéticos muy aproximados a los reales. Utilizando esta herramienta, se pretende analizar y evaluar los campos electromagnéticos en líneas de transmisión de alta tensión, con el propósito de obtener información que permita proponer ajustes en su diseño y operación, asegurando el cumplimiento de los límites normativos y la protección de la salud de las personas.

1.16. Instrumentos de recolección de datos

Con el propósito de llevar a cabo un análisis exhaustivo de la radiación electromagnética generada por la línea de transmisión L-6001, se elaboró un conjunto de instrumentos destinados a la recolección de datos, tomando como referencia normas internacionales, entre ellas la IEEE Std. 644-1994 Standard Procedures for Measurement, que define lineamientos estandarizados para la medición de campos eléctricos y magnéticos. La aplicación de estos instrumentos permitirá obtener mediciones precisas de las variables de interés y asegurará la confiabilidad y validez de los resultados alcanzados.

Tabla 6 *Instrumentos de recolección de datos*

Variable	Instrumento	Descripción
Intensidad de campo eléctrico	Medidor de campo eléctrico	Utilizado para medir la intensidad del campo eléctrico en diversos puntos a lo largo de la línea de transmisión.
Intensidad de campo magnético	Medidor de campo magnético	Utilizado para medir la intensidad del campo magnético en diversos puntos a lo largo de la línea de transmisión.

Fuente: Elaboración propia.

1.17. Instrumentos de medición

Existen múltiples dispositivos que permiten medir campos electromagnéticos, así como registrar de forma independiente los campos eléctrico y magnético en diferentes rangos de frecuencia. Para esta investigación se emplearon equipos especializados en la medición de CEM. En el caso de las líneas de transmisión que operan a 60 Hz, se utilizaron los instrumentos

BENETECH GM3120 y LUTRON EMF-827. Las especificaciones técnicas correspondientes a cada equipo se detallan en la **Tabla 7** y la **Tabla 8**.

Tabla 7

Especificaciones equipo de medición BENETECH GM3120.

BENETECH GM3120		
Parámetros Técnicos		
Características	Campo Eléctrico	Campo Magnético
Unidad	V/m	μT
Precisión	1V/m	0.01 μT
Rango	1V/m - 1999V/m	0.01 μT - 99.99 μT
valor límite de alarma	40V/m	0.4 μT
Pantalla de lectura	3 - 1/2 - digit LCD	
Prueba de ancho de banda	5Hz - 3500MHz	
Tiempo de muestreo	aprox. 4 segundos	
Modo de prueba	Bimodule synchronous test	
Indicación de exceso de rango	LCD display the maximum measure range	
Temperatura de funcionamiento	0°C - 50°C	
Humedad de funcionamiento	humedad relativa < 80%	
Voltaje de funcionamiento	9 V	
Fuente de alimentación	6F22 9V battery	
Tamaño	63 6*31*125 8mm	
Peso	146 g	

Fuente: Elaboración propia.

Figura 2*BENETECH GM3120***Fuente:** Elaboración propia.

Tabla 8*Especificaciones equipo de medición LUTRON EMF-827.*

LUTRON MODEL EMF-827	
	Especificaciones Eléctricas
Nombre del modelo	EMF Tester
Numero de modelo	EMF-827
Número de serie	I.595920
Temperatura	23.2°C
Humedad	65%
Fecha de Calibración	Diciembre.26, 2023
Mostrar	13mm (0.5pulg) LCD,3 ½ digits max. Indicacion 199.9
Rango/Resolución	20 micro Tesla/0.01 micro tesla 200 micro tesla/0.1 micro tesla 2000 micro tesla/1 micro tesla * 1 micro tesla = 10 mili-Gauss
Ancho de banda	30 Hz a 300Hz
Numero de ejes	Eje único
Exactitud ($23 \pm 5^{\circ}\text{C}$)	$\pm (4\% + 3d)$ - 20 micro tesla rango $\pm (5\% + 3d)$ - 200 micro tesla rango $\pm (10\% + 5d)$ - 2000 micro tesla rango
Sobre-Entrada	Mostrar entrada 1
Tiempo de muestreo	aprox 0.4 second
Batería	DC 9V batería (006P, 6F22)
Corriente de potencia	aprox DC 2mA
Humedad de funcionamiento	Max 90% RH (0°C a 35°C) Max 80% RH (35°C a 50°C)
Peso	245 g/0.54 LB (solo medidor)
Dimensión	163 x 68 x 24 mm
Accesorios	Sonda sonora Cabezal sensor

Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.*LUTRON EMF-827.***Fuente:** Elaboración propia.**1.18. Técnicas y procesamiento de datos**

La presente investigación utilizó un enfoque metodológico que integra la recolección de datos en campo y el procesamiento computacional mediante herramientas especializadas. Para ello, se siguió un procedimiento sistemático, descrito a continuación:

1.18.1. Organización de los datos recolectados

Las mediciones de los campos se efectuaron en puntos estratégicamente seleccionados a lo largo del recorrido de la línea de transmisión de 66 kV, empleando un medidor de radiación electromagnética capaz de registrar la intensidad del campo eléctrico, expresada en voltios por metro (V/m), así como la densidad de flujo magnético, medida en microteslas (μT).

1.18.2. Ingreso de datos al software de simulación

Las variables obtenidas se ingresaron en el software FEMM (Finite Element Method Magnetic), donde se diseñó un modelo bidimensional representativo de la sección transversal de la línea de transmisión L-6001, bajo condiciones nominales de operación.

1.18.3. Simulación Computacional

Con los datos técnicos y geométricos definidos, se ejecutaron simulaciones del campo eléctrico generado alrededor de la línea de transmisión. El modelo consideró la distribución de potencial, propiedades dieléctricas del aire, altura de los conductores, distancia a tierra y condiciones límites del entorno.

1.18.4. Procesamiento y análisis de resultados

Los resultados simulados fueron exportados y organizados en tablas comparativas, evaluando los niveles máximos de campo eléctrico en zonas cercanas a las estructuras. Posteriormente, estos resultados fueron comparados con las mediciones reales obtenidas en campo, calculando el margen de diferencia porcentual.

1.18.5. Validación de resultados

La diferencia entre los valores medidos y simulados fue inferior al 7 %, lo que valida la precisión del modelo. Este margen se encuentra dentro de los rangos aceptables en estudios de este tipo, respaldado por la literatura técnica. Los resultados obtenidos permitieron evaluar la seguridad de la infraestructura eléctrica conforme a los estándares establecidos por el CNE 2011 y ICNIRP 2020.

1.19. Matriz de Consistencia

ANALISIS DE LA RADIACION ELECTROMAGNETICA EN LAS LINEAS DE TRANSMISION EN 66 KV, MEDIANTE EL USO DEL METODO DE ELEMENTOS FINITOS					
FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	OBJETIVO	HIPÓTESIS	METODOLOGIA	VARIABLES E INDICADORES	CONCLUSIONES
PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPÓTESIS GENERAL		Variable Independiente	Se logró evaluar los niveles de radiación electromagnética de la línea de transmisión L-6001, mediante simulaciones realizadas en FEMM y su contraste con mediciones de campo. Los valores obtenidos demuestran que, bajo la línea en configuración vertical, el campo eléctrico máximo alcanzó 1193.77 V/m en la simulación y 1233 V/m en la medición, mientras que el campo magnético llegó a 1.449 μT simulado y 1.44 μT medido. En la disposición horizontal, los valores fueron menores, con 830.91 V/m y 783 V/m para el campo eléctrico, y 1.029 μT y 1.07 μT para el magnético. Estos resultados evidencian que las zonas de mayor exposición se localizan directamente debajo de la línea, aunque los valores registrados se encuentran por debajo de los límites normativos nacionales e internacionales, lo que permite concluir que la operación de la línea no representa un riesgo significativo para la salud.
¿En qué medida los niveles de radiación electromagnética generados por las líneas de transmisión de alta tensión a 66 kV, simulados a través del método de los elementos finitos, representan un riesgo potencial para la salud de los seres humanos?	Evaluar los niveles de radiación electromagnética generados por las líneas de transmisión de alta tensión en 66 kV, mediante simulaciones realizadas con el método de los elementos finitos, con el fin de determinar su impacto potencial en la salud de los seres humanos, identificando las áreas de mayor riesgo y proponiendo medidas de mitigación.	El análisis mediante el método de los elementos finitos, al simular los niveles de radiación electromagnética generados por una línea de transmisión de alta tensión de 66 kV, permite obtener información esencial sobre la magnitud y la distribución espacial, facilitando la evaluación de como factores como la proximidad de las áreas pobladas y el diseño geométrico de las líneas influyen en el grado de exposición y el cumplimiento de los límites establecidos por las normativas de seguridad.	Tipo de Estudio: Cuantitativo, experimental y comparativo	Líneas de Alta Tensión	
			Nivel de Investigación: Hipotético-Deductivo	Indicadores. -Tensión de la Línea. -Corriente de Operación. -Configuración geométrica de fases	
			Población: Todas las líneas de transmisión de alta tensión a 66 kV que forman parte del Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN) en Perú.	Variable Dependiente	
PE1. ¿Cómo afecta la proximidad de las líneas de transmisión a las áreas pobladas, en términos de niveles de radiación electromagnética simulados por el método de elementos finitos?	OE1. Analizar cómo la proximidad de las líneas de transmisión de alta tensión en 66 kV, afecta los niveles de radiación electromagnética simulados mediante el método de los elementos finitos.	H.1. La cercanía de áreas pobladas a las líneas de transmisión de alta tensión de 66 kV aumenta el riesgo de exposición a niveles de radiación electromagnética superiores a los límites recomendados por las normativas internacionales.	Herramientas: Software de simulación (FEMM, Matlab, office, etc.)	Radiación Electromagnética. Indicadores. -Campo Eléctrico (E) -Campo Magnético (B)	Se determinó que la proximidad a la línea de transmisión influye directamente en la magnitud de los campos eléctricos y magnéticos. En la configuración vertical, el campo eléctrico disminuyó de 1193.77 V/m bajo la línea a 823.59 V/m a 8 metros del eje derecho, mientras que el campo magnético pasó de 1.449 μT a 1.048 μT en la misma distancia. De forma similar, en la configuración horizontal el campo eléctrico se redujo de 830.91 V/m en el eje central a 609.58 V/m a 8 metros, y el campo magnético descendió de 1.029 μT a 0.560 μT respectivamente. Asimismo, se detectó la presencia de viviendas dentro de la franja de servidumbre mínima de 16 metros, lo que implica que, aunque los valores se mantengan bajo los límites normativos, existe una exposición mayor y un riesgo potencial acumulativo para las personas que habitan en dichas zonas.
PE2. ¿De qué manera influye el diseño geométrico de las líneas de transmisión en la intensidad de la radiación electromagnética simulada y su impacto en el entorno?	OE2. Determinar cómo el diseño geométrico de las líneas de transmisión influye en la intensidad y distribución de la radiación electromagnética en el entorno.	H.2. El diseño geométrico de las líneas de transmisión, como la separación de los conductores y la altura de las estructuras, afecta directamente la distribución de los campos electromagnéticos en el entorno circundante.			Se comprobó que el diseño geométrico de la línea condiciona la distribución de la radiación electromagnética. En la configuración vertical se concentraron los valores máximos (hasta 1193.77 V/m y 1.449 μT) en el eje central bajo la línea, mientras que en la configuración horizontal los valores centrales fueron menores (830.91 V/m y 1.029 μT) pero se amplió el área de influencia hacia los laterales (hasta 641.36 V/m y 0.551 μT a 8 metros). Estos resultados evidencian que la geometría vertical concentra la radiación en el centro, mientras que la horizontal distribuye la intensidad en un área más amplia, lo que la hace más favorable para minimizar la exposición en zonas habitadas.
PE3. ¿Cuáles son los límites de exposición a radiación electromagnética en comparación con los resultados de las simulaciones, y cómo estos límites afectan a la salud?	OE3. Comparar los resultados de las simulaciones con los límites de exposición establecidos en las normativas internacionales para evaluar los riesgos para la salud.	H.3. El análisis mediante el método de los elementos finitos revela que la magnitud de los campos electromagnéticos generados por líneas de alta tensión de 66 kV varía en función de la distancia de los conductores.			Se compararon los resultados con las normativas vigentes de la ICNIRP (2020) y el Código Nacional de Electricidad (2011). Los valores más altos obtenidos, 1233 V/m para el campo eléctrico y 1.44 μT para el magnético, se encuentran por debajo de los límites permisibles (5 kV/m para el campo eléctrico y 100 μT para el campo magnético en exposición poblacional), respectivamente. Esto confirma que los niveles de radiación electromagnética de la línea L-6001 están por debajo de lo permitido tanto para población en general como para personal ocupacional. No obstante, la presencia de viviendas dentro de la franja de seguridad constituye un factor de riesgo que debe atenderse de manera prioritaria. Aunque los valores actuales no exceden los límites, la permanencia prolongada en estas áreas puede aumentar la exposición acumulativa, lo que resalta la necesidad de reforzar el cumplimiento normativo y aplicar medidas de mitigación, como control de servidumbre, incremento de la altura de los conductores y monitoreo permanente.

CAPÍTULO II : MARCO TEÓRICO Y NORMATIVO

2.1. Antecedentes

2.1.1. Internacionales

La investigación sobre los efectos de los campos eléctricos generados por líneas de alta tensión, en la salud humana constituye un ámbito de estudio crítico y multidisciplinario, sobre todo en las líneas eléctricas; por ejemplo; Elmashtoly et al. (2024), investigaron este efecto en los trabajadores que realizan actividades bajo estas líneas y en las personas que viven cerca de los corredores en países densamente poblados. La exposición al campo eléctrico representa un riesgo para la salud humana y la seguridad laboral. Además, se ha señalado la posible relación entre la exposición a campos eléctricos y magnéticos y la aparición de ciertas enfermedades, especialmente en niños. El estudio se enfocó en el desarrollo y evaluación de una solución innovadora para la mitigación de campos eléctricos generados por líneas de alta tensión en áreas de exposición humana, mediante la implementación estratégica de redes metálicas.

De igual manera, Ghani et al. (2023), investigó los efectos adversos para la salud humana provocados por la radiación electromagnética emitida por las líneas de transmisión de alta tensión. Este trabajo presenta los efectos del ajuste de parámetros sobre los campos eléctricos y magnéticos de un modelo de línea de transmisión aérea a la altura humana. Se utilizó el software de elementos finitos “*COMSOL Multiphysics*” para simular los campos eléctricos y magnéticos. Primero, se calcularon los campos eléctricos y magnéticos generados por los modelos de líneas de transmisión aérea de 1200 kV y 220 kV, y se validaron los modelos comparando los resultados de la simulación con estudios previos. Se ajustaron varios parámetros para investigar sus efectos en las distribuciones de los campos eléctricos y magnéticos. Los resultados muestran que la intensidad del campo eléctrico aumenta con el incremento del voltaje de los conductores, y la densidad del campo magnético aumenta con el incremento de la corriente transportada por los conductores. El propósito del estudio fue

evaluar cómo los ajustes de parámetros afectan la intensidad de los campos eléctricos y magnéticos emitidos por las líneas de transmisión. Los resultados indican que un voltaje de 700 kV produce una intensidad de campo eléctrico que excede el límite de seguridad residencial (50 kV/m) establecido por la Comisión Internacional de Protección contra la Radiación No Ionizante. Por lo tanto, se requiere un derecho de paso adecuado para asegurar que las áreas residenciales estén a una distancia segura de las torres de transmisión. El estudio demuestra que la intensidad del campo eléctrico y la densidad del campo magnético en las líneas de transmisión de alta tensión aumentan con el voltaje y la corriente de los conductores, respectivamente, y resalta la necesidad de mantener una distancia segura entre las líneas de transmisión y las áreas residenciales para proteger la salud pública.

La seguridad en la operación y mantenimiento de las líneas de alta tensión es un tema de creciente preocupación debido a los potenciales riesgos que representan para la salud humana; por ejemplo, Marty et al. (2024), recientemente hizo un estudio motivado por la necesidad de garantizar la seguridad y protección comunitaria en torno a los postes de transmisión de alta tensión. La legislación establece un perímetro de seguridad alrededor de los HVTP y las líneas de alta tensión, donde no se permite la ubicación de edificios ni árboles. La inspección de miles de kilómetros de circuitos es una tarea costosa y compleja que se realiza mediante inspección humana; su investigación propuso una Red Neuronal Convolucional (CNN) para detectar, a partir de imágenes de Google Earth, edificios y árboles dentro del perímetro de seguridad de los cuales podríamos hacer un análisis previo de las redes eléctricas, basados en modelos matemáticos.

Frigura-Iliasa et al. (2020), evaluó los niveles de CEM en la proximidad de una estación de alta tensión en el sur de Transilvania, Rumania, y determinar si cumplen con los límites de seguridad establecidos. Las mediciones se realizaron en diferentes puntos críticos cerca de equipos como transformadores y líneas aéreas, siguiendo la Directiva Europea de CEM. Los

resultados indicaron que, aunque algunos valores del campo eléctrico superaron los límites recomendados, se pueden aplicar medidas de protección para garantizar la seguridad del personal y mitigar cualquier riesgo potencial para la salud. En conclusión, el estudio resalta la importancia de continuar monitoreando y ajustando las medidas de seguridad para proteger la salud humana frente a la exposición a CEM en entornos de alta tensión.

La creciente preocupación por los efectos en la salud de la exposición humana a campos eléctricos, magnéticos y electromagnéticos (CEM) no solo es tema de análisis en la ingeniería eléctrica; Wu et al. (2022) abordan esta cuestión debido al avance de las tecnologías inalámbricas y dispositivos electrónicos. La recopilación de 14 artículos, publicada en la sección de Radiación y Salud de *Frontiers in Public Health*, presenta estudios recientes sobre diversos escenarios de exposición y revisiones de las guías de seguridad internacionales. Los investigadores discuten los efectos neurológicos y biológicos de los CEM, así como los métodos de medición y optimización de la exposición en tecnologías emergentes como 4G y 5G, destacando la necesidad de continuar investigando y actualizando los estándares de seguridad para mitigar riesgos a la salud.

Schuermann & Mevissen (2021), abordan la misma problemática debido al aumento en el uso de aparatos eléctricos y sistemas de comunicación móvil. En su revisión publicada en la *International Journal of Molecular Sciences*, resumen hallazgos experimentales clave sobre el estrés oxidativo relacionado con la exposición a EMF, discutiendo los mecanismos moleculares y las funcionalidades relevantes para la salud, como la función neurológica, la estabilidad del genoma, la respuesta inmune y la reproducción. Los estudios muestran un aumento en el estrés oxidativo inducido por CEM en animales y células, subrayando la necesidad de considerar estudios experimentales y epidemiológicos para evaluar los riesgos para la salud humana.

SCENIHR (2015), también aborda este tema por el aumento en el uso de tecnologías inalámbricas y dispositivos electrónicos. Esta revisión actualiza opiniones previas del

SCENIHR sobre los efectos potenciales de los CEM en la salud, considerando nuevas investigaciones y áreas con brechas de conocimiento significativas. El comité evalúa la exposición a los CEM en diferentes frecuencias y sus efectos en la salud, incluyendo el riesgo de cáncer, enfermedades neurológicas y trastornos neuroconductuales, subrayando la necesidad de continuar investigando y actualizando las guías de seguridad para proteger la salud pública.

No solo los humanos son afectados a los campos electromagnéticos; sino también estructuras, como se puede evidenciar en el estudio de Loan (2023); que analiza el impacto de las características de las líneas de transmisión trifásicas en las interferencias de los campos electromagnéticos, especialmente en las interferencias del campo magnético primario. Los campos electromagnéticos generados por las líneas de transmisión de energía pueden tener efectos perjudiciales en estructuras metálicas cercanas, dispositivos electrónicos y la salud humana. Comprender la relación entre las características de las líneas de transmisión y las interferencias electromagnéticas es crucial para el desarrollo de estrategias de mitigación efectivas. Para evaluar el efecto de las características de las líneas de transmisión trifásicas en las interferencias del campo magnético, el estudio presenta un conjunto exhaustivo de estudios de simulación numérica basados en la configuración de la línea de transmisión. Los hallazgos revelan que la disposición de los conductores, especialmente en proximidad, el número de circuitos o las transposiciones de fase pueden influir significativamente en la fuerza y la distribución espacial de los campos magnéticos.

(Tarko et al., 2021), en su estudio proponen estrategias para reducir el impacto ambiental del campo eléctrico generado por las líneas de transmisión de alta tensión. Utilizan modelos numéricos implementados en Matlab para analizar diversas configuraciones de líneas de transmisión, identificando aquellas que minimizan la radiación electromagnética y el ruido audible producido por el efecto corona. Los resultados demuestran que modificaciones en el diseño, como la geometría y disposición de los conductores, así como el ajuste a las condiciones

atmosféricas, reducen significativamente la exposición a los campos eléctricos y al ruido, asegurando el cumplimiento de las normas internacionales de seguridad.

López-Espí et al. (2024), aborda el diseño óptimo de mapas de exposición a campos electromagnéticos (CEM) en grandes áreas, con el objetivo de mejorar el análisis de riesgo y la evaluación epidemiológica. Dado que la producción de estos mapas requiere un proceso costoso de medición, el estudio propone una metodología que optimiza el esfuerzo y asegura la representatividad de los mapas de exposición mediante la combinación de criterios de propagación de ondas de radio y métodos de sistemas de información geográfica (GIS). Las mediciones se basan en una cuadrícula rectangular de 250 metros de lado, analizando tanto zonas urbanas como rurales. El estudio subraya que la incorporación de mediciones en condiciones de línea de visión directa es crucial para evitar la subestimación de los valores medios de exposición.

Tabla 9

Resumen artículos internacionales

Autor	Título	Objetivo de la investigación	Aporte a la tesis
Marty et al. (2024)	Detección de edificios y árboles dentro del perímetro de seguridad de los HVTP	Proponer una red neuronal convolucional (CNN) para detectar edificios y árboles dentro del perímetro de seguridad de postes de alta tensión a partir de imágenes satelitales.	Permite realizar un análisis previo de redes eléctricas basado en modelos matemáticos para garantizar la seguridad en torno a los HVTP.
Elmashtoly et al. (2024)	Reducción del campo eléctrico en áreas pobladas bajo líneas de alta tensión	Proponer una solución mediante redes metálicas para reducir el campo eléctrico generado por las líneas de alta tensión en áreas donde las personas están expuestas.	Aporta una metodología para la mitigación de los riesgos eléctricos asociados a la exposición al campo eléctrico de líneas de alta tensión.
Ghani et al. (2023)	Efectos de la radiación electromagnética emitida por líneas de transmisión de alta tensión	Evaluar cómo los ajustes de parámetros afectan la intensidad de los campos eléctricos y magnéticos emitidos por líneas de transmisión de alta tensión.	Contribuye a la comprensión de cómo los cambios en el voltaje y la corriente afectan la seguridad en áreas cercanas a las líneas de alta tensión.

Frigura-Iliasa et al. (2020)	Evaluación de los niveles de CEM cerca de una estación de alta tensión en Transilvania	Determinar si los niveles de CEM cerca de una estación de alta tensión cumplen con los límites de seguridad establecidos.	Proporciona datos relevantes sobre los niveles de exposición a CEM y medidas de seguridad necesarias para proteger a los trabajadores en instalaciones eléctricas.
Wu et al. (2022)	Efectos de los CEM en la salud por exposición a tecnologías inalámbricas	Analizar los efectos neurológicos y biológicos de la exposición a campos electromagnéticos en tecnologías emergentes como 4G y 5G.	Aporta información sobre la exposición a CEM en entornos urbanos y su impacto en la salud, útil para evaluar los efectos de la radiación electromagnética.
Schuermann & Mevissen (2021)	Estrés oxidativo inducido por la exposición a CEM en animales y células	Resumir los hallazgos experimentales clave sobre el estrés oxidativo relacionado con la exposición a CEM y su impacto en la salud humana.	Ofrece una base científica para entender los efectos moleculares de los CEM en la salud, importante para la evaluación de riesgos en áreas de alta exposición.
SCENIHR (2015)	Revisión de los efectos potenciales de los CEM en la salud por el uso de tecnologías inalámbricas	Actualizar las opiniones sobre los efectos potenciales de los CEM en la salud, incluyendo el riesgo de cáncer y enfermedades neurológicas.	Refuerza la necesidad de seguir investigando el impacto de los CEM y actualizar las guías de seguridad en el contexto de la operación de líneas de alta tensión.
Ioan (2023)	Interferencias del campo magnético primario en líneas de transmisión trifásicas	Analizar cómo las características de las líneas de transmisión trifásicas afectan las interferencias electromagnéticas.	Contribuye a la mitigación de las interferencias electromagnéticas que podrían afectar la operación de equipos cercanos a líneas de alta tensión.
Tarko et al. (2021)	Estrategias para reducir el impacto ambiental del campo eléctrico generado por líneas de alta tensión	Proponer modelos numéricos para analizar configuraciones de líneas de transmisión que minimicen la radiación electromagnética y el ruido producido por el efecto corona.	Proporciona soluciones para reducir el impacto de los campos eléctricos en el medio ambiente y asegura el cumplimiento de las normas de seguridad.

Fuente: elaboración propia

De la misma manera, Cabezas et al. (2020), en su estudio hizo la simulación para el campo electromagnético en la línea de transmisión de 500 kV San Rafael - El Inga utilizando el método de elementos finitos con el software FEMM. Esta simulación se realiza para

comparar los resultados con mediciones de campo y determinar una configuración geométrica adecuada que minimice los valores del campo electromagnético, asegurando que estos se mantengan dentro de los límites establecidos por las normas internacionales. Los resultados obtenidos mostraron que, en la del campo eléctrico fue de 4.5 kV/m y la del campo magnético de 72 μ T, ambos valores por debajo de los límites recomendados por la ICNIRP (2020). Las conclusiones del estudio indican que la simulación del campo electromagnético utilizando FEMM es una herramienta eficaz para modelar y optimizar la configuración de líneas de transmisión de alta tensión. Se encontró que la configuración geométrica vertical de los conductores es la más efectiva para reducir los valores del campo eléctrico. Asimismo, se observó que la altura de los conductores sobre el nivel del suelo y el número de subconductores en el haz influyen significativamente en los valores del campo electromagnético. Se recomendó una configuración de tres subconductores por haz y una disposición vertical para minimizar la emisión de campos electromagnéticos y cumplir con los límites de exposición establecidos por las normas aplicables.

2.1.2. Nacionales

En el ámbito nacional (Castro et al., 2021), midieron los campos electromagnéticos en una línea de transmisión de 500 kV utilizando el método de elementos finitos. Este trabajo se enfocó en la línea de transmisión Mantaro-Marcona-Socabaya-Montalvo, con el objetivo de validar y comparar los resultados de las simulaciones con mediciones reales, y proponer configuraciones geométricas óptimas para reducir la intensidad de los campos electromagnéticos. Los resultados obtenidos mostraron que, para la configuración original, la intensidad máxima del campo eléctrico fue de 3.8 kV/m y la del campo magnético alcanzo 65 μ T, valores que se encuentran por debajo de los límites establecidos por la ICNIRP (2020). Las simulaciones mostraron que la intensidad de los campos eléctricos y magnéticos varía según las condiciones atmosféricas y la configuración geométrica de los conductores. Además, se

sugiere que la implementación de estas configuraciones optimizadas, pueden minimizar la emisión de campos electromagnéticos, cumpliendo con los límites establecidos por las normas nacionales e internacionales y asegurando que la exposición humana no tenga efectos perjudiciales para la salud.

2.2. Marco Teórico Conceptual

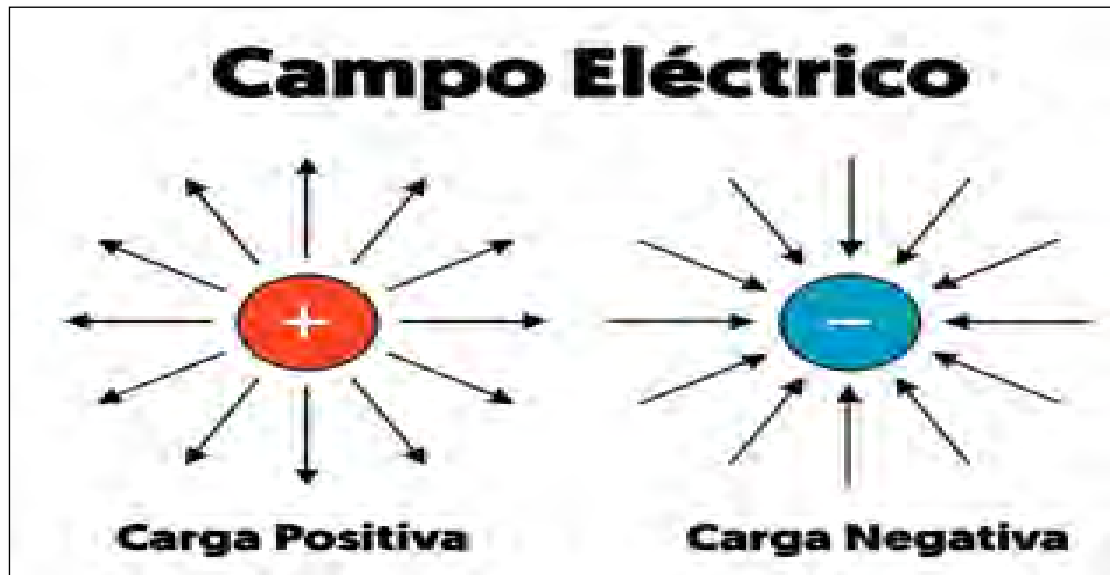
2.2.1. Definición de campo eléctrico

El campo eléctrico es una magnitud vectorial que describe la fuerza que una carga ejerce sobre otra en un punto determinado del espacio. Expresa la influencia que una carga, o un sistema de ellas, genera en su entorno y se representa mediante el símbolo \vec{E} . En aplicaciones de alta tensión, se mide en voltios por metro (V/m) o en kilovoltios por metro (kV/m).

Desde el enfoque matemático, el campo eléctrico \vec{E} corresponde a una magnitud vectorial definida en cada punto del espacio y puede representarse como la fuerza \vec{F} que actúa sobre una carga de prueba, positiva o negativa, por unidad de carga. De acuerdo con el Sistema Internacional de Unidades (SI), su medición puede expresarse en newtons por coulomb (N/C) o en voltios por metro (V/m).

Figura 4

Esquema que representa la dirección del campo eléctrico debido a una carga puntual positiva y una carga puntual negativa



Fuente: Wikipedia, la enciclopedia libre

su definición fundamental es:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} \quad (1)$$

Donde:

- \vec{E} : Intensidad de campo eléctrico (V/m o N/C).
- \vec{F} : Fuerza eléctrica ejercida sobre la carga (N).
- q : Magnitud de la carga de prueba (C).

