



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS
CARRERA INGENIERÍA ELÉCTRICA

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

**EVALUACIÓN DE RADIACIONES NO IONIZANTES GENERADAS POR LAS
LÍNEAS DE ENERGÍA ELÉCTRICA DE SUBTRANSMISIÓN A 69 kV, EN EL EJE
DE LA SUBESTACIÓN LA PENÍNSULA - SUBESTACIÓN LORETO UBICADO EN
LA CIUDAD DE AMBATO**

Proyecto de Titulación presentado previo a la obtención del Título de Ingeniero
Eléctrico en Sistemas Eléctricos de Potencia

Autores:

Tiban Mangui Ronny Daniel
Yanchapaxi Lloacana Alex Mecias

Tutor:

Ing. Jimmy Xavier Toaza Iza

LATACUNGA – ECUADOR

2022



DECLARACIÓN DE AUDITORIA

Nosotros **TIBAN MANGUI RONNY DANIEL** y **YANCHAPAXI LLOACANA ALEX MECIAS** declaramos ser autores del presente proyecto de investigación: “**EVALUACIÓN DE RADIACIONES NO IONIZANTES GENERADAS POR LAS LÍNEAS DE ENERGÍA ELÉCTRICA DE SUBTRANSMISIÓN A 69 kV, EN EL EJE DE LA SUBESTACIÓN LA PENÍNSULA - SUBESTACIÓN LORETO UBICADO EN LA CIUDAD DE AMBATO**”, siendo el Ing. **JIMMY XAVIER TOAZA IZA** el tutor del presente trabajo; y eximo expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

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

.....
Tiban Mangui Ronny Daniel
C.C. 1804872636

.....
Yanchapaxi Lloacana Alex Mecias
C.C. 1727453605



AVAL DEL TUTOR DE PROYECTO DE TITULACIÓN

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

“EVALUACIÓN DE RADIACIONES NO IONIZANTES GENERADAS POR LAS LÍNEAS DE ENERGÍA ELÉCTRICA DE SUBTRANSMISIÓN A 69 kV, EN EL EJE DE LA SUBESTACIÓN LA PENÍNSULA - SUBESTACIÓN LORETO UBICADO EN LA CIUDAD DE AMBATO”, de **TIBAN MANGUI RONNY DANIEL** y **YANCHAPAXI LLOACANA ALEX MECIAS**, de la carrera de Ingeniería Eléctrica, considero que dicho Informe Investigativo cumple con los requerimientos metodológicos y aportes científico-técnicos suficientes para ser sometidos a la evaluación del Tribunal de Validación de Proyecto que el Honorable Consejo Académico de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas de la Universidad Técnica de Cotopaxi designe, para su correspondiente estudio y calificación.

Latacunga, marzo 2022

El Tutor

.....
Ing. Jimmy Xavier Toaza Iza
C.C. 1717621062



APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN

En calidad de Tribunal de Lectores, aprueban el presente Informe de Investigación de acuerdo a las disposiciones reglamentarias emitidas por la Universidad Técnica de Cotopaxi, y por la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas; por cuanto, los postulantes **TIBAN MANGUI RONNY DANIEL** y **YANCHAPAXI LLOACANA ALEX MECIAS** con el título de Proyecto de titulación “**EVALUACIÓN DE RADIACIONES NO IONIZANTES GENERADAS POR LAS LÍNEAS DE ENERGÍA ELÉCTRICA DE SUBTRANSMISIÓN A 69 kV, EN EL EJE DE LA SUBESTACIÓN LA PENÍNSULA - SUBESTACIÓN LORETO UBICADO EN LA CIUDAD DE AMBATO**”, han considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometido al acto de Sustentación de Proyecto.

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

Latacunga, marzo 2022

Para constancia firman:

.....
Ing. Wilian Guamán
C.C. 0603578956

.....
Ing. Gabriela Cabrera Celi
C.C. 1104683873

.....
Ing. Franklin Vásquez
C.C. 1710434497

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por darme fuerzas y permitir cumplir mi sueño más anhelado. A mi papá Geovanny que siempre estuvo cuando más lo necesitaba, por brindarme su apoyo y nunca soltarme, por ser el principal promotor de mi sueño. A mis hermanos Leonardo y Christian por ser mi inspiración para obtener este logro, ojalá algún día yo me convierta en esa fuerza para que puedan seguir avanzando en su camino, A Martha por brindarme su apoyo moral en aquellos momentos de dificultad y debilidad.

A mi abuelita María por ser una madre para mí, por su amor, su trabajo, su apoyo incondicional me motivo a que salga adelante.

A mi tía Anita por estar siempre conmigo, por ser esa madre que me brindo todo el apoyo necesario, por entenderme, confiar, creer en mí, por los consejos, valores y principios que me ha inculcado. A mi tía Susana que siempre me apoyo y fui como un hijo para ella, pese a la distancia siempre han estado en mi corazón. Mi tía Mirian, tía Olga por creer siempre en mí, dándome un ejemplo de superación. A todos mis primos. En especial a Mario que siempre estuvo pendiente en este proceso, gracias por cada momento, por todos los consejos brindados y sobre todo por apoyarme en los momentos más difíciles de mi vida. A Paulina por ser un ejemplo a seguir. A David por todos los momentos que hemos pasado juntos.

A mi compañero de tesis Alex, gracias por su paciencia, dedicación, apoyo y amistad. Así mismo, deseo expresar mi reconocimiento al Ing. Jimmy Toaza por toda su ayuda y buena voluntad. Al Ing. Wilian Guamán por habernos guiado en todos los momentos que necesitábamos sus consejos.

A mis amigos que gracias a su apoyo moral me permitieron permanecer con empeño, dedicación y cariño.

Mi profundo agradecimiento a la EEASA en especial al Ing. Oscar Rodríguez, por confiar en nosotros, abrirnos las puertas y permitir realizar todo el proceso investigativo dentro de la empresa.

Infinitamente gracias Familia.

Ronny Tiban.



DECLARACIÓN DE AUDITORIA

Nosotros **TIBAN MANGUI RONNY DANIEL** y **YANCHAPAXI LLOACANA ALEX MECIAS** declaramos ser autores del presente proyecto de investigación: “**EVALUACIÓN DE RADIACIONES NO IONIZANTES GENERADAS POR LAS LÍNEAS DE ENERGÍA ELÉCTRICA DE SUBTRANSMISIÓN A 69 kV, EN EL EJE DE LA SUBESTACIÓN LA PENÍNSULA - SUBESTACIÓN LORETO UBICADO EN LA CIUDAD DE AMBATO**”, siendo el Ing. **JIMMY XAVIER TOAZA IZA** el tutor del presente trabajo; y eximo expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

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

.....
Tiban Mangui Ronny Daniel
C.C. 1804872636

.....
Yanchapaxi Lloacana Alex Mecias
C.C. 1727453605



AVAL DEL TUTOR DE PROYECTO DE TITULACIÓN

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

“EVALUACIÓN DE RADIACIONES NO IONIZANTES GENERADAS POR LAS LÍNEAS DE ENERGÍA ELÉCTRICA DE SUBTRANSMISIÓN A 69 kV, EN EL EJE DE LA SUBESTACIÓN LA PENÍNSULA - SUBESTACIÓN LORETO UBICADO EN LA CIUDAD DE AMBATO”, de **TIBAN MANGUI RONNY DANIEL** y **YANCHAPAXI LLOACANA ALEX MECIAS**, de la carrera de Ingeniería Eléctrica, considero que dicho Informe Investigativo cumple con los requerimientos metodológicos y aportes científico-técnicos suficientes para ser sometidos a la evaluación del Tribunal de Validación de Proyecto que el Honorable Consejo Académico de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas de la Universidad Técnica de Cotopaxi designe, para su correspondiente estudio y calificación.

Latacunga, marzo 2022

El Tutor

.....
Ing. Jimmy Xavier Toaza Iza
C.C. 1717621062



APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN

En calidad de Tribunal de Lectores, aprueban el presente Informe de Investigación de acuerdo a las disposiciones reglamentarias emitidas por la Universidad Técnica de Cotopaxi, y por la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas; por cuanto, los postulantes **TIBAN MANGUI RONNY DANIEL** y **YANCHAPAXI LLOACANA ALEX MECIAS** con el título de Proyecto de titulación “**EVALUACIÓN DE RADIACIONES NO IONIZANTES GENERADAS POR LAS LÍNEAS DE ENERGÍA ELÉCTRICA DE SUBTRANSMISIÓN A 69 kV, EN EL EJE DE LA SUBESTACIÓN LA PENÍNSULA - SUBESTACIÓN LORETO UBICADO EN LA CIUDAD DE AMBATO**”, han considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometido al acto de Sustentación de Proyecto.

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

Latacunga, marzo 2022

Para constancia firman:

.....
Ing. Wilian Guamán
C.C. 0603578956

.....
Ing. Gabriela Cabrera Celi
C.C. 1104683873

.....
Ing. Franklin Vásquez
C.C. 1710434497

AGRADECIMIENTO

Expreso mi infinito agradecimiento a mis padres Yolanda y Gerardo por su gran amor, por el apoyo incondicional en todas y cada una de mis decisiones, por demostrarme que con esfuerzo y dedicación se puede lograr grandes cosas sin importar los obstáculos.

A mis hermanos Patricio, Jonathan, Cristian, Saúl y Mateo por su cariño y palabras de aliento para no darme por vencido durante esta etapa de mi vida. A mis amigos de facultad, por todas las experiencias y gratos momentos vividos en mi etapa universitaria.

A mis amigos de vida por su apoyo y palabras que fomentaban a continuar con el anhelo de terminar mis estudios universitarios.

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

A la Universidad Técnica de Cotopaxi y a los docentes de la Carrera de Ingeniería Eléctrica por haber compartido sus conocimientos a lo largo de mis estudios, al Ing. Jimmy Toaza tutor de nuestro proyecto quien nos ha guiado con su paciencia, y sus conocimientos como docente. Al Ing. Wilian Guamán por todos sus consejos académicos y Al Ing. Carlos Quinatoa por guiarnos a la culminación de nuestro proyecto de titulación.

A todos, infinitas gracias.

Alex Yanchapaxi

DEDICATORIA

El presente trabajo está dedicada a la memoria de dos personas especiales en el cielo. Primeramente, para mi mamá Sandra Mangui, quien me guio y está presente en el caminar de mi vida, bendiciéndome y dándome fuerzas para continuar con mis metas trazadas sin desfallecer. Todo este esfuerzo está dedicado a mi madre porque sé que ella me ayudo en las buenas y malas, además de haberme dado la vida, siempre confió en mí y nunca me abandono. Te Quiero mamá.

Por último, también le dedico a mi abuelito Alberto, por el esfuerzo, dedicación, paciencia, por su confianza, por su enseñanza y por todo lo que me ha dado a lo largo de mi carrera y de mi vida. Cuanto te extraño polvillo.

A mi padre, hermanos y familia.

Ronny Tiban.

DEDICATORIA

*“El éxito en la vida no se mide por lo que logras sino
por los obstáculos que superas”
Pasta Blanda.*

A mis padres, Yolanda y Gerardo.

Alex Yanchapaxi

RESUMEN:

Un sistema eléctrico de potencia consta de varios elementos desde la generación hasta el consumidor final, al existir un flujo de potencia que circula por las líneas de transmisión genera cargas eléctricas en movimiento, por este efecto se produce el campo eléctrico y el campo magnético (Campos Electromagnéticos).

El presente estudio esta referenciado a la evaluación de las radiaciones no ionizantes generadas por las líneas de energía eléctrica de subtransmisión a 69 kV, obteniendo información mediante una recopilación bibliográfica sobre el campo eléctrico y campo magnético en una línea de transmisión. En consecuencia, esta actividad deberá tomar como referencia los niveles expuestos en la normativa establecida, donde se identificarán y valorarán los campos electromagnéticos.

El estudio se realizará mediante una recopilación de datos en los puntos referenciados, con la ayuda del equipo EMF 450 METER que indicará la cantidad de ondas generadas de CEM en los puntos analizados en la línea de subtransmisión. En segunda instancia, se realiza de forma analítica el cálculo de radiaciones no ionizantes generadas en las líneas de energía eléctrica, facilitando el cálculo con la ayuda del software EXCEL y a continuación, mediante el software FEMM se simula las ondas de campo eléctrico y campo magnético de la línea de subtransmisión, para luego hacer una evaluación siendo una validación entre los datos obtenidos de la simulación con los datos obtenidos en las mediciones.

En base a los resultados obtenidos en la evaluación de los datos recopilados, se contrastará una evaluación con las normativas establecidas en las zonas donde se analiza los campos electromagnéticos generadas por las líneas de subtransmisión, para observar si los niveles de los CEM, están dentro de las normativas establecidas.

Palabras claves: radiaciones no ionizantes, campo eléctrico, campo magnético, líneas de subtransmisión, FEMM.

TECHNICAL UNIVERSITY OF COTOPAXI

THEME: EVALUATION OF NON-IONIZING RADIATIONS GENERATED BY THE 69 kV SUBTRANSMISSION ELECTRIC POWER LINES IN THE LA PENINSULA - LORETO SUBSTATION AXIS, LOCATED IN THE CITY OF AMBATO.

Authors: Tiban Mangui Ronny Daniel

Yanchapaxi Lloacana Alex Mecias

ABSTRACT:

An electrical power system consists of several elements from the generation to the final consumer, as there is a power flow that circulates through the transmission lines generates electric charges in motion, by this effect the electric field and the magnetic field (Electromagnetic Fields) are produced.

The present study is referenced to the evaluation of non-ionizing radiation generated by 69 kV subtransmission power lines, obtaining information through a bibliographic compilation on the electric field and magnetic field in a transmission line. Consequently, this activity should take as a reference the levels exposed in the established regulations, where the electromagnetic fields will be identified and evaluated.