2.2.2. *Campo Eléctrico debido a una carga puntual*

Para una carga puntual Q , la magnitud del campo eléctrico en un punto situado a una distancia r se calcula mediante la Ley de Coulomb:

$$\vec{E} = K \cdot \frac{|Q|}{r^2} \quad (2)$$

Donde:

- K: Constante de Coulomb ($8.9875 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$).
- Q: Carga generada del campo (C).
- r: Distancia entre la carga y el punto de observación (m).

Este método es útil para sistemas de cargas concentradas y es la base para el análisis más complejo de distribución de cargas.

2.2.3. *Campo Eléctrico debido a una carga no puntual*

El cálculo del campo eléctrico generado por una carga no puntual se realiza considerando una distribución de carga fraccionada en múltiples elementos diferenciales dq (ecuación 10), tomando en cuenta las distintas distancias respecto al punto en el que se desea determinar el valor del campo.

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

Donde:

- r: Distancia entre dq y la posición de interés (m).
- \hat{r}_i : Vector unitario que indica la dirección de la recta que une cada carga.
- ϵ_0 : Permisividad del vacío ($8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$).
- dq : Elemento de carga (C).

2.2.4. *Campo Eléctrico debido a un sistema de cargas distribuidas*

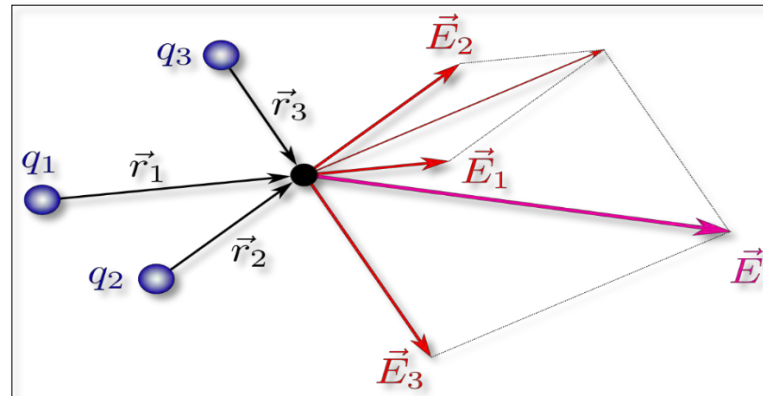
Cuando se cuenta con un sistema de cargas distribuidas en el espacio (**figura 5**), el campo eléctrico se determina aplicando el principio de superposición.

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

De modo que su valor corresponde a la suma vectorial de los campos generados por cada una de las cargas individuales.

Figura 5

Campo eléctrico debido a un sistema de cargas distribuidas



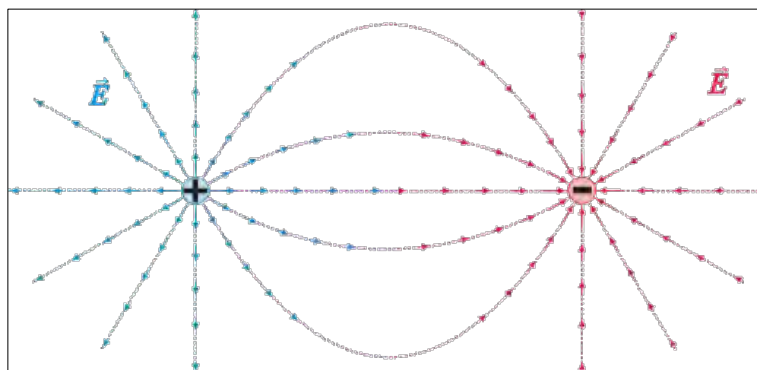
Fuente: Wikipedia, la enciclopedia libre

2.2.5. Líneas de Campo Eléctrico

El concepto de líneas de campo o líneas de fuerza fue introducido por Michael Faraday (1791-1867). Estas se definen como representaciones imaginarias que facilitan la visualización de cómo varía la dirección del campo eléctrico en diferentes puntos del espacio. Dichas líneas indican la trayectoria que seguiría una carga positiva si se dejara en libertad, partiendo desde las cargas positivas y dirigiéndose hacia las cargas negativas.

Figura 6

Líneas de campo causadas por una carga positiva y una negativa



Fuente: Wikipedia, la enciclopedia libre

Las principales propiedades de las líneas de campo eléctrico pueden resumirse de la siguiente manera:

- El vector del campo eléctrico en cada punto es siempre tangente a la línea de campo.
- Estas líneas son abiertas: parten de las cargas positivas o del infinito y terminan en las cargas negativas o en el infinito.
- El número de líneas que emergen de una carga positiva o convergen en una carga negativa es proporcional a la magnitud de dicha carga.
- La densidad de líneas en una región indica la intensidad del campo eléctrico en ese lugar.
- A grandes distancias de un sistema de cargas, las líneas tienden a distribuirse de manera uniforme y radial, lo que hace que el sistema se comporte de forma equivalente a una carga puntual.

2.2.6. *Flujo Eléctrico*

El flujo eléctrico se define como la medida del campo eléctrico que atraviesa una superficie determinada. Su cálculo se realiza a través de la integral del producto escalar entre el vector del campo eléctrico y el vector área asociado a dicha superficie. Esta magnitud permite estimar la cantidad de líneas de campo eléctrico que cruzan la superficie y se encuentra estrechamente vinculada con la Ley de Gauss.

Matemáticamente, se define como:

$$\phi = \oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} \quad (5)$$

Donde:

- ϕ : Flujo eléctrico (Nm^2/C).
- \vec{E} : Vector campo eléctrico.
- \vec{dS} : Vector área diferencial perpendicular a la superficie S.

2.2.7. *Ley de Gauss*

La Ley de Gauss establece una relación general entre el flujo del campo eléctrico a través de una superficie cerrada y la carga total contenida en su interior. En otras palabras, vincula directamente el flujo eléctrico con la magnitud de la carga encerrada.

$$\phi = \frac{Q_{int}}{\epsilon_0} \quad (6)$$

Donde:

- Q_{int} : Carga encerrada en dicha superficie (c)
- ϵ_0 : Permitividad dieléctrica del medio

Este principio constituye uno de los fundamentos del electromagnetismo y resulta especialmente útil para simplificar el cálculo del campo eléctrico en sistemas con simetría definida, ya sea esférica, cilíndrica o plana. En el caso del análisis de líneas de transmisión, el flujo eléctrico puede vincularse con la densidad de carga presente en los conductores y, en consecuencia, con la intensidad del campo generado en su entorno.

2.2.8. *Definición de campo magnético.*

El campo magnético es una magnitud vectorial que caracteriza la zona del espacio en la cual se ejercen fuerzas magnéticas sobre cargas en movimiento (corrientes eléctricas) o sobre materiales con propiedades magnéticas. Se representa mediante \vec{B} y su unidad de medida en el Sistema Internacional es el tesla (T), aunque también suele expresarse en microteslas (μT).

En este sistema de unidades, el campo magnético se define como la fuerza que actúa sobre una partícula cargada en movimiento, por unidad de carga y velocidad.

$$\vec{F} = q(\vec{v} \times \vec{B}) \quad (7)$$

Donde:

- \vec{F} : Fuerza magnética (N).
- \vec{v} : Velocidad de la carga (m/s).
- \vec{B} : Vector campo magnético (T).
- q : Carga eléctrica (C).
- \times : Producto vectorial.

En el caso de las líneas de transmisión, el campo magnético es generado por las corrientes que circulan a través de los conductores, y su magnitud está determinada por la intensidad de la corriente, la configuración geométrica de las fases y la distancia desde el punto donde se realiza la observación (Hayt & Buck, 2012; Sadiku, 2015).

2.2.9. *Campo magnético debido a un conductor recto largo*

La Ley de Ampere permite calcular la magnitud del campo magnético originado por un conductor recto, largo y delgado que transporta una corriente I .

$$B = \frac{I \mu_0}{2\pi r} \quad (8)$$

Donde:

- B : Intensidad de campo magnético (T)
- μ_0 : Permeabilidad del vacío ($4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$)
- I : Corriente eléctrica (A).
- r : Distancia perpendicular al conductor (m).

2.2.10. *Campo magnético debido a múltiples conductores*

En el caso de las líneas de transmisión de alta tensión, el campo magnético resultante en un punto corresponde a la suma vectorial de los campos generados por cada uno de los conductores.

$$\overrightarrow{B_{total}} = \sum_{i=1}^n \overrightarrow{B_i} \quad (9)$$

Donde cada $\overrightarrow{B_i}$ se calcula con la formula anterior, considerando la posición y dirección de la corriente en cada fase.

2.2.11. Ley de Biot – Savart Distribución de corriente

Para una distribución de corriente más compleja, la Ley de Biot–Savart proporciona el campo magnético en un punto P:

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{I dL \times \hat{r}}{r^2} \quad (10)$$

Donde:

- B : Intensidad de campo magnético (T)
- μ_0 : Permeabilidad del vacío ($4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$)
- dL : Elemento de longitud del conductor (m)
- I : Corriente eléctrica (A).
- \hat{r} : Vector unitario desde elemento de corriente hasta el punto de observación.

2.2.12. Flujo magnético

El flujo magnético ϕ_B se define como la cantidad total de campo magnético que atraviesa una superficie determinada. Constituye un concepto fundamental en el estudio de la inducción electromagnética y se expresa de la siguiente forma:

$$\phi_B = \oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad (11)$$

Donde:

- ϕ_B : Flujo magnético (weber, wb).
- \vec{B} : Vector campo magnético (T).
- \vec{dS} : Vector área diferencial perpendicular a la superficie S

Según la Ley de Gauss para el magnetismo:

$$\phi_B = 0 \quad (12)$$

Esto implica que, en una superficie cerrada, la cantidad de líneas de campo magnético que ingresa es igual a la que emerge, lo que evidencia la inexistencia de cargas magnéticas aisladas o monopolos magnéticos.

2.2.13. Definición campos electromagnéticos.

Los campos electromagnéticos (CEM) son regiones del espacio en las que interactúan simultáneamente un campo eléctrico (E) y un campo magnético (B), (**figura 7**), generados por cargas eléctricas y su movimiento (Hayt & Buck, 2012; Sadiku, 2015).

Estos campos pueden variar en el tiempo y en el espacio, propagándose o permaneciendo estacionarios dependiendo de la naturaleza de la fuente.

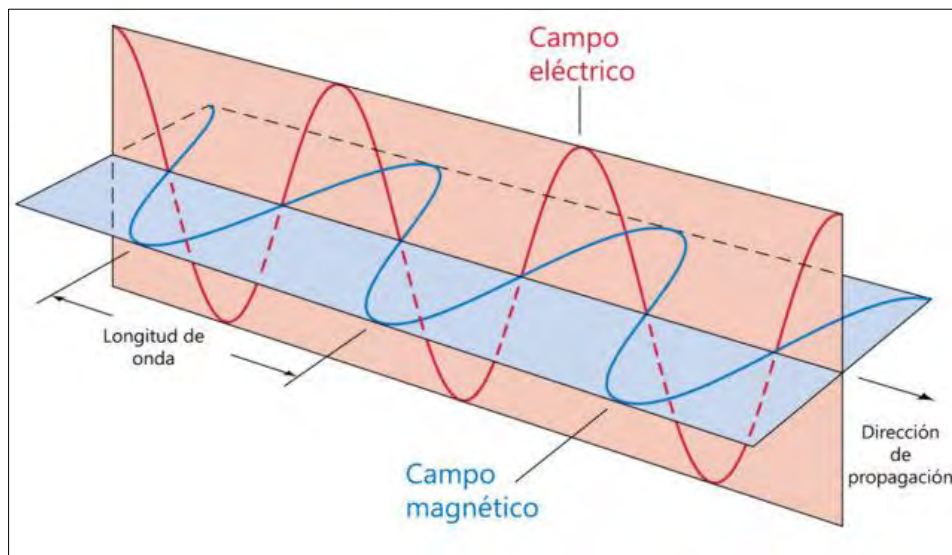
- **El campo eléctrico** se origina a partir de la presencia de cargas y su intensidad se mide en voltios por metro (V/m). Su magnitud depende de la diferencia de potencial aplicada, la geometría de los conductores y la distancia al punto de observación.
- **El campo magnético** surge por el movimiento de cargas eléctricas (corriente) y se cuantifica en teslas (T) o microteslas (μT). Su valor está condicionado por la intensidad de la corriente, la disposición de los conductores y la separación respecto al punto de interés.

En las líneas de transmisión de energía eléctrica, ambos campos se generan de manera simultánea debido a la tensión y a la corriente que circulan por los conductores. Su comportamiento dinámico se describe mediante las ecuaciones de Maxwell y presentan las siguientes características:

- **Dependencia de la frecuencia:** en sistemas de 60 Hz, los campos corresponden a bajas frecuencias y son cuasi estacionarios.
- **Atenuación con la distancia:** la intensidad de los campos decrece rápidamente conforme se incrementa la separación respecto a la fuente.
- **Direccionalidad y distribución espacial:** determinadas por la configuración geométrica de la línea (circuito simple, doble circuito, disposición horizontal o vertical).

Figura 7

Propagación de un campo eléctrico y un campo magnético



Fuente: Cultura científica (s.f.), ondas electromagnéticas

2.2.14. Campos electromagnéticos en Líneas de Transmisión de baja frecuencia

Los campos electromagnéticos (CEM) son el resultado de la combinación de un campo eléctrico (E) y un campo magnético (B), generados simultáneamente por la presencia de cargas

eléctricas y su movimiento, es decir, por la corriente eléctrica. En los sistemas de corriente alterna de baja frecuencia, como las líneas de transmisión que operan a 60 Hz, estos campos se consideran cuasi estacionarios, dado que las variaciones en el tiempo son lentas y las componentes eléctrica y magnética pueden analizarse de manera independiente (ICNIRP, 2020; CNE).

El campo eléctrico surge de la diferencia de potencial entre los conductores y la tierra, y su distribución espacial está influenciada por el nivel de tensión aplicado, la configuración geométrica de la línea y la altura de los conductores respecto al terreno. En cambio, el campo magnético se origina a partir de la corriente que circula por los conductores, siendo su magnitud dependiente tanto de la intensidad de dicha corriente como de la disposición de las fases.

En la teoría general del electromagnetismo, la radiación electromagnética se describe como la propagación de ondas formadas por campos eléctricos y magnéticos perpendiculares entre sí que se desplazan a la velocidad de la luz. No obstante, en las líneas de transmisión de baja frecuencia no se presenta una propagación significativa de energía en forma de onda electromagnética. En estos casos predominan las interacciones de campo cercano, donde los valores de E y B decrecen rápidamente conforme aumenta la distancia a la fuente.

2.2.15. Definición Líneas de Transmisión de Alta Tensión

Las líneas de transmisión de alta tensión constituyen infraestructuras eléctricas diseñadas para transportar energía a grandes distancias, desde los centros de generación hacia las subestaciones de distribución. Operan con elevados niveles de tensión con el fin de disminuir las pérdidas por efecto Joule y optimizar la eficiencia del transporte (Kothari & Nagrath, 2011).

En particular, las líneas de 66 kV, como las evaluadas en este estudio, se clasifican dentro de la categoría de alta tensión y suelen emplearse para interconectar subestaciones y

abastecer redes de distribución tanto en áreas urbanas como rurales. Su configuración habitual incluye:

- **Conductores:** generalmente de aluminio con refuerzo de acero (ACSR), instalados en una o varias fases.
- **Aisladores:** fabricados en porcelana, vidrio templado o materiales compuestos, cuya función es separar eléctricamente los conductores de las torres o estructuras de soporte.
- **Torres o estructuras de soporte:** contruidos en metal o concreto, diseñados para garantizar las distancias de seguridad entre fases y con respecto al terreno.
- **Cables de guarda:** empleados como protección frente a descargas atmosféricas.

Además de su función de transporte energético, estas líneas generan campos eléctricos y magnéticos cuya magnitud depende de la tensión aplicada, la corriente que circula y la disposición geométrica de los conductores. De ahí la importancia de analizarlas en relación con los límites de exposición definidos por organismos internacionales como la ICNIRP (2020).

2.2.15.1. Franjas de Servidumbre para Líneas de Transmisión de Alta Tensión

Las franjas de servidumbre corresponden a zonas aledañas a las líneas de transmisión donde se restringe la construcción de viviendas y se limitan ciertas actividades, con el objetivo de disminuir los riesgos asociados a la exposición a campos electromagnéticos.

En la **Tabla 10** se muestran las franjas de servidumbre recomendadas para líneas de transmisión de alta tensión, tomando como referencia tanto normativas nacionales como regulaciones internacionales.

Tabla 10*Franjas de servidumbre*

Voltaje de la Línea	Ancho de la Franja de Servidumbre
10-15 kV	6 metros
20-36 kV	11 metros
50-70 kV	16 metros
115-145 kV	20 metros
220 kV	25 metros
500 kV	64 metros

Fuente: Ministerio de Energía y Minas, "Código Nacional de Electricidad", 2011.

Las zonas de servidumbre tienen como propósito asegurar que la exposición a campos electromagnéticos permanezca dentro de los márgenes de seguridad definidos por entidades internacionales, como la Comisión Internacional de Protección contra la Radiación No Ionizante (ICNIRP). El respeto a estas distancias es esencial para salvaguardar la salud de la población y minimizar los posibles efectos adversos vinculados a la proximidad de las líneas de transmisión de alta tensión.

2.2.16. Ecuaciones de Maxwell.

Las ecuaciones de Maxwell, formuladas en 1873 por James Clerk Maxwell, consolidan sus propios aportes junto con los descubrimientos de científicos como Gauss, Faraday y Ampere. Posteriormente, entre los años 1885 y 1887, Oliver Heaviside simplificó su representación matemática, facilitando su aplicación práctica.

Dicha teoría anticipó la existencia de ondas electromagnéticas, hipótesis que más adelante fue confirmada de manera experimental por Heinrich Hertz. Estas ecuaciones pueden expresarse en distintos formatos ya sea en forma integral o diferencial y adaptarse al medio en

el que se propaga la onda, ya sea el vacío o un material. En el caso del vacío, su formulación integral se expresa del siguiente modo:

- Ley de Gauss para campo eléctrico

$$\oint_{\partial V} \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{Q_{enc}}{\epsilon_0} = \frac{1}{\epsilon_0} \int_V \rho dv \quad (13)$$

- Ley de Gauss para campo magnetismo

$$\oint_{\partial V} \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0 \quad (14)$$

- Ley de Faraday de la inducción

$$\oint_{\partial V} \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad (15)$$

- Ley de Ampere-Maxwell

$$\oint_{\partial S} \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I = \mu_0 \int_S \vec{j} \cdot d\vec{S} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d}{dt} \int_S \vec{E} \cdot d\vec{S} \quad (16)$$

Donde:

- \vec{E} : campo eléctrico (V/m)
- \vec{B} : campo magnético (T)
- $d\vec{S}$: Elemento de superficie (m^2)
- $d\vec{l}$: Elemento de línea (m)
- Q_{enc} : Carga encerrada (C)
- \vec{j} : densidad de corriente (A/m^2)

- ϵ_0 : Permitividad eléctrica del vacío. ($8.854 \times 10^{12} F/m$)
- μ_0 permeabilidad magnética del vacío. ($4\pi \times 10^{-7} H/m$)

En su formulación diferencial, las ecuaciones de Maxwell pueden descomponerse en ocho ecuaciones escalares. Seis de ellas provienen de las tres componentes de los rotacionales de los campos eléctrico y magnético, mientras que las dos restantes corresponden a las divergencias asociadas a cada campo.

A continuación, se presenta el conjunto de ecuaciones de Maxwell en su forma diferencial:

- Ley de Gauss para el campo eléctrico:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (17)$$

El campo eléctrico diverge proporcionalmente a la densidad de carga eléctrica ρ .

- Ley de Gauss para campo magnetismo

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (18)$$

No existen monopolos magnéticos: el flujo magnético neto siempre es cero.

- Ley de Faraday de la inducción

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (19)$$

Una variación temporal del campo magnético induce un campo eléctrico rotacional.

- Ley de Ampere-Maxwell

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (20)$$

El campo magnético se genera tanto por la densidad de corriente eléctrica \vec{J} como por la variación temporal del campo eléctrico.

Donde:

- \vec{E} : campo eléctrico (V/m)
- \vec{B} : campo magnético (T)
- $\vec{\nabla} \times$: Rotacional.
- $\vec{\nabla} \cdot$: Divergencia.
- ρ : Densidad de carga (C/m^3)
- \vec{J} : densidad de corriente (A/m^2)
- ϵ_0 : Permitividad eléctrica del vacío. ($8.854 \times 10^{12} F/m$)
- μ_0 permeabilidad magnética del vacío. ($4\pi \times 10^{-7} H/m$)

Las ecuaciones de Maxwell representan la base matemática que permite comprender la dinámica de los campos eléctricos y magnéticos, ya sea en el vacío o en presencia de materiales. Cuando se expresan en su forma diferencial, incorporando las magnitudes de desplazamiento eléctrico \vec{D} y densidad de corriente \vec{J} , adoptan la siguiente formulación:

- Ley de Gauss para el campo eléctrico:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho \quad (21)$$

Establece que el flujo del vector desplazamiento eléctrico \vec{D} a través de una superficie cerrada es igual a la densidad de carga libre ρ .

- Ley de Gauss para campo magnetismo

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (22)$$

Este principio establece que los monopolos magnéticos no existen en la naturaleza, lo que implica que el flujo total del campo magnético a través de una superficie cerrada es siempre igual a cero.

- Ley de Faraday de la inducción

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (23)$$

Explica que un campo magnético variable en el tiempo genera un campo eléctrico de carácter rotacional.

- Ley de Ampere-Maxwell

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (24)$$

Expresa que un campo magnético puede originarse tanto por la presencia de corrientes eléctricas \vec{J} , como por la variación temporal del desplazamiento eléctrico \vec{D} .

Donde:

- \vec{E} : campo eléctrico (V/m)
- \vec{B} : campo magnético (T)
- $\vec{\nabla} \times$: Rotacional.
- $\vec{\nabla} \cdot$: Divergencia.
- ρ : Densidad de carga (C/m³)

- \vec{J} : densidad de corriente (A/m^2)
- \vec{D} : Desplazamiento eléctrico (C/m^2)
- μ_0 permeabilidad magnética del vacío. ($4\pi \times 10^{-7} H/m$)

2.2.17. Ondas Electromagnéticas en el Vacío.

Las ecuaciones formuladas por Maxwell permiten demostrar la presencia de ondas electromagnéticas que se propagan en el vacío, como resultado de la interacción recíproca entre los campos eléctrico y magnético. En este contexto, la Ley de Ampere-Maxwell introduce el concepto de corriente de desplazamiento, indicando que una variación temporal del campo eléctrico puede inducir un campo magnético. Esta relación, combinada con la Ley de Faraday, conduce a la deducción de la ecuación de onda que describe la propagación del campo eléctrico:

$$\nabla^2 \vec{E} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (25)$$

Donde la velocidad de propagación está dada por:

$$c = 1/\sqrt{\epsilon_0 \mu_0} \quad (26)$$

De manera análoga, el campo magnético cumple la misma ecuación de onda, lo que demuestra que ambos se propagan en conjunto. En el caso de una onda plana, los campos eléctricos \vec{E} y magnético \vec{B} son perpendiculares entre sí y también a la dirección de propagación \vec{k} , cumpliendo la relación fundamental:

$$\frac{E_0}{B_0} = c \quad (27)$$

Donde:

- E_0 : Amplitud máxima del campo eléctrico (V/m)

- B_0 : Amplitud máxima del campo magnético (T)
- c : Velocidad de la luz ($3 \times 10^8 m/s$)

Esto implica que las ondas electromagnéticas son transversales y transportan energía a través del espacio a la velocidad de la luz, con los vectores \vec{E} , \vec{B} y \vec{k} formando un triedro ortogonal derecho.

Donde:

- \vec{E} : campo eléctrico (V/m)
- \vec{B} : campo magnético (T)
- c : Velocidad de propagación (en el vacío $3 \times 10^8 m/s$)
- \vec{k} : Numero de onda (rad/m)
- μ_0 permeabilidad magnética del vacío. ($4\pi \times 10^{-7} H/m$)
- ϵ_0 : Permitividad eléctrica del vacío. ($8.854 \times 10^{12} F/m$)
- ∇^2 : Operador Laplaciano.

2.2.18. *Campos Eléctricos y Magnéticos de Baja Frecuencia*

Los campos eléctricos y magnéticos de baja frecuencia son generados principalmente por los sistemas de transmisión y distribución de energía eléctrica. Su origen está vinculado a la frecuencia operativa de la red, la cual, en la mayoría de países (incluido el Perú), es de 60Hz.

El campo eléctrico (E) surge a partir de la diferencia de potencial aplicada a los conductores, y su intensidad depende del voltaje, la configuración geométrica de la línea y la altura respecto al nivel del suelo. Se mide en voltios por metro (V/m) y disminuye notablemente con la distancia desde la fuente emisora, lo que le permite atravesar con mayor facilidad materiales y estructuras. Por ello, su análisis resulta clave al estudiar la exposición humana.

Por su parte, el campo magnético (B) se origina debido al paso de corriente eléctrica a través de los conductores. Su magnitud, que se expresa en teslas (T) o microteslas (μT), está directamente relacionada con la intensidad de la corriente circulante.

Ambos campos corresponden al espectro de radiación no ionizante y son elementos fundamentales en los estudios sobre seguridad eléctrica. Es indispensable que sus niveles de exposición permanezcan dentro de los límites establecidos por las regulaciones nacionales e internacionales, garantizando así que la operación de las líneas de alta tensión no represente un peligro significativo para las personas que viven o trabajan cerca de ellas.

2.2.19. Método de Elementos Finitos

El método de elementos finitos (FEM) es una técnica numérica que se utiliza para resolver ecuaciones diferenciales complejas, que suelen aparecer en problemas de ingeniería y física, como la mecánica estructural, la transferencia de calor y la electromagnética (Jin, 2014). Este método permite dividir un dominio complejo en múltiples secciones pequeñas o elementos finitos que, al estar conectados, forman una malla sobre el área o volumen de interés (Kwon & Bang, 2000). En cada uno de estos elementos, se establecen ecuaciones de Maxwell a cada elemento (Sadiku, 2010), que, al resolverse de manera acumulativa, proporcionan una solución aproximada al problema global.

Para el análisis de campos electromagnéticos en líneas de transmisión, el FEM es particularmente útil, ya que permite modelar con precisión los campos generados alrededor de estas líneas en configuraciones complejas y geometrías no lineales. La aplicación de este método en el área de transmisión eléctrica ha demostrado ser eficaz para evaluar los niveles de campo electromagnético en zonas específicas y analizar su impacto, especialmente en zonas urbanas donde las líneas de alta tensión están en proximidad a estructuras habitables (DhanaLakshmi et al., 2011).

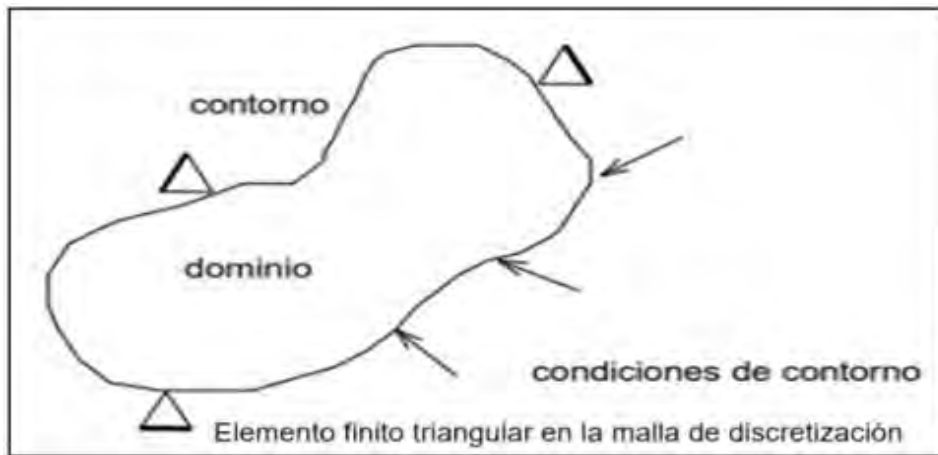
En el estudio de DhanaLakshmi et al. (2011), se aplicó el método de elementos finitos (FEM) para calcular la distribución del campo electromagnético en el entorno de una línea de transmisión. El análisis se realizó modelando una sección transversal del sistema de transmisión y generando una malla de elementos finitos que permitió representar con detalle la variación espacial de los campos. Los resultados evidenciaron la distribución del campo en zonas críticas, como el espacio directamente bajo la línea y las inmediaciones de edificaciones residenciales, proporcionando información clave para la evaluación del cumplimiento de los límites de exposición establecidos en normas de baja frecuencia.

En el análisis mediante el Método de Elementos Finitos (FEM), cualquier sistema a estudiar se describe en función de tres componentes fundamentales:

- **Dominio:** corresponde al espacio geométrico en el que se realiza el análisis, definido por la configuración física del sistema, sus dimensiones y la discretización en elementos finitos.
- **Condiciones de contorno:** son las variables conocidas que influyen y determinan el comportamiento del sistema. En el contexto del análisis de campos electromagnéticos, estas condiciones incluyen la tensión aplicada a los conductores, la corriente que circula por cada fase, el potencial de referencia (tierra) y, cuando corresponde, factores ambientales como la altura sobre el nivel del mar. Estos parámetros fijan el marco en el que se calculan las magnitudes de los campos eléctricos y magnéticos.
- **Incógnitas:** representan las variables que se desean obtener como resultado del análisis, después de aplicar las condiciones de contorno sobre el dominio. En este caso, las incógnitas corresponden a la magnitud y distribución espacial de los campos eléctricos (V/m) y magnéticos (μT) en el entorno de la línea de transmisión.

Figura 8

Idea general del método de elementos finitos



Fuente: Muñoz Rubio, A. (2020). *Estudio de Máquinas Eléctricas mediante software de elementos finitos* (Trabajo de titulación, Grado en Ingeniería Eléctrica). Universidad de Valladolid.

2.2.20. Métodos de simulación con modelo de elementos finitos

El proceso de simulación de los campos eléctrico y magnético alrededor de una línea de transmisión se fundamenta en las ecuaciones de Maxwell, que describen el comportamiento de los fenómenos electromagnéticos en medios materiales (Sadiku, 2014). Para su resolución numérica, estas ecuaciones se reformulan mediante el Método de Elementos Finitos (FEM), el cual transforma las expresiones diferenciales en una formulación integral y discretiza el dominio de estudio en una malla de elementos finitos (Jin, 2014).

En el caso del campo eléctrico, se emplean funciones de forma asociadas a cada nodo de la malla, lo que permite construir las matrices de rigidez y de masa que representan el sistema. Dichas matrices se ensamblan en un sistema global de ecuaciones, incorporando condiciones de contorno, donde se asume campo eléctrico nulo en los límites del dominio. Una vez resuelto el sistema con métodos numéricos adecuados, se obtiene la distribución espacial del campo eléctrico y su variación en función de la distancia respecto al conductor (Binns & Lawrenson, 1992).

De manera análoga, para el campo magnético se aplica la formulación magnetostática basada en la Ley de Ampere y en el potencial vectorial magnético, que relaciona la corriente en los conductores con la intensidad del campo generado (Hayt & Buck, 2012). A través del FEM, se discretiza el dominio y se construyen las matrices correspondientes que vinculan las fuentes de corriente con el campo magnético. Posteriormente, se establecen condiciones de borde que aseguran la correcta representación del entorno físico. La resolución del sistema permite visualizar la distribución espacial del campo magnético, cuya intensidad disminuye progresivamente al alejarse del conductor (Jin, 2014).

De esta forma, el FEM posibilita obtener representaciones detalladas y cuantitativas tanto del campo eléctrico como del campo magnético en el entorno de la línea de transmisión, asegurando un análisis preciso de su comportamiento espacial y su relación con los parámetros geométricos y operativos de la infraestructura (Silvester & Ferrari, 1996).

2.2.20.1. Planteamiento de la Ecuación de Maxwell para el Campo Eléctrico

El proceso de simulación comienza utilizando una de las ecuaciones de Maxwell que modela el comportamiento del campo eléctrico (E) en las proximidades de la línea de transmisión. Esta formulación incorpora la frecuencia operativa del sistema eléctrico como un parámetro fundamental, así como las propiedades del medio circundante, incluyendo la permeabilidad (μ), la permitividad (ϵ) y la conductividad (σ) del material circundante la ecuación diferencial parcial para el campo eléctrico se presenta de la siguiente manera:

$$\int_{\Omega} (\nabla \times E) \cdot (\nabla \times \phi) d\Omega = j\omega \int_{\Omega} \mu(\sigma + j\omega\epsilon) E \cdot \phi d\Omega \quad (28)$$

Donde:

- E : Campo eléctrico
- ω : Frecuencia angular, definida como $\omega = 2\pi f$

- μ : Permeabilidad magnética del medio
- σ : Conductividad eléctrica del medio
- ϵ : Permitividad dieléctrica del medio
- Ω : Dominio del área de simulación
- ϕ : Función de prueba que aproxima el comportamiento del campo

2.2.20.2. Formulación Integral o Variacional

Para aplicar el Método de Elementos Finitos, se convierte esta ecuación en una formulación integral. Este paso es fundamental, ya que facilita la resolución numérica dividiendo el área de estudio en pequeños elementos. La ecuación diferencial se multiplica por una función de prueba:

$$\int_{\Omega} (\nabla \times E) \cdot (\nabla \times \phi) d\Omega = j\omega \int_{\Omega} \mu(\sigma + j\omega\epsilon) E \cdot \phi d\Omega \quad (29)$$

Donde

- E : Campo eléctrico
- ϕ : Función de prueba que aproxima el comportamiento del campo
- Ω : Dominio del área de simulación
- ω : Frecuencia angular
- μ : Permeabilidad magnética del medio
- σ : Conductividad eléctrica del medio
- ϵ : Permitividad dieléctrica del medio

2.2.20.3. Discretización del Dominio y Aproximación del Campo Eléctrico

Para resolver el campo eléctrico en el área de interés, se discretiza el dominio

Ω en una malla de elementos finitos triangulares. En cada elemento, el campo eléctrico E se aproxima mediante una combinación lineal de funciones de forma $N_i(x, y)$ específicas para cada nodo del elemento. La aproximación del campo en un punto dentro de un elemento es:

$$E(x, y) \approx \sum_i E_i N_i(x, y) \quad (30)$$

Donde

- $E(x, y)$: Aproximación del campo eléctrico en el punto (x, y)
- E_i : Valor del campo eléctrico en el nodo i
- $N_i(x, y)$: Función de forma asociada al nodo i

2.2.20.4. Construcción de las Matrices de Rigidez y de Masa

Matriz de Rigidez K

$$K_{ij} = \int_{\Omega_e} \frac{1}{\mu} (\nabla N_i \cdot \nabla N_j) d\Omega \quad (31)$$

Donde

- K_{ij} : Elemento de la matriz de rigidez en la posición (i, j)
- μ : Permeabilidad magnética del medio
- Ω_e : Área del elemento individual en la malla
- N_i : Función de forma asociada al nodo i
- N_j : Función de forma asociada al nodo j

Matriz de Masa M

$$M_{ij} = \int_{\Omega_e} (\sigma + j\omega\epsilon) N_i N_j d\Omega \quad (32)$$

Donde

- M_{ij} : Elemento de la matriz de masa en la posición (i, j)
- σ : Conductividad eléctrica del medio
- ω : Frecuencia angular
- ϵ : Permitividad dieléctrica del medio
- Ω_e : Área del elemento individual en la malla
- N_i : Función de forma asociada al nodo i
- N_j : Función de forma asociada al nodo j

2.2.20.5. Ensamblaje del Sistema de Ecuaciones Global

Luego de construir las matrices de rigidez y de masa para cada elemento, se ensamblan en un sistema de ecuaciones global, de forma que representen las interacciones en todo el dominio de la simulación. El sistema de ecuaciones que surge tiene la siguiente forma:

$$(K + j\omega M)E = F \quad (33)$$

Donde

- K : Matriz de rigidez global
- M : Matriz de masa global
- ω : Frecuencia angular
- E : Vector de incógnitas que contiene los valores del campo eléctrico en cada nodo
- F : Vector de fuerzas externas que representa las fuentes de voltaje aplicadas en ciertos nodos.

2.2.20.6. Aplicación de Condiciones de Borde

Para obtener un modelo realista, se aplican condiciones de borde en los límites del dominio. En esta simulación, se asume que el campo eléctrico en los bordes es cero, lo que implica que el campo se atenúa completamente en los límites del área de simulación. Esto se

representa ajustando los valores de la matriz global y el vector de fuerzas F en los nodos de borde.

2.2.20.7. Resolución del Sistema y Visualización de Resultados

El sistema de ecuaciones resultante se resuelve numéricamente para obtener el valor del campo eléctrico E en cada nodo de la malla. Para esto, se utiliza un método de álgebra lineal que es eficiente para matrices dispersas, dado que las matrices resultantes de la discretización son en su mayoría matrices dispersas.

Los resultados se visualizan graficando la magnitud del campo eléctrico en el dominio, utilizando un gradiente de colores que varía de azul (baja intensidad) a rojo (alta intensidad). Esta representación permite observar cómo el campo se distribuye radialmente alrededor de los conductores de alta tensión y cómo disminuye en función de la distancia.

2.2.21. Normativa y estándares de seguridad

La normativa y los estándares de seguridad son elementos fundamentales para garantizar la protección de personas, bienes e información en diversos ámbitos. Estos marcos regulatorios establecen requisitos mínimos, mejores prácticas y directrices que las organizaciones deben seguir para mitigar riesgos y prevenir incidentes. Incluyen leyes nacionales e internacionales, normas técnicas como las ISO, y estándares específicos de la industria. Su aplicación abarca desde la seguridad laboral y de productos hasta la ciberseguridad y la protección de datos personales. El cumplimiento de estas normas no solo es una obligación legal en muchos casos, sino también una estrategia para mejorar la confianza de clientes y partes interesadas.

En el ámbito de las líneas eléctricas de transmisión, organismos internacionales como la International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) han establecido límites de exposición a campos electromagnéticos, con el propósito de salvaguardar la salud pública. Estas normativas son fundamentales para definir las distancias mínimas de seguridad

(conocidas como franjas de servidumbre), que corresponden a áreas contiguas a las líneas eléctricas donde se restringe la construcción de edificaciones y ciertas actividades humanas, con el fin de minimizar la exposición.

En el caso del Perú, el Código Nacional de Electricidad (CNE), regulado por el Ministerio de Energía y Minas (2011), contempla estos límites y estipula medidas de seguridad específicas para las instalaciones eléctricas. Entre ellas, se incluyen disposiciones sobre las franjas de servidumbre, asegurando que las líneas de alta tensión mantengan una separación adecuada respecto a zonas habitadas y otras infraestructuras. El cumplimiento de estas regulaciones es clave para prevenir riesgos, proteger a las personas y mitigar posibles impactos negativos sobre el entorno.

2.2.21.1. Efectos de los Campos Electromagnéticos en la Salud

La preocupación por los efectos de los campos electromagnéticos (CEM), especialmente aquellos generados por líneas de transmisión de alta tensión, ha motivado un creciente interés en la comunidad científica. Esta inquietud se basa en los posibles impactos sobre la salud humana, tema que ha sido abordado por múltiples estudios epidemiológicos. Algunos de estos trabajos han sugerido que una exposición prolongada a campos eléctricos y magnéticos de baja frecuencia (60 Hz) podría estar relacionada con alteraciones fisiológicas y neurológicas; sin embargo, la evidencia disponible sigue siendo considerada limitada y no concluyente (WHO, 2007; Kheifets et al., 2021).

El principal mecanismo de interacción de los CEM con el cuerpo humano consiste en la inducción de corrientes eléctricas dentro del organismo. A intensidades elevadas, estas corrientes pueden producir efectos inmediatos, como la estimulación de fibras nerviosas y musculares o el aumento de temperatura en los tejidos. En cambio, a intensidades más bajas — como las que normalmente se encuentran cerca de líneas de transmisión eléctrica —, la atención se orienta hacia los posibles efectos crónicos. Entre ellos se han identificado alteraciones del

sueño, estados de ansiedad y, en ciertos estudios, una posible correlación con cáncer infantil, particularmente leucemia (ICNIRP, 2020).

Para reducir cualquier posible riesgo, entidades internacionales como la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Comisión Internacional de Protección contra Radiaciones No Ionizantes (ICNIRP) han establecido límites de exposición tanto para la población general como para los trabajadores en entornos ocupacionales. Estos valores buscan asegurar que las intensidades de los campos no superen niveles capaces de producir efectos adversos comprobados.

En este sentido, evaluar los CEM emitidos por líneas de transmisión operando a 66 kV resulta clave para verificar el cumplimiento de los límites establecidos por las regulaciones vigentes, tanto a nivel nacional como internacional. Este análisis no solo permite proteger a las comunidades que viven o trabajan en zonas cercanas, sino que también proporciona un respaldo técnico-científico necesario para fundamentar decisiones en materia de planificación energética y salud pública.

2.2.21.2. Mecanismos de Interacción Biológica:

Comprender los mecanismos a través de los cuales los campos electromagnéticos interactúan con los organismos vivos es esencial para evaluar los posibles riesgos derivados de la exposición. Entre estos mecanismos se encuentran la generación de corrientes eléctricas en los tejidos biológicos, las modificaciones en la estructura y función de las membranas celulares, así como la interferencia en procesos bioquímicos clave (Pall, 2015). Estos efectos pueden variar en función de diversos factores, como la intensidad del campo, su frecuencia, y las características individuales de cada persona. Tales fundamentos científicos son los que respaldan los límites de exposición definidos por organismos internacionales, como la ICNIRP (2020), en sus directrices de seguridad.

2.2.21.3. Legislación Peruana e Internacional aplicable a 60 HZ

En el contexto peruano, los límites máximos de exposición a campos eléctricos y magnéticos de frecuencia industrial (60 Hz) están establecidos en el Código Nacional de Electricidad – Suministro (CNE, 2011), los valores permitidos son de 4,2 kV/m y 83,3 μ T para la población general, y de 8,3 kV/m y 416,7 μ T para los trabajadores expuestos. Dichos parámetros constituyen la referencia normativa principal de este estudio, garantizando que las condiciones de operación de las líneas de transmisión de 66 kV se mantengan dentro de márgenes seguros.

A nivel internacional, la International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP, 2020) plantea, para 60 Hz, valores de 5 kV/m y 100 μ T en población general, y de 10kV/m y 200 μ T en ocupacional. En comparación con estos lineamientos, el CNE-2011 peruano resulta más estricto en cuanto al componente magnético para la población general (83,3 μ T frente a 100 μ T).

Estas diferencias reflejan la variabilidad en los criterios adoptados por distintas instituciones; sin embargo, en el ámbito nacional, el cumplimiento de lo dispuesto por el CNE constituye el criterio obligatorio de seguridad.

Tabla 11

Cuadro comparativo de límites de exposición a 60 Hz

Cuadro comparativo de límites de exposición (60 Hz)				
Marco normativo	Población general (E) kV/m	Población general (B) μT	Ocupacional (E) kV/m	Ocupacional (B) μT
CNE-SUMINISTRO (2011)	4.2	83.3	8.3	416.7
ICNIRP (2020)	5	100	10	200

Fuente: Elaboración Propia

2.2.21.4. Legislación en otros países

Varios países han adoptado regulaciones relacionadas con la exposición a campos electromagnéticos de frecuencia industrial (60 Hz). En Brasil, por ejemplo, los límites se basan directamente en las recomendaciones de la ICNIRP (2010), aplicando valores de referencia tanto para la población general como para trabajadores expuestos. En Chile, aunque no existe una normativa nacional específica, se toman como guía los estándares internacionales.

Este panorama evidencia que, a nivel regional, las regulaciones sobre campos electromagnéticos se apoyan en marcos internacionales, lo que resalta la importancia de la normativa peruana. El Código Nacional de Electricidad – Suministro (2011), no solo establece límites concretos y de cumplimiento obligatorio, sino que también proporciona un marco legal claro para la evaluación y control de la exposición en líneas de transmisión de alta tensión.

Tabla 12

Cuadro comparativo de límites de exposición con otros países

País	Normativa aplicable	Población general (E / B)	Ocupacional (E / B)
Perú	CNE - Suministro (2011)	4.2 kV/m - 83.3 μ T	8.3 kV/m - 416.7 μ T
Brasil	Basado en ICNIRP (2010)	\approx 4.17 kV/m - \approx 167 μ T	\approx 8.33 kV/m - \approx 833 μ T
Chile	Referencia a estándares ICNIRP	4.17 kV/m - 167 μ T	8.33 kV/m - 833 μ T

Fuente: Elaboración Propia

CAPÍTULO III : ANALISIS Y PROCESAMIENTO DE DATOS

3.1. Introducción

El análisis y tratamiento de datos constituye una etapa esencial para evaluar el comportamiento de los campos eléctricos y magnéticos generados por la línea de transmisión de alta tensión L-6001 Combapata–Sicuani, operando a 66 kV. Este proceso comenzó con la recolección de información técnica proporcionada por la empresa Electro Sur Este S.A.A., incluyendo las características estructurales de los postes, la altura de los conductores, la configuración geométrica de la línea y sus condiciones operativas.

Los datos recopilados fueron organizados y modelados mediante el software FEMM, permitiendo simular el comportamiento de los campos eléctrico y magnético en diferentes puntos próximos a la línea. Para ello, se establecieron condiciones de contorno, se definieron materiales dieléctricos, la geometría de la línea y los parámetros eléctricos, replicando fielmente el entorno físico real.

Posteriormente, los resultados obtenidos en la simulación fueron exportados y presentados en tablas y gráficos para su análisis. Estos valores se compararon con las mediciones realizadas en campo, lo que permitió validar el modelo. La diferencia observada entre los valores simulados y medidos fue inferior al 7 %, un margen considerado aceptable en estudios de este tipo, lo que respalda la validez y confiabilidad del modelo utilizado.

Los valores obtenidos fueron comparados con los umbrales establecidos en la normativa nacional (CNE, 2011) y en los lineamientos internacionales (ICNIRP, 2020). Esta verificación permitió evaluar el grado de conformidad de la línea de transmisión con los marcos regulatorios vigentes, además de estimar el nivel de riesgo potencial que representan los campos eléctricos para la población ubicada en zonas urbanas y rurales cercanas a la infraestructura.

3.2. Ubicación geográfica

Electro Sur Este S.A.A., empresa dedicada a la comercialización y distribución de energía eléctrica en los departamentos de Cusco, Apurímac, Madre de Dios y Ayacucho, cuenta dentro de su concesión con el sistema de transmisión Combapata–Sicuani. La línea de transmisión L-6001, ubicada en la región Cusco, atraviesa los distritos de Combapata, Tinta, San Pablo, San Pedro y Sicuani, posee una longitud aproximada de 29.129 km y opera a una tensión de 66 kV.

Figura 9

Ubicación Geografía de la línea L-6001



Fuente: (centro de control Electro Sur Este, 2024)

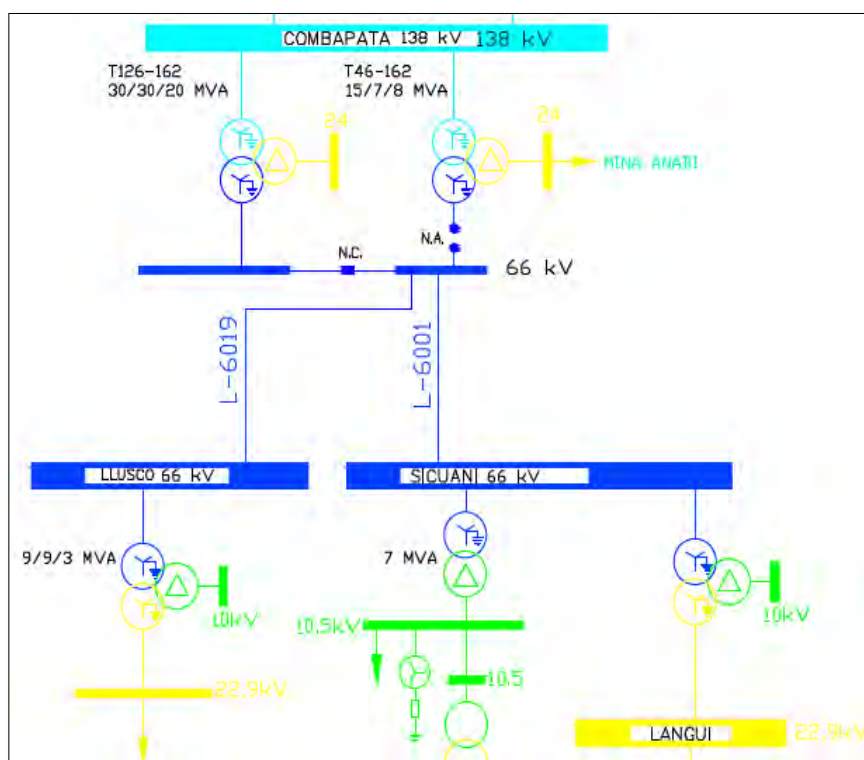
3.3. UBICACIÓN ELECTRICA

La línea de transmisión L-6001 forma parte del Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN). Inicia en la subestación Combapata (138/60/22.9 Kv) y finaliza en la subestación de Sicuani (60/22.9/10.5 Kv). Esta línea se encuentra configurado a simple terna con cable de guarda sin neutro físico y postes de hormigón armado (CAC). La configuración geométrica varía en tramos urbanos y rurales.

El diagrama unifilar que representa la configuración de la línea muestra cómo se distribuyen los diferentes componentes eléctricos de las subestaciones y la línea de transmisión. En la **figura 10** se muestra el diagrama unifilar.

Figura 10

Diagrama Unifilar SET Combapata - Sicuani



Fuente: Diagrama unifilar L-6001 tomado de (COES – OCTUBRE 2024)

3.3.1. Generalidades del Sistema Eléctrico

El sistema eléctrico Combapata – Sicuani. está compuesto por la línea de transmisión L-6001, en 60 Kv como tensión nominal (S.E. Combapata – S.E. Sicuani), abarcando una longitud aproximada de 29.129 km.

3.3.2. Descripción Técnica de la S.E. Combapata

La subestación de transformación Combapata pertenece a la empresa ISA REP (Red de Energía del Perú). Esta subestación está equipada con un transformador de potencia de 15/7/8 MVA, operando con niveles de tensión de 138/60/22.9 kV. Los alimentadores de media tensión, denominados CO 01, CO 02, CO 03, CO 04 y CO 05, se encuentran conectados a la barra de 22.9 kV.

3.3.3. Descripción Técnica de la S.E. Sicuani

La subestación de transformación Sicuani cuenta con un transformador de potencia de 18/12/12 MVA, operando a niveles de tensión de 60/22.9/10.5 kV. Los alimentadores de media tensión, identificados como SI 01, SI 02, SI 03 y SI 05, están conectados a la barra de 10.5 kV.

3.3.4. Descripción Técnica de la línea de transmisión L-6001

La línea de transmisión en 60 kV desde la barra Combapata – Sicuani, tiene un recorrido de 29.129 km pasando por los distritos de Combapata, Tinta, San pablo, San Pedro y Sicuani. En la **Tabla 13** se detalla las características de la línea.

Tabla 13
Características de la Línea L-6001

Descripción	Línea Combapata - Sicuani
Tensión Nominal	60 kV
Tensión máxima	66 KV
Numero de ternas	Una
Longitud	29.129 km
Calibre de conductor	90 mm ² AAAC
Calibre de cable de guarda	38.32 mm ² acero EHS
Estructuras	Poste de C.A.C

Aisladores	Porcelana
Suspensión	6 aisladores ANSI 52-3
Anclaje	7 aisladores ANSI 52-3
Vano promedio	290 m
Altura máxima sobre el nivel mar	3677 msnm
Altura mínima sobre el nivel mar	3394 msnm

Fuente: Elaboración propia.

3.3.5. Descripción Técnica de Postes

Para la línea de transmisión L-6001 de Combapata a Sicuani, se tiene postes de concreto armado centrifugado de 18 y 15 metros, que cumplen con las características mecánicas establecidas y está conformada por dos tipos principales de configuración, para nuestro estudio se denominará, configuración vertical y configuración horizontal. Cada uno de estas configuraciones presentan características específicas adaptadas a las exigencias estructurales y eléctricas del sistema de transmisión, que ofrecen mayor capacidad de carga y separación entre conductores.

Estos postes están contruidos con materiales de alta resistencia, como el de concreto armado centrifugado (C.A.C), que garantizan la estabilidad y durabilidad ante factores como el viento y otras cargas mecánicas. La combinación de estos dos tipos de postes asegura una distribución efectiva y segura del flujo eléctrico a lo largo de toda la línea. En la **Tabla 14** se detalla las características de las estructuras del recorrido de línea.

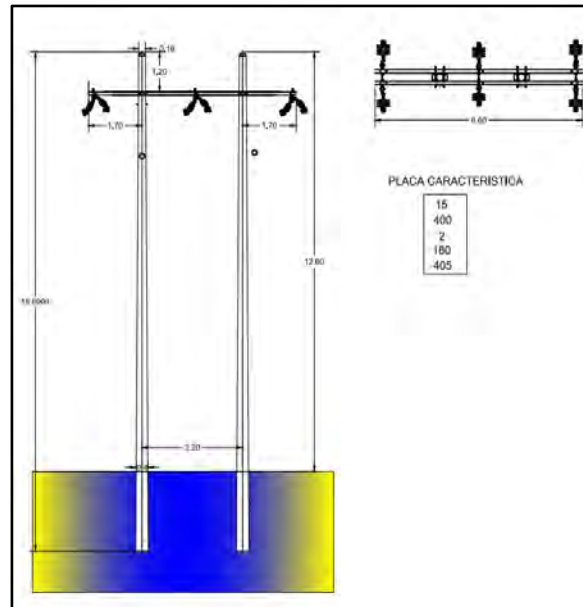
Tabla 14 Características de los postes

Código del Poste	Altura (m)	Material	Capacidad de Carga (KN)	Separación entre Conductores (m)	Configuración de armado
A	18	Concreto Armado Centrifugado	600	1.5	Vertical
B	15	Concreto Armado Centrifugado	400	3.0	Horizontal

Fuente: Elaboración propia.

Figura 11

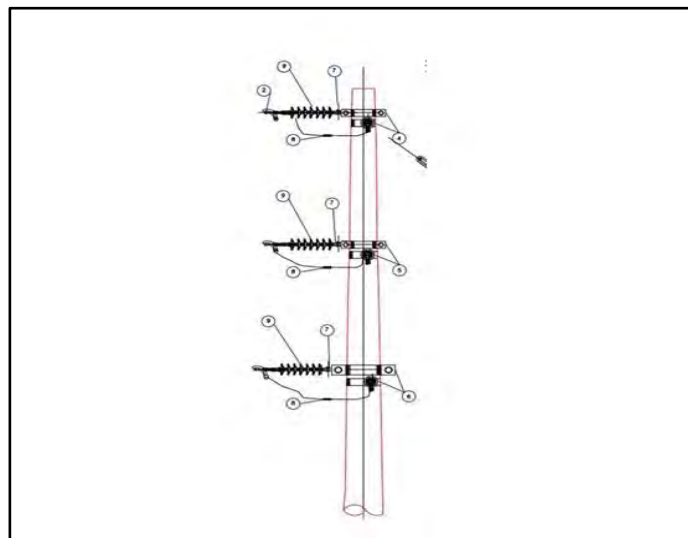
Armado poste de concreto armado configuración horizontal



Fuente: Elaboración propia.

Figura 12

Armado de poste concreto armado configuración vertical



Fuente: Elaboración propia.

3.4. Registro de datos en software de simulación

En este estudio se empleó el software FEMM (Finite Element Method Magnetics), desarrollado por David Meeker (2015), debido a su versatilidad para realizar simulaciones

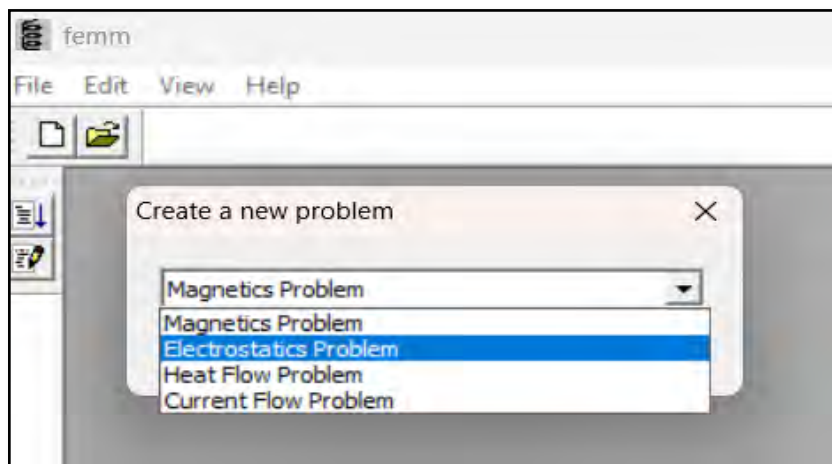
bidimensionales (2D), lo que permitió analizar con detalle los campos eléctricos y magnéticos asociados a la línea de transmisión L-6001.

Se consideraron dos configuraciones geométricas, vertical y horizontal, que representan los principales tipos de estructuras presentes en la línea. Los parámetros geométricos empleados en el modelado como la altura, separación y radio del conductor, fueron obtenidos a partir de la información técnica suministrada por la empresa concesionaria.

El procedimiento inició con la creación de un nuevo modelo en FEMM, en el que se incorporaron los datos de operación del sistema, proporcionados por la empresa Electro Sur Este S.A.A. Posteriormente, se configuró el sistema de unidades en metros, garantizando la precisión y consistencia de la simulación. En la **Figura 13** se muestran los tipos de problemas que pueden resolverse en FEMM, de los cuales se seleccionaron los módulos de análisis electrostático y magnético para este trabajo.

Figura 13

Selección de problema en software FEMM



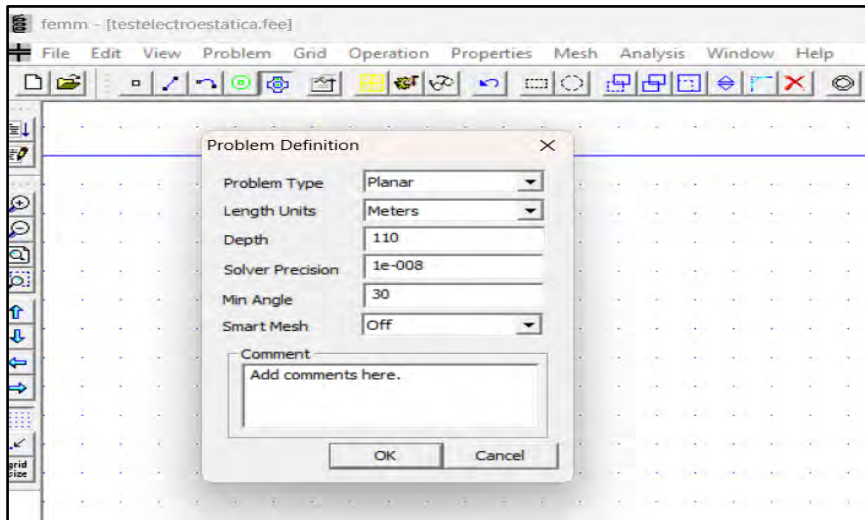
Fuente: Módulo de análisis – FEMM

Tras seleccionar el tipo de problema en el software FEMM, se habilita una ventana de configuración en la que se definen parámetros esenciales como el tipo de análisis, el sistema

de unidades y el nivel de precisión requerido. La **Figura 14** presenta dicho cuadro de configuración utilizado en el estudio.

Figura 14

Definición de problema



Fuente: Módulo de análisis – FEMM

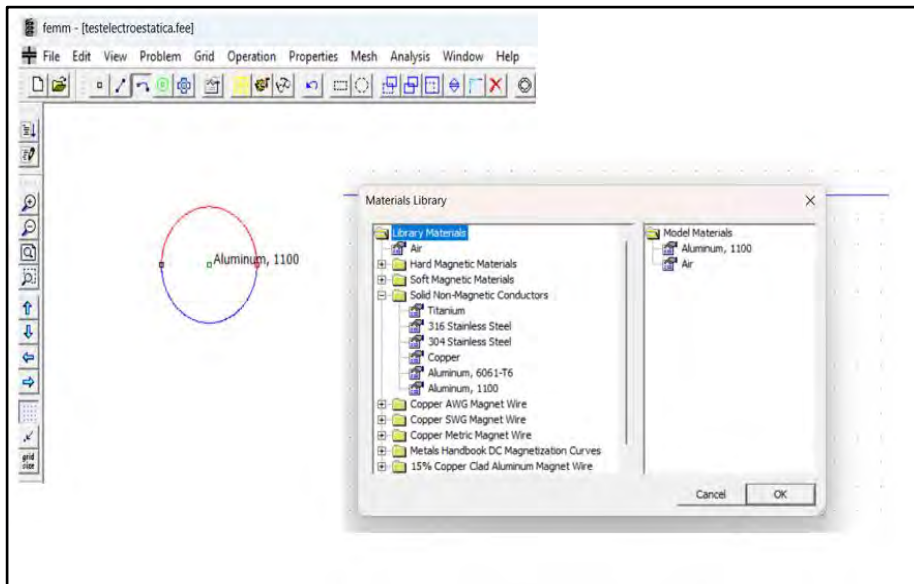
El modelo fue configurado bajo varias condiciones esenciales para la simulación, entre ellas, la suposición de que la simulación no variaría con el tiempo, que el análisis se llevaría a cabo en dos dimensiones utilizando coordenadas cartesianas, y que los conductores tendrían una longitud infinita. Además, se asumió que la tierra es plana y actúa como un conductor perfecto, lo que simplificó los cálculos del entorno electromagnético. Para la representación de la infraestructura, se definieron dos configuraciones clave: configuración vertical y configuración horizontal, de acuerdo con los parámetros físicos de la línea de transmisión.