In this project, a data collection of the electric and magnetic field in the referenced points is carried out, with the help of the EMF 450 METER equipment that will indicate the amount of EMF waves generated in the points analyzed in the sub-transmission line. In second instance, the calculation of non-ionizing radiation generated in the electric power lines is performed analytically, facilitating the calculation with the help of EXCEL software and then, using FEMM software, the electric field waves and magnetic field of the sub-transmission line are simulated, to then make an evaluation being a validation between the data obtained from the simulation with the data obtained in the measurements.

Based on the results obtained in the evaluation of the data collected, the results will be contrasted with the regulations established in the areas where the electromagnetic fields generated by the sub-transmission lines are analyzed, to observe if the EMF levels are within the established regulations.

Keywords: non-ionizing radiation, electric field, magnetic field, sub-transmission lines, EMF.

AVAL DE TRADUCCIÓN

En calidad de Docente del Idioma Inglés del Centro de Idiomas de la Universidad Técnica de Cotopaxi; en forma legal **CERTIFICO** que:

La traducción del resumen al idioma Inglés del trabajo de titulación cuyo título versa: **“EVALUACIÓN DE RADIACIONES NO IONIZANTES GENERADAS POR LAS LÍNEAS DE ENERGÍA ELÉCTRICA DE SUBTRANSMISIÓN A 69 kV, EN EL EJE DE LA SUBESTACIÓN LA PENÍNSULA - SUBESTACIÓN LORETO UBICADO EN LA CIUDAD DE AMBATO”** presentado por: **Tiban Mangui Ronny Daniel y Yanchapaxi Lloacana Alex Mecias** estudiantes de la Carrera de **Ingeniería Eléctrica** perteneciente a la **Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas** lo realizaron bajo mi supervisión y cumple con una correcta estructura gramatical del Idioma.

Es todo cuanto puedo certificar en honor a la verdad y autorizo a los **peticionarios** hacer uso del presente aval para los fines académicos legales.

Latacunga, 23 marzo del 2022

Atentamente,



Mg. Marco Paúl Beltrán Semblantes



CENTRO
DE IDIOMAS

DOCENTE CENTRO DE IDIOMAS-UTC
CI: 0502666514

ÍNDICE DE CONTENIDO

1.	INFORMACIÓN GENERAL.....	1
2.	Introducción	2
2.1	El Problema	2
2.1.1	Situación Problemática:	2
2.1.2	Formulación del problema	2
2.2	Objeto y Campo de Acción	3
2.3	Beneficiarios:.....	3
2.3.1	Beneficiarios directos.....	3
2.3.2	Beneficiarios indirectos.....	3
2.4	Justificación:.....	3
2.5	Hipótesis.....	4
2.6	Objetivos:	4
2.6.1	General	4
2.6.2	Específicos.....	4
2.7	Sistema de Tareas	5
3.	Fundamentación Teórica.....	7
3.1	Antecedentes.....	7
3.2	Sistema Eléctrico de Potencia	9
3.3	Sistema Nacional de Transmisión SNT	10
3.3.1	Líneas de Transmisión	11
3.4	Radiación No Ionizante.....	13
3.4.1	Campos Electromagnéticos	13
3.4.2	Campo Eléctrico	16
3.4.3	Ecuaciones de Maxwell	20
3.4.4	Campo Magnético.....	24
3.5	Campos Electromagnéticos en Sistemas Eléctricos de Potencia.....	28
3.5.1	Campo en Subestaciones Eléctricas.....	28
3.5.2	Campo en Conductores Subterráneos	29

3.5.3	Líneas de Transmisión y Campos Electromagnéticos	30
4.	Materiales y Métodos	33
4.1	Métodos de Investigación.....	33
4.2	Materiales e Instrumentos	33
4.2.1	Normativas	34
4.2.2	Software	39
4.3	Campos electromagnéticos en Líneas de Transmisión	39
4.3.1	Ubicación de la línea de subtransmisión a 69 kV para el caso de estudio	39
4.3.2	Estructuras seleccionadas para el caso de estudio	40
4.4	Instrumentos de Medición.....	42
4.5	Procedimiento de medición de campos eléctricos y magnéticos en el campo ..	44
4.5.1	Medición de campos eléctricos	44
4.5.2	Medición de campos magnéticos.....	46
4.6	Simulación de campos eléctricos y magnéticos en el software FEMM.....	46
4.7	Cálculo del campo eléctrico y magnético método de imágenes reflejadas.....	49
4.7.1	Cálculos de campos eléctricos.....	49
4.7.2	Cálculos de campos magnéticos	53
4.8	Cálculo del campo eléctrico y magnético método de elementos finitos.....	56
5.	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	58
5.1	Medición de campos electromagnéticos en la línea de subtransmisión a 69 kV La Península – Loreto	58
5.1.1	Aspectos considerados para las mediciones de campo eléctrico y magnético ..	59
5.2	Validación de las simulaciones realizadas	64
5.2.1	Campo eléctrico – Vista lateral	64
5.2.2	Campo magnético – Vista lateral.....	65
5.2.3	Campo eléctrico – Vista longitudinal	67
5.2.4	Campo magnético – Vista longitudinal.....	68
5.2.5	Validación de resultados	70
5.2.6	Validación de resultados de los cálculos y simulación.....	81
5.2.7	Justificación de la simulación y cálculos	83
5.2.8	Análisis de resultados y contrastación con las normativas vigentes.....	85

6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	92
6.1	Conclusiones.....	92
6.2	Recomendaciones	94
7.	BIBLIOGRAFÍA.....	95
8.	ANEXOS	99

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1. Diagrama esquematizado del sistema eléctrico	10
Figura 3.2. Sistema Nacional de Transmisión.....	11
Figura 3.3. Campos magnéticos y eléctricos asociados con una línea de dos conductores	12
Figura 3.4. Estructura y partes del átomo.....	14
Figura 3.5. Interacciones entre cargas.....	15
Figura 3.6. A) Líneas de campo eléctrico entre dos cargas iguales y de signo opuesto. B) Líneas de campo eléctrico entre dos cargas iguales y del mismo signo	18
Figura 3.7. Líneas de campo eléctrico	19
Figura 3.8. Esquema que representa a dirección del campo debido a una carga puntual positiva y una carga puntual negativa	21
Figura 3.9. Campo eléctrico debido a un sistema de cargas puntuales.....	22
Figura 3.10. Líneas del campo eléctrico que atraviesan dos superficies	22
Figura 3.11. Superficie gaussiana esférica de radio r que rodea una carga puntual q	23
Figura 3.12. Sobre el campo generado por una corriente en un anillo.	26
Figura 3.13. Filamento de un alambre infinito por el que circula una corriente.	27
Figura 3.14. (a) Representación del campo eléctrico describiendo una elipse,.....	31
Figura 4.1. Procedimiento para las mediciones de CEM en líneas de transmisión.	34
Figura 4.2. Perfiles de elevación del tramo de la línea de subtransmisión a 69 kV de la S/E La Península – SE Loreto.	40
Figura 4.3. Estructura A60M-2C	41
Figura 4.4. Estructura TRAU-1C.....	41
Figura 4.5. Estructura SAU-1C	42
Figura 4.6. EMF 450 METER.....	43
Figura 4.7. Anemómetro Digital.....	43
Figura 4.8. Medidor de estrés térmico WBGT.	44
Figura 4.9. Medición perfil longitudinal y lateral.....	45
Figura 4.10. Medición perfil lateral	45
Figura 4.11. Selección del tipo de problema en el software FEMM.	47
Figura 4.12. Estructura importada al software FEMM.	47
Figura 4.13. Selección del tipo de material.	48
Figura 4.14. Lista de materiales.....	48

Figura 4.15. Torre de transmisión mallada en FEMM.....	48
Figura 4.16. Valores obtenidos de la torre de transmisión.....	49
Figura 4.17. Conductores y sus imágenes.	51
Figura 4.18. Campo magnético de un conductor infinitamente largo sobre la tierra.	54
Figura 5.1. Anchos de la franja de servidumbre.....	59
Figura 5.2. Distribución del campo eléctrico en la estructura E-1075, perfil lateral.....	64
Figura 5.3. Distribución del campo eléctrico en la estructura E-0268, perfil lateral.....	64
Figura 5.4. Distribución del campo eléctrico en la estructura E-0263, perfil lateral.....	65
Figura 5.5. Distribución del campo magnético en la estructura E-1075, perfil lateral..	65
Figura 5.6. Distribución del campo magnético en la estructura E-0268, perfil lateral..	66
Figura 5.7. Distribución del campo magnético en la estructura E-0263, perfil lateral..	66
Figura 5.8. Distribución del campo eléctrico en la estructura E-1075, perfil longitudinal.	67
Figura 5.9. Distribución del campo eléctrico en la estructura E-0268, perfil longitudinal.	67
Figura 5.10. Distribución del campo eléctrico en la estructura E-0263, perfil longitudinal.	68
Figura 5.11. Distribución del campo magnético en la estructura E-1075, perfil longitudinal.....	68
Figura 5.12. Distribución del campo magnético en la estructura E-0268, perfil longitudinal.....	69
Figura 5.13. Distribución del campo magnético en la estructura E-0263, perfil longitudinal.....	69
Figura 5.14. Representación de la medición a 1 m sobre el nivel del suelo.	70
Figura 5.15. Representación de la medición a 1 m sobre el nivel del suelo con pendiente.	71
Figura 5.16. Gráfica del campo eléctrico – vano adelante.	73
Figura 5.17. Gráfica del campo eléctrico – vano atrás.....	75
Figura 5.18. Interferencias en las mediciones zona geográfica vano atrás (E-1075).	76
Figura 5.19. Interferencias en las mediciones zona geográfica vano atrás (E-1075).	76
Figura 5.20. Gráfica del campo eléctrico – Perfil lateral estructura E-1075.....	78
Figura 5.21. Gráfica del campo magnético– vano adelante.	79
Figura 5.22. Gráfica del campo magnético– perfil lateral.....	80
Figura 5.23. Gráfica del campo eléctrico calculado– perfil lateral.....	82

Figura 5.24. Gráfica del campo magnético calculado– perfil lateral.....	83
Figura 5.25. Grafica del nivel de referencia del campo eléctrico.....	86
Figura 5.26. Gráfica del nivel de referencia del campo magnético.....	87
Figura 5.27. Gráfica del nivel de referencia del campo eléctrico.....	88
Figura 5.28. Gráfica del nivel de referencia del campo magnético.....	88
Figura 5.29. Gráfica del nivel de referencia del campo eléctrico estructura E-0263.	89
Figura 5.30. Gráfica del nivel de referencia del campo magnético estructura E-0263...	90

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.1. Valores de máxima exposición a frecuencia industrial (60 Hz).....	35
Tabla 4.2. Niveles de para exposición ocupacional a campos eléctricos y magnéticos (valores rms no perturbados)	36
Tabla 4.3. Niveles de para exposición poblacional a campos eléctricos y magnéticos (valores rms no perturbados)	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 4.4. Niveles de referencia para la exposición a campos electromagnéticos de 60 Hz.....	38
Tabla 5.1. Niveles de referencia para la limitar la exposición a campos eléctricos y magnéticos de 60 Hz para líneas de alta tensión, medidos en el límite de su franja de servidumbre.....	59
Tabla 5.2. Ficha técnica para la medición de campos electromagnéticos E-1075.....	60
Tabla 5.3. Ficha técnica para la medición de campos electromagnéticos E-268.	61
Tabla 5.4. Ficha técnica para la medición de campos electromagnéticos E-0263.....	62
Tabla 5.5. Parámetros de corriente y tensión, página web de la Empresa Eléctrica Ambato S.A.....	63
Tabla 5.6. Resultados fase-neutro para la simulación del campo eléctrico.....	63
Tabla 5.7. Resultados de la densidad de corriente para la simulación del campo magnético.	63
Tabla 5.8. Resultados del campo eléctrico medidos y simulados de la estructura E-1075.	72
Tabla 5.9. Resultados del campo eléctrico medidos y simulados de la estructura E-1075.	74
Tabla 5.10. Resultados del campo eléctrico medidos y simulados de la estructura E-1075.	77
Tabla 5.11. Resultados del campo magnético medidos y simulados de la estructura E-0268.....	78
Tabla 5.12. Resultados del campo magnético medidos y simulados de la estructura E-0268.....	80
Tabla 5.13. Datos de CEM obtenidos en los cálculos y simulación.	82
Tabla 5.14. Contraste según normativa nacional en la estructura E-1075.	86
Tabla 5.15. Contraste según normativa internacional en la estructura E-0268.	87
Tabla 5.16. Contraste según normativa nacional en la estructura E-0268.	89

1. INFORMACIÓN GENERAL

Título: Evaluación de radiaciones no ionizantes generadas por las líneas de energía eléctrica de subtransmisión a 69 kV, en el eje de la subestación La Península - subestación Loreto ubicada en la ciudad de Ambato.

Fecha de inicio: octubre 2021

Fecha de finalización: marzo 2022

Lugar de ejecución: Cantón Ambato

Facultad que auspicia: Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas.

Carrera que auspicia: Carrera de Ingeniería Eléctrica.

Proyecto Macro Asociado: Estudios de campos electromagnéticos en Sistemas Eléctricos de Potencia: Caso Provincia de Tungurahua

Equipo de Trabajo:

Tutor de Titulación:

Ing. Jimmy Xavier Toaza Iza

Estudiante/s:

Tiban Mangui Ronny Daniel

Yanchapaxi Lloacana Alex Mecias

Área de Conocimiento: 07 Ingeniería, Industria y Construcción / 071 Ingeniería y Profesiones Afines / 0713 Electricidad y Energía.