En la geometría del modelo (**Figura 15**), los conductores se representaron mediante arcos y se definieron nodos en puntos estratégicos, con el fin de estructurar una malla de elementos finitos adecuada para la simulación de los campos eléctricos y magnéticos. En esta etapa se asignaron propiedades específicas a los materiales, empleando aluminio 1100 para los

conductores y aire para el entorno, lo que garantizó una caracterización precisa y realista de las condiciones eléctricas del sistema.

Figura 15

Modelamiento de los conductores eléctricos



Fuente: Módulo de análisis – FEMM

Una vez definido el modelo geométrico de cada fase de la línea, se establecieron las condiciones de contorno para representar de forma realista el comportamiento eléctrico en torno a los conductores. Estas condiciones incluyeron la configuración de los segmentos de arco y de los límites del área de simulación.

Los parámetros principales considerados fueron:

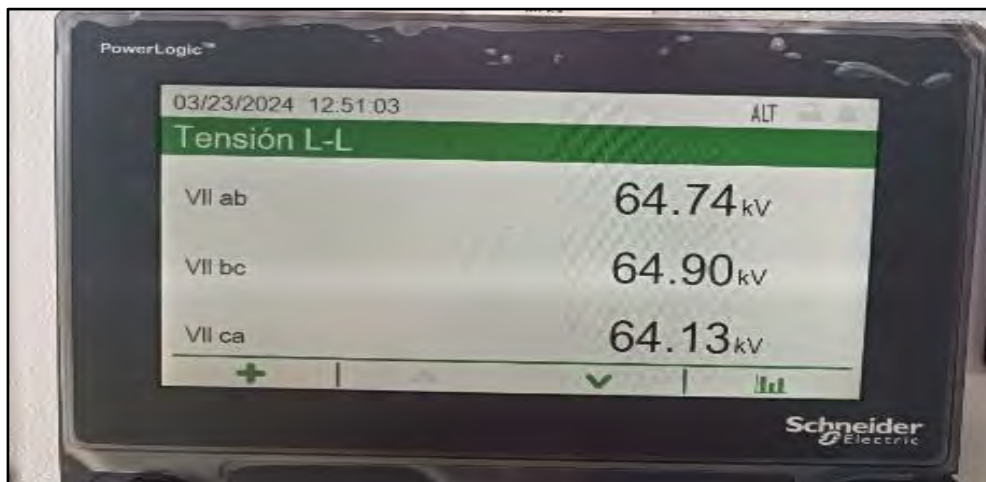
- Altura de los conductores: 18 m respecto al nivel del suelo.
- Separación entre fases: 1.5 m para la disposición vertical y 3 m para la disposición horizontal.
- Diámetro del conductor: 0.0162 m (conductor de aluminio 1100).
- Tensión de operación: 64.9 kV línea–línea.
- Corriente nominal: 36.927 A.

A partir de la tensión línea a línea, se calculó la tensión de fase en valores RMS y pico, necesarios para asignar los potenciales en FEMM:

$$V_{fase-RMS} = \frac{V_{LL}}{\sqrt{3}} \quad V_{fase-pico} = V_{fase-RMS} \cdot \sqrt{2} \quad (34)$$

Figura 16

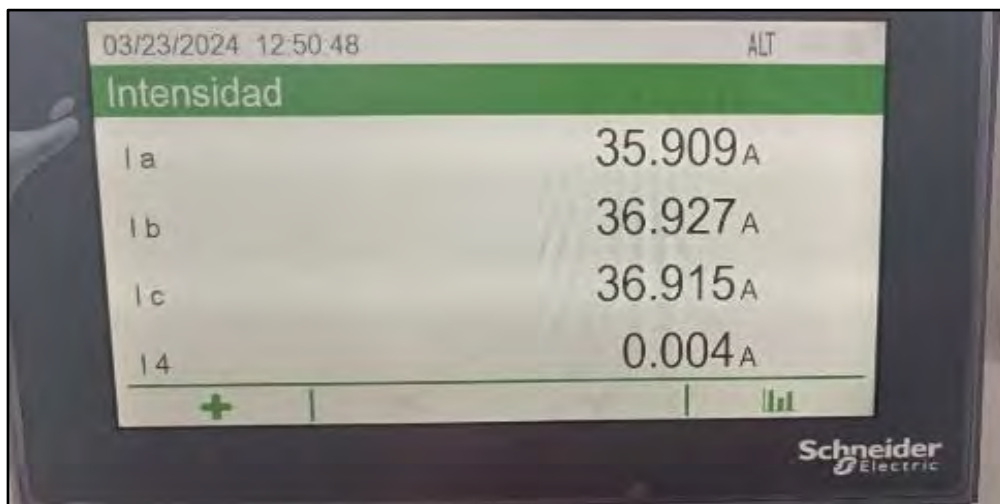
Registro de nivel de tensión en operación en la línea en máxima demanda



Fuente: Elaboración propia

Figura 17

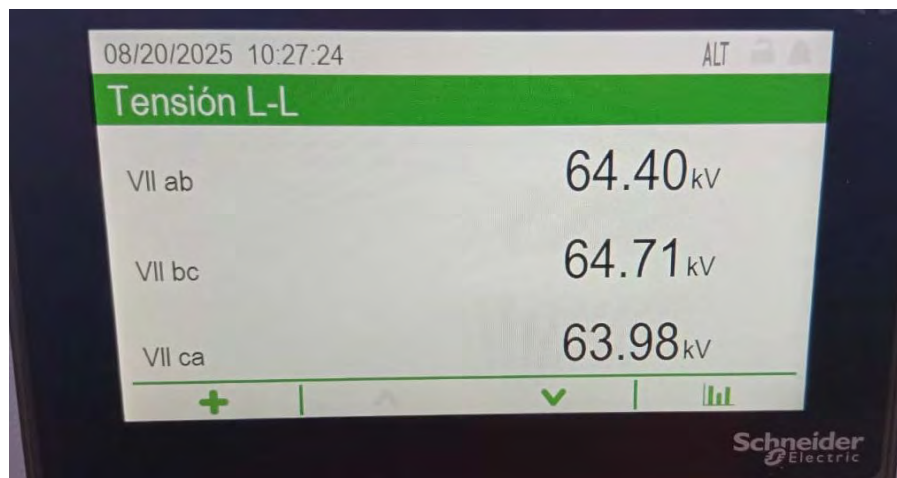
Registro de corriente de operación en máxima demanda



Fuente: Elaboración propia

Figura 18

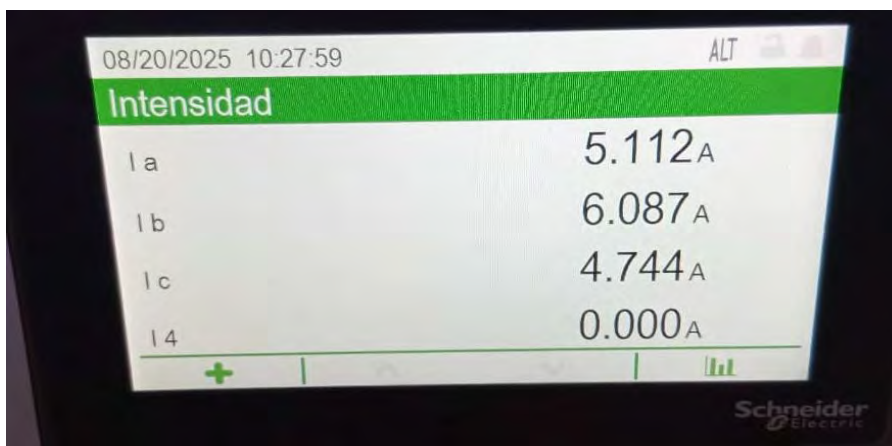
Registro de nivel de tensión en operación en la línea en mínima demanda



Fuente: Elaboración propia

Figura 19

Registro de corriente de operación en mínima demanda



Fuente: Elaboración propia

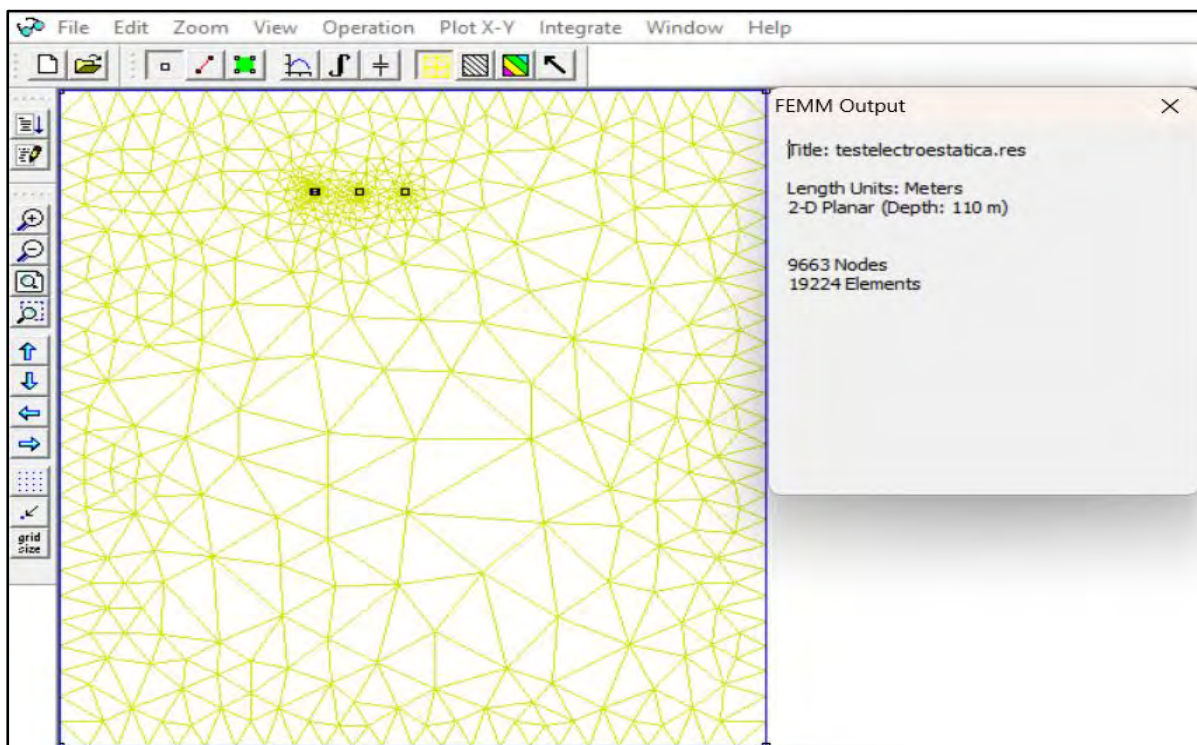
A continuación, se llevaron a cabo simulaciones destinadas a analizar la distribución espacial de los campos eléctricos y magnéticos a lo largo de la línea de transmisión. Para este propósito, se emplearon algoritmos específicos capaces de calcular los efectos electromagnéticos, considerando la interacción entre los campos generados y las estructuras físicas involucradas. Este procedimiento implicó la resolución numérica de las ecuaciones de Maxwell.

Mediante la aplicación del Método de los Elementos Finitos (FEM), se dividió el dominio de estudio en una malla compuesta por elementos finitos, lo que permitió estimar el comportamiento del campo eléctrico en cada nodo utilizando funciones de forma vinculadas a la geometría del sistema.

Asimismo, se definieron las condiciones de frontera para los conductores en función de los valores máximos de voltaje por fase del sistema, considerando el voltaje pico en estado estable. Para el plano del suelo, se asumió una condición de potencial eléctrico igual a cero. Con estos parámetros, se procedió a la discretización del espacio, generando la malla de elementos finitos en forma de triángulos dentro del software, como se muestra en las **figuras 20 y 21**, lo cual permitió una simulación más detallada y precisa del fenómeno.

Figura 20

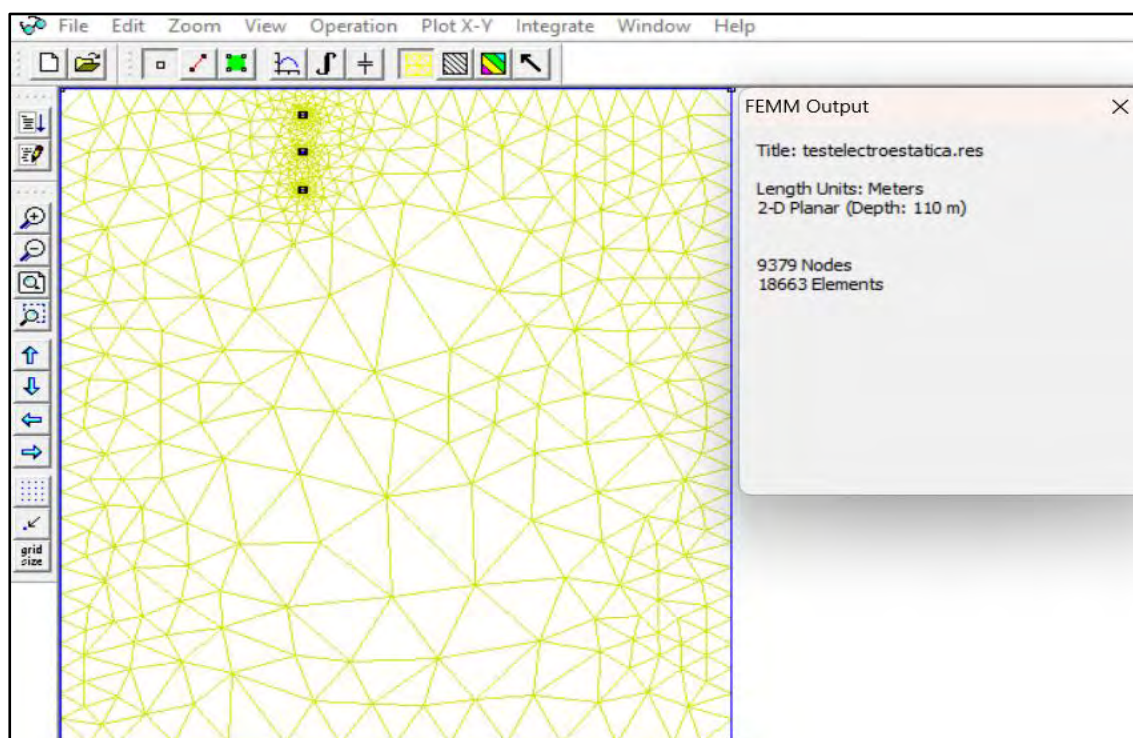
Generación de triángulos y nodos configuración horizontal



Fuente: Módulo de análisis – FEMM

Figura 21

Generación de triángulos y nodos configuración vertical



Fuente: Módulo de análisis – FEMM

A continuación, se presentan las variables y parámetros técnicos utilizados en la simulación:

Tabla 15

Parámetros técnicos del conductor eléctrico.

Parámetro	Valor
Tensión de la línea en máxima demanda	64,900 voltios
Corriente eléctrica en máxima demanda	36.927 amperios
Material del conductor	Aluminio 1100
Conductividad del conductor	34.45 Ms/m
Diámetro del conductor	0.0162 metros
Permeabilidad del aire	1 (permeabilidad relativa del aire)

Fuente: Elaboración propia

3.5. Mediciones en la línea de transmisión

Para la medición de campos eléctricos y magnéticos, es imprescindible seguir procedimientos estandarizados que garanticen la validez de los resultados. La norma internacional que establece los métodos adecuados para estas mediciones es la IEEE Std. 644-1994 (Standard Procedures for Measurement of Power Frequency Electric and Magnetic Fields From AC Power Lines). Según esta norma, la medición de la intensidad de los campos eléctricos debe realizarse a 1 metro sobre el nivel del suelo, aplicándose el mismo procedimiento para la medición del campo magnético.

En lo que respecta al campo magnético, el cual depende directamente de la corriente que circula por el conductor, su medición no se ve influenciada por la proximidad al suelo, a las personas o a otros objetos. No obstante, es fundamental evitar la presencia de materiales ferromagnéticos cerca del instrumento de medición, ya que podrían ocasionar errores en los resultados.

Las mediciones de los campos eléctrico y magnético en la línea de transmisión de alta tensión L-6001, Combapata–Sicuani, proporcionan información esencial para comprender la distribución y variabilidad de estos campos a lo largo de la línea. Las mediciones se realizaron en diversas ubicaciones durante un periodo de tiempo determinado, con el propósito de evaluar el comportamiento de los campos en condiciones de máxima y mínima demanda, permitiendo así analizar su comportamiento real bajo distintos escenarios operativos.

El 23 de marzo de 2024, se efectuaron las primeras mediciones en la estructura L60010NAT000110 a las 12:10 p.m., con una configuración horizontal ubicada debajo de la línea. En este punto, se registró un campo eléctrico de 717 V/m y un campo magnético de 1.02 μ T. A una distancia de 8 metros del eje derecho de la línea, el campo eléctrico disminuyó a 495 V/m, mientras que el campo magnético bajó a 0.85 μ T. En el eje izquierdo, a la misma distancia, los valores fueron 485 V/m para el campo eléctrico y 0.84 μ T para el campo

magnético. Finalmente, en el medio vano entre las estructuras, el campo eléctrico fue de 392 V/m y el campo magnético aumentó a 1.33 μ T. Estos valores corresponden a una condición de máxima demanda, lo que explica la mayor intensidad de los registros.

El mismo día, en la estructura L60010NAT000100 a las 13:17 p.m., se registraron valores similares. Debajo de la línea, el campo eléctrico alcanzó 648 V/m y el campo magnético 1.33 μ T. A 8 metros del eje derecho, se midió un campo eléctrico de 495 V/m y un campo magnético de 0.85 μ T, mientras que, en el eje izquierdo, los valores fueron 485 V/m para el campo eléctrico y 0.84 μ T para el campo magnético. En el medio vano, el campo eléctrico se redujo a 392 V/m, permaneciendo el campo magnético en 1.33 μ T.

En la estructura L60010NAT000109, a las 12:28 p.m., se registró un campo eléctrico de 405 V/m y un campo magnético de 1.33 μ T debajo de la línea. A 8 metros del eje derecho, los valores disminuyeron a 335 V/m para el campo eléctrico y 1.02 μ T para el campo magnético. En el eje izquierdo, se midieron 307 V/m y 0.75 μ T, mientras que, en el medio vano, el campo eléctrico aumentó a 525 V/m y el campo magnético bajó a 0.84 μ T.

En la estructura L60010NAT000108, a las 12:43 p.m., el campo eléctrico debajo de la línea fue de 783 V/m y el campo magnético de 1.04 μ T. A 8 metros del eje derecho, los valores disminuyeron a 586 V/m y 0.58 μ T, respectivamente, mientras que en el eje izquierdo se registraron 611 V/m y 0.56 μ T. En el medio vano, el campo eléctrico alcanzó 780 V/m y el campo magnético 0.99 μ T.

El 25 de marzo de 2024, en la estructura L60010NAT000042 a las 12:15 p.m., se midió un campo eléctrico de 1233 V/m y un campo magnético de 1.44 μ T debajo de la línea. A 8 metros del eje derecho, el campo eléctrico disminuyó a 779 V/m y el campo magnético a 1.10 μ T, mientras que en el eje izquierdo los valores fueron 785 V/m y 1.04 μ T. En el medio vano, el campo eléctrico subió a 1240 V/m y el campo magnético alcanzó 1.50 μ T.

El 26 de marzo de 2024, en la estructura L60010NAT000003, a las 12:25 p.m., se registraron valores más bajos. Debajo de la línea, el campo eléctrico fue de 219 V/m y el campo magnético de 0.80 μ T. A 8 metros del eje derecho, los valores fueron 264 V/m y 0.29 μ T, mientras que en el eje izquierdo se midieron 274 V/m y 0.33 μ T. En el medio vano, el campo eléctrico descendió a 136 V/m y el campo magnético a 0.23 μ T.

Ese mismo día, en la estructura L60010NAT000002, a las 12:37 p.m., debajo de la línea, se registró un campo eléctrico de 722 V/m y un campo magnético de 1.39 μ T. A 8 metros del eje derecho, los valores fueron 405 V/m y 1.33 μ T, mientras que en el eje izquierdo se midieron 648 V/m y 0.95 μ T. En el medio vano, el campo eléctrico alcanzó 525 V/m y el campo magnético 0.84 μ T.

Posteriormente, con el objetivo de contrastar estos registros, el 20 de agosto de 2025 se realizaron nuevas mediciones en condiciones de mínima demanda. En la configuración horizontal, en la estructura L60010NAT000109 a las 10:25 a.m., los valores obtenidos debajo de la línea fueron de 845 V/m y 0.13 μ T. A 8 metros hacia la derecha de la línea, el campo eléctrico fue de 611 V/m y el magnético de 0.07 μ T, mientras que en el lado izquierdo de la línea se registraron 648 V/m y 0.07 μ T.

Del mismo modo, en la configuración vertical, en la estructura L60010NAT000042 a las 11:05 a.m., se midieron valores de 1240 V/m y 0.18 μ T debajo de la línea. A 8 metros hacia la derecha de la línea, se obtuvo 779 V/m y 0.12 μ T, mientras que a la misma distancia hacia la izquierda de la línea los valores fueron de 785 V/m y 0.12 μ T.

Tabla 16

Resumen de mediciones de campo eléctrico y magnético en condiciones de máxima demanda.

Estructura	Ubicación	Campo Eléctrico a 1 metro del suelo (V/m)	Campo Magnético a 1 metro del suelo(μ T)
	Debajo de la línea	717	1.02
L60010NAT000110	A 8 metros del eje derecho	495	0.85
	A 8 metros del eje izquierdo	485	0.84
	Medio vano	392	1.33
	Debajo de la línea	648	1.33
L60010NAT000100	A 8 metros del eje derecho	495	0.85
	A 8 metros del eje izquierdo	485	0.84
	Medio vano	392	1.33
	Debajo de la línea	405	1.33
L60010NAT000109	A 8 metros del eje derecho	335	1.02
	A 8 metros del eje izquierdo	307	0.75
	Medio vano	525	0.84
	Debajo de la línea	783	1.04
L60010NAT000108	A 8 metros del eje derecho	586	0.58
	A 8 metros del eje izquierdo	611	0.56
	Medio vano	780	0.99
	Debajo de la línea	1233	1.44
L60010NAT000042	A 8 metros del eje derecho	779	1.10
	A 8 metros del eje izquierdo	785	1.04
	Medio vano	1240	1.50
	Debajo de la línea		

L60010NAT000003	Debajo de la línea	219	0.8
	A 8 metros del eje derecho	264	0.29
	A 8 metros del eje izquierdo	274	0.33
	Medio vano	136	0.23
L60010NAT000002	Debajo de la línea	722	1.39
	A 8 metros del eje derecho	405	1.33
	A 8 metros del eje izquierdo	648	0.95
	Medio vano	525	0.84

Fuente: Elaboración propia

Tabla 17

Resumen de mediciones de campo eléctrico y magnético en condiciones de mínima demanda.

Configuración de línea de transmisión	Estructura	Ubicación	Campo Eléctrico a 1 m del suelo (V/m)	Campo Magnético a 1 m del suelo (μ T)
Horizontal	L60010NAT000109	Debajo de la línea	845	0.13
		A 8 m del eje derecho	611	0.07
		A 8 m del eje izquierdo	648	0.07
Vertical	L60010NAT000042	Debajo de la línea	1240	0.18
		A 8 m del eje derecho	779	0.12
		A 8 m del eje izquierdo	785	0.12

Fuente: Elaboración propia

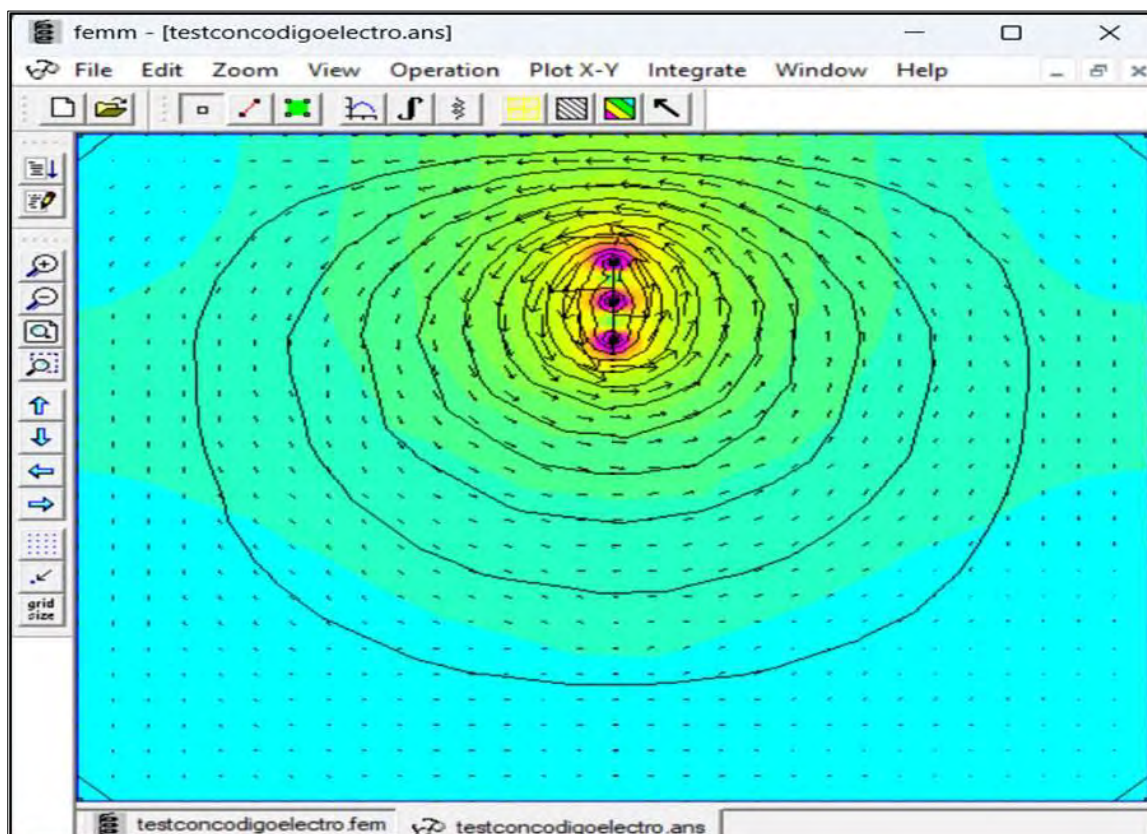
3.6. Distribución espacial de la radiación

Los resultados de la simulación generaron mapas detallados de la distribución espacial de los campos eléctrico y magnético. En la **figura 22**, se aprecia que el campo magnético presenta mayor intensidad en las proximidades del conductor y disminuye gradualmente al

aumentar la distancia, en concordancia con la Ley de Ampere, que establece la proporcionalidad entre el campo magnético y la corriente que lo origina. La representación gráfica emplea un gradiente de colores, donde las tonalidades más intensas reflejan valores elevados y las más suaves corresponden a niveles bajos, evidenciando la reducción de la densidad de flujo magnético a medida que se aleja de la línea de transmisión. Este comportamiento resalta la importancia de evaluar la exposición en zonas cercanas a la infraestructura eléctrica, particularmente en áreas residenciales e industriales, debido a los posibles riesgos asociados a la presencia de campos magnéticos intensos.

Figura 22

Distribución del campo magnético configuración vertical.



Fuente: Módulo de análisis de conductor eléctrico – FEMM

En la figura 23 se puede observar que las líneas del campo magnético adoptan una configuración circular y concéntrica en torno a los conductores. Este patrón es característico de los campos magnéticos inducidos por corrientes eléctricas y se explica a través de la Ley de

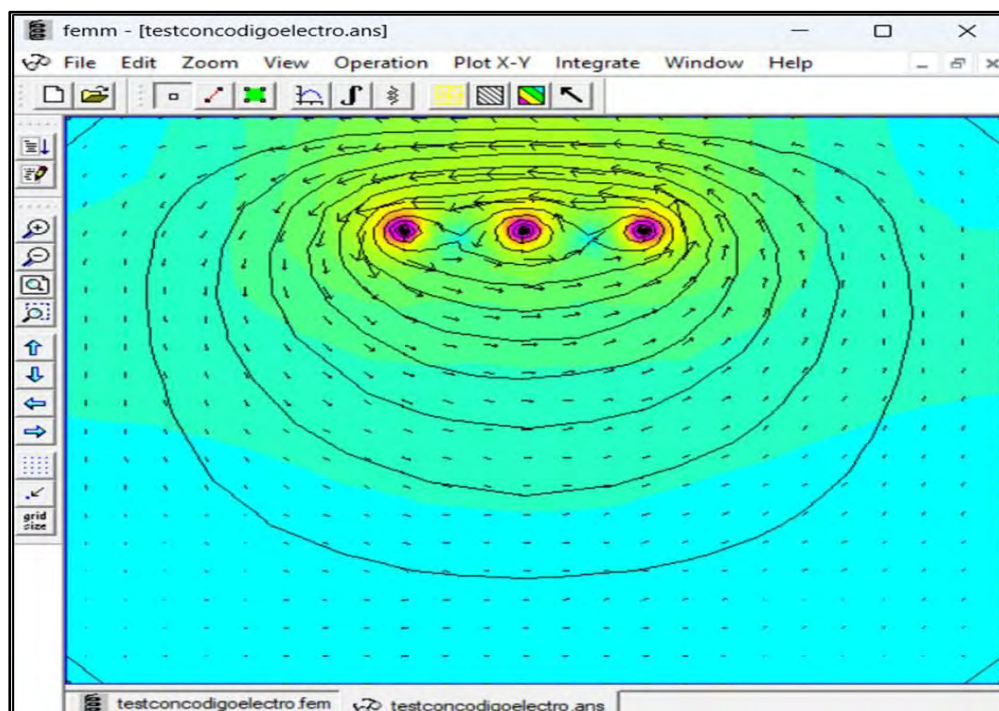
la Mano Derecha. Según esta ley, si se orienta el pulgar de la mano derecha en la dirección del flujo de corriente, los dedos mostrarán la trayectoria del campo magnético, el cual rodea al conductor en forma de círculos concéntricos.

Este comportamiento evidencia cómo una corriente eléctrica genera un campo magnético que se propaga radialmente desde el conductor, siendo más intenso en las proximidades del mismo y atenuándose conforme aumenta la distancia. Dicha distribución es típica en los sistemas de transmisión eléctrica, y su análisis es clave para entender el impacto de los campos magnéticos en el entorno circundante.