Línea de investigación: Energías Alternativas y Renovables, Eficiencia Energética y Protección Ambiental.

Sublíneas de investigación de la Carrera:

Sublínea 1: Explotación y diseño de Sistemas Eléctricos de Potencia

Grupos Temáticos:

1. Planificación y operación de Sistemas Eléctricos de Potencia.
2. Sistemas de Transmisión y Distribución de energía.

2. INTRODUCCIÓN

2.1 EL PROBLEMA

2.1.1 Situación Problemática:

Un sistema eléctrico de potencia es un conjunto de dispositivos que convierte energía de una forma primaria a energía eléctrica, la transporta y la distribuye a los consumidores finales, por razones históricas y de eficiencia se adoptó en forma generalizada el uso de la corriente alterna, un sistema eléctrico de potencia está compuesto por tres componentes principales que son la generación, transmisión y distribución.

La transmisión es la parte encargada de transmitir grandes bloques de energía de los centros de producción a los centros de consumo, todos los elementos que conformen un sistema eléctrico de potencia, están siendo atravesados por una carga eléctrica en movimiento, es por esta razón que se convierten en una fuente de constante generación de radiación no ionizante, este tipo de radiación no ionizante se origina por el movimiento de cargas eléctricas, cuando hay corriente.

La presencia de las líneas de transmisión en las cercanías de los domicilios, a con llevado a que se hagan revisiones y estudios referentes acerca de los niveles que se generan de este tipo de radiación, y en base a esto evaluar los límites máximos y mínimos, a los cuales la población en general puede estar expuesta con referencias, en normas tanto nacionales como internacionales, ya que con el pasar del tiempo estas estructuras van quedando dentro del ámbito urbano.

En la actualidad los estudios en base a la radiación no ionizante originada por las líneas de transmisión de alto voltaje, que cruzan lugares urbanos del territorio ecuatoriano son escasos, y por ende son motivo de análisis, para realizar ciertos enfoques que ayuden a conocer, si los niveles de radiación cumplen o no cumplen las normativas vigentes.

2.1.2 Formulación del problema

La transmisión de energía eléctrica por las líneas de subtransmisión de alto voltaje, genera la presencia de radiaciones no ionizantes las cuales deben ser evaluadas en función de normativas establecidas por instituciones nacionales e internacionales.

2.2 OBJETO Y CAMPO DE ACCIÓN

El campo de acción para el proyecto: 330000 ciencias Tecnológicas / 3306 Ingeniería y Tecnología Eléctrica / 330609 Transmisión y Distribución.

2.3 BENEFICIARIOS:

2.3.1 Beneficiarios directos

Los beneficiarios directos de este estudio es la Empresa Eléctrica Ambato Regional Centro Norte (EEASA).

2.3.2 Beneficiarios indirectos

Los beneficiarios indirectos son los trabajadores operativos de la empresa eléctrica y la ciudadanía que tienen su domicilio en la ciudad de Ambato sector del eje subestación la Península-subestación Loreto

2.4 JUSTIFICACIÓN:

Las líneas de transmisión generan radiación no ionizante relativamente más altos que las líneas de distribución, dependiendo de su longitud y del nivel de tensión que esta traslade, por ende, la presente investigación evalúa las radiaciones no ionizantes que se generan en las líneas de subtransmisión a 69 kV, que cruzan por zonas urbanas residenciales.

Para el presente estudio se realiza una investigación teórica como práctica, basada en fuentes bibliográficas acerca de la generación, transmisión y de distribución de energía eléctrica, conceptos de ingeniería, conocimientos de S.E.P., procedimientos de mediciones de radiaciones no ionizantes en redes de alta y media tensión, aparatos de medición de CEM, software de simulación de CEM, esto ayudará a la validación de todos los datos tomados en campo e investigados acerca de las radiaciones no ionizantes generados por las líneas de subtransmisión a 69 kV.

Los CEM producen efectos ambientales, biológicos y afectaciones a la salud humana, los principales efectos biológicos que producen las radiaciones no ionizantes son calentamiento, ruido, alteración de las reacciones químicas o inducción de corrientes eléctricas en los tejidos, las exposiciones de los CEM a largo plazo pueden provocar respuestas biológicas e influir en el bienestar de las personas.

Por ende, se realizará este estudio para poder conocer si los niveles de CEM se encuentran dentro de las normativas nacionales e internacionales vigentes, siendo el caso

se puedan tomar acciones correctivas para su cumplimiento, y de esta forma poder dotar de un estudio confiable y sustentable acerca de las radiaciones no ionizantes que se generan en las líneas de transmisión, sirviendo de guía para estudios futuros.

2.5 HIPÓTESIS

En base a las mediciones tomadas por el equipo EMF 450 METER de los niveles de radiación no ionizante generadas en las líneas de transmisión del tramo subestación la Península-subestación Loreto, podemos determinar que el campo eléctrico y el campo magnético se encuentran dentro de los niveles permisibles emitidos por las normativas vigentes establecidas por el marco de la ley.

2.6 OBJETIVOS:

2.6.1 General

Evaluar las radiaciones no ionizantes generadas por las líneas de energía eléctrica de subtransmisión a 69 kV, en el eje de la subestación La Península - subestación Loreto ubicada en la ciudad de Ambato.

2.6.2 Específicos

Investigar información en base a fuentes bibliográficas relacionada con la medición de las radiaciones no ionizantes generadas en las líneas de energía eléctrica.

Determinar el campo eléctrico y magnético en el software FEMM, de las líneas de subtransmisión.

Realizar la medición de campos eléctricos y magnéticos con el equipo EMF 450 METER, en las líneas de transmisión a 69 kV

Validar las mediciones tomadas, simuladas y calculadas del campo eléctrico y magnético con las normativas establecidas a nivel nacional e internacional.

2.7 SISTEMA DE TAREAS

Tabla 1. Sistema de tareas en relación con el objetivo específico 1.

Objetivo específico 1	Actividad (tareas)	Resultados Esperados	Técnicas, Medios e Instrumentos
Investigar información en base a fuentes bibliográficas relacionada con la medición de las radiaciones no ionizantes generadas en las líneas de energía eléctrica.	Realizar una investigación bibliográfica relacionada a las metodologías y técnicas usadas para la medición y cálculo del campo eléctrico y magnético.	Obtención de información adecuada y clara para las metodologías y factores que inciden en este estudio.	<ul style="list-style-type: none"> • Tesis • Revistas • Artículos • Documentos • Libros • Normativas

Tabla 2. Sistema de tareas en relación con el objetivo específico 2.

Objetivo específico 2	Actividad (tareas)	Resultados Esperados	Técnicas, Medios e Instrumentos
Determinar el campo eléctrico y magnético en el software FEMM, de las líneas de subtransmisión.	Validación de los datos calculados, y simulados. Aplicación de un software para simular el campo eléctrico y magnético.	Evaluación de las mediciones simuladas y calculadas con los valores de normativas.	<ul style="list-style-type: none"> • Excel • Metodología de cálculos • Programa FEMM • Normativa

Tabla 3. Sistema de tareas en relación con el objetivo específico 3.

Objetivo específico 3	Actividad (tareas)	Resultados Esperados	Técnicas, Medios e Instrumentos
Realizar las mediciones de campos eléctricos y magnéticos con el equipo EMF 450 METER, en las líneas de transmisión de 69 Kv.	Tomar mediciones del campo magnético y eléctrico con el equipo especializado EMF 450 METER	Analizar las mediciones tomadas y comprobar si se encuentran dentro de la normativa	<ul style="list-style-type: none"> • Equipo de medición EMF 450 METER • Normativas

Tabla 4. Sistema de tareas en relación con el objetivo específico 4.

Objetivo específico 4	Actividad (tareas)	Resultados Esperados	Técnicas, Medios e Instrumentos
Validar las mediciones tomadas, simuladas y calculadas del campo eléctrico y magnético con las normativas establecidas a nivel nacional e internacional.	Investigar acerca de las normativas vigentes y necesarias para realizar una evaluación y comparación con las mediciones tomadas.	Registro optimo y análisis de las mediciones tomadas tanto del campo eléctrico y magnético a través del equipo EMF 450 METER.	<ul style="list-style-type: none"> • Fotos • Equipo de medición EMF 450 METER • Apuntes

3. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

3.1 ANTECEDENTES

Las radiaciones de los (CEM) han estado presentes en forma natural desde el inicio de la humanidad, manifestándose en forma de campo eléctrico atmosférico y campo magnético terrestre, esta era la única manera a la que una persona podía estar expuesta, pero con el desarrollo de la tecnología y la consecuente aparición de la electricidad en todos los ámbitos de la vida, se han generado campos eléctricos y magnéticos de una forma distinta a la que se deriva de la naturaleza, envolviendo a las comunidades en un nuevo ambiente [1].

El consumo de energía eléctrica ha pasado a formar parte integrante de la vida cotidiana, siempre que hay un flujo de electricidad, se crean campos eléctricos y magnéticos junto a los conductores que la transportan, así como alrededor de los dispositivos que la consumen, desde finales de los años setenta, se han plantado interrogantes sobre si la exposición a los campos magnéticos y eléctricos de muy baja frecuencia (CEM) tiene consecuencias adversas para la salud, desde entonces, se han llevado a cabo numerosos estudios, que han contribuido a resolver cuestiones importantes y a focalizar mejor las investigaciones futuras [2].

Se ha suscitado un considerable debate sobre los posibles efectos adversos para la salud entre los trabajadores que utilizan equipos que funcionan en este intervalo de frecuencias. La frecuencia más común es con mucho la de 50/60 Hz, utilizada para la generación, transmisión y distribución de energía eléctrica. Los medios de información, la distribución de información inexacta y el debate científico en curso han alimentado la preocupación por la posibilidad de que la exposición a campos magnéticos de 50/60 Hz pueda estar relacionada con un aumento de la incidencia de cáncer esto en base a estudios previamente realizadas [3].

Si bien existen recomendaciones realizadas por organismos internacionales sobre niveles límite de exposición, tales como las guías de la Comisión Internacional de Protección contra Radiaciones No Ionizantes (*International Commission on Non-Ionizing Radiation*, ICNIRP), adoptada por la Directiva 2004/40/CE, o de IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*), éstas se basan en los efectos a corto plazo, por lo que los estudios más recientes se centran en determinar si por debajo de los niveles

establecidos de exposición pueden existir efectos perjudiciales para la salud humana, siendo éste el principal aspecto de incertidumbre en la temática tratada [2].

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

Las medidas realizadas por el centro de investigación CIEMAT (Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas) en una línea de 400 Kv redacta que en la vertical del punto medio entre apoyos para las líneas españolas de mayor tensión (400 kV) proporcionan valores de 3-10 kV/m para el campo eléctrico y 1-20 μT para el campo magnético. Estos valores decrecen con la distancia a la línea, de manera que el rango de valores a 100 metros de distancia es de 0,02-0,15 kV/m para el campo eléctrico y de 0,02-0,30 μT para el campo magnético [5].

En el escrito [6] (modelación, simulación y medición de los campos electromagnéticos en una línea de extra alto voltaje mediante el método de elementos finitos, caso de aplicación a línea de transmisión de 500 kV San Rafael - El Inga) plasma el informe final respecto a la simulación de campos eléctricos y magnéticos en la línea de transmisión de 500 Kv, San Rafael-El Inga, propiedad de CELEC EP. en este proyecto se encontró los niveles de campo electromagnético en la línea de transmisión para verificar el cumplimiento de los límites establecidos en el reglamento técnico y de normativas eléctricas, para la ejecución de mencionado trabajo se hizo uso del software FEMM (*Finite Element Method Magnetics*), con él se pudo obtener una exactitud aceptable para las zonas urbanas evaluadas, es decir a metros de los componentes de la línea de transmisión energizados [6].

El sistema de la EEASA en la ciudad de Tungurahua se enlaza al S.N.I a través de dos nodos, situado en las S/E Totoras SNI, Transelectric, 230/138/69 KV y la S/E Ambato SNI, Transelectric, 138/69 KV, el sistema de subtransmisión de la EEASA permite llevar la energía eléctrica desde sus fuentes de suministro (centrales de generación y nodos SNI) hasta sus centros de carga o subestaciones, mediante líneas eléctricas con niveles de voltaje que van desde 69 KV hasta 13.8 KV, bajo un esquema eléctrico de tipo anillo [7].

La Corporación eléctrica del Ecuador, CELEC EP unidad de negocio TRANSELECTRIC en el año 2012 realizó un estudio de impacto ambiental que producen las subestaciones eléctricas para determinar los niveles de campos eléctricos y magnéticos a los que están expuestos los trabajadores de cada una de las S/E y los alrededores de las mismas, se realizó la medición de la Intensidad de Campo Eléctrico, Intensidad de Campo Magnético y Densidad de Flujo Magnético de acuerdo a lo estipulado en la Norma de Radiaciones No Ionizantes de Campos Electromagnéticos [4].

La línea de subtransmisión que comprende el eje de la subestación La Península-subestación Loreto, es conformada por dos subestaciones una elevadora y una reductora de 4.16/6.9 a 13.8 que es la parte de la Península y 69 a 13,8 Kv, que es la parte de Loreto, la línea de subtransmisión tiene un tramo de 0.42983 Km en doble circuito, configuración simple y con un conductor ACAR 300 MCM, y un tramo de 0.60186 Km en circuito simple, configuración simple y con un conductor ACAR 300 MCM, en este sentido estudios referentes a la generación de radiaciones no ionizantes generadas por dicha línea no existen por falta de recursos y estudios técnicos previos.

En la actualidad, con el desarrollo social y económico en el país, ha incrementado las radiaciones no ionizantes generadas por las líneas de transmisión debido al crecimiento de la demanda en el consumo de energía eléctrica, en el país existe una escasa fuente de investigación acerca de este tipo de fenómenos, en este sentido, y con el fin de que las distintas empresas distribuidoras del servicio eléctrico puedan suministrar el servicio eléctrico de una manera adecuada, esta investigación busca evaluar la radiación no ionizante generada por las líneas de transmisión, y observar si los niveles cumplen con los parámetros establecidos por las normativas vigentes.

3.2 SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA

El sistema eléctrico de potencia (SEP) es una red interconectada, que brinda la capacidad necesaria para abastecer a todas las cargas que se encuentran haciendo uso de la energía eléctrica.

El sistema eléctrico de potencia se encuentra conformado por tres sistemas importantes las cuales son: sistemas de generación, sistemas de transmisión y sistemas de distribución. Estos sistemas deben encontrarse en los niveles requeridos de calidad de la energía tanto para su transmisión como para su utilización [8].

El punto de inicio de los sistemas eléctricos de potencia son las plantas generadoras que convierten una energía primaria en energía eléctrica; esta energía es transmitida a grandes distancias hacia los grandes centros de consumo mediante sistemas de transmisión; finalmente, los sistemas de distribución son los responsables de entregar la energía al cliente. Tradicionalmente, los servicios públicos se han centrado con mayor énfasis en mejorar la fiabilidad de la generación y de los sistemas de transmisión. Sin embargo, con el concepto moderno de red inteligente en el que el sistema eléctrico se considera de manera integral, sumado a ello las medidas reglamentarias emitidas por el ente regulador, han cambiado el enfoque de los sistemas de distribución [9].



Figura 3.1. Diagrama esquematizado del sistema eléctrico [9].

3.3 SISTEMA NACIONAL DE TRANSMISIÓN SNT

Es el sistema integrado por los elementos del sistema eléctrico conectados entre sí, el cual permite la producción y transferencia de energía eléctrica entre centros de generación, centros de consumo y nodos de interconexión internacional, dirigido a la prestación del servicio público de energía eléctrica, no incluye la distribución de electricidad [10].

Es el sistema de intercambio entre los centros de generación y los consumidores de energía eléctrica, que permite el intercambio de energía en todo el territorio nacional. Las líneas de transmisión y las subestaciones son los principales componentes del sistema de transmisión.

Según CELEC-EP TRASNELECTRIC, 2014 El Sistema Nacional de Transmisión está compuesto por subestaciones y líneas de transmisión a lo largo de todo el territorio nacional [11].



Figura 3.2. Sistema Nacional de Transmisión [12].

Artículo 42.- De la transmisión. - La actividad de transmisión de electricidad a nivel nacional será realizada por el Estado a través de la respectiva empresa pública.

Será obligación de la empresa pública encargada de la transmisión, expandir el Sistema Nacional de Transmisión, sobre la base de los planes elaborados por el Ministerio de Electricidad y Energía Renovable [10].

3.3.1 Líneas de transmisión

La línea de transmisión de energía eléctrica es un tramo radial entre dos subestaciones consistente de un conjunto de estructuras, conductores y accesorios que forman una o más ternas de conductores diseñadas para operar a voltajes mayores de 40 kV [13].

Una línea de transmisión aérea consiste principalmente de estructuras de soporte (torres o postes) de las cuales los conductores eléctricos son suspendidos por medio de un juego de aisladores. Cada juego de aisladores soporta uno o un arreglo de conductores los cuales llevan una fase eléctrica del suministro de potencia. Los conductores de cada fase son suspendidos y separados de los otros conductores y de la torre de transmisión para prevenir el flashover y corto circuitos entre una fase y otra, o entre la fase y tierra (usando como medio de aislamiento el aire) [14].

Una línea de transmisión de electricidad tiene cuatro parámetros que afectan su capacidad para cumplir su función como parte de un sistema de potencia: resistencia, inductancia, capacitancia y conductancia [15].

- a. **La resistencia** produce una caída de voltaje del tipo I^2R (Efecto Joule), afectando la regulación de voltaje en la línea de transmisión.
- b. **Inductancia** este parámetro está determinado por el campo magnético generado por la propia cercanía de los conductores y depende principalmente de la geometría de la disposición de los mismos.
- c. **Capacitancia** este parámetro está relacionado con el campo eléctrico de los conductores y se presenta debido a la diferencia de potencial entre estos y respecto a tierra, que hace que la línea de transmisión se comporte como un capacitor.
- d. **Conductancia** es provocado por las corrientes de fuga que fluyen a través de la contaminación de los aisladores y al fenómeno efecto corona [16].

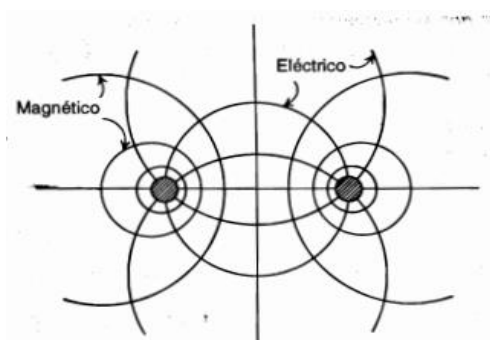


Figura 3.3. Campos magnéticos y eléctricos asociados con una línea de dos conductores [15].

La inductancia del circuito relaciona el voltaje inducido por el flujo variable con la razón de cambio de la corriente.

La capacitancia que se presenta entre los conductores se define como su carga por unidad de diferencia de potencial entre ellos.

La resistencia y la inductancia uniformemente distribuidas a lo largo de la línea constituyen la impedancia seria.

La conductancia y la capacitancia que se presentan entre conductores de una línea monofásica o desde un conductor al neutro de una línea trifásica constituyen la admitancia paralela. Aunque la resistencia, inductancia y capacitancia están distribuidas, el circuito equivalente de una línea se hace con parámetros concentrados, como se verá cuando llegue el momento de su análisis [15].

3.4 RADIACIÓN NO IONIZANTE

Son ondas de radiación cuya energía no es lo suficientemente fuerte para alterar la estructura de una molécula o un átomo quitándole uno o más electrones. La radiación no ionizante se puede clasificar en dos grupos: la radiación óptica y los campos electromagnéticos [14].

- Entre las radiaciones ópticas se pueden mencionar los rayos láser, los rayos infrarrojos, la luz visible y la radiación ultravioleta. Se ha comprobado que estas radiaciones producen efectos biológicos, por ejemplo: calentamiento, alteración de las reacciones químicas o inducción de corrientes eléctricas en los tejidos y las células.
- Dentro de los campos electromagnéticos se pueden distinguir aquellos generados por las líneas de transmisión de alta tensión o por campos eléctricos estáticos, las ondas de radiofrecuencia utilizadas por las estaciones de radio en sus transmisiones, y las microondas utilizadas en electrodomésticos y en el área de las telecomunicaciones.

A frecuencias menores de 300 MHz la exposición a la radiación de los campos electromagnéticos de baja frecuencia, tiene significado únicamente cuando se emplea la condición de “campo próximo” ya que la exposición se caracteriza principalmente por campos eléctrico y magnético [14].

3.4.1 Campos electromagnéticos

Los campos electromagnéticos existen en el ambiente y provienen de diversas fuentes naturales y artificiales. Sólo se diferencian por la frecuencia de su condición alterna que va desde los campos estáticos de frecuencia 0, pasando por la baja frecuencia o frecuencia industrial 50 o 60 Hz, la radiofrecuencia, televisión, microondas, radar, luz infrarroja, luz

visible, luz ultravioleta, Rayos X y Rayos Gamma. Estos dos últimos son del tipo ionizantes con frecuencias superiores a los trillones de Hz [17].

Se denominan a los campos eléctricos, magnéticos y electromagnéticos variables en el tiempo, de frecuencias de hasta 300 GHz [13].

Una onda electromagnética tiene una componente eléctrica y otra magnética. Radiación significa simplemente energía transmitida por ondas electromagnéticas, que son ondas de fuerzas eléctricas y magnéticas.

La carga eléctrica es una propiedad auténtica de la materia, porque está constituida esencialmente de átomos, y estos están compuestos de electrones, protones y neutrones, los electrones tienen carga negativa mientras que los protones tienen carga positiva y los neutrones carecen de carga [18].

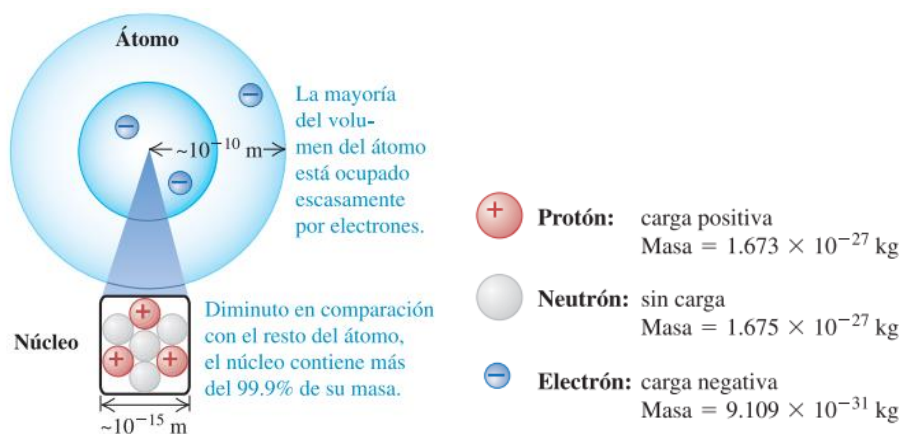


Figura 3.4. Estructura y partes del átomo [18].

Las radiaciones se caracterizan por parámetros que incluyen:

- Frecuencia:** se define como el número de cambios completos por segundo del campo eléctrico o magnético en un punto dado y se expresa en Hercio (Hz).
- Longitud de onda (λ):** es la distancia entre dos crestas o dos valles consecutivos de la onda (máximos o mínimos). Se expresa en nanómetro (nm), milímetro (mm), centímetro (cm), metro (m), kilómetro (km).
- Intensidad del campo eléctrico (E):** corresponde a la fuerza ejercida sobre una partícula cargada independientemente de su movimiento en el espacio. Se expresa en voltio o kilovoltio por metro (V/m o kV/m).

- d) Intensidad de campo magnético (H):** es correspondiente con la fuerza que recibe una carga que se mueve en un entorno próximo a una corriente eléctrica o un campo magnético estático en el vacío. Se puede expresar en amperes por metro (A/m).
- e) Densidad de flujo magnético o inducción magnética (B):** es la intensidad de campo magnético que se genera sobre las cargas que se mueven en un medio no vacío. Se expresa en teslas (T), militeslas (mT), microteslas (μT) o gauss (G) y miligauss (mG); donde $1 G = 100 \mu T$ y $1 mG = 0,1 \mu T$.
- f) La velocidad (v) de una onda electromagnética:** es la velocidad de la luz, su frecuencia (f) y longitud de onda (λ) están relacionadas en la siguiente ecuación [19].

$$v = f \cdot \lambda \quad (3.1)$$

Al existir una carga positiva y una carga negativa se dice que estas se atraen, mientras que, si son dos cargas iguales, ya sean positivas o negativas, estas tienden a repelerse, sin embargo, hay que tener en cuenta que al mencionar cargas iguales no significa que ambas cargas sean idénticas, sino solamente comparten el mismo signo algebraico, la expresión cargas opuestas señala que los ambos objetos tienen carga eléctrica de signos distintos [18].

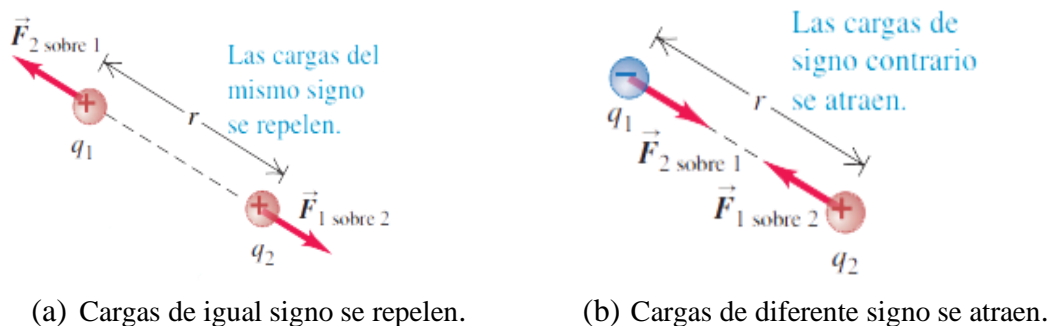


Figura 3.5. Interacciones entre cargas [18].

En 1785 Charles Augustin Coulomb midió por primera vez cuantitativamente las atracciones y repulsiones eléctricas utilizando la balanza de torsión, donde llegó a la siguiente ley: La magnitud de la fuerza eléctrica entre dos cargas puntuales es directamente proporcional al producto de las cargas e inversamente proporcional al

cuadrado de la distancia que los separa, actualmente es conocida como Ley de Coulomb [18].

$$\mathbf{F} = k \frac{|q_1 q_2|}{r^2} \quad (3.2)$$

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

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \quad (3.3)$$

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

$$\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \left[\frac{\text{C}^2}{\text{Nm}^2} \right] \quad (3.4)$$

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

$$F = \frac{|q_1 q_2|}{4\pi\epsilon_0 \cdot r^2} \text{ [N]} \quad (3.5)$$

3.4.2 Campo Eléctrico

El concepto del campo eléctrico nació de la necesidad de explicar el fenómeno de las fuerzas a distancia entre dos o más partículas por lo que se define al campo como la región espacial donde se presenta una magnitud física y eléctrica. En consecuencia, el campo eléctrico es la fuerza que se manifiesta por medio del rechazo o atracción de cuerpos cargados; brinda una idea de la intensidad de fuerza eléctrica que sufriría una carga ubicada en un sitio determinado [6]

Son líneas de fuerza invisibles producidas por diferencias de potencia. Se pueden bloquear con facilidad y disminuyen conforme aumenta la distancia de la fuente emisora. Se miden en voltios por metro (V/m) [20].