Asimismo, se identifica un radio de influencia del campo magnético alrededor de los conductores, lo cual resalta la importancia de aplicar medidas preventivas en zonas cercanas a estas instalaciones. Una exposición prolongada a campos magnéticos de alta intensidad podría tener implicancias en la salud humana, por lo que su monitoreo y control resultan fundamentales.

Figura 23

Distribución del campo magnético configuración horizontal

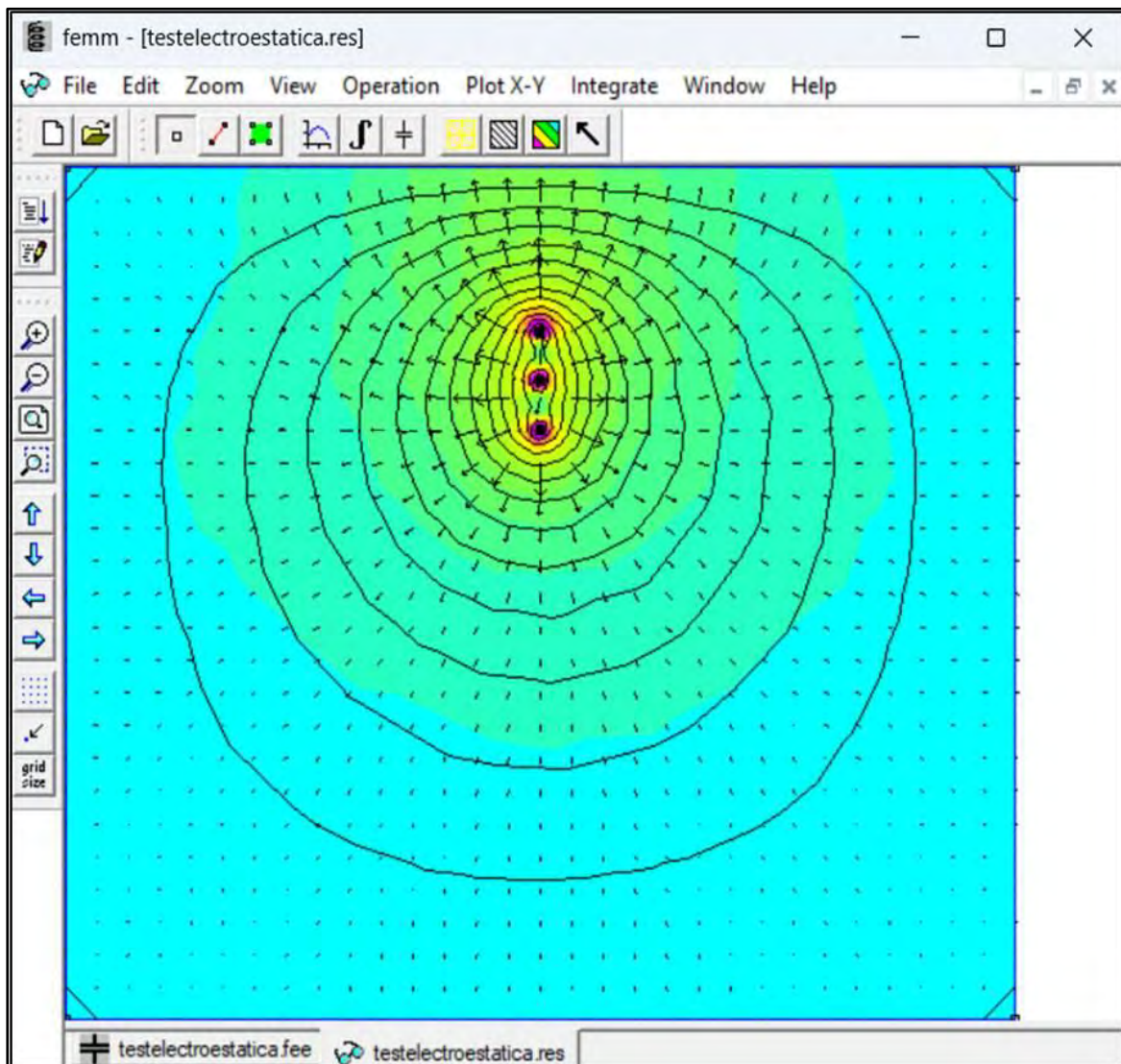


Fuente: Modulo de análisis de conductor eléctrico – FEMM

En contraste, el campo eléctrico presenta una distribución radial que se origina en los conductores y se dirige hacia el suelo, el cual actúa como plano de referencia o tierra. A diferencia del campo magnético, cuya intensidad está directamente asociada a la corriente, el campo eléctrico depende del voltaje aplicado y de la geometría de la línea, extendiéndose en un área más amplia alrededor de los conductores. Este comportamiento es característico de las líneas de alta tensión, donde las líneas de campo eléctrico tienden a dispersarse en el entorno inmediato, tal como se aprecia en las **figuras 24 y 25**.

Figura 24

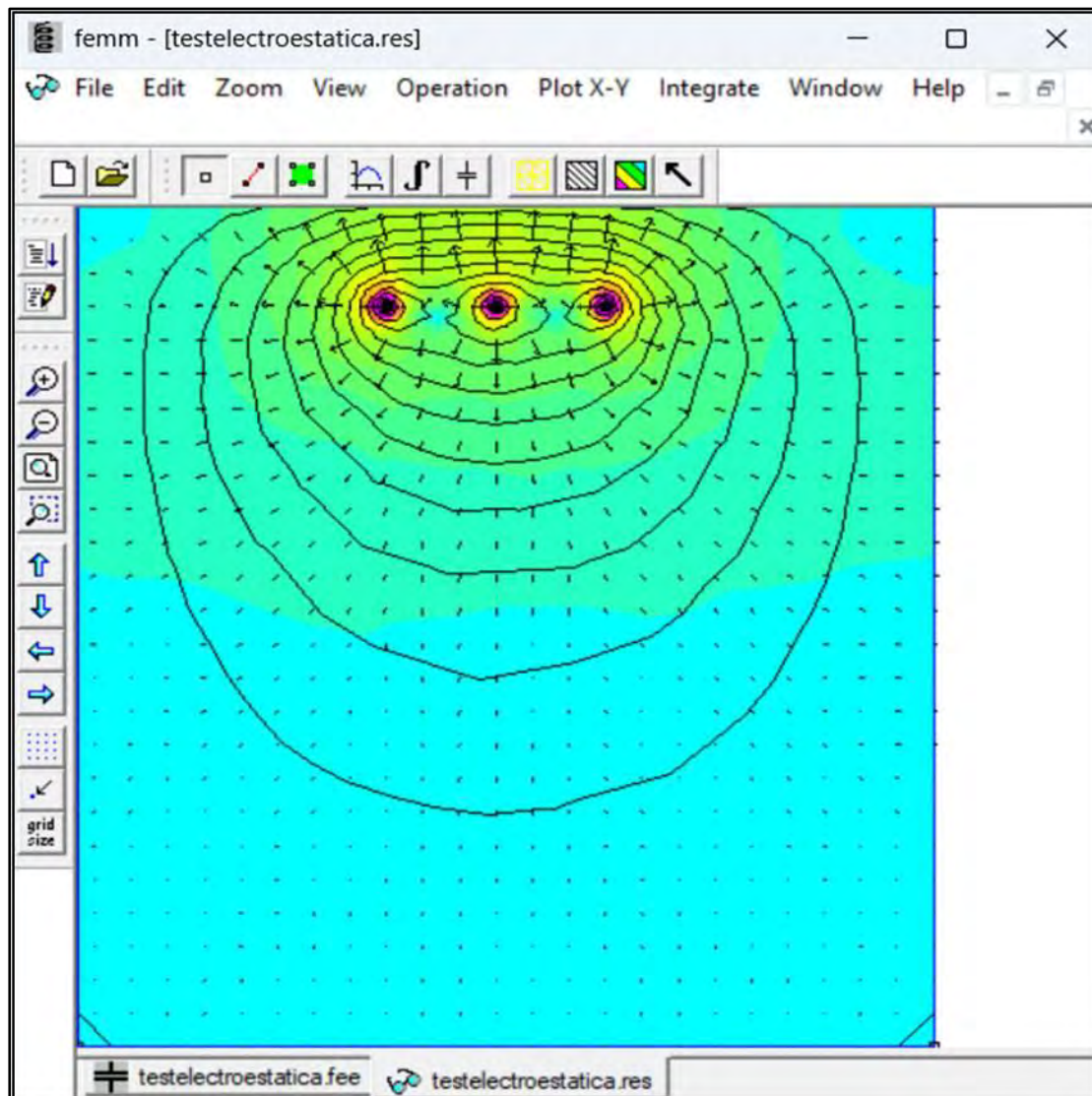
Distribución del campo eléctrico configuración vertical



Fuente: Módulo de análisis de conductor eléctrico – FEMM

Figura 25

Distribución campo eléctrico configuración horizontal



Fuente: Módulo de análisis de conductor eléctrico – FEMM

El comportamiento observado está directamente relacionado con la diferencia de potencial entre los conductores. A medida que el voltaje se distribuye entre los conductores, se genera un campo eléctrico cuya intensidad es proporcional a la cantidad de carga acumulada en los conductores y al voltaje aplicado. Por lo tanto, cerca de los conductores, la intensidad del campo eléctrico es mayor, ya que las líneas de campo eléctrico están más concentradas.

En conjunto, este análisis de datos permite comprender con mayor precisión la distribución de la radiación electromagnética en líneas de transmisión de alta tensión. La

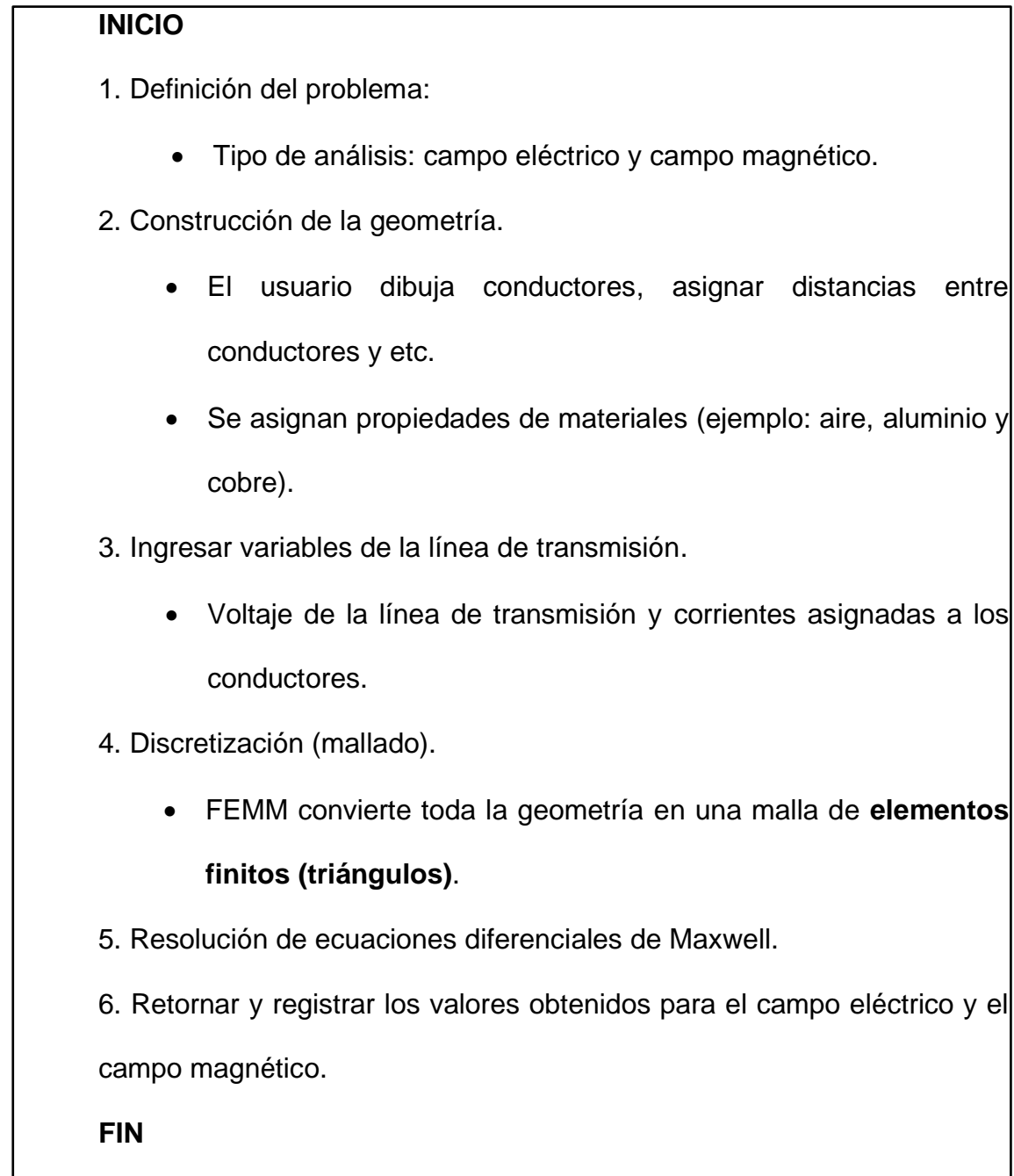
evaluación detallada de las condiciones ambientales en las distintas ubicaciones constituye una base sólida para la implementación de medidas de seguridad y estrategias de mitigación en las zonas cercanas a estas infraestructuras. Este enfoque resulta esencial tanto para la protección de los trabajadores como de las comunidades aledañas, garantizando que la normativa de seguridad refleje los niveles reales de exposición y contribuyendo a minimizar los riesgos asociados a la radiación electromagnética.

3.7. Validación de la simulación mediante el software FEMM

La validación del modelo se realizó comparando los valores simulados con los valores medidos. Este código de simulación en FEMM, tiene una estructura como se muestra en la **figura 26**, fue creado para simular el comportamiento del campo eléctrico y campo magnético alrededor de la línea de transmisión L-6001, específicamente en las configuraciones de tipo horizontal y vertical, utilizando el método de elementos finitos (FEM).

Figura 26

Estructura del algoritmo para el Cálculo de Campos Eléctricos y Magnéticos en Líneas de Transmisión.



Fuente: Elaboración propia

El modelo del software FEMM calcula la radiación eléctrica y magnética promedio generada en la línea de transmisión, tomando como base los datos operativos y las características de la línea de transmisión L-6001. A partir de las variables como el voltaje, la corriente eléctrica, y la configuración geométrica de la línea, el software aplicó algoritmos especializados para estimar los campos eléctricos y magnéticos presentes en el entorno cercano a la línea de transmisión. Los resultados obtenidos se expresan en voltios por metro (V/m) para el campo eléctrico y micro teslas (μT) para el campo magnético, proporcionan una referencia cuantitativa del comportamiento de ambos campos en las configuraciones de línea analizada. La información obtenida resulta fundamental para analizar el posible impacto de los campos eléctricos y magnéticos en las áreas habitadas próximas a la línea de transmisión, contrastando los valores simulados con los límites de exposición establecidos por organismos internacionales como la ICNIRP (2020) y la normativa nacional vigente en el Código Nacional de Electricidad (2011).

El cálculo de los campos eléctricos y magnéticos a lo largo de la línea de transmisión se realizó mediante un algoritmo que toma como variables de entrada el voltaje aplicado en la línea, la corriente eléctrica que circula, y las distancias mínima y máxima a los puntos evaluados. A partir de estos datos, se aplicaron las leyes físicas correspondientes para obtener una estimación de los campos.

El cálculo del campo eléctrico se fundamentó en la Ley de Coulomb, considerando que la densidad de carga en los conductores es proporcional al voltaje aplicado. La estimación se realizó en distintos puntos de la línea L-6001 y posteriormente se calcularon valores en distintos puntos y se determinó un valor representativo del campo eléctrico.

Por otro lado, el campo magnético se determinó aplicando la expresión correspondiente a un conductor rectilíneo, la cual relaciona la intensidad de la corriente con la distancia al punto

de observación. Los valores calculados en los distintos puntos de la línea fueron procesados para obtener un valor representativo del campo magnético en la configuración analizada.

Para terminar, el algoritmo divide al conductor de la línea de transmisión en una serie de subsegmentos discretos, permitiendo calcular de forma acumulativa los campos eléctricos y magnéticos.

De esta manera, se desarrolló un script en MATLAB (**figura 52**), para automatizar la interacción con FEMM y permitir la réplica del modelo de forma más eficiente.

3.7.1. *Simulación de la radiación electromagnética en máxima demanda*

3.7.1.1. Configuración Vertical

Las gráficas presentan la distribución del campo eléctrico y magnético alrededor de los conductores de la línea con una configuración vertical, mostrando cómo la intensidad del campo se dispersa en un patrón radial. Los valores obtenidos en condiciones de máxima demanda se resumen en la **tabla 18**.

Tabla 18

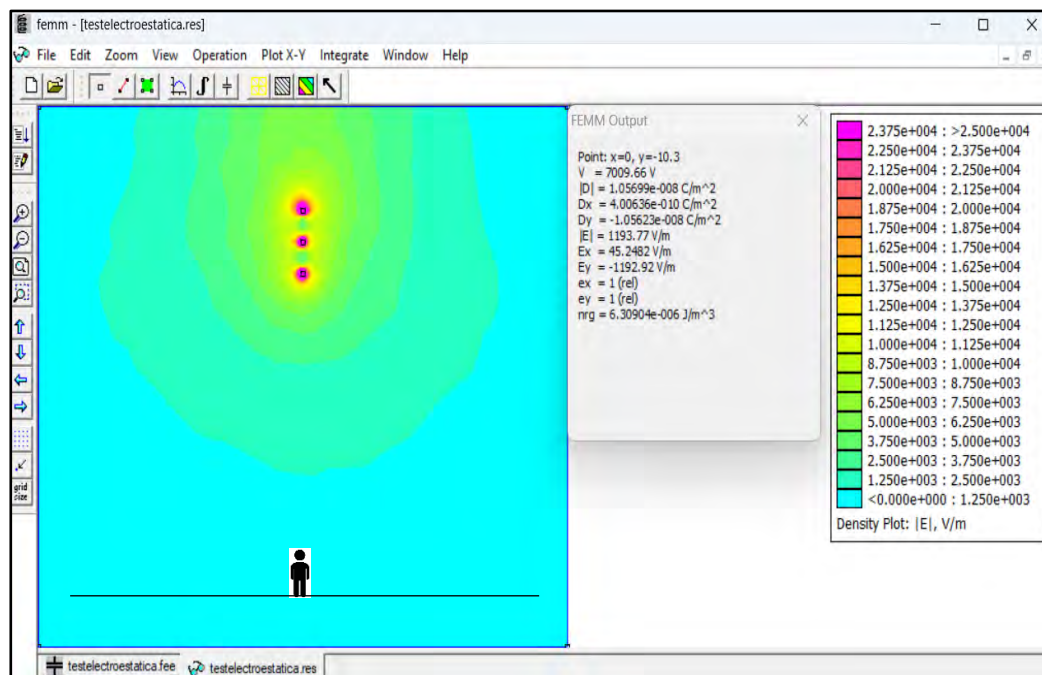
Resumen de mediciones configuración vertical en condiciones de máxima demanda

Configuración Vertical		
Posición	Campo Eléctrico (V/m)	Campo Magnético (μT)
Directamente bajo el conductor a 1 metro del suelo	1193.77	1.44995
A 08 m de distancia lateral derecho	823.588	1.04814
A 08 m de distancia lateral izquierdo	811.196	1.05586

Fuente: Elaboración propia

Figura 27

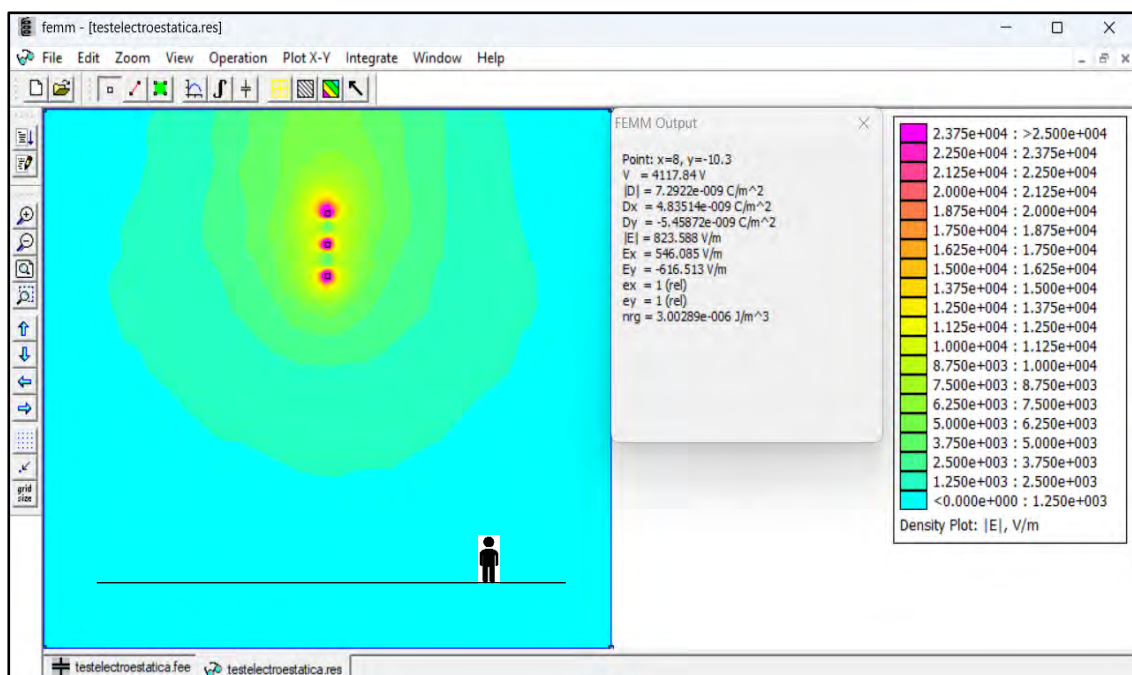
Distribución del campo eléctrico configuración vertical debajo de la línea de transmisión.



Fuente: Elaboración propia con programación en FEMM

Figura 28

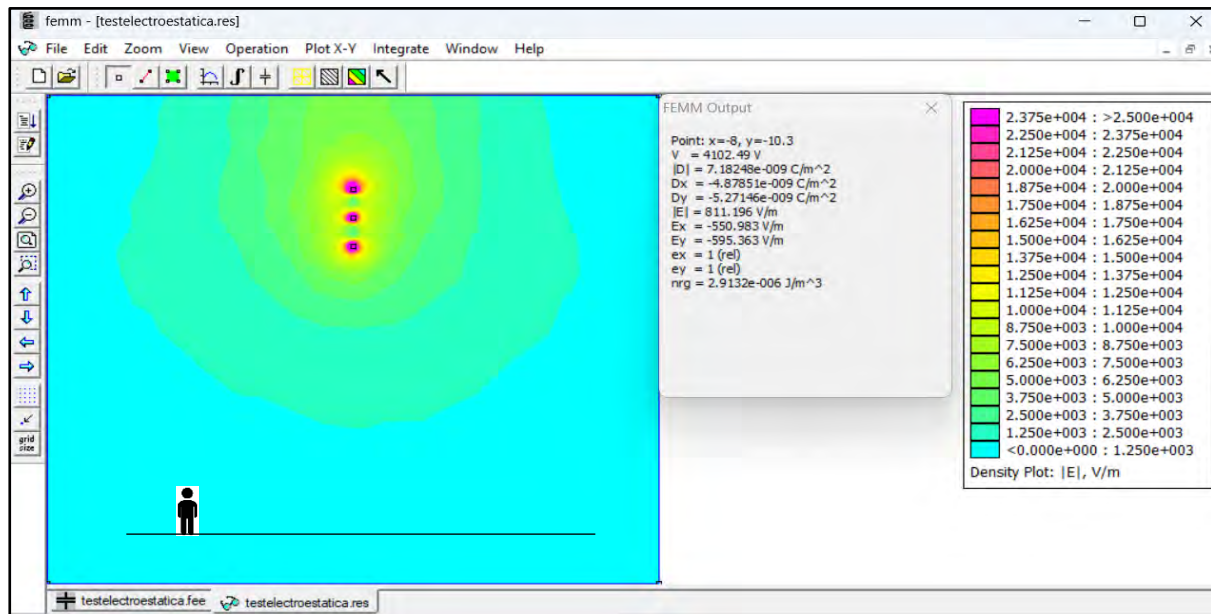
Distribución del campo eléctrico configuración vertical a 8 metros hacia el lado derecho del eje.



Fuente: Elaboración propia con programación en FEMM

Figura 29

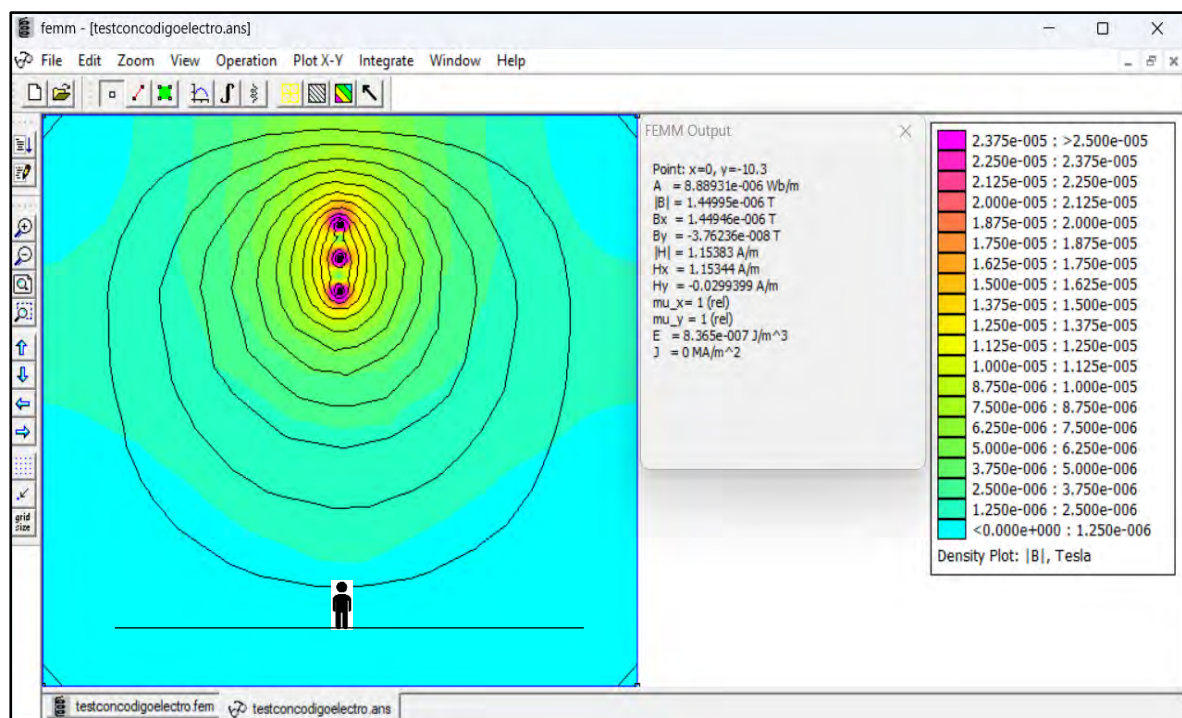
Distribución del campo eléctrico configuración vertical a 8 metros hacia el lado izquierdo del eje.



Fuente: Elaboración propia con programación en FEMM

Figura 30

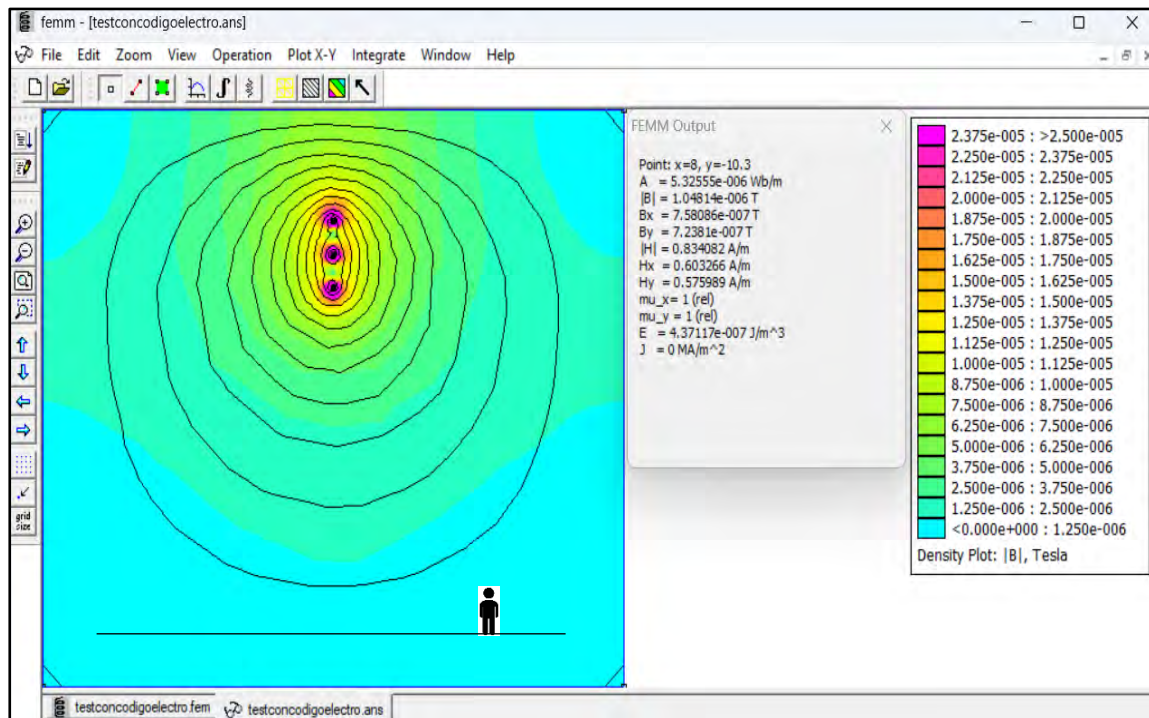
Cálculo de campo magnético configuración vertical debajo de la línea de transmisión



Fuente: Elaboración propia con programación en FEMM

Figura 31

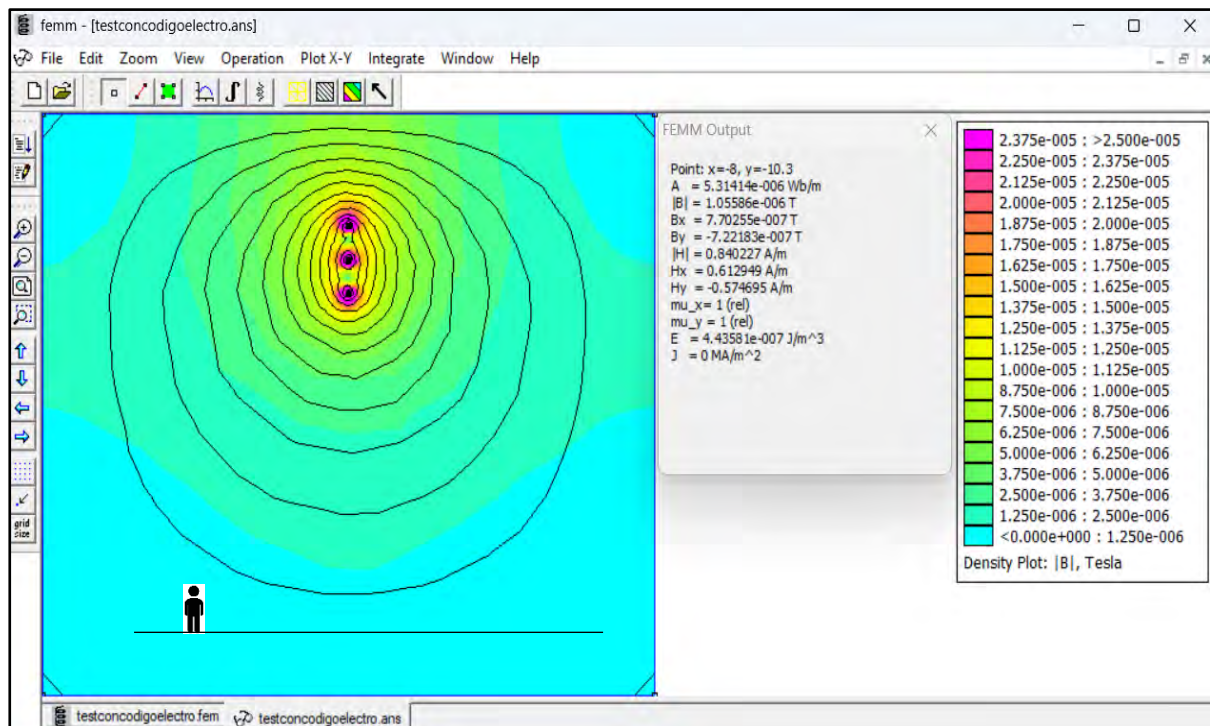
Cálculo de campo magnético configuración vertical a 8 hacia el lado derecho del eje.



Fuente: Elaboración propia con programación en FEMM

Figura 32

Cálculo de campo magnético configuración vertical a 8 metros hacia el lado izquierdo del eje.



Fuente: Elaboración propia con programación en FEMM

3.7.1.2. Configuración Horizontal

La gráfica presenta la distribución del campo eléctrico y magnético alrededor de los conductores de la línea de transmisión con una configuración horizontal, se observan similitudes en la forma de dispersión del campo, pero existen diferencias importantes en la magnitud de la intensidad. Los resultados obtenidos en condiciones de máxima demanda se resumen en la **tabla 19**.

Tabla 19

Resumen de mediciones en configuración horizontal en condiciones de máxima demanda

Configuración Horizontal		
Posición	Campo eléctrico (V/m)	Campo magnético (μT)
Directamente bajo el conductor a un metro del suelo	830.918	1.02941
A 08 m de distancia lateral derecho	609.584	0.560388
A 08 m de distancia lateral izquierdo	641.359	0.551891

Fuente: Elaboración propia

Figura 33

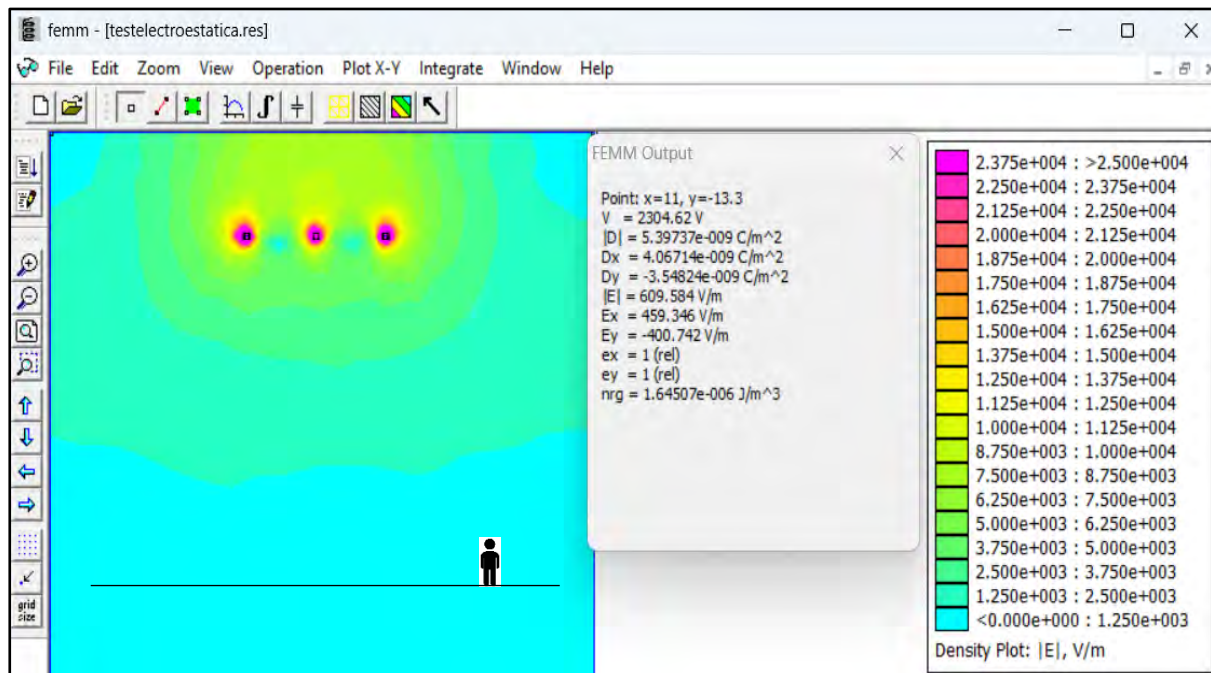
Distribución del campo eléctrico configuración horizontal debajo de la línea de transmisión.



Fuente: Elaboración propia con programación en FEMM

Figura 34

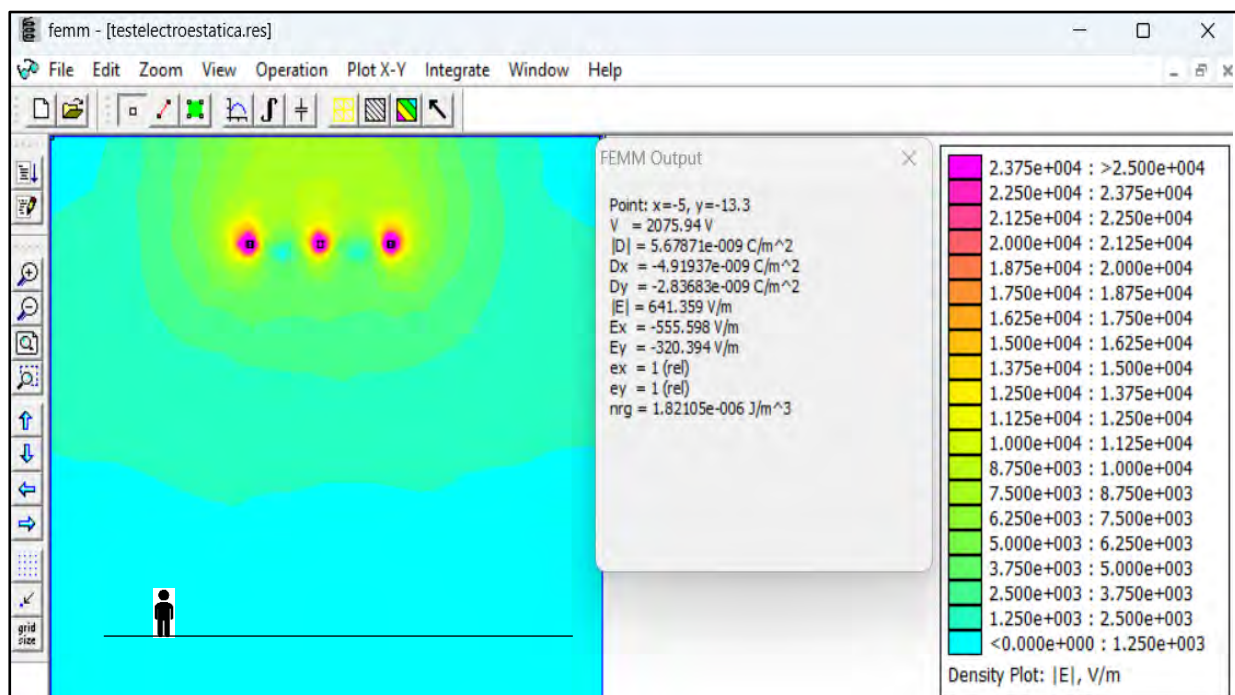
Cálculo de campo eléctrico configuración horizontal a 8 metros eje del derecho.



Fuente: Elaboración propia con programación en FEMM

Figura 35

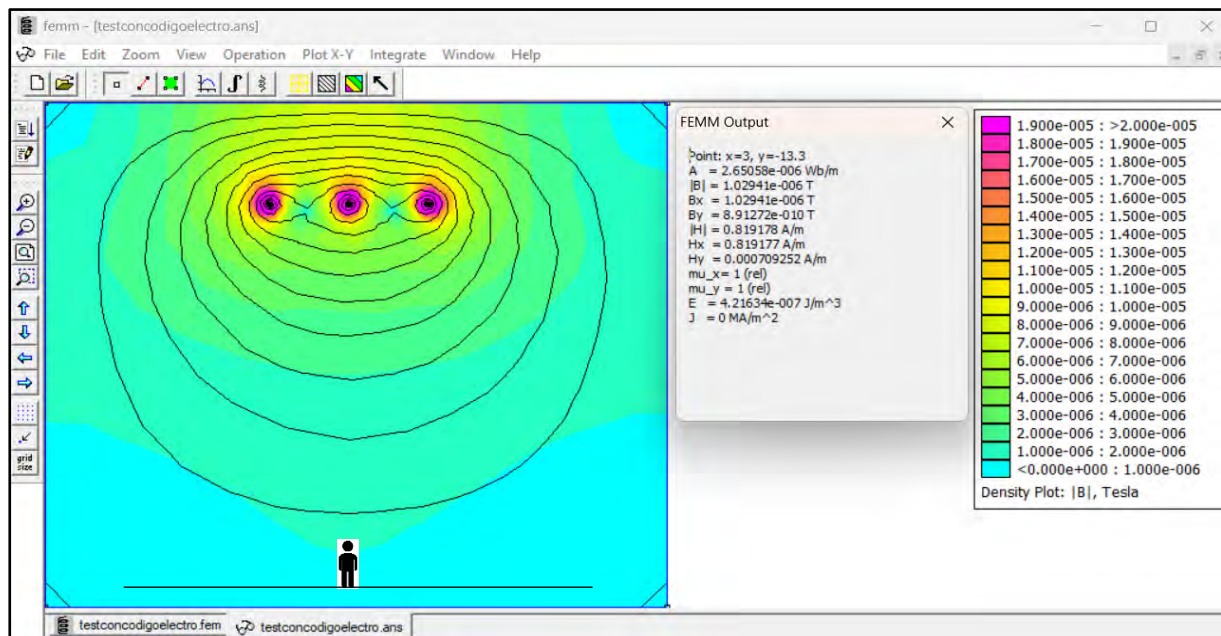
Cálculo de campo eléctrico configuración horizontal a 8 metros eje del izquierdo.



Fuente: Elaboración propia con programación en FEMM

Figura 36

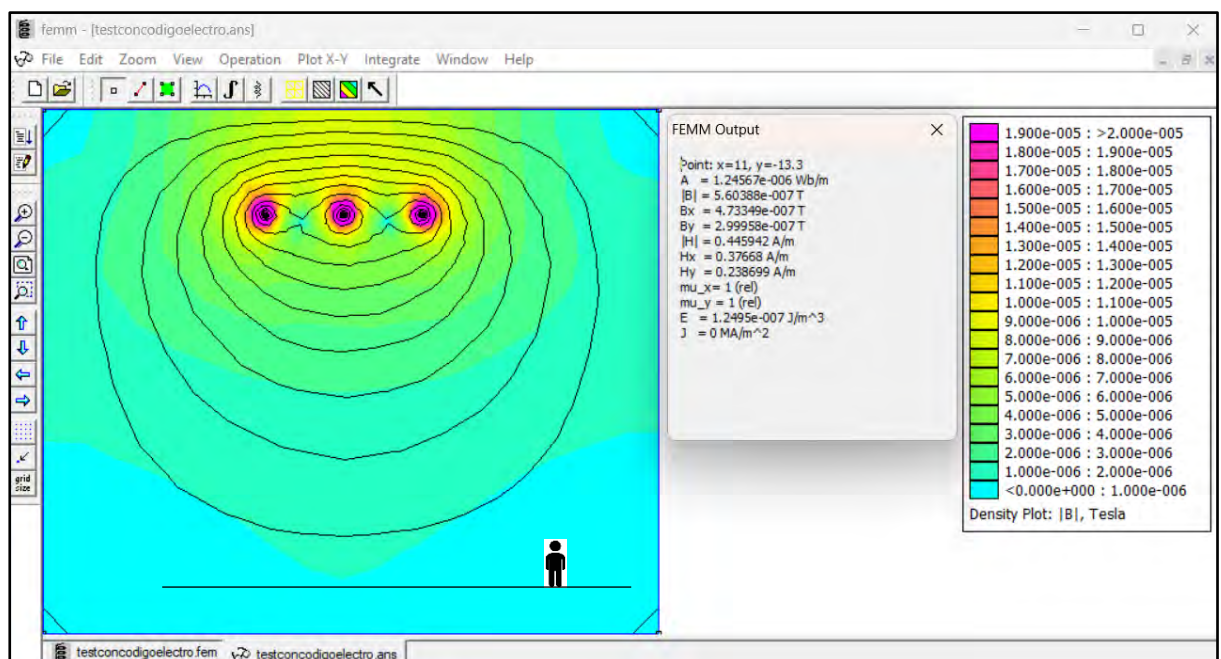
Distribución del campo magnético configuración horizontal debajo de la línea de transmisión.



Fuente: Elaboración propia con programación en FEMM

Figura 37

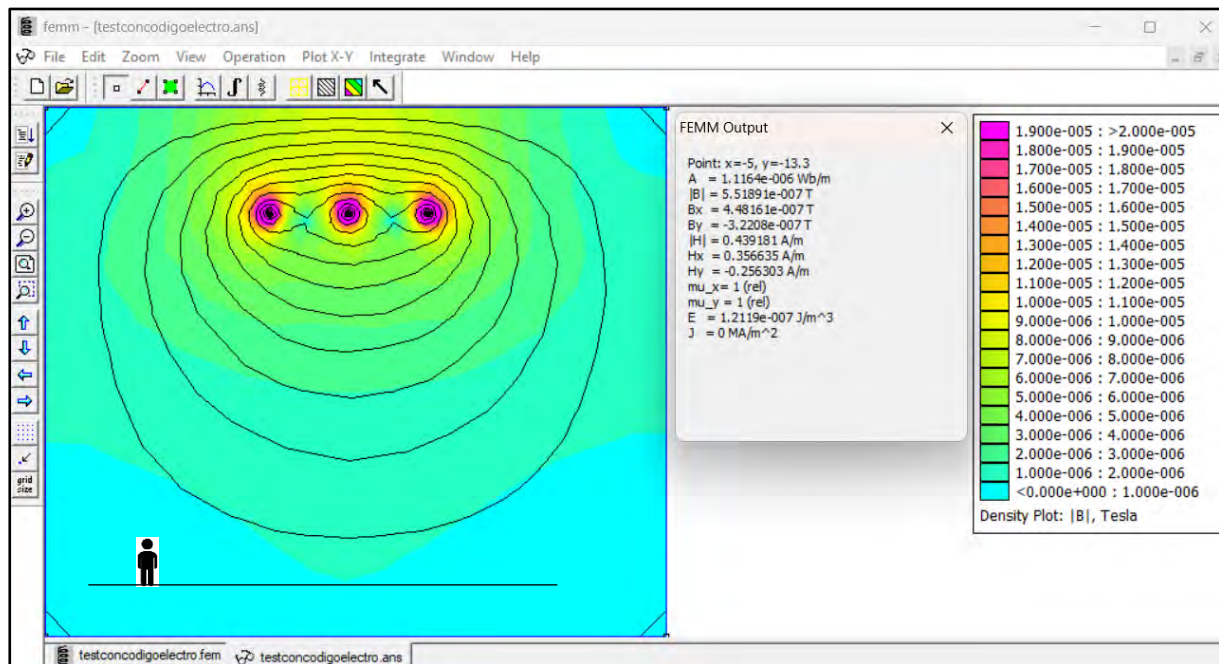
Distribución del campo magnético configuración horizontal a 8 metros del eje derecho.



Fuente: Elaboración propia con programación en FEMM

Figura 38

Distribución del campo magnético configuración horizontal a 8 metros del eje izquierdo.



Fuente: Elaboración propia con programación en FEMM

3.7.2. Simulación de la radiación electromagnética en mínima demanda

3.7.2.1. Configuración Vertical

De forma complementaria, también se realizaron simulaciones bajo condiciones de mínima demanda cuyos valores se resumen en la tabla 20, donde se observa un patrón de distribución semejante, pero con intensidades menores debido a la reducción de carga transportada por la línea.

Tabla 20

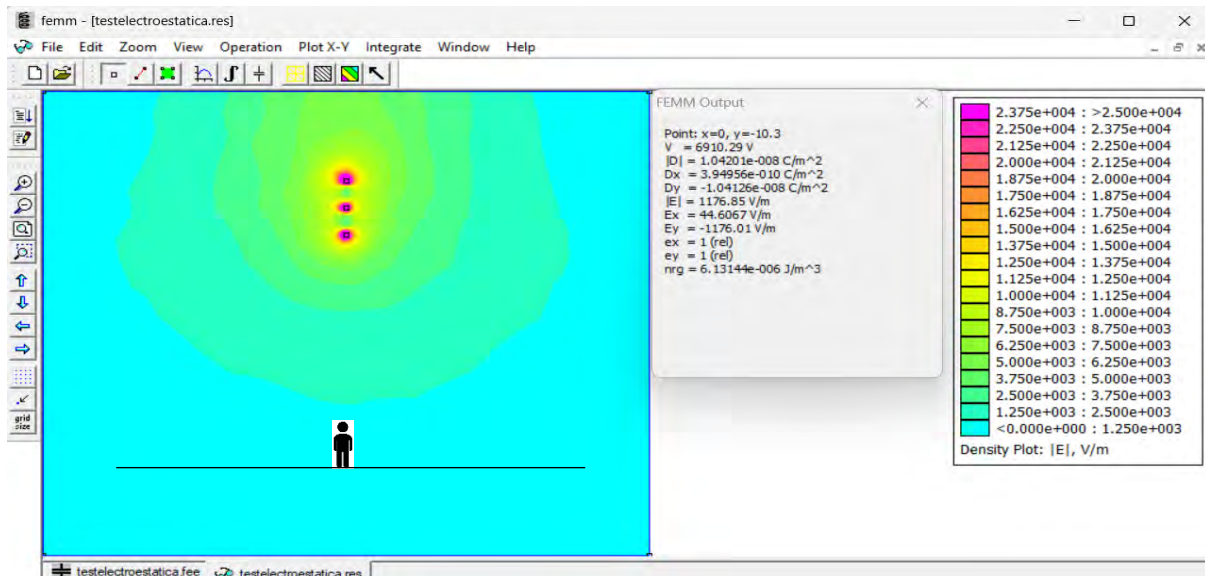
Resumen de mediciones configuración vertical en condiciones de mínima demanda.

Posición	Campo Eléctrico a 1 m del suelo (V/m)	Campo Magnético a 1 m del suelo (μ T)
Debajo de la línea	1176.85	0.22105
A 8 m del eje derecho	811.913	0.15979
A 8 m del eje izquierdo	799.697	0.16096

Fuente: Elaboración propia

Figura 39

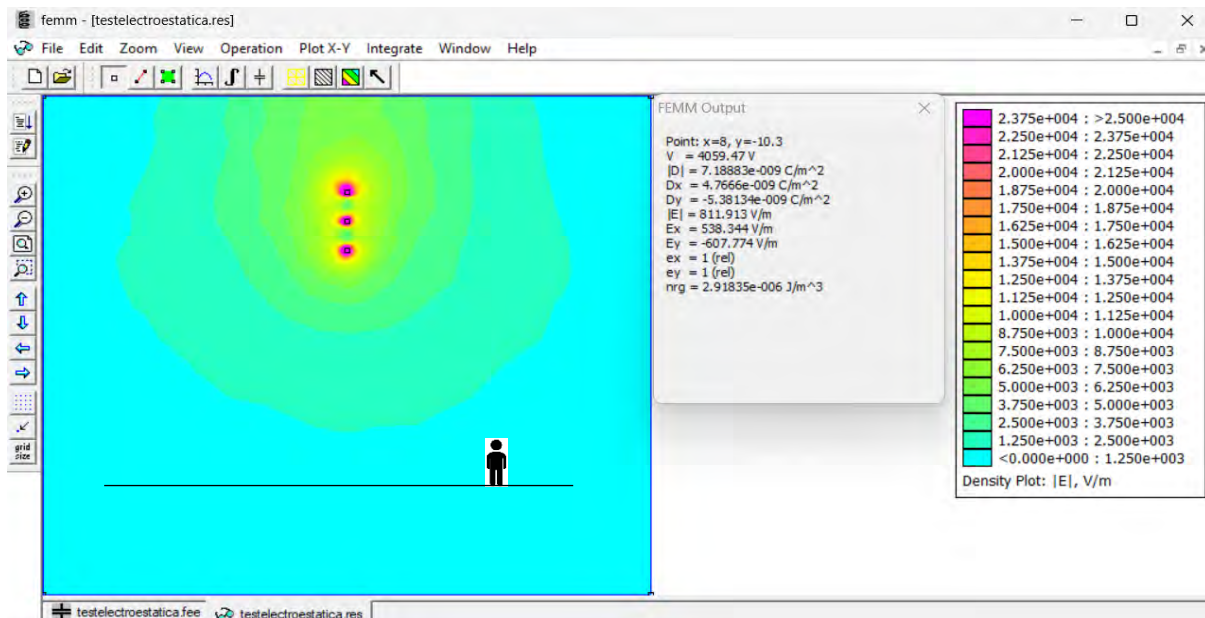
Distribución del campo eléctrico configuración vertical debajo de la línea de transmisión



Fuente: Elaboración propia con programación en FEMM

Figura 40

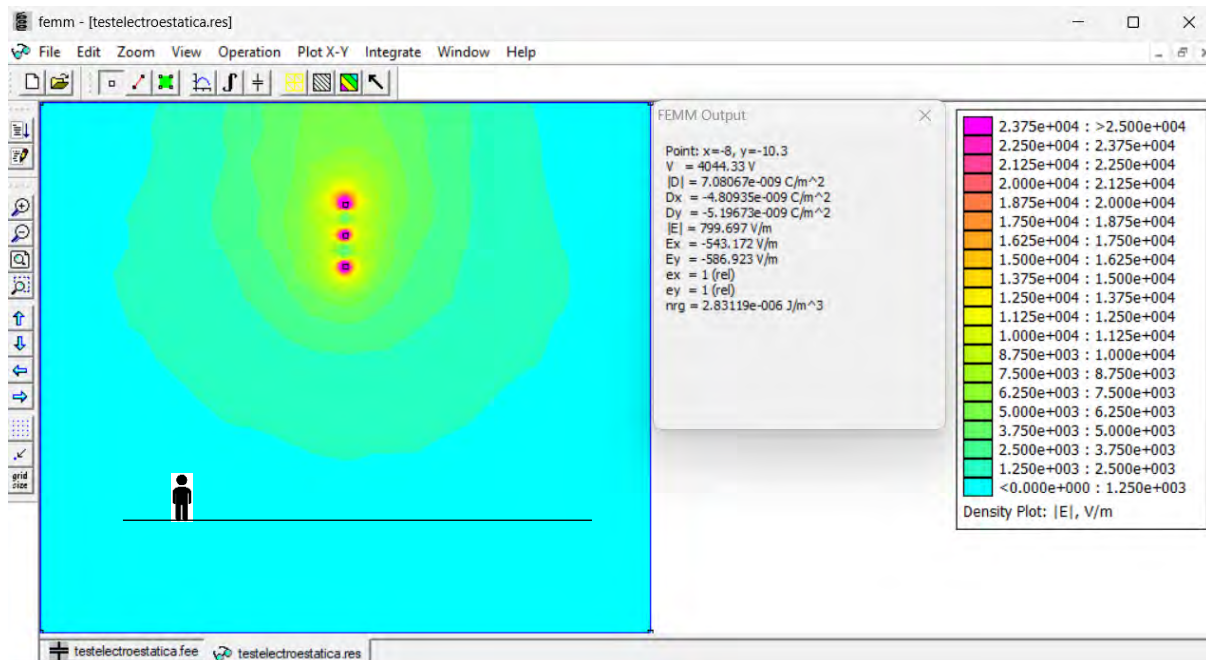
Distribución del campo eléctrico configuración vertical a 8 metros hacia el lado derecho del eje.



Fuente: Elaboración propia con programación en FEMM

Figura 41

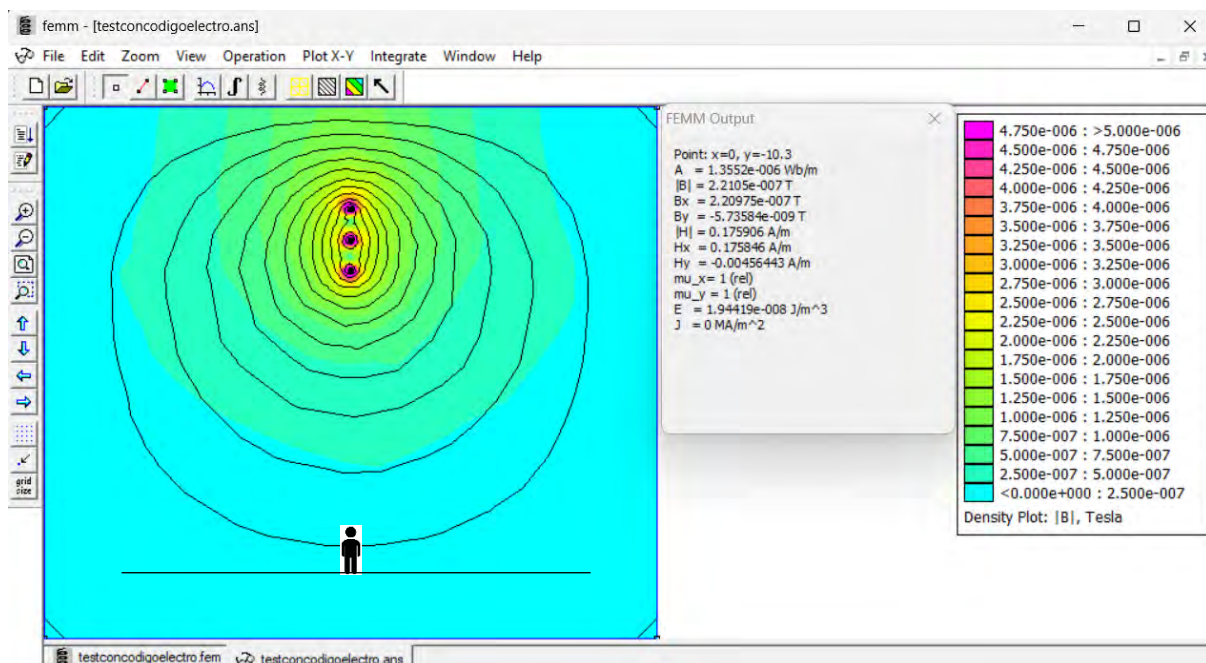
Distribución del campo eléctrico configuración vertical a 8 metros hacia el lado izquierdo del eje.



Fuente: Elaboración propia con programación en FEMM

Figura 42

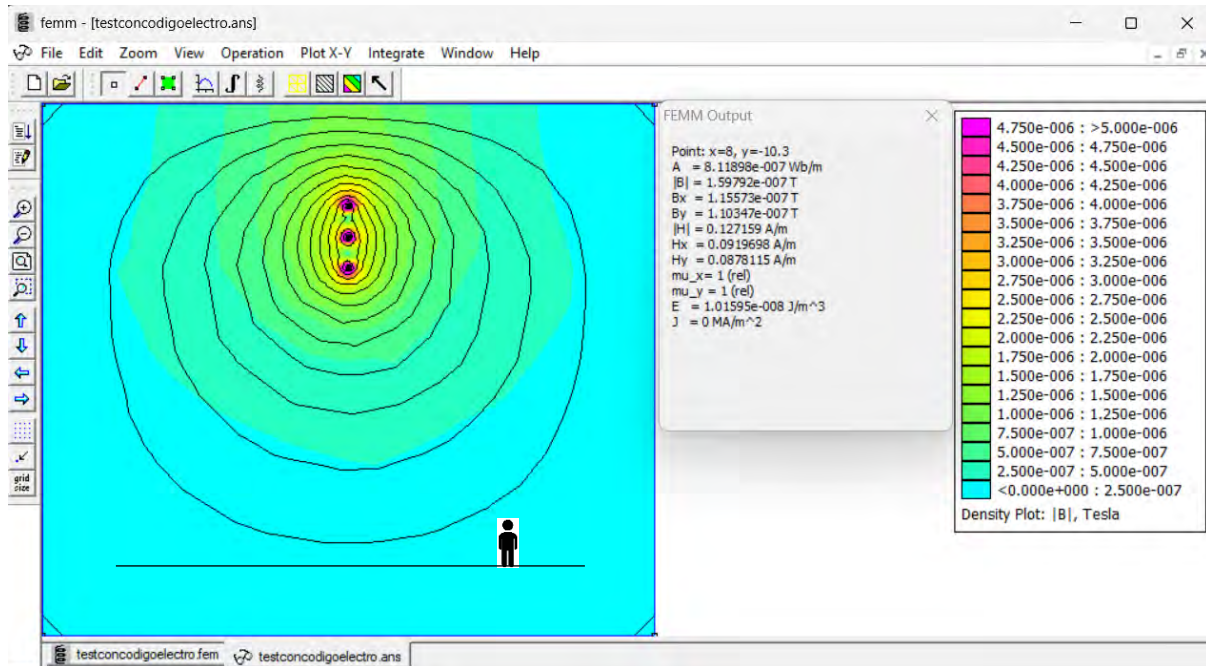
Cálculo de campo magnético configuración vertical debajo de la línea de transmisión



Fuente: Elaboración propia con programación en FEMM

Figura 43

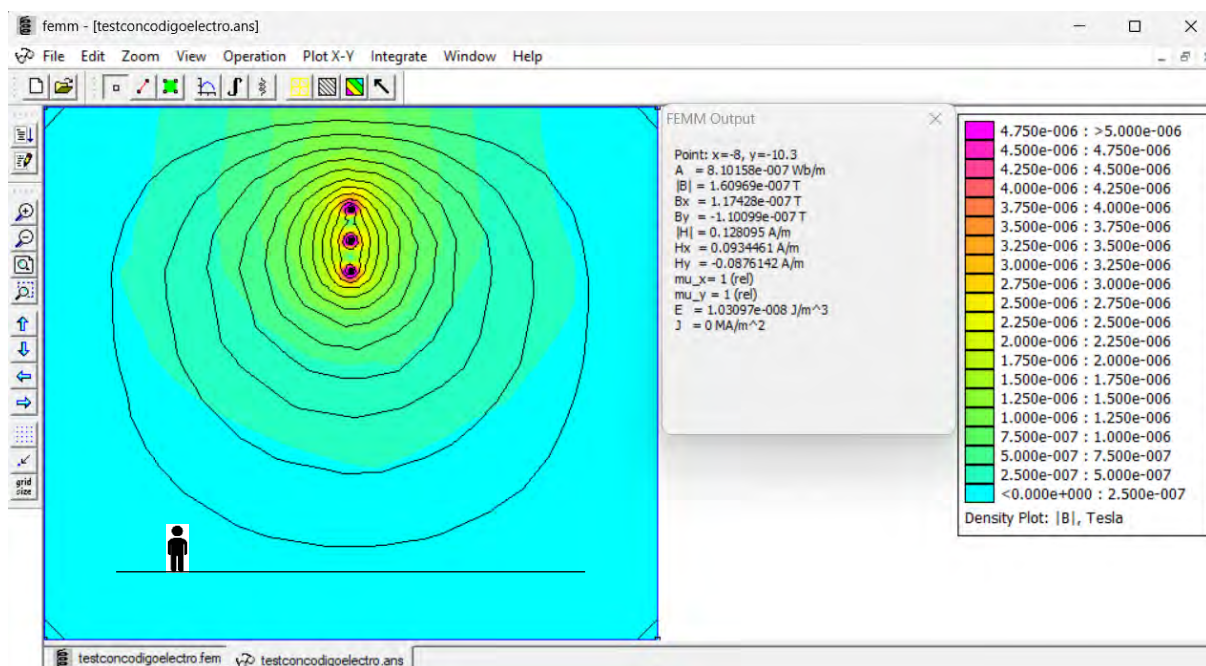
Cálculo de campo magnético configuración vertical a 8 hacia el lado derecho del eje.