Este campo es producido por la presencia de cargas eléctricas (electrones) directamente proporcional al voltaje (volts o kilovolts), decreciendo rápidamente al aumentar la distancia de las cargas eléctricas.

Una característica que presenta el campo eléctrico es su facilidad para ser blindado, de modo que el campo no penetre en el interior de un cuerpo. El blindaje o apantallamiento de estos campos se logra encerrando el cuerpo con una malla o superficie conductora o semiconductor, que establece un voltaje único en la superficie exterior del volumen (jaula de Faraday) [17].

El campo eléctrico E , existe siempre que estén presentes partículas eléctricamente cargadas, la carga de estas puede ser positiva o negativa (protones y electrones) las mismas ejercen fuerzas una sobre la otra. Si dos partículas de carga opuesta están presentes ejercerán una fuerza de atracción. Al contrario, si dos partículas de carga de igual signo están presentes la fuerza será de repulsión. El concepto que relaciona la fuerza eléctrica entre partículas es el campo eléctrico [14].

La unidad para el potencial eléctrico es el Voltio (V), pero dado que la diferencia de potencial es definida en términos del trabajo hecho por el campo eléctrico a mover una carga de prueba entre dos puntos, también tiene unidades de trabajo por unidad de carga, esto es, la fuerza por unidad de carga multiplicada por la distancia. Si las unidades para el campo eléctrico son fuerza por unidad de carga, entonces los Voltios = campo eléctrico x distancia (metros). Así un conjunto de unidades apropiadas para medir el campo eléctrico es el voltio por metro (V/m) [14].

Los campos pueden transmitir energía y cantidad de movimiento. Esto significa que, aunque las acciones y reacciones actúan sobre dos cuerpos no sean, en todo momento, exactamente iguales y opuestas, no hay violación de la conservación de la cantidad de movimiento. En primera instancia, podremos evitar algunos problemas de las teorías de acción a distancia, considerando solo situaciones en las cuales nuestros sistemas físicos alcanzaron un estado estacionario: las fuerzas ya no cambian en el tiempo [21].

El valor del campo eléctrico es función de la tensión del sistema eléctrico; es decir, cuanto mayor sea la tensión del dispositivo más intenso será el campo eléctrico que genere [22].

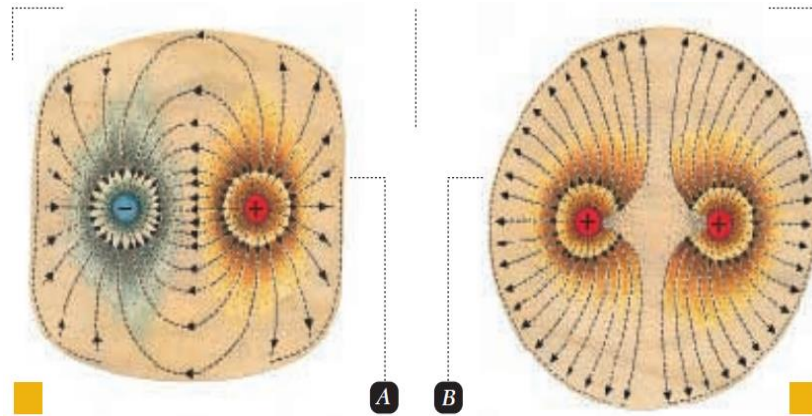


Figura 3.6. A) Líneas de campo eléctrico entre dos cargas iguales y de signo opuesto.
 B) Líneas de campo eléctrico entre dos cargas iguales y del mismo signo [22].

Veamos cómo se define un campo de fuerzas eléctricas. Consideremos que tenemos N cargas, numeradas q_1 a q_N , colocadas en posiciones dadas por los vectores \vec{r}_1 a \vec{r}_N . Queremos medir la fuerza que estas cargas ejercen sobre una carga de prueba.

Experimentalmente se encontrará que las fuerzas eléctricas disfrutan de la propiedad de superposición: la fuerza eléctrica que actúa sobre la carga de prueba q , situada en una posición \vec{r} , es simplemente la suma vectorial de todas las fuerzas ejercidas sobre ella por cada una de las N cargas tomadas como aisladas. Así, la fuerza que actúa sobre la carga de prueba está dada por:

$$\vec{F}(\vec{r}) = q \sum_{i=1}^N \frac{q_i}{4\pi\epsilon_0} \frac{(\vec{r} - \vec{r}_i)}{|\vec{r} - \vec{r}_i|^3} \quad (3.6)$$

Resulta conveniente definir un vector $\vec{E}(\vec{r})$, llamado el campo eléctrico, que es la fuerza que se ejercería sobre la carga de prueba de valor una unidad (1 coulomb), situada en la posición \vec{r} . La fuerza sobre otra carga q sería:

$$\vec{F} = q\vec{E} \quad (3.7)$$

Y el campo eléctrico estará dado por:

$$\vec{E}(\vec{r}) = \sum_{i=1}^N \frac{q_i}{4\pi\epsilon_0} \frac{(\vec{r} - \vec{r}_i)}{|\vec{r} - \vec{r}_i|^3} \quad (3.8)$$

Las unidades son *newton/coulomb* para el campo eléctrico.

El campo eléctrico generado por una carga q , situada en el origen de coordenadas, es puramente radial; si la carga que lo origina es positiva, apuntara hacia afuera; si es negativa, apuntara hacia adentro. Tiene la magnitud:

$$E_r(r) = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 \cdot r^2} \quad (3.9)$$

Donde $r = |\vec{r}|$, la magnitud del vector posición.

Faraday imaginaba líneas cuyas tangentes en cada punto serían paralelas al campo eléctrico en ese punto, con flechas en las líneas para marcar esta dirección. Por ejemplo, el campo de una carga positiva aislada, lejos de otras cargas, tiene líneas que salen en forma radial de la carga. En el caso de una carga negativa, las líneas apuntan hacia la carga. Tal definición de las líneas de campo implica dos propiedades. La primera es que, bajo condiciones estáticas, una línea debe comenzar en una carga positiva y terminar en una negativa. La segunda es que dos líneas no se pueden cruzar [21].

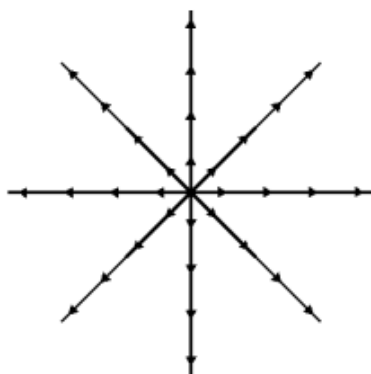


Figura 3.7. Líneas de campo eléctrico [21].

En un punto dado en el espacio, la relación de la fuerza sobre una carga de prueba positiva colocada en el punto y la magnitud de la carga de prueba, en el límite en que la magnitud de la carga de prueba llega a cero. La intensidad del campo eléctrico en un punto en el espacio es un vector definido por sus componentes espaciales a lo largo de tres ejes ortogonales. Para campos sinusoidales de estado estacionario, cada componente del espacio es un número complejo o fasor. Las magnitudes de los componentes,

expresadas por sus valores de raíz cuadrada media (rms) en voltios por metro (V / m), y las fases no necesitan ser las mismas [23].

Nota: Los componentes del espacio (fasores) no son vectores. Los componentes del espacio tienen un ángulo dependiente del tiempo, mientras que los vectores tienen ángulos de espacio. Por ejemplo, el campo eléctrico sinusoidal E se puede expresar en coordenadas rectangulares como:

$$\vec{E} = \hat{a}_x E_x + \hat{a}_y E_y + \hat{a}_z E_z \quad (3.10)$$

3.4.3 Ecuaciones de Maxwell

Es claro que usando las ecuaciones propuestas por James Clerck Maxwell en el año de 1873 llamadas Ecuaciones de Maxwell, las leyes correspondientes a Gauss, Coulomb, Ampere, Faraday, entre otros, pueden ser resumidas desde otro punto de vista. A partir de las mismas se describen todos los fenómenos electromagnéticos tales como:

3.4.3.1 Densidad de carga y campo eléctrico

La ley de Coulomb para cargas estacionarias en el vacío corresponde a la primera ecuación de Maxwell, la misma describe el comportamiento de campo eléctrico debido a cargas en reposo. Usando el Teorema de Divergencia conocido como Ley de Gauss, su forma integral equivalente es calculada tal como [1]:

$$\oint_S \vec{D} \cdot d\vec{A} = Q_{\text{encerrada}} \quad (3.11)$$

3.4.3.2 Campo eléctrico debido a carga puntual aislada

El campo eléctrico alrededor de una carga puntual aislada se calcula por medio de la relación mostrada en la ecuación [6].

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \vec{r}_1 \quad (3.12)$$

Donde \vec{r}_1 es el vector unitario que indica la dirección de la recta que une cada carga q .

La Figura 3.8. presenta que la dirección del campo eléctrico en una carga puntual positiva es hacia afuera mientras que la de la carga puntual negativa es hacia dentro [6].

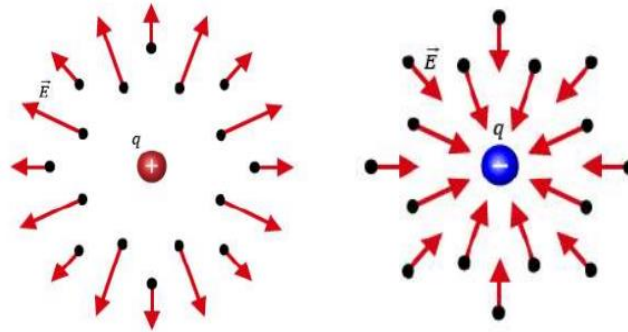


Figura 3.8. Esquema que representa a dirección del campo debido a una carga puntual positiva y una carga puntual negativa [6].

3.4.3.3 Campo eléctrico debido a carga no puntual

El campo eléctrico proveniente de una carga no puntual se calcula imaginando una distribución de carga que se encuentra subdividida en muchos elementos de carga dq , ecuación (3.13) considerando las diferentes distancias desde el punto del cual se desea calcular el campo [6].

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{dq}{r^2} \vec{r}_1 \quad (3.13)$$

Donde:

r = Distancia entre dq y la posición de interés.

\vec{r}_1 = Vector unitario que indica la dirección de la recta que une cada carga q .

3.4.3.4 Campo eléctrico debido a un sistema de carga distribuidas

Al tener un sistema de cargas distribuidas en el espacio (Figura 3.9), el campo eléctrico se calcula en base al principio de superposición [6].

$$\vec{E}_p = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_n \quad (3.14)$$

Siendo así el campo eléctrico es el resultante de una suma vectorial de los campos eléctricos de cada una de las cargas.

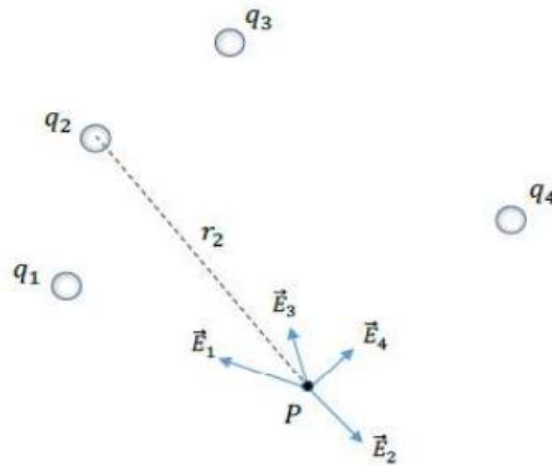


Figura 3.9. Campo eléctrico debido a un sistema de cargas puntuales [6].

3.4.3.5 Líneas de campo eléctrico

Las líneas del campo eléctrico no son objetos materiales, al contrario, son una representación gráfica que describe cualitativamente al campo eléctrico. Relacionan al campo eléctrico con una región en el espacio así:

- El vector del campo eléctrico \vec{E} es tangente a la línea del campo eléctrico en cada punto. La dirección que tiene la línea se muestra por medio de la punta de la flecha, es igual al vector del campo eléctrico. La dirección de la línea representa la fuerza sobre la carga positiva que se encuentra en el campo.
- El número de las líneas por unidad de área que atraviesan una superficie perpendicular a dichas líneas es proporcional a la magnitud del campo eléctrico en dicha región. Por lo que las líneas del campo estarán más juntas donde el campo eléctrico es más intenso y estarán más separadas donde el campo eléctrico sea más débil [6].

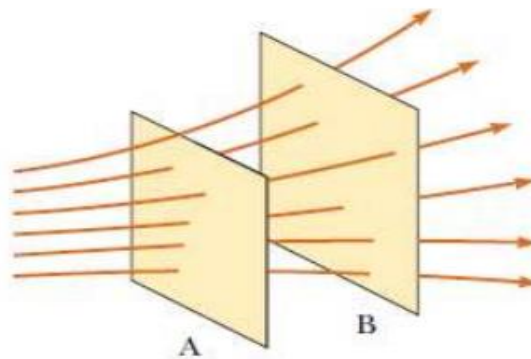


Figura 3.10. Líneas del campo eléctrico que atraviesan dos superficies [6].

Como se observa en la Figura 3.10 la densidad de las líneas de campo a través de la superficie A es mayor a que la densidad de las líneas de campo de la superficie B debido a que la magnitud del campo eléctrico en A es mayor que en B [6].