Fuente: Elaboración propia con programación en FEMM

Figura 44

Cálculo de campo magnético configuración vertical a 8 metros hacia el lado izquierdo del eje.



Fuente: Elaboración propia con programación en FEMM

3.7.2.2. Configuración Horizontal

Así mismo, en las simulaciones realizadas en condiciones de mínima demanda, se observó la misma tendencia en el patrón de dispersión, aunque con valores más bajos. Estos resultados se resumen en la **tabla 21**.

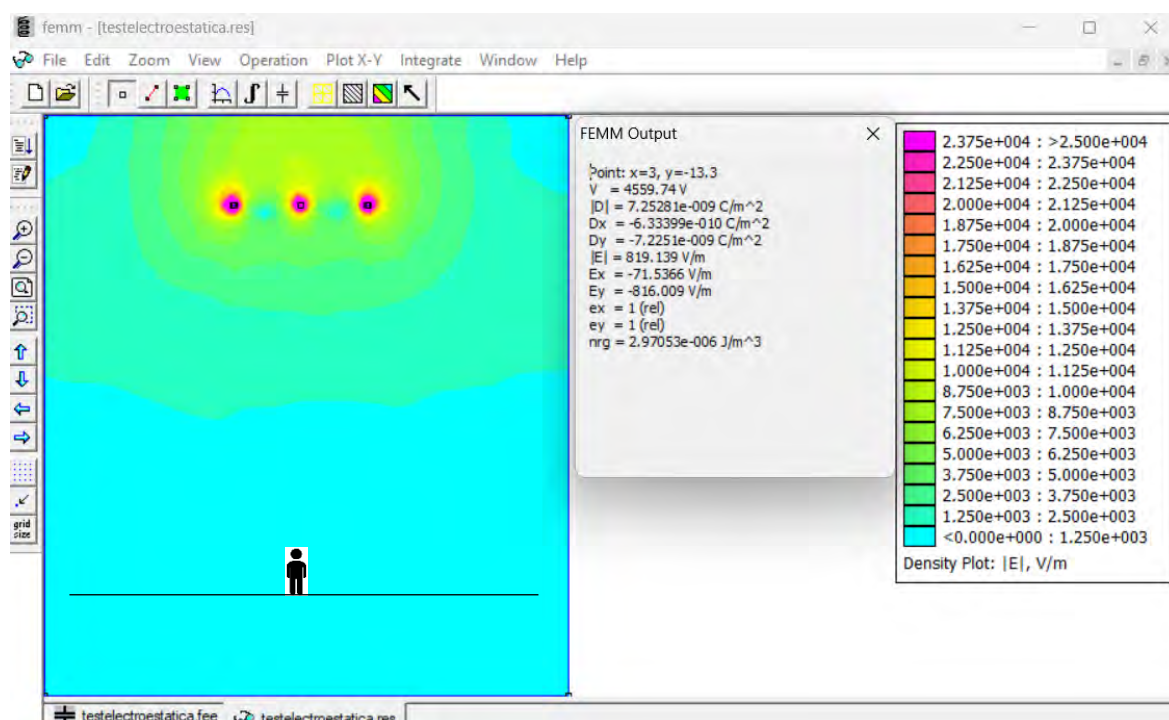
Tabla 21 Resumen de mediciones configuración vertical en condiciones de mínima demanda.

Posición	Campo Eléctrico a 1 m del suelo (V/m)	Campo Magnético a 1 m del suelo (μT)
Debajo de la línea	819.139	0.156937
A 8 m del eje derecho	600.943	0.085432
A 8 m del eje izquierdo	632.267	0.084137

Fuente: Elaboración propia

Figura 45

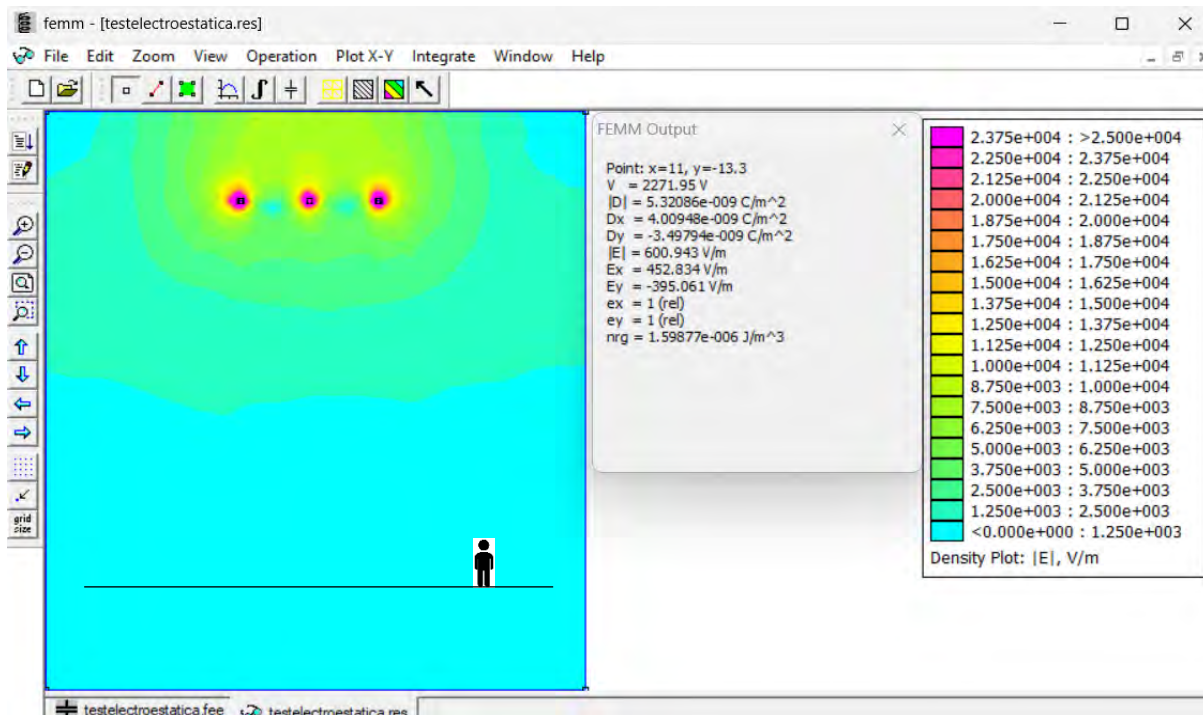
Distribución del campo eléctrico configuración horizontal debajo de la línea de transmisión.



Fuente: Elaboración propia con programación en FEMM

Figura 46

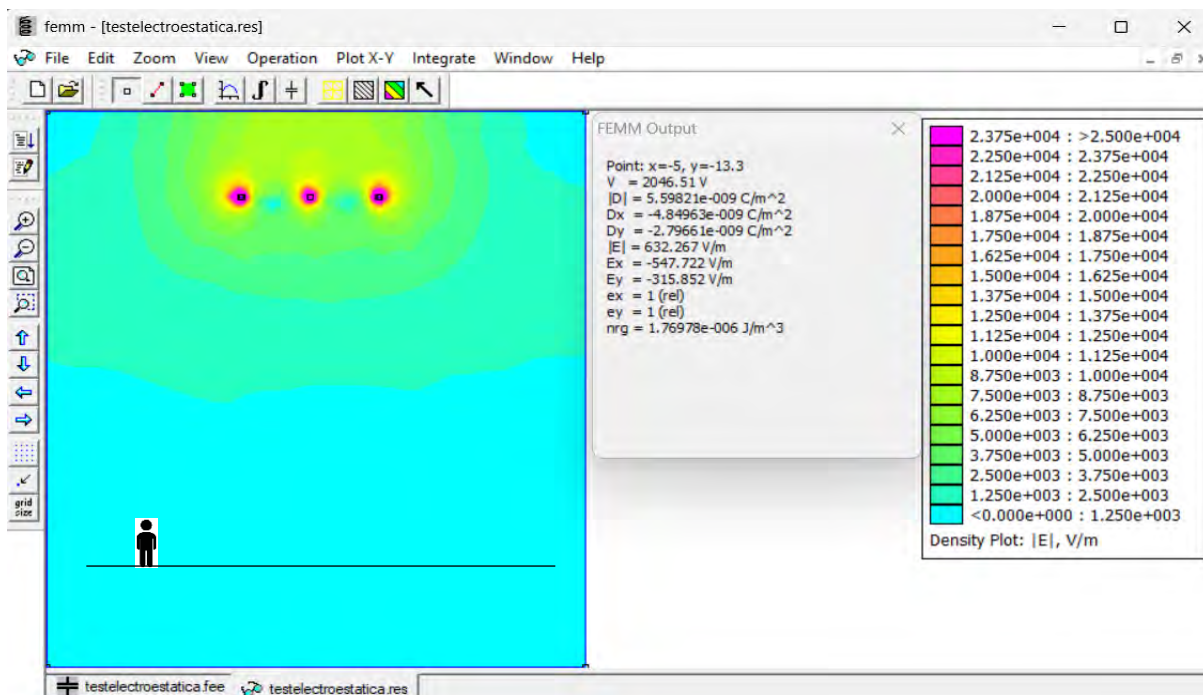
Cálculo de campo eléctrico configuración horizontal a 8 metros eje del derecho.



Fuente: Elaboración propia con programación en FEMM

Figura 47

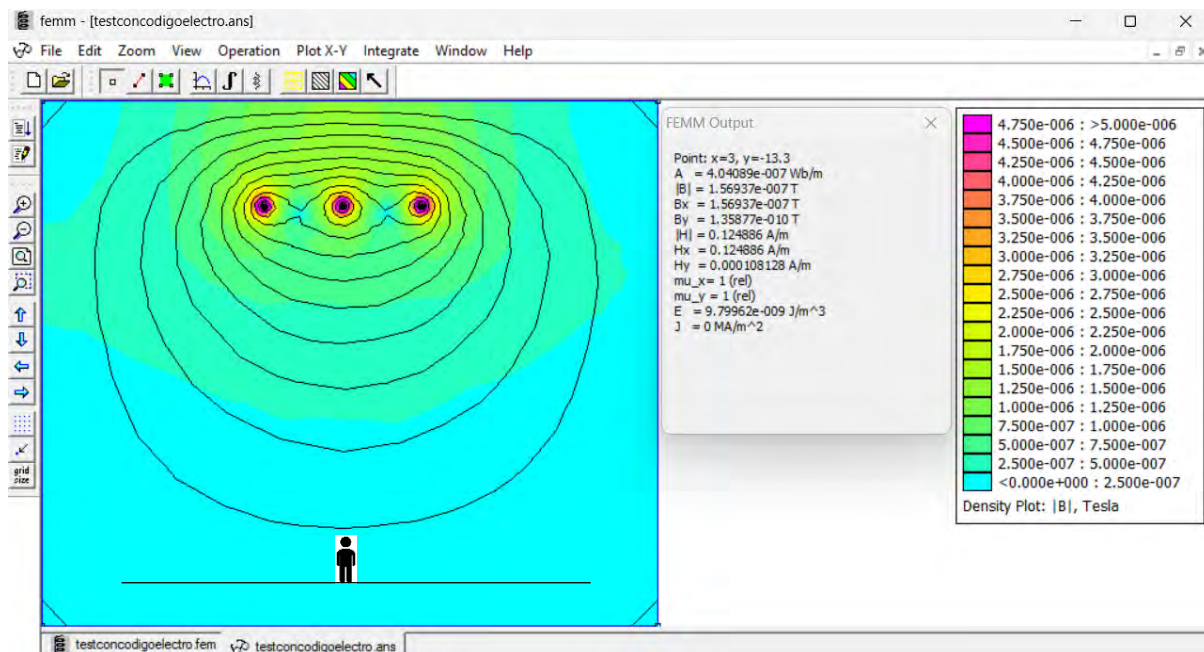
Cálculo de campo eléctrico configuración horizontal a 8 metros eje del izquierdo.



Fuente: Elaboración propia con programación en FEMM

Figura 48

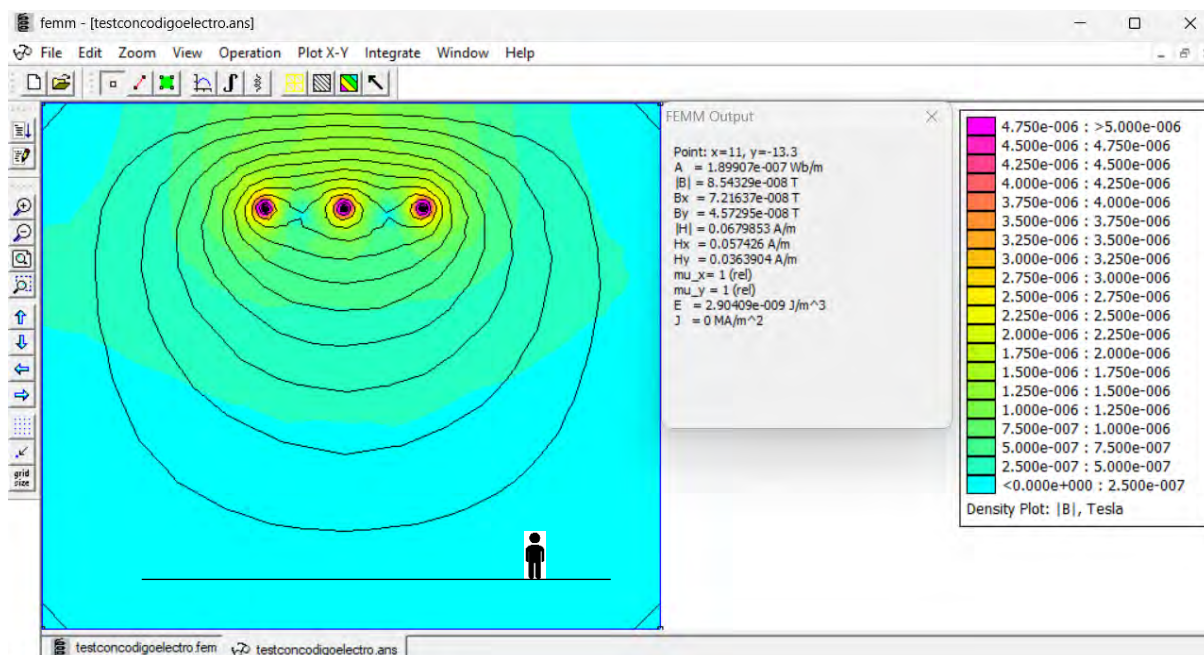
Distribución del campo magnético configuración horizontal debajo de la línea de transmisión.



Fuente: Elaboración propia con programación en FEMM

Figura 49

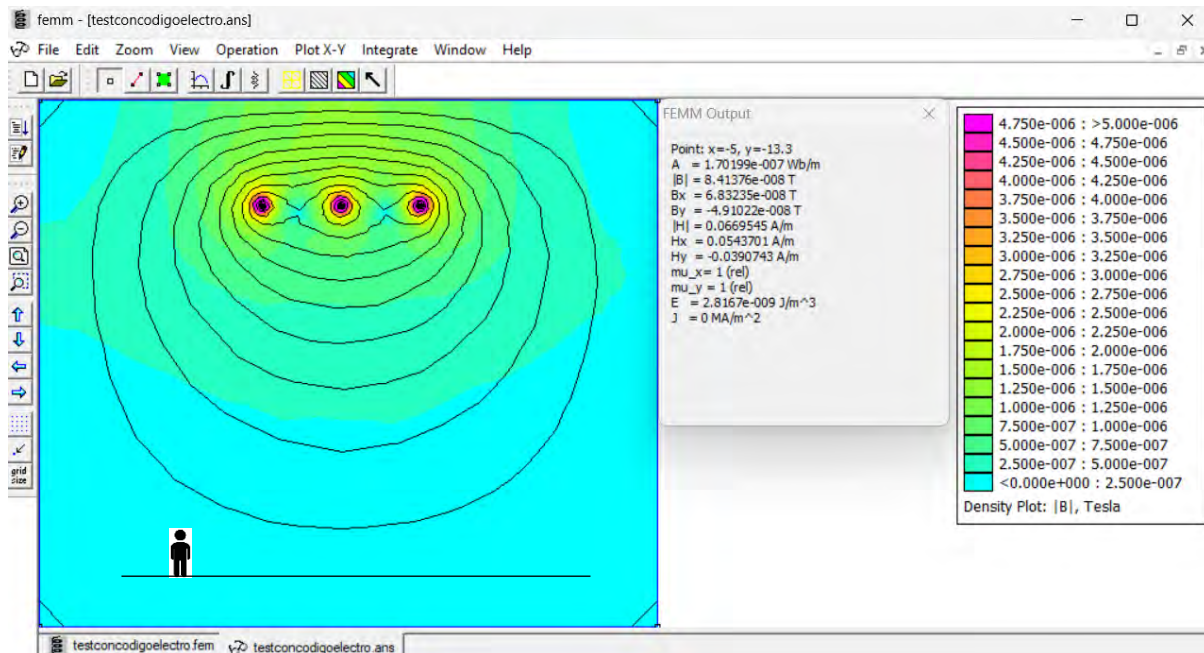
Distribución del campo magnético configuración horizontal a 8 metros del eje derecho.



Fuente: Elaboración propia con programación en FEMM

Figura 50

Distribución del campo magnético configuración horizontal a 8 metros del eje izquierdo.



Fuente: Elaboración propia con programación en FEMM

CAPÍTULO IV : ANALISIS DE RESULTADOS DE SIMULACIONES

4.1. Introducción

En este capítulo, se presentan los resultados obtenidos a partir de las simulaciones realizadas con el software FEMM para la línea de transmisión L-6001. El objetivo principal de estas simulaciones es analizar la distribución de los campos eléctricos y magnéticos generados por la línea de transmisión, utilizando el Método de Elementos Finitos (FEM). Este análisis es crucial para comprender cómo se comportan estos campos en el entorno circundante y para evaluar su impacto en términos de seguridad y cumplimiento de normativas nacionales e internacionales.

Se analizaron las dos configuraciones geométricas de los conductores, configuración vertical y configuración horizontal. Además, los resultados se comparan con los límites máximos permisibles establecidos en el Código Nacional de Electricidad y la ICNIRP.

4.2. Resultados de las Simulaciones con FEMM

4.2.1. Configuraciones Geométricas simuladas

Para analizar la distribución de los campos eléctrico y magnético en la línea de transmisión L-6001, se plantearon dos configuraciones geométricas de los conductores: vertical y horizontal. Estas disposiciones fueron seleccionadas porque representan los principales arreglos estructurales presentes en el tramo de estudio, lo que permite realizar una comparación representativa de su comportamiento electromagnético.

En la configuración vertical, los tres conductores de fase se disponen en un mismo eje perpendicular al suelo, con una separación de 1,5 m entre cada fase. Este tipo de arreglo se emplea en estructuras compactas, con un menor ancho de franja de servidumbre, aunque

concentra mayores niveles de campo eléctrico en las inmediaciones del poste, particularmente en la zona inferior cercana a la base de la estructura.

En la configuración horizontal, los conductores se ubican en paralelo al suelo, separados 3 m entre fases. Esta disposición facilita la dispersión lateral de los campos, lo que reduce la densidad directamente debajo de la línea, aunque incrementa el área de influencia hacia los extremos de la servidumbre.

Las **Figuras 22, 23, 24 y 25** correspondientes, ilustran los esquemas de las configuraciones analizadas, mostrando la disposición espacial de los conductores y el dominio de simulación definido. Estas representaciones constituyen la base para evaluar numéricamente el comportamiento de los campos eléctricos y magnéticos bajo condiciones de máxima demanda.

4.2.2. Distribución del Campo Eléctrico

El análisis de la distribución del campo eléctrico en la línea de transmisión L-6001 permitió identificar su comportamiento en relación con la geometría de los conductores y la distancia respecto a la línea. Los resultados, expresados en voltios por metro (V/m), ofrecen una referencia cuantitativa de la intensidad del campo en el entorno inmediato a la infraestructura.

En la configuración vertical, los valores máximos obtenidos fueron de 1193.77 V/m directamente bajo el conductor a 1 metro del suelo, disminuyendo a 823.59 V/m a 8 m en el eje derecho y a 811.19 V/m en el eje izquierdo (**Tabla 18**). Esta tendencia confirma que el campo eléctrico alcanzó sus máximos valores directamente debajo de los conductores. Esto se debe a que los elementos se disponen de manera perpendicular al suelo, concentrando las líneas de campo en el eje central de la estructura. A medida que aumenta la distancia lateral, la magnitud del campo disminuye progresivamente, hasta alcanzar niveles bajos en los límites de la franja de servidumbre.

En la configuración horizontal, el valor máximo fue menor, con 830.91 V/m bajo el conductor, reduciéndose a 609.58 V/m y 641.36 V/m a 8 m de distancia hacia el eje derecho e izquierdo, respectivamente (**Tabla 19**). El campo eléctrico mostró una distribución más amplia hacia los costados. La separación de 3 m entre fases favoreció la dispersión de las líneas de campo, lo que redujo la intensidad justo debajo de los conductores, pero amplió la zona de influencia en dirección a los ejes laterales. Esto implica que, si bien los valores máximos fueron inferiores a los registrados en la disposición vertical, el área afectada fue mayor.

En las **Figuras 27 y 33**, muestran los mapas de distribución del campo eléctrico en ambas configuraciones, representados con gradientes de color. Los tonos cálidos indican zonas de mayor intensidad, mientras que los tonos fríos corresponden a regiones de menor magnitud. Esta representación facilita la interpretación espacial del fenómeno y permite identificar sectores críticos donde la exposición podría resultar significativa.

En todos los casos, al compararse con los límites establecidos por la ICNIRP (2020) y el Código Nacional de Electricidad (2011), que establecen un máximo de 5 kV/m para el público en general y 10 kV/m para trabajadores, se comprobó que los valores obtenidos se mantienen dentro de los márgenes permitidos.

4.2.3. *Distribución del Campo Magnético*

La simulación de la línea de transmisión L-6001 permitió analizar la distribución del campo magnético en dos configuraciones geométricas: vertical y horizontal, bajo condiciones de máxima demanda. Estas variables fueron incorporados al modelo utilizando el software FEMM, basado en el método de elementos finitos, el cual resuelve las ecuaciones de Maxwell que relacionan la circulación de corriente con la generación de campo magnético.

Los resultados evidencian que la intensidad del campo magnético es mayor en la proximidad de los conductores, reduciéndose gradualmente conforme aumenta la distancia, en

concordancia con la Ley de Ampere, que establece la proporcionalidad directa entre la corriente y el campo generado, e inversa respecto a la distancia al conductor.

En la configuración vertical, se alcanzó un valor máximo de 1,449 μT bajo la línea reduciéndose a 1.048 μT y 1.055 μT a 8 m del eje derecho e izquierdo, respectivamente (**Tabla 18**). Esto refleja que la cercanía al punto de unión de fases produce una mayor densidad de flujo magnético. Sin embargo, a medida que se aleja lateralmente, la magnitud del campo decrece con rapidez, lo que indica que esta configuración concentra la mayor intensidad en el eje central de la estructura.

En la configuración horizontal, en cambio, la distribución fue más uniforme sobre el plano lateral. Aunque los picos alcanzaron valores similares, cercanos a 1,02941 μT bajo el conductor y reducciones a 0.560 μT y 0.551 μT a 8 m en los laterales (**Tabla 19**), el campo se expandió de forma más amplia hacia las zonas externas de la franja de servidumbre, lo que demuestra una mayor cobertura espacial respecto a la disposición vertical.

La representación gráfica de los resultados (**Figuras 30 y 36**), empleó gradiente de colores, donde los tonos intensos (rosado) corresponden a mayores valores de campo, mientras que los tonos claros (celeste) indican menores intensidades. Esta herramienta permitió identificar con precisión las áreas de mayor exposición potencial para la población o infraestructura adyacente.

Finalmente, en ambas configuraciones, los niveles obtenidos se encuentran por debajo de los límites establecidos por la ICNIRP (2020) y el Código Nacional de Electricidad (2011), garantizando condiciones de seguridad frente a la exposición. No obstante, se evidencia que la geometría de la línea influye en el área de influencia del campo magnético, lo cual representa un factor determinante en el diseño y selección de estructuras para nuevas líneas de transmisión.

4.2.4. Comparación con las normativas

Los resultados obtenidos en las simulaciones de la línea de transmisión L-6001, tanto en la disposición vertical como en la horizontal, fueron contrastados con los límites de exposición establecidos por la International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP, 2020), y el Código Nacional de Electricidad – Suministro 2011 (CNE, 2011).

En la configuración vertical, bajo el eje central de la línea, se registró un campo eléctrico máximo de 1193.77 V/m y un campo magnético de 1.449 μ T. En la configuración horizontal, los valores fueron de 830.918 V/m para el campo eléctrico y 1.029 μ T para el campo magnético.

Al compararse con las normativas, se observa que los valores simulados están muy por debajo de los límites definidos por la ICNIRP (2020), que establecen un máximo de 5 kV/m para el campo eléctrico y 100 μ T para el campo magnético en condiciones de exposición del público en general. De igual manera, cumplen con las disposiciones del CNE (2011), y con las exigencias relacionadas con franjas de servidumbre y distancias de seguridad.

En síntesis, los campos eléctrico y magnético generados por la línea de transmisión L-6001, se mantienen dentro de los márgenes de seguridad establecidos por la normativa internacional y nacional. Sin embargo, la proximidad de viviendas y edificaciones a la franja de servidumbre refuerza la necesidad de un control estricto en dichas zonas, a fin de prevenir posibles riesgos en caso de variaciones operativas o ampliaciones futuras de la infraestructura.

Tabla 22

Comparación entre valores medidos en campo, simulados y límites normativos internacionales y nacionales del campo eléctrico.

Configuración	E medido (V/m)	E simulado (V/m)	Error relativo (%)	ICNIRP Poblacional (KV/m)	ICNIRP Ocupacional (KV/m)	CNE Poblacional (KV/m)	CNE Ocupacional (KV/m)
Vertical - Debajo de la línea	1233	1193.77	3.182	5	10	4.2	8.3
Vertical - 8 m eje derecho	779	823.588	5.724	5	10	4.2	8.3
Vertical - 8 m eje izquierdo	785	811.196	3.337	5	10	4.2	8.3
Horizontal - Debajo de la línea	783	830.918	6.12	5	10	4.2	8.3
Horizontal - 8 m eje derecho	586	609.584	4.025	5	10	4.2	8.3
Horizontal - 8 m eje izquierdo	611	641.359	4.969	5	10	4.2	8.3

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados medidos en campo (2024), simulaciones FEMM

Tabla 23

Comparación entre valores medidos en campo, simulados y límites normativos internacionales y nacionales del campo magnético.

Configuración	B medido (μT)	B simulado (μT)	Error relativo (%)	ICNIRP Poblacional (μT)	ICNIRP Ocupacional (μT)	CNE Poblacional (μT)	CNE Ocupacional (μT)
Vertical - Debajo de la línea	1.44	1.449	0.625	100	200	83.3	416.7
Vertical - 8 m eje derecho	1.1	1.048	4.727	100	200	83.3	416.7
Vertical - 8 m eje izquierdo	1.04	1.055	1.442	100	200	83.3	416.7
Horizontal - Debajo de la línea	1.07	1.029	3.832	100	200	83.3	416.7
Horizontal - 8 m eje derecho	0.58	0.56	3.448	100	200	83.3	416.7
Horizontal - 8 m eje izquierdo	0.56	0.551	1.607	100	200	83.3	416.7

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados medidos en campo (2024), simulaciones FEMM

La comparación punto a punto entre simulaciones y mediciones indica un margen de error promedio absoluto de 4.56 % para el campo eléctrico y 2.61 % para el campo magnético (promedio global de 3.59 %). Estos valores confirman la buena concordancia entre el modelo numérico implementado en FEMM y las mediciones en campo.

4.3. Validación con mediciones en Campo

4.3.1. Descripción de las Mediciones

Las mediciones de los campos eléctricos y magnéticos se llevaron a cabo con el propósito de validar los resultados obtenidos mediante el modelo numérico desarrollado en FEMM. Estas pruebas de campo se realizaron en la línea de transmisión L-6001, Combapata - Sicuani, seleccionando estructuras representativas que reflejaran tanto condiciones geométricas particulares como sectores con cercanía a zonas habitadas.

El procedimiento de medición se ejecutó utilizando un medidor de campo eléctrico y magnético (BENETECH modelo GM3120 y LUTRON modelo EMF-827), el cual permitió registrar valores de intensidad de campo eléctrico en voltios por metro (V/m) y de campo magnético en micro teslas (μT). Para asegurar la consistencia de los datos, las lecturas se efectuaron en distintos puntos de referencia: debajo de la línea de transmisión, a 8 metros hacia el eje derecho y a 8 metros hacia el eje izquierdo, además de mediciones intermedias en medio vano. Esta metodología permitió caracterizar la atenuación de los campos en función de la distancia al eje de la línea.

Las mediciones se efectuaron en horario diurno (entre las 10:00 y 16:00 horas), garantizando condiciones de operación estables y representativas del régimen nominal de la línea. En cada punto se realizaron varias lecturas consecutivas, promediándose los valores para minimizar la influencia de fluctuaciones instantáneas.

Los resultados obtenidos evidencian una disminución progresiva del campo eléctrico conforme aumenta la distancia al eje central de la línea, mientras que el campo magnético

muestra una mayor sensibilidad a la variación de la corriente y a la geometría de los conductores, como se muestra en la **tabla16**. Esta información constituye la base para la comparación con los valores simulados, y resulta esencial para evaluar el cumplimiento de las normativas nacionales (CNE 2011) e internacionales (ICNIRP, 2020).

4.3.2. *Análisis Comparativo*

El análisis comparativo entre los valores simulados mediante FEMM, los obtenidos en campo y los límites normativos establecidos por la ICNIRP (2020) y el Código Nacional de Electricidad – CNE (2011), permite evaluar con mayor precisión el grado de cumplimiento de la línea de transmisión L-6001, en lo referente a exposición a campos electromagnéticos.

En el caso del campo eléctrico, las mediciones registradas directamente en las estructuras de la línea presentaron valores significativamente menores a los límites máximos establecidos en la normativa internacional y nacional. Los resultados de las simulaciones FEMM.

Respecto al campo magnético, los valores obtenidos en campo y en las simulaciones se mantuvieron muy por debajo de los límites normativos de la ICNIRP. Esto confirma que la línea de transmisión no representa un riesgo significativo de exposición a campos magnéticos en las zonas evaluadas, incluso en áreas residenciales próximas a la infraestructura.

La comparación evidencia que tanto las simulaciones como las mediciones reales cumplen de manera amplia con los estándares de seguridad, lo que permite concluir que la operación de la línea de transmisión L-6001, Combapata – Sicuani, no excede los niveles de exposición permitidos, garantizando la seguridad de la población y del personal que realiza labores en su entorno.

4.3.3. *Validación comparativa de resultados*

En función de los resultados obtenidos, se puede afirmar que el modelo desarrollado presenta validez, ya que los valores simulados de campo eléctrico y magnético coinciden

estrechamente con los valores medidos en campo. Las diferencias encontradas, según se aprecia en las **Tablas N.º 22 y 23**, no superan el 7 %, lo cual es aceptable en estudios de simulación electromagnética, como lo respaldan diversos trabajos científicos. Esta concordancia entre datos simulados y reales demuestra que el modelo representa fielmente el comportamiento físico del sistema bajo condiciones normales de operación.

En cuanto a la confiabilidad, se realizaron pruebas de sensibilidad variando parámetros de entrada (como altura de los conductores y disposición de fases) dentro de un rango razonable (± 10 %), observándose que los resultados no se ven afectados significativamente. Este comportamiento estable indica que el modelo responde de manera consistente ante pequeñas perturbaciones, lo cual confirma su confiabilidad como herramienta predictiva. Por tanto, los resultados obtenidos son tanto válidos como confiables, cumpliendo criterios esenciales de rigor metodológico en estudios de simulación y validación técnica.

Tabla 24

Comparación de resultados medidos de campo eléctrico

TIPO CONFIGURACION	LUGAR DE MEDICION	Campo E medido (V/m)	Campo E simulado (V/m)	Error Relativo (%)
CONFIGURACIÓN VERTICAL	Debajo de la línea	1233	1193,77	3,18%
	A 8 metros del eje derecho	779	823,588	5,72%
	A 8 metros del eje izquierdo	785	811,196	3,34%
CONFIGURACIÓN HORIZONTAL	Debajo de la línea	783	830,918	6,12%
	A 8 metros del eje derecho	586	609,584	4,02%
	A 8 metros del eje izquierdo	611	641,359	4,97%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 25 Comparación de resultados medidos de campo magnético

TIPO CONFIGURACION	LUGAR DE MEDICION	Campo B medido (V/m)	Campo B simulado (V/m)	Error Relativo (%)
CONFIGURACIÓN VERTICAL	Debajo de la línea	1,44	1,449	0,63%
	A 8 metros del eje derecho	1,1	1,048	4,73%
	A 8 metros del eje izquierdo	1,04	1,055	1,44%
CONFIGURACIÓN HORIZONTAL	Debajo de la línea	1,07	1,029	3,83%
	A 8 metros del eje derecho	0,58	0,56	3,45%
	A 8 metros del eje izquierdo	0,56	0,551	1,61%

Fuente: Elaboración propia

4.4. Discusión de Resultados

El análisis de los resultados obtenidos, tanto en las simulaciones realizadas con el software FEMM, como en las mediciones de campo, permite establecer una visión integral sobre el comportamiento de los campos eléctricos y magnéticos generados por la línea de transmisión.

En primer lugar, los valores de campo eléctrico simulados para las configuraciones vertical y horizontal muestran una disminución progresiva con la distancia respecto a los conductores. Esta tendencia es coherente con la teoría electromagnética, que establece que la intensidad del campo eléctrico disminuye a medida que se incrementa la separación respecto a la fuente de generación. Asimismo, las mediciones de campo corroboraron estos resultados, con diferencias menores al 7 %, lo que valida la fiabilidad del modelo numérico implementado.

En cuanto al campo magnético, se observó que su intensidad máxima se concentra en las inmediaciones de los conductores, reduciéndose gradualmente conforme se aumenta la distancia. Esta distribución es consistente con la Ley de Ampere y con estudios previos sobre líneas de alta tensión, en los cuales se demuestra que el campo magnético está directamente

relacionado con la magnitud de la corriente y la geometría de los conductores. Al igual que en el caso del campo eléctrico, los valores medidos en campo fueron coherentes con las simulaciones, confirmando la validez del enfoque metodológico empleado.

Al comparar los resultados con las normativas internacionales (ICNIRP, 2020) y nacionales (CNE, 2011), se determinó que tanto los niveles de campo eléctrico como los de campo magnético se encuentran muy por debajo de los límites de exposición permitidos, tanto para el público general como para exposición ocupacional. Esto implica que la operación de la línea de transmisión L-6001, no representa un riesgo significativo de exposición a radiación electromagnética para la población ni para los trabajadores que realizan labores en su entorno.

No obstante, el estudio también evidencia la importancia de la franja de servidumbre como medida de seguridad. La detección de viviendas ubicadas dentro de esta franja en algunos tramos de la línea constituye un factor de riesgo que debe ser considerado por las autoridades competentes. Si bien los niveles de campo medidos no superan los límites normativos, la permanencia continua en dichas áreas puede aumentar la exposición acumulada, lo que resalta la necesidad de reforzar el cumplimiento de las disposiciones legales vigentes.

En conjunto, los resultados de la simulación y las mediciones en campo confirman que el uso del Método de Elementos Finitos (MEF), constituye una herramienta confiable y precisa para el análisis de campos electromagnéticos en líneas de transmisión de alta tensión. Además, permiten sustentar la implementación de estrategias de mitigación y de control, garantizando tanto la seguridad de las comunidades cercanas como la sostenibilidad del sistema eléctrico.

4.5. Evaluación estratégica de mitigación

Los resultados obtenidos en las simulaciones y mediciones realizadas en la línea de transmisión L-6001, evidencian la necesidad de implementar medidas de mitigación orientadas a garantizar el cumplimiento de los límites de exposición establecidos por la ICNIRP (2020) y el Código Nacional de Electricidad (2011). Estas acciones buscan disminuir la intensidad de

los campos eléctricos y magnéticos en las zonas de influencia de la infraestructura, priorizando la protección de la salud de las poblaciones cercanas y la operación confiable del sistema eléctrico. Las principales estrategias de mitigación identificadas son:

- Incremento de la altura de los conductores: elevar los conductores sobre el nivel del suelo contribuye a reducir la magnitud de los campos en áreas accesibles a la población.
- Gestión adecuada de la franja de servidumbre: asegurar el cumplimiento estricto de la franja de seguridad de 16 m a cada lado de la línea de transmisión en 66 kV, evitando la ocupación de estas zonas con edificaciones u otras actividades humanas.
- Monitoreo permanente: establecer un plan de mediciones periódicas de campos electromagnéticos en sectores críticos, a fin de verificar el cumplimiento de la normativa y anticipar posibles desviaciones.
- Sensibilización comunitaria: desarrollar campañas de información dirigidas a la población para explicar los riesgos asociados a la exposición prolongada y difundir las medidas de prevención vinculadas al uso seguro de las franjas de servidumbre.
- Reconfiguración de estructuras: en áreas donde los niveles de campo superen los valores normativos o representen un riesgo, se recomienda evaluar la reubicación de estructuras o la modificación de la disposición geométrica de los conductores para mitigar la intensidad de los campos.

La aplicación de estas medidas no solo asegura la conformidad con las regulaciones vigentes, sino que también favorece la aceptación social de la infraestructura eléctrica, minimizando la percepción de riesgo y contribuyendo a la sostenibilidad del sistema en la región.

CONCLUSIONES

1. Se logró evaluar los niveles de radiación electromagnética de la línea de transmisión L-6001, mediante simulaciones realizadas en FEMM y su contraste con mediciones de campo. Los valores obtenidos demuestran que, bajo la línea en configuración vertical, el campo eléctrico máximo alcanzó 1193.77 V/m en la simulación y 1233 V/m en la medición, mientras que el campo magnético llegó a 1.449 μ T simulado y 1.44 μ T medido. En la disposición horizontal, los valores fueron menores, con 830.91 V/m y 783 V/m para el campo eléctrico, y 1.029 μ T y 1.07 μ T para el magnético. Estos resultados evidencian que las zonas de mayor exposición se localizan directamente debajo de la línea, aunque los valores registrados se encuentran por debajo de los límites normativos nacionales e internacionales, lo que permite concluir que la operación de la línea no representa un riesgo significativo para la salud.
2. Se determinó que la proximidad a la línea de transmisión influye directamente en la magnitud de los campos eléctricos y magnéticos. En la configuración vertical, el campo eléctrico disminuyó de 1193.77 V/m bajo la línea a 823.59 V/m a 8 metros del eje derecho, mientras que el campo magnético pasó de 1.449 μ T a 1.048 μ T en la misma distancia. De forma similar, en la configuración horizontal el campo eléctrico se redujo de 830.91 V/m en el eje central a 609.58 V/m a 8 metros, y el campo magnético descendió de 1.029 μ T a 0.560 μ T respectivamente. Asimismo, se detectó la presencia de viviendas dentro de la franja de servidumbre mínima de 16 metros, lo que implica que, aunque los valores se mantengan bajo los límites normativos, existe una exposición mayor y un riesgo potencial acumulativo para las personas que habitan en dichas zonas.

3. Se comprobó que el diseño geométrico de la línea condiciona la distribución de la radiación electromagnética. En la configuración vertical se concentraron los valores máximos (hasta 1193.77 V/m y 1.449 μ T) en el eje central bajo la línea, mientras que en la configuración horizontal los valores centrales fueron menores (830.91 V/m y 1.029 μ T) pero se amplió el área de influencia hacia los laterales (hasta 641.36 V/m y 0.551 μ T a 8 metros). Estos resultados evidencian que la geometría vertical concentra la radiación en el centro, mientras que la horizontal distribuye la intensidad en un área más amplia, lo que la hace más favorable para minimizar la exposición en zonas habitadas.
4. Se compararon los resultados con las normativas vigentes de la ICNIRP (2020) y el Código Nacional de Electricidad (2011). Los valores más altos obtenidos, 1233 V/m para el campo eléctrico y 1.44 μ T para el magnético, se encuentran por debajo de los límites permisibles (5 kV/m para el campo eléctrico y 100 μ T para el campo magnético en exposición poblacional), respectivamente. Esto confirma que los niveles de radiación electromagnética de la línea L-6001 están por debajo de lo permitido tanto para población en general como para personal ocupacional. No obstante, la presencia de viviendas dentro de la franja de seguridad constituye un factor de riesgo que debe atenderse de manera prioritaria. Aunque los valores actuales no exceden los límites, la permanencia prolongada en estas áreas puede aumentar la exposición acumulativa, lo que resalta la necesidad de reforzar el cumplimiento normativo y aplicar medidas de mitigación, como control de servidumbre, incremento de la altura de los conductores y monitoreo permanente.

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda reforzar estrictamente el cumplimiento de las franjas de servidumbre de 16 metros establecidas por el Código Nacional de Electricidad (CNE, 2011). Para ello, la empresa concesionaria debe realizar inspecciones periódicas a lo largo del tramo de la línea L-6001, identificando y corrigiendo ocupaciones indebidas (viviendas o edificaciones), ya que representan el mayor factor de riesgo acumulativo detectado en este estudio.
2. Implementar medidas de mitigación en zonas críticas, priorizando las áreas donde se registraron campos eléctricos superiores a los 700 V/m o donde las viviendas se encuentran en cercanía inmediata a la línea. Estas medidas pueden incluir reubicación de estructuras, instalación de barreras físicas o rediseño parcial del trazado de la línea.
3. Fortalecer el monitoreo continuo de los campos electromagnéticos, integrando campañas de medición anual en diferentes puntos del tramo L-6001. Esto permitirá verificar variaciones temporales en la magnitud de los campos eléctricos y magnéticos, garantizando que se mantengan dentro de los límites establecidos por la ICNIRP (2020) y el CNE (2011).
4. Optimizar el diseño de futuras líneas de transmisión, considerando en la etapa de planificación comparaciones entre configuraciones geométricas (vertical y horizontal), de modo que se seleccione la disposición que minimice la exposición a campos eléctricos y magnéticos en áreas residenciales y rurales.
5. Promover la sensibilización de la población local mediante programas informativos desarrollados por la empresa concesionaria, con el fin de difundir los riesgos asociados a la cercanía de las líneas de alta tensión y fomentar el respeto a las franjas de servidumbre.

6. Ampliar estudios complementarios incorporando análisis de impacto en la salud ocupacional de los trabajadores eléctricos, así como estudios de largo plazo en comunidades cercanas, con el fin de fortalecer las bases científicas y técnicas que respaldan la seguridad de las operaciones.

BIBLIOGRAFÍA

- 214-2011-MEM/DM, R. M. N. (2011). *Código Nacional de Electricidad - SUMINISTRO 2011*.
<https://www.minem.gob.pe/minem/archivos/R%20M%20%20y%20CNE%202011.pdf>
- Alonso, E., García, R., & Onaindia, C. (2011). *Campos electromagnéticos y efectos en salud*.
https://www.euskadi.eus/contenidos/informacion/salud_amb_campos_electrom/es_def/adjuntos/CEM_cast.pdf
- Arrieta, P. (2012). *Propuesta de Guía para la Evaluación de Impacto Ambiental del Ruido y Campos Eléctricos y Magnéticos generados por las Líneas Eléctricas de Alta Tensión de Corriente Continua en el Marco del SEIA [Tesis de Ingeniería Física]*.
https://fisica.usach.cl/sites/fisica/files/2012_tesis_paz_veronica_arrieta_cardichis.pdf
- ATRIA. (2022). *¿Cuáles son los sistemas de transmisión existentes en el Perú?*
<https://atria.com.pe/sistemas-de-transmision-en-el-peru/>
- Balanis, C. A. (2016). *Antenna Theory: Analysis and Design (4th ed.)*.
<https://www.wiley.com/en-gb/Antenna+Theory%3A+Analysis+and+Design%2C+4th+Edition-p-9781118642061>
- Cabezas, K., Jiménez, P., Ramírez, J. D., & Canelos, R. (2020). Simulación del campo electromagnético en una línea de transmisión de extra alto voltaje mediante el método de los elementos finitos. *MASKAY*, 11(1), 1. <https://doi.org/10.24133/maskay.v11i1.1724>
- Castro, C., Farfán, M., & Orihuela, W. (2021). *Modelado y medición de los campos electromagnéticos en una línea de transmisión de 500kv utilizando el método de elementos finitos [Tesis de Ingeniería de Licenciatura]*.
https://repositorio.unac.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12952/6132/TESIS_PREGRADO_ORIHUELA_CASTRO_FARFAN_FIEE_2021%20%281%29.pdf?sequence=4&isAllowed=y

Congreso de la República del Perú. (2013). Ley N° 29733 Ley de Protección de Datos Personales. En *Ley N° 29733*.

Meeker, D. C. (2015). Finite Element Method Magnetics (Versión 4.2) [Computer software]. <http://www.femm.info>

Decreto Supremo N° 010-2005-PCM. (2005). *Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECAs) para Radiaciones No Ionizantes*. <https://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/DGGAE/ARCHIVOS/DS-010-2005-PCM.pdf>

DECRETO SUPREMO N° 038-2003-MTC. (2003).

Defensoría del Pueblo. (2010). *La Electrificación Rural en el Perú: Derechos y Desarrollo para Todos. Serie Informes Defensoriales - Informe Defensorial N° 149*. <https://www.defensoria.gob.pe/wp-content/uploads/2018/05/informe-149.pdf>

DhanaLakshmi, P., Kalaivani, L., & Subburaj, P. (2011). Analysis of magnetic field distribution in power system using finite element method. *2011 International Conference on Computer, Communication and Electrical Technology (ICCCET)*, 394-399. <https://doi.org/10.1109/ICCCET.2011.5762507>

ICNIRP. (2020). *Guidelines for limiting exposure to electromagnetic fields (100 kHz to 300 GHz)*. *Health Physics*, 118(5), 483-524. <https://doi.org/10.1097/HP.0000000000001210>

ICNIRP. (2020). *Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz)*. *Health Physics*, 118(5), 483-524. <https://doi.org/10.1097/HP.0000000000001137>

Dong, L., Wu, J., & Di, G. (2024). Static electric field inhibits the proliferation and secretion functions of splenic lymphocytes in mice. *International Journal of Environmental Health Research*, 34(2), 1136-1146. <https://doi.org/10.1080/09603123.2023.2202900>

- Elmashtoly, M. H., Gouda, O. E., Lehtonen, M., & Darwish, M. M. F. (2024). Mitigation of the Electric Field Under EHVT in Limited Space Crowded with Human Activities. *IEEE Access*, 12, 41009-41018. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3376417>
- Frigura-Iliasa, M., Baloi, F. I., Frigura-Iliasa, F. M., Simo, A., Musuroi, S., & Andea, P. (2020). Health-related electromagnetic field assessment in the proximity of high voltage power equipment. *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(1). <https://doi.org/10.3390/app10010260>
- Ghani, S. A., Khair, M. S. A., Chairul, I. S., Rahim, N. H., & Hashim, S. N. M. A. (2023). Effects of parameter adjustment on the electromagnetic field of an overhead power transmission line model. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 30(2), 643-650. <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v30.i2.pp643-650>
- Hernández-Sampieri, R., & Mendoza, C. (2018). *Metodología de la investigación. Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta.*
- IAEA. (2014). *Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards.* INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. <https://doi.org/10.61092/iaea.u2pu-60vm>
- Ioan, I. A. (2023). The Impact of Three-Phase High Voltage Overhead Powerlines Characteristics on Electromagnetic Field Interference. *Proceedings of 2023 10th International Conference on Modern Power Systems, MPS 2023.* <https://doi.org/10.1109/MPS58874.2023.10187528>
- Jin, J.-M. (2014). The Finite Element Method in Electromagnetics, 3rd edition. *Journal of Chemical Information and Modeling.*
- Kwon, Y. H., & Bang, H. (2000). The Finite Element Method Using MATLAB, Second Edition. En *CRC Press*.
- López-Espí, P. L., Sánchez-Montero, R., Guillén-Pina, J., Chocano-del-Cerro, R., & Rojas, J. A. M. (2024). Optimal design of electromagnetic field exposure maps in large areas.

- Environmental Impact Assessment Review*, 106, 107525.
<https://doi.org/10.1016/j.eiar.2024.107525>
- Marty, B., Gaudin, R., Piperno, T., Rouquette, D., Schwob, C., & Mezeix, L. (2024). Methodology to classify high voltage transmission poles using CNN approach from satellite images for safety public regulation application: Study case of rural area in Thailand. *Systems and Soft Computing*, 6. <https://doi.org/10.1016/j.sasc.2024.200080>
- MINEM. (2006). *Plan Referencial de Electricidad formulado por el Ministerio de Energía y Minas para el período 2006 – 2015 (PRE-2006)*.
https://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/Electricidad/publicaciones/plan2006/03-PRE-2006_CAPITULO_3_V5.pdf
- Ministerio de la Secretaría General de la Presidencia - Chile. (2024). *Decreto 95 del Ministerio de la Secretaría General de la Presidencia, que modifica el Reglamento de la Ley 19300 de Medio Ambiente*. URL
- Ouyang, G., & Abed-Meraim, K. (2022). Analysis of Magnetic Field Measurements for Indoor Positioning. *Sensors*, 22(11), 4014. <https://doi.org/10.3390/s22114014>
- Sadiku, M. (2010). *Elements of Electromagnetics (5th ed.)*.
<https://archive.org/details/matthew-n.-o.-sadiku-elements-of-electromagnetic-book-fi>
- SCENIHR. (2015). Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks: Potential Health Effects of Exposure to Electromagnetic Fields (EMF). En *Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks (SCENIHR)* (Número January).
- D. P. Kothari y I. J. Nagrath, *Modern Power System Analysis*, 4ª ed., New Delhi: Tata McGraw-Hill Education, 2011.

- Schuermann, D., & Mevissen, M. (2021). Manmade electromagnetic fields and oxidative stress— biological effects and consequences for health. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(7). <https://doi.org/10.3390/ijms22073772>
- Sert, C., Başak, N., & Koruk, İ. (2024). Electric and magnetic field pollution in near substations and investigation of anxiety and depressive effects on adult individuals living in this area. *Electromagnetic Biology and Medicine*. <https://doi.org/10.1080/15368378.2024.2348574>
- Stam, R. (2018). *Comparison of international policies on electromagnetic fields*. <https://www.rivm.nl/sites/default/files/2018-11/Comparison%20of%20international%20policies%20on%20electromagnetic%20fields%202018.pdf>
- Tarko, R., Kochanowicz, K., Nowak, W., Szpyra, W., & Wszolek, T. (2021). Reduction of the environmental impact of electric field generated by high voltage power transmission lines. *Energies*, 14(19). <https://doi.org/10.3390/en14196388>
- Torres, E. (2018). *Riesgos por campos electromagnéticos en líneas eléctricas de transmisión y distribución en el Perú [Tesis de Maestría]*. https://repositorio.unac.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12952/3916/Ramos%20Torres_titulo%20maestria%20electronica_2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Vargas, F. (2005). *La contaminación ambiental como factor determinante de la salud*. http://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1135-57272005000200001&lng=es&tlng=es
- World Bank. (2023). *Peru Overview: Development news, research, data*. <https://www.worldbank.org/en/country/peru/overview>
- Wu, T., Peng, R., Zhang, L., & Li, K. (2022). Editorial: Human Exposure to New-Emerging Electric, Magnetic and Electromagnetic Fields. *Frontiers in Public Health*, 10. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2022.894624>

Zhang, Y., & Jiang, L. (2024). A Hybrid Model-Based Data-Driven Framework for the Electromagnetic Near-Field Scanning. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 1-10. <https://doi.org/10.1109/TEM.C.2024.3411406>

Zhang, Y., Ma, P., Jiang, L., & Gao, S. (2024). Time-Resolved Electromagnetic Near-Field Scanning: Dual Sparse Sampling in Time and Space. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 66(3), 928-938. <https://doi.org/10.1109/TEM.C.2024.3381980>

Sinopsis de la Norma IEEE Std C95.1TM-2019 “Estándar IEEE para niveles de seguridad con respecto a la exposición humana a campos eléctricos, magnéticos y electromagnéticos, de 0 Hz a 300 GHz”, en *IEEE Access*, vol. 7, págs. 171346-171356, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2954823.

ANEXOS

Anexo 1

Figura 51

Sistema Eléctrico Interconectado Nacional. Actualizado: enero 2023



Fuente: COES. (2023). Diagrama Del Sistema Eléctrico Interconectado Nacional.

Anexo 2

Figura 52

Código script de simulación en MATLAB con FEMM

```
#=====
=====
# ANÁLISIS DE LA RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA EN LAS LÍNEAS DE
# TRANSMISIÓN EN 66 KV,
# MEDIANTE EL USO DEL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS
#
# Versión: .2.0
#
# AUTORES
# Bach. Efrain Pereira Panccahua
# Bach. William Mamani Choquetaipe
#
# DESCRIPCIÓN:
# Este código emplea el método de elementos finitos (FEM) para analizar
# la distribución de campos eléctricos y magnéticos en líneas de transmisión de 66 kV.
#
#=====
=====
% SIMULACION ELECTROESTATICA EN LINEA

addpath('C:\femm42\mfiles')
openfemm;
newdocument(1); %a comparacion de la simulacion electromagnetica aca se coloca
%el valor de 1 para definir la simulacion electroestatita

ei_zoomnatural;
ei_probdef('meters','planar',1E-8,110,30)
ei_smartmesh(0);

% Primero se define el diámetro del conductor
D_cond = 0.0162; % metros

% Creamos el punto de referencia 0,0
ei_addnode(0,0);
ei_addnode(D_cond,0);

% Ahora creamos los arcos
ei_addarc(0,0,D_cond,0,180,2);
ei_addarc(D_cond,0,0,0,180,2);

% Definimos el circuito
ei_addconductorprop('circuit',64900,0,1);
ei_modifyconductorprop('circuit',1,64900);

% Ahora definimos el label del conductor, es decir, el material que utiliza
```

```

ei_addmaterial('Aluminum, 1100', 1, 1, 0)
ei_addblocklabel(D_cond/2,0);
ei_selectlabel(D_cond/2,0);
ei_setblockprop('Aluminum, 1100',0,0,0);

% Definimos una condición de contorno para el conductor
%ei_addboundprop('conduc',64900, 0, 0, 0, 0);

ei_selectarcsegment(D_cond,0);
ei_selectarcsegment(0,D_cond);
%ei_setarcsegmentprop(6, 'conduc', 0, 0);

ei_setarcsegmentprop(1, 'conduc', 0, 0, 'circuit')

% Definimos la distancia entre ternas
D_term = 1.5; % metros

ei_selectgroup(0);
ei_copytranslate(D_term,0,2);

% Definimos el contorno
ei_addnode(-8.5,4);
ei_addnode(15,4);

ei_addnode(-8.5,-22);
ei_addnode(15,-22);

ei_addsegment(-8.5,4,15,4);
ei_addsegment(-8.5,-22,15,-22);

ei_addsegment(-8.5,4,-8.5,-22);
ei_addsegment(15,4,15,-22);

%ei_addboundprop('exterior', 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0);
ei_addboundprop('exterior', 0, 0, 0, 0, 0);
ei_selectsegment(3.23,4.21);
%ei_setsegmentprop('exterior', 1, 0, 0, 0);
ei_setsegmentprop('exterior', 1, 0, 0, 0, 'conduc')

ei_selectsegment(-8.5,-22);
ei_setsegmentprop('exterior', 1, 0, 0, 0, 'conduc')

ei_selectsegment(-9.3,-6.3);
ei_setsegmentprop('exterior', 1, 0, 0, 0, 'conduc')

ei_selectsegment(15.3,-5.5);
ei_setsegmentprop('exterior', 1, 0, 0, 0, 'conduc')
ei_clearselected;

```

```

ei_getmaterial('Air'); % Material aire

ei_addblocklabel(3.7,-6.5);
ei_selectlabel(3.7,-6.5);
ei_setblockprop('Air',0,0,0);

ei_clearselected;

% Guardamos el archivo y analizamos
ei_saveas('testelectroestatica.fee');
ei_analyze(1);
ei_loadsolution();

%código para simular la radiación electromagnética en líneas de
%configuración horizontal

%simulación electromagnetismo

addpath('C:\femm42\mfiles')

openfemm;
newdocument(0);

mi_zoomnatural;
mi_probdef(0,'meters','planar',1E-8,110,30,'Newton');
mi_smartmesh(0);

%primero se define el diámetro del conductor
D_cond = 0.0162; % metros

%creamos el punto de referencia 0,0

mi_addnode(0,0);
mi_addnode(D_cond,0);

%ahora creamos los arcos

mi_addarc(0,0,D_cond,0,180,2);
mi_addarc(D_cond,0,0,0,180,2);

%definimos el circuito

mi_addcircprop('circuit',0,1);
mi_modifycircprop('circuit',1,36.927)

%ahora definimos el label del conductor, es decir el material que utiliza
mi_getmaterial('Aluminum, 1100');
mi_addblocklabel(D_cond/2,0);
mi_selectlabel(D_cond/2,0);

```

```

mi_setblockprop('Aluminum, 1100',0,0,'circuit',0,0,0);

mi_addboundprop('conduc',0, 0, 0, 0, 0, 37.7, 0, 0, 1, 0, 0);

mi_selectarcsegment(D_cond,0);
mi_selectarcsegment(0,D_cond);
mi_setarcsegmentprop(6, 'conduc', 0, 0);

%definimos la distancia entre ternas

D_term = 1.5; %metros

mi_selectgroup(0);
mi_copytranslate(D_term,0,2);

%definimos el contorno
mi_addnode(-8.5,4);
mi_addnode(15,4);

mi_addnode(-8.5,-16);
mi_addnode(15,-16);

mi_addsegment(-8.5,4,15,4);
mi_addsegment(-8.5,-16,15,-16);

mi_addsegment(-8.5,4,-8.5,-16);
mi_addsegment(15,4,15,-16);

mi_addboundprop('exterior', 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0);
mi_selectsegment(3.23,4.21);
mi_setsegmentprop('exterior', 1, 0, 0, 0);

mi_selectsegment(-8.5,-16);
mi_setsegmentprop('exterior', 1, 0, 0, 0);

mi_selectsegment(-9.3,-6.3);
mi_setsegmentprop('exterior', 1, 0, 0, 0);

mi_selectsegment(15.3,-5.5);
mi_setsegmentprop('exterior', 1, 0, 0, 0);
mi_clearselected;

mi_getmaterial('Air'); % material aire

mi_addblocklabel(3.7,-6.5)
mi_selectlabel(3.7,-6.5);
mi_setblockprop('Air',0,0,0,0,0,0);
mi_clearselected

```

```
mi_saveas('testconcodigoelectro.fem');  
mi_analyze(1);  
mi_loadsolution();
```

Fuente: Elaboración propia con apoyo del Ing. Ivan Medrano.

Anexo 3

EVIDENCIAS FOTOGRAFICAS