3.4.3.6 Ley de Gauss para el campo eléctrico

De la definición de campo se puede deducir un teorema muy interesante. Es llamado la ley de Gauss. Para justificarlo en un caso simple, consideremos una carga q , situada en el origen de coordenadas, que genera un campo eléctrico alrededor suyo. Calculemos ahora el flujo del campo eléctrico en una superficie esférica S , de radio r , centrada también en el origen [21].

La Ley de Gauss es de mucha importancia para estudiar los campos eléctricos ya que describe la relación que existe entre el flujo eléctrico neto a través de una superficie cerrada y la carga encerrada por la superficie [6].

Al suponer una carga puntual positiva q que se encuentra ubicada en el centro de una esfera de radio r , la magnitud del campo eléctrico en todos los puntos de una superficie es igual a la mostrada en la ecuación (3.15).

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \quad (3.15)$$

Las líneas de campo se dirigen radialmente hacia afuera siendo así perpendiculares a la superficie en todos sus puntos, como se presenta en la Figura 3.11. Por lo que, en cada punto de la superficie el vector del campo eléctrico es paralelo al vector del área, donde representa un elemento de área local, el cual está rodeando al punto en la superficie [6].

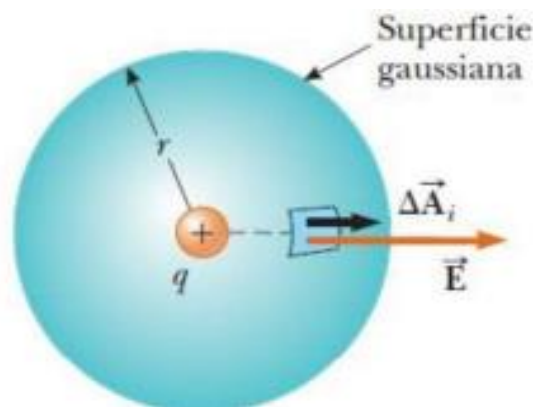


Figura 3.11. Superficie gaussiana esférica de radio r que rodea una carga puntual q [6].

3.4.4 Campo Magnético

El campo magnético no es más que la representación matemática que describe la cantidad de fuerza ejercida en una carga en movimiento. Esta representación permite describir la distribución de una fuerza magnética en el espacio dentro y fuera de algo magnético. Todas las fuentes del campo magnético son bipolares por naturaleza, poseen un polo norte y un polo sur (positivo y negativo).

Al existir una fuente de energía, habrá a su alrededor un campo magnético, que describe cómo actúan estas fuerzas magnéticas. El campo magnético es una magnitud vectorial que posee módulo y dirección. Cada vector apunta la dirección en la que lo haría una brújula y su magnitud depende de la fuerza magnética a la que se encuentra sometido.

La intensidad de campo magnético H , además se define como un vector de campo de la densidad de flujo magnético B . Tanto H como B se relacionan mediante μ , (ecuación (3.16)), que no es más que la permeabilidad magnética del aire [6].

$$B = \mu H \quad (3.16)$$

En este punto en la consideración de las interacciones entre corrientes eléctricas podemos introducir un concepto de campo. En la introducción del concepto de campo eléctrico, después de considerar fuerzas entre cargas, encontramos que las fuerzas son proporcionales a la carga sobre la que medimos la fuerza. Ahora son proporcionales a la intensidad de la corriente.

La siguiente ecuación muestra que la fuerza sobre un elemento de corriente $I_2 \vec{dl}_1$ es proporcional a la magnitud de este elemento, lo que nos permite definir un campo, en forma análoga al campo eléctrico, pero con características diferentes, como veremos [21].

$$d^2\vec{F}_{21} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{4\pi} \left(\vec{dl}_2 \times \frac{\vec{dl}_1 \times \hat{R}}{|\hat{R}|^2} \right) \quad (3.17)$$

El campo que definiremos relaciona la fuerza sobre un elemento de corriente con el elemento:

$$d\vec{F}_{21} = I_2 d\vec{l}_2 \times \vec{B} \quad (3.18)$$

El campo \vec{B} se denomina “densidad de flujo magnético” Las dimensiones \vec{B} en el SI son, de acuerdo con la ecuación anterior, newton por amperio por metro y la unidad se denomina tesla (T). La ecuación (3.18) sugiere, en principio, un método para determinar \vec{B} ; no necesitamos saber cómo se está generando el campo \vec{B} para medir la fuerza debida a él. Resulta más complicado que en el caso eléctrico, en primer lugar, porque la determinación de la fuerza sobre un elemento de un circuito presenta dificultades, pero además porque hay un producto vectorial en su definición.

La definición (3.18) lleva a una expresión para la fuerza sobre un circuito completo que queda de la siguiente manera [21]:

$$\vec{F}_{21} = I_2 \oint_2 \vec{dl}_2 \times \vec{B} \quad (3.19)$$

Cuando se conocen las corrientes que generan el campo \vec{B} , la ley de Biot y Savart nos muestra que el campo se puede calcular a partir de esas corrientes como:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} I_1 \oint_1 \frac{d\vec{l}_1 \times \vec{R}}{R^3} \quad (3.20)$$

A partir de la ecuación (3.18) se puede ver que la fuerza sobre un elemento de corriente es perpendicular al elemento y también a \vec{B} . El orden en los factores de este producto vectorial debe ser tomado con cuidado para no obtener un cambio indeseable en la dirección de la fuerza calculada.

Una comparación con el campo calculado para el caso de una corriente en un alambre recto infinito muestra que la magnitud de ese campo está dada por:

$$B = \frac{\mu_0 I_1}{4\pi x} \quad (3.21)$$

La densidad de flujo magnético asociado a una corriente en un alambre infinito tiene una magnitud B que decae con el inverso de la distancia al alambre. Pero hay que prestar atención a la dirección de este campo: si dibujamos una línea continua de manera que el campo \vec{B} sea siempre tangente a esta línea, esta será una circunferencia. Aunque tal campo

circular es solo un caso especial debido a la geometría simple del alambre, veremos como hecho general que tales líneas no tienen extremo: son líneas cerradas sobre sí mismas. Suelen dibujarse diagramas de líneas de campo para \vec{B} lo mismo que para \vec{E} en la electrostática, como ayuda eficaz para la comprensión de la forma del campo [21].

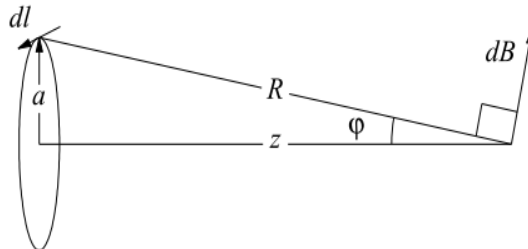


Figura 3.12. Sobre el campo generado por una corriente en un anillo [21].

3.4.4.1 Campo magnético proveniente por un conjunto de cargas en movimiento (corriente eléctrica).

El movimiento de cargas eléctricas en un conductor genera un campo magnético alrededor de este. Al incrementar la corriente que pasa por el conductor la magnitud del campo magnético se incrementa y disminuye al aumentar la distancia con respecto al conductor. Este campo, cuya unidad es el Tesla, puede ser representado y calculado mediante la Ley de Biot-Savart relacionando el valor del campo magnético con las corrientes que lo producen [6].

3.4.4.2 Ley de Biot-Savart

El físico francés Jean Biot dedujo una ecuación que permite calcular el campo magnético H creado por un circuito recorrido por una corriente de intensidad I . Esta ley propone que el diferencial de intensidad del campo magnético, dH , se produce por un elemento diferencial de corriente IdL . El campo varía inversamente proporcional con el cuadrado de la distancia, es independiente del medio que le rodea y tiene la dirección dada por el producto cruz de IdL y a_R [6].

$$dH = \frac{IdL \times a_R}{4\pi R^2} \quad (3.22)$$

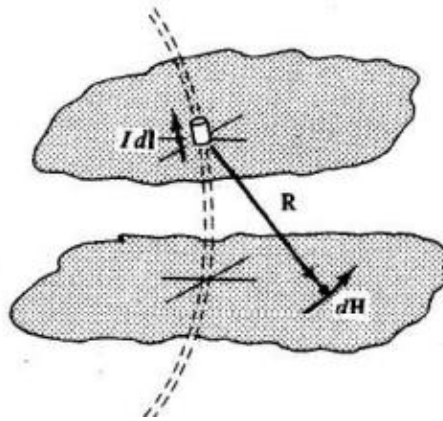


Figura 3.13. Filamento de un alambre infinito por el que circula una corriente [6].

En pocas palabras, esta ley establece que en cualquier punto P la magnitud de la intensidad del campo magnético que produce el elemento diferencial es proporcional al producto de la corriente, la magnitud del diferencial de longitud y el seno del ángulo formado entre el filamento y la línea que lo conecta con el punto P en donde se busca el campo. Gráficamente esta ley se encuentra indicada en la Figura 3.13.

Ahora bien, cada elemento que conforma el filamento de corriente contribuye a H obteniéndose así una suma infinitesimal [6]. Esta sumatoria conduce a la forma integral de la ley de Biot-Savart, ecuación (3.23).

$$\mathbf{H} = \oint \frac{Id\mathbf{L} \times \mathbf{a}_R}{4\pi R^2} \quad (3.23)$$

3.4.4.3 Campo magnético resultante

La cantidad vectorial (B -campo) de divergencia cero en todos los puntos, lo que determina la componente de la fuerza de Coulomb-Lorentz, que es proporcional a la velocidad del portador de carga.

Nota: En un campo eléctrico cero, la fuerza F es dado por $\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$ donde \vec{v} es la velocidad de la carga eléctrica q . Las propiedades vectoriales del campo producido por las corrientes en las líneas eléctricas son las mismas que las dadas anteriormente para el campo eléctrico [23].

El campo magnético resultante viene dado por la expresión:

$$B_R = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2} \quad (3.24)$$

Donde:

$B_x^2 + B_y^2 + B_z^2$ son los valores rms de los tres componentes del campo ortogonal.

El campo magnético resultante también viene dado por la expresión:

$$B_R = \sqrt{B_{\max}^2 + B_{\min}^2} \quad (3.25)$$

Un medidor de campo magnético de tres ejes mide simultáneamente los valores rms de los tres componentes del campo ortogonal y la combina de acuerdo con la ecuación (3.25) para indicar el campo magnético resultante. Aunque los campos magnéticos de las líneas eléctricas son típicamente de naturaleza bidimensional, es decir, polarizados elípticamente, a menos que dos ejes de una sonda de tres ejes estén en el plano de la elipse, cada una de las tres sondas detectara un componente del vector de campo magnético giratorio [23].

3.5 CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

Un Sistema Eléctrico de Potencia consta de los subsistemas de generación, transmisión, distribución, y utilización de energía eléctrica.

Toda carga eléctrica genera un campo eléctrico y toda carga eléctrica en movimiento un campo magnético. En este sentido, los alimentadores de distribución y cada uno de los elementos del SEP son una fuente de constante emisión electromagnética. Estos oscilan entre 50 Hz o 60 Hz y están en la parte final baja del espectro electromagnético y se refieren como los campos de extrema baja frecuencia. De este modo las líneas eléctricas generan un campo eléctrico cuando los cables conductores son sometidos a una determinada tensión, y un campo magnético cuando fluye por ellos una corriente eléctrica [1].

3.5.1 Campo en subestaciones eléctricas

Las subestaciones son componentes imprescindibles para la operación y confiabilidad de los SEP, sirviendo como un punto de conexión y conmutación para las LT, AD,

circuitos de generación y transformadores. Sin embargo, estos elementos generan tanto campo eléctrico como magnético de frecuencia industrial, cuya intensidad dependerá de diversos factores geométricos y de su diseño, así como de la tensión de funcionamiento, potencia transportada, disposición de los elementos, número de conductores, distancia entre conductores, etc. [1].

Adicionalmente, en el exterior de las subestaciones eléctricas, usualmente, los campos eléctricos y magnéticos son más intensos lo cual se debe a las líneas de alimentación que entran y salen de la estación. Las fuentes más significativas de campo magnético en las subestaciones son:

- Los barrajes;
- Las líneas aéreas o subterráneas, entrantes y salientes;
- Los transformadores de potencia; y
- Los equipos de patio.

3.5.1.1 Campo eléctrico

El campo eléctrico es originado por los conductores en tensión. La magnitud del campo eléctrico en el espacio es proporcional al nivel de tensión y depende de la posición y forma de los otros objetos conductores.

Excepto para algunos transformadores especiales de tipo seco sin envolvente, el campo eléctrico radiado es únicamente producido de manera significativa por embarrados y bornes [24].

3.5.1.2 Campo magnético

El campo magnético generado por un transformador sin envolvente en sus caras laterales es del mismo orden de magnitud que el campo generado por las corrientes que circulan por los bornes de baja tensión.

El valor más considerable del campo magnético es debido a la corriente que circula por los bornes de baja tensión. El campo magnético del transformador, generado por las corrientes que recorren los arrollamientos puede despreciarse [24].

3.5.2 Campo en conductores subterráneos

Es necesario indicar que cuando la transmisión o distribución de energía eléctrica se realiza mediante conductores subterráneos, las características de sus CEM varían debido a los siguientes factores:

- La tierra puede ser usada para aislar el campo eléctrico.
- Como las fases de los conductores se colocan muy cercanos entre sí, los campos magnéticos tienden a ser menores.
- Los conductores llevan corrientes alternas de múltiples fases, que están fuera de fase, la una respecto a la otra, por lo que los campos tienen a cancelarse uno con otro. Este efecto de cancelación es mayor con la disminución del espacio entre conductores [1].

3.5.3 Líneas de transmisión y campos electromagnéticos

Los campos eléctricos y magnéticos (EMF) son generados por cargas eléctricas y por su movimiento (corrientes eléctricas). El término campos electromagnéticos se refiere a campos eléctricos y magnéticos que están acoplados, como en la radiación de alta frecuencia. Los campos eléctricos y magnéticos pueden ser separados en eléctricos (relacionados con los voltajes) y magnéticos (relacionado con las corrientes). En este caso, la palabra EMF debe entenderse en el sentido de campo eléctrico y magnético [25].

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

El campo eléctrico puede variar dependiendo de las características de la línea, esto es, número de conductores por fase, diámetro del conductor, número de circuitos, disposición geométrica del conductor, entre otros. Por otro lado, la intensidad del campo magnético dependiendo de la magnitud de corriente que pasa por los conductores [6].

3.5.3.1 Campo eléctrico

La magnitud y la dirección de la fuerza ejercida sobre una carga eléctrica estacionaria definen un campo eléctrico. El campo eléctrico es un vector. La unidad de carga eléctrica, es: un culombio es una unidad de campo eléctrico, un voltio por metro estará sujeto a una fuerza unitaria, un newton es la dirección del campo [25].

Una visualización más intuitiva de un campo eléctrico es obtenida considerando dos placas conductoras paralelas separadas por un medio aislante, como el aire. Si un voltaje es aplicado entre las dos placas, se creará un campo eléctrico entre ellas, dirigido de una placa a la otra [25]. La unidad de medida del campo eléctrico es el voltio por metro (V/m).

El campo eléctrico es un vector de campo de la fuerza del campo eléctrico definido en el espacio a lo largo de tres ejes perpendiculares. Para campos sinusoidales en estado estable cada eje es un número complejo o fasor cuya magnitud es expresada por su valor RMS y su dirección expresada en coordenadas rectangulares como se indica en la ecuación (3.26), y viene dada por:

$$\vec{E} = \vec{a}_x E_x + \vec{a}_y E_y + \vec{a}_z E_z \quad (3.26)$$

Una representación general alternativa de la ecuación 1.34 puede ser expresada como un vector que se mueve en el espacio describiendo una elipse como en la Figura 3.14(a), cuyo semieje principal representa la magnitud y dirección del valor máximo del campo eléctrico, y el eje menor representa la magnitud y la dirección del campo un cuarto de ciclo después cuando el campo es mínimo como en la Figura 3.14(b). El campo eléctrico en la dirección perpendicular al plano de la elipse es cero [6].

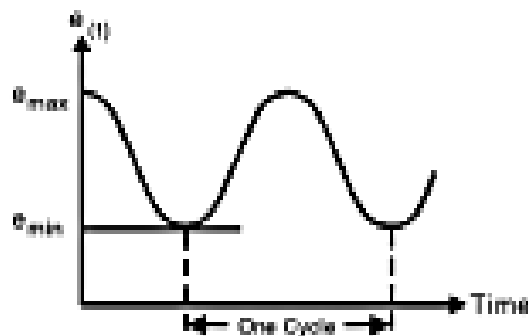
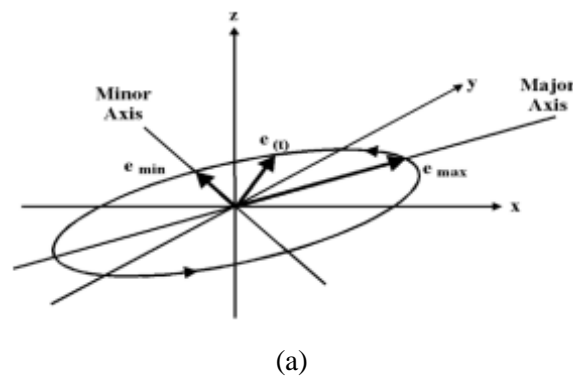


Figura 3.14. (a) Representación del campo eléctrico describiendo una elipse, (b) variación del campo eléctrico con el tiempo [6].

3.5.3.2 Campo magnético

Los campos magnéticos se producen por cualquier carga eléctrica producida por los electrones en movimiento y el momento magnético intrínseco de las partículas elementales asociadas con una propiedad cuántica fundamental, su espín. En la relatividad especial, campos eléctricos y magnéticos son dos aspectos interrelacionados de un objeto, llamado el tensor electromagnético. Las fuerzas magnéticas dan información sobre la carga que lleva un material a través del efecto Hall. La interacción de los campos magnéticos en dispositivos eléctricos tales como transformadores son estudiada en la disciplina de circuitos magnéticos.

La magnitud y dirección de la fuerza ejercida sobre una carga eléctrica en movimiento define el campo magnético. Si una carga eléctrica se está moviendo hacia un campo magnético, o si un campo se mueve más allá de la carga, la carga estará sujeta a una fuerza [25].

Si la unidad tiene carga eléctrica, es decir, 1 C (un culombio): se mueve a una velocidad unitaria, es decir, 1 m/s (un metro por segundo) - perpendicular a un campo magnético de una unidad de densidad de flujo, es decir, 1 T (un tesla), se someterá a una fuerza unitaria, es decir, 1 N (un newton), en una dirección ortogonal tanto a la dirección del movimiento como a la dirección del campo magnético. La cantidad descrita es la densidad de flujo magnético, que es el flujo magnético en el área unitaria atravesada perpendicularmente por el flujo [25].

El campo magnético describe una elipse tal como se muestra en el campo eléctrico. La resultante del campo magnético bajo una línea de transmisión viene dada por la ecuación.

$$B_R = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2} = \sqrt{B_{max}^2 + B_{min}^2} \quad (3.27)$$

En la cual B_x , B_y , B_z son los valores RMS del campo magnético de las 3 componentes perpendiculares de la elipse y B_{max}^2 , B_{min}^2 son los valores RMS de los semi ejes mayor y menor de la elipse que representan los campos magnéticos máximos y mínimos, respectivamente [6].

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN

Para el desarrollo de esta investigación se basa en el método deductivo que permite un análisis general de las metodologías y procedimientos para obtener los cálculos del campo eléctrico y campo magnético en una línea de subtransmisión. Así mismo como el método de investigación de campo siendo fundamental para una revisión bibliográfica con apoyo en documentos que se basen en el tema, lo que permite obtener datos semejantes a la realidad, por ejemplo, la investigación de campo recolecta información directamente basado en la realidad y permite indagar directamente en relación a un problema.

También el método descriptivo ayuda con la recolección de información mediante fuentes bibliográficas, que se obtiene recolectando de libros, tesis, artículos, revistas y normativas vigentes que se emplean en la medición y simulación de campos eléctricos y campos magnéticos en líneas de subtransmisión.

4.2 MATERIALES E INSTRUMENTOS

Un campo electromagnético es un campo físico, de tipo tensorial, producido por aquellos elementos cargados eléctricamente, que afecta a partículas con carga eléctrica. Convencionalmente, dado un sistema de referencia, el campo electromagnético se divide en una "parte eléctrica" y en una "parte magnética". Sin embargo, esta distinción no puede ser universal sino dependiente del observador. Así un observador en movimiento relativo respecto al sistema de referencia medirá efectos eléctricos y magnéticos diferentes, que un observador en reposo respecto a dicho sistema. Esto ilustra la relatividad de lo que se denomina "parte eléctrica" y "parte magnética" del campo electromagnético. Como consecuencia de lo anterior tenemos que ni el "vector" campo eléctrico ni el "vector" de inducción magnética se comportan genuinamente como magnitudes físicas de tipo vectorial, sino que juntos constituyen un tensor para el que sí existen leyes de transformación físicamente esperables.

En este apartado se detalla los materiales e instrumentos empleados para la simulación de campos eléctricos y campos magnéticos asimismo el procedimiento a seguir para las mediciones de los campos electromagnéticos y además el análisis teórico para la obtención de cálculos sobre el campo eléctrico y campo magnético. En el siguiente diagrama de flujo se detalla la metodología y el procedimiento que se desarrolla para el análisis de los valores obtenidos en la medición simulación y cálculos para ser validado.

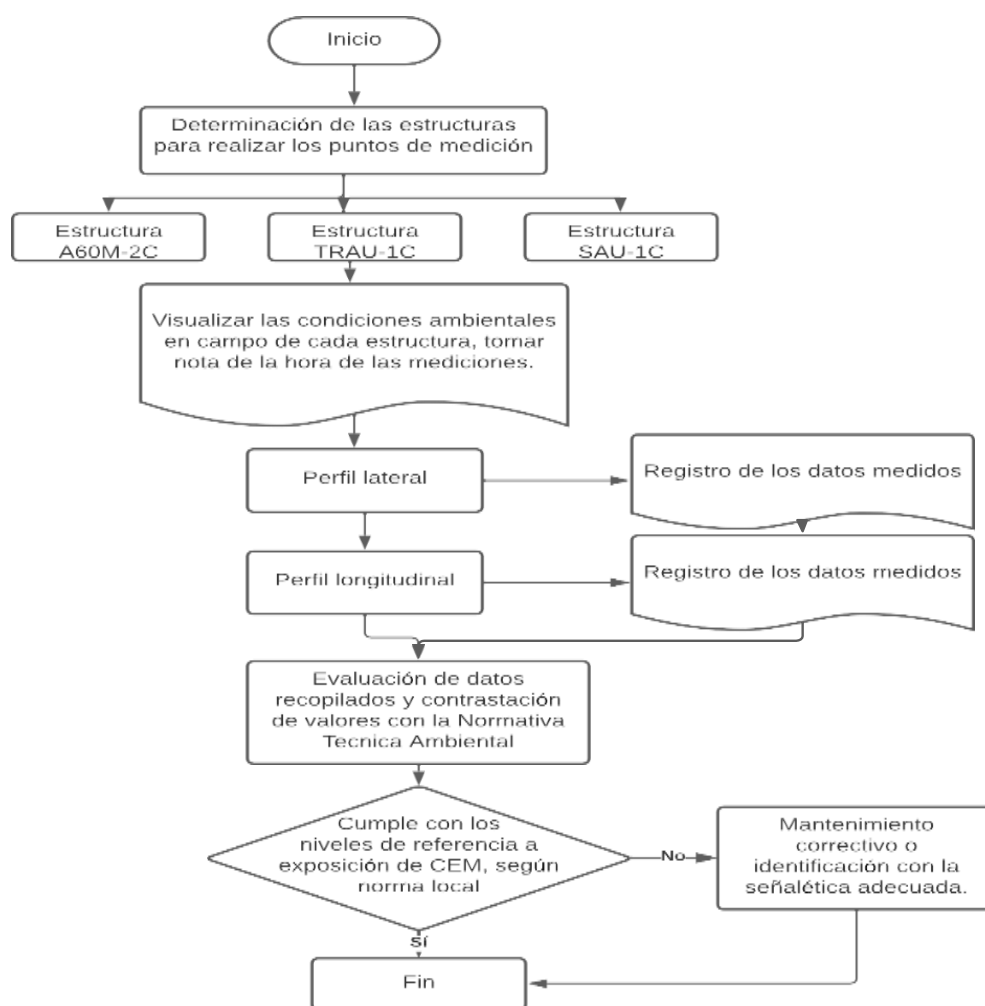


Figura 4.1. Procedimiento para las mediciones de CEM en líneas de transmisión.

4.2.1 Normativas

En esta sección se detalla las características y se describe el procedimiento de las diferentes Normas Técnicas que existen a nivel nacional e internacional.

Actualmente existen diferentes Normas Técnicas sobre límites de exposición y métodos de medición de campos eléctricos y magnéticos, la cuales han sido elaboradas por organismos competentes, con un adecuado soporte científico, aplicables tanto a la industria como a líneas de media y alta tensión, terminales de radiofrecuencia, etc. [1].

En este estudio, dentro de las principales normas internacionales que más han promulgado las normativas de exposición a campos eléctricos y magnéticos están: la ICNIRP (*International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection*) e IEEE (*Institute of Electrical and Electronic Engineers*) y como normativa local está: TULSMA (Texto Unificado de Legislación Secundaria de Medio Ambiente) esta normativa se constituye

del Anexo 10 de la Norma de Radiaciones No Ionizantes de Campos Electromagnéticos como norma de referencia al Tribunal Constitucional, Ministerio del Ambiente. Registro Oficial N° 41, 2007.

a) ICNIRP

Es una normativa que se basa en recomendaciones que han sido asociada con la Organización Mundial de la Salud (OMS), además expone los valores máximos de exposición a campos eléctricos y campos magnéticos para 60 Hz.

El principal objetivo de esta publicación es establecer recomendaciones para limitar la exposición a los CEM con el objetivo de proveer protección contra efectos adversos a la salud conocidos [26].

La Norma de Radiaciones No Ionizantes de Campos Electromagnéticos fue elaborada para conservar la salud y seguridad del público en general y trabajadores derivados de la exposición a radiaciones no ionizantes provenientes de sistemas eléctricos, tales como sistemas de generación, distribución y utilización de energía eléctrica con frecuencia de 60 Hz y para uso de frecuencias dentro del espectro radioeléctrico (3 kHz – 300 GHz) [27].

En el Cuadro 4.1. se citan los niveles de referencia para la exposición a campos eléctricos y magnéticos provenientes de fuentes de 60 Hz, tanto para público en general como para el personal ocupacionalmente expuesto [28].

Tabla 4.1. Valores de máxima exposición a frecuencia industrial (60 Hz).

Estándar	Campo [mG]	Comentario
International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, 1998	4167.7	Ocupacional
	833.3	Público
European Prestandar ENV 50166-1 (1995)	1333.3	Ocupacional
	5333.3	Público
International Radiation Protection Association (IRPA)	5000.0	Ocupacional
	1000.0	Público
(National Resources Planning Board) NRPB, Reino Unido	16000.0	Ocupacional
	16000.0	Público
American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH)	10000.0	Ocupacional

En la siguiente tabla se muestra los niveles de referencia para el público general y para exposición poblacional y ocupacional teniendo en cuenta las características de la exposición a campos eléctricos y campos magnéticos para frecuencias hasta 10 GHz.

Tabla 4.2. Niveles de para exposición ocupacional a campos eléctricos y magnéticos (valores rms no perturbados) [26].

Rango de frecuencia	Intensidad de campo eléctrico (V/m)	Intensidad de campo magnético (A/m)	Densidad de flujo magnético (μT)	Densidad de potencia (W^{-2})
Hasta 1 Hz	–	$1,63 \times 10^5$	2×10^5	–
1 – 8 Hz	20000	$1,63 \times 10^5/f^2$	$2 \times 10^5/f^2$	–
8 – 25 Hz	20000	$2 \times 10^4/f$	$2,5 \times 10^4/f$	–
0,025 – 0,82 kHz	$500/f$	$20/f$	$25/f$	–
0,82 – 65 kHz	610	24,4	30,7	–
0,065 – 65 kHz	610	$1,6/f$	$2/f$	–
1 – 10 MHz	$610/f$	$1,6/f$	$2/f$	–
10 – 400 MHz	61	0,16	0,2	10
400 – 2000 MHz	$3 f^{0,5}$	$0,0008 f^{0,5}$	$0,01 f^{0,5}$	$f/40$
2 – 300 GHz	137	0,36	0,45	50

En el rango de baja frecuencia, actualmente hay pocos datos relativos a los efectos en la salud de los transitorios de corriente. El ICNIRP, por lo tanto, recomienda que las restricciones basadas en las densidades de corrientes inducidas provenientes de campos transitorios o picos de muy corta duración, sean consideradas como valores instantáneos que no deberían ser promediados

Los niveles de referencia son obtenidos, cuando es apropiado, a partir de las restricciones básicas mediante el uso de modelos matemáticos y por extrapolación de los resultados de las investigaciones de laboratorio en frecuencias específicas.

Para el caso de campos de baja frecuencia, se desarrollaron diversos modelos de medición y de cómputo para derivar los niveles de referencia de intensidad de campo a partir de las restricciones básicas.

Tabla 4.3. Niveles de para exposición poblacional a campos eléctricos y magnéticos (valores rms no perturbados) [26].

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

b) IEEE Std 644 – 1994

Esta normativa internacional se ha elaborado para el procedimiento de las mediciones de campo eléctrico y campo magnético sobre las líneas de alta tensión a través de una metodología donde se puede medir de perfil lateral y perfil longitudinal, a su vez las mediciones se hacen a 1m sobre el nivel del suelo.

Se establecen procedimientos uniformes para la medición de campos eléctricos y magnéticos de frecuencia industrial de líneas aéreas de corriente alterna (CA) y para la calibración de los medidores utilizados en estas mediciones. Los procedimientos se aplican a la medición de campos eléctricos y magnéticos cerca del nivel del suelo. Los procedimientos también pueden aplicarse tentativamente (con limitaciones, como se especifica en la norma) a campos eléctricos cerca de un conductor o estructura energizados [23].

c) TULSMA

Estas normativas se constituyen en anexos al Libro VI de la Calidad Ambiental del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente, además forman

parte de la Normativa Técnica Ambiental para la prevención y control de la contaminación citadas en la Disposición General Primera del Reglamento a la Ley de Gestión Ambiental para la Prevención y Control de la Contaminación Ambiental [1].

La normativa para el Sector de Infraestructura: Telecomunicaciones y Eléctrico, se contempla en el Anexo 10 y establece: “La Norma de Radiaciones No Ionizantes de Campos Electromagnéticos y Requerimientos mínimos de seguridad para exposición a campos eléctricos y magnéticos de 60 Hz”, y está determinado que deben aplicarse en subestaciones de electricidad, sistemas de transporte de energía eléctrica, estructuras, torres, postes, cables, transformadores de potencia y cualquier otro elemento utilizado para fines de generación, transmisión, distribución y uso de energía eléctrica; a fin de garantizar la salud y seguridad del público en general y de los trabajadores expuestos a radiaciones no ionizantes provenientes de sistemas eléctricos del territorio nacional (Ministerio del Ambiente) [1].

La normativa Técnica Ambiental menciona que: las mediciones de campo eléctrico y campo magnético incluirá de modo particular los sitios en donde se observe el efecto acumulativo con otras fuentes de radiaciones no ionizantes de 60 Hz (líneas de distribución) y en que además se identifique la presencia de asentamientos humanos en sus proximidades. Por ende, para realizar la medición de campos electromagnéticos se deberán considerar aquellos sitios ubicados, sea a lo largo del recorrido de la línea de transmisión, o en los límites físicos de una subestación, y en que se encuentren viviendas o asentamientos humanos [13].

En el Cuadro 4.3. se citan los niveles de referencia para la exposición a campos eléctricos y magnéticos provenientes de fuentes de 60 Hz, tanto para público en general como para el personal ocupacionalmente expuesto [27].

Tabla 4.4. Niveles de referencia para la exposición a campos electromagnéticos de 60 Hz.

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

4.2.2 Software

En este estudio se realizará la simulación de campos eléctricos y campos magnéticos a partir de un programa que se denomina FEMM.

FEMM es un conjunto de programas para resolver problemas electromagnéticos de baja frecuencia en dos dimensiones. El programa actualmente aborda problemas magnetostáticos lineales/no lineales, problemas magnéticos armónicos de tiempo lineal/no lineal, problemas electrostáticos lineales, y problemas de flujo de calor en estado estacionario [29].

Este programa es un preprocesador de interfaz de documentos múltiples y un postprocesador para los distintos tipos de problemas resueltos por FEMM. Contiene una interfaz similar a CAD para diseñar la geometría del problema a resolver y para definir las propiedades del material y las condiciones de contorno. Los archivos DXF de AutoCAD se pueden importar para facilitar el análisis de geometrías existentes [29].

4.3 CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN

En este apartado se detallan todas las características, elementos de las estructuras que conforma una línea de subtransmisión la cual se va a simular y el software (FEMM) que se utilizara para las diferentes simulaciones, también se describe todo el procedimiento a seguir para la medición de los campos eléctricos y campos magnéticos a través de la línea de subtransmisión. Las mediciones obtenidas en campo serán comparadas con los valores obtenidos en la simulación y en cálculos con el fin de validar los valores [6].

Una línea de transmisión y cada uno de los elementos de un sistema eléctrico de potencia son una fuente de emisión de campos electromagnéticos debido a que las líneas de energía eléctrica generan un campo eléctrico cuando los conductores son energizados por un nivel de tensión, y para el campo magnético es cuando fluye un nivel de corriente eléctrica por el conductor [30].

4.3.1 Ubicación de la línea de subtransmisión a 69 kV para el caso de estudio

A continuación, se presenta la ubicación exacta de la línea a evaluar sobre los campos electromagnéticos, correspondiente a: longitud de la línea de subtransmisión en el tramo de la S/E La Península – S/E Loreto. Para el siguiente caso el aérea de prestación de servicio eléctrico le corresponde a la Empresa Eléctrica Ambato Regional Centro Norte S.A. [31].

La línea de subtransmisión a 69 kV atraviesa diferentes tipos de suelos y por ello diversas condiciones atmosféricas, además la línea cruza una zona urbana, donde la medición puede variar dependiendo el lugar de la estructura.

Para el siguiente estudio se toma en cuenta específicamente tres estructuras de la línea de subtransmisión lo cual se interpreta más adelante.

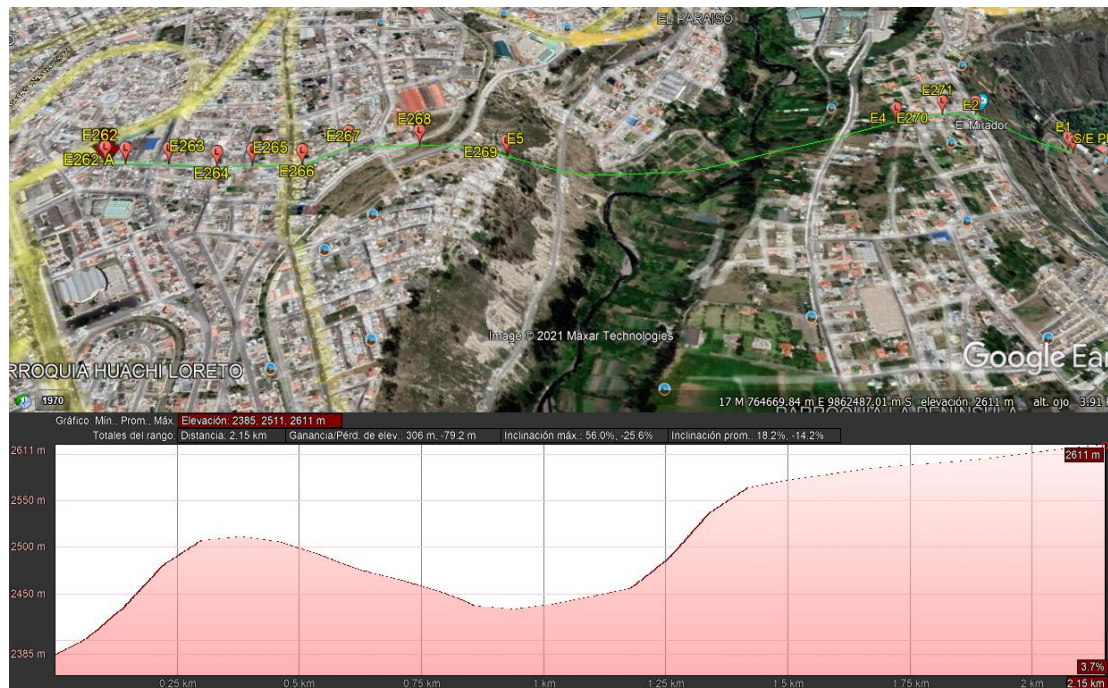


Figura 4.2. Perfiles de elevación del tramo de la línea de subtransmisión a 69 kV de la S/E La Península – SE Loreto.

Las coordenadas y puntos de la línea de subtransmisión fueron proporcionados por la Empresa Eléctrica Ambato Regional Centro Norte Sur S.A. Siendo así, entender de manera específica la ubicación de cada estructura.

4.3.2 Estructuras seleccionadas para el caso de estudio

4.3.2.1 Estructura metálica monobloque de retención angular urbana (A60M-2C)

La presente estructura está sujeta a cargas gravitacionales de peso propio y mantenimiento, así como las cargas horizontales debido al viento en la estructura la cual puede soportar y el árbol de cargas [32].

Esta estructura se usa cuando existe un cambio de dirección en la línea o a su vez se encarga de soportar la tensión de los conductores producido por el cambio de dirección [6].



Figura 4.3. Estructura A60M-2C

4.3.2.2 Estructura metálica de retención angular urbana terminal (TRAU-1C)

La presente estructura está sujeta a cargas gravitacionales de peso propio y mantenimiento, así como las cargas horizontales debido al viento en la estructura la cual puede soportar y el árbol de cargas [32].

Esta estructura se usa cuando existe un cambio de dirección en la línea o a su vez se encarga de soportar la tensión de los conductores producido por el cambio de dirección [6]. A diferencia de la anterior estructura es que esta es para un solo circuito.



Figura 4.4. Estructura TRAU-1C

4.3.2.3 Estructura de suspensión angular urbana (SAU)

Es una estructura la cual se encuentran suspendidos a través de la cadena de los aisladores. Es diseñada para soportar el peso de los conductores de la acción que ejerce

el viento sobre ellos [6]. Este tipo de estructuras son especialmente utilizados en zonas urbanas en los tramos rectos de la línea de subtransmisión además de estar construido por hormigón y son más livianas.



Figura 4.5. Estructura SAU-1C

4.4 INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN

Hoy en día existen varios equipos donde permiten medir el campo eléctrico y el campo magnético independientemente de la frecuencia y su necesidad, en este trabajo se toma en cuenta la medición de campos electromagnéticos en líneas de subtransmisión a 60 Hz.

Para el presente estudio se utilizó el equipo EMF 450 METER para la medición de campos electromagnéticos. Las especificaciones de este equipo vienen dadas en la tabla 4.4. Para las mediciones de cuerpo libre se utiliza el equipo Anemómetro Digital y Medidor de estrés térmico WBGT, los mismos que sirven para medir velocidad del viento, temperatura, presión atmosférica, humedad relativa etc. Todas las especificaciones de los equipos se encuentran en Anexos.

- **EMF 450 METER**

El EMF 450 es un medidor 3 en 1, que mide y muestra simultáneamente el campo magnético, el campo eléctrico y la fuerza de radiofrecuencia. Diseño ergonómico de bolsillo con un menú fácil de navegar. La gran pantalla TFT de colores vivos muestra lecturas digitales, gráficos de barras y gráficos de tendencias. Mediciones de fuerza de campo magnético, campo eléctrico y radiofrecuencia (RF). Almacene hasta 20 registros históricos de RF. Retención de datos y apagado automático con función de desactivación. Completo con 3 pilas AAA y cable de alimentación USB.



Figura 4.6. EMF 450 METER.

- **Anemómetro Digital**

Un anemómetro mide la velocidad del viento. En interiores, un anemómetro mide la velocidad y el caudal del aire. Además de la velocidad del viento o del aire, los anemómetros multifuncionales miden parámetros adicionales como la temperatura y la humedad. Dependiendo del modelo, un anemómetro también puede poseer funciones de registro de datos o de almacenamiento de datos para realizar mediciones a largo plazo o durante un cierto período de tiempo.



Figura 4.7. Anemómetro Digital.

- **Medidor de estrés térmico**

El medidor de estrés térmico mide el valor WBGT en interior y exterior, la temperatura de globo negro, humedad, temperatura del aire, temperatura de bulbo húmedo y la temperatura de punto de rocío. El medidor de estrés térmico está concebido para una valoración objetiva de las condiciones de trabajo en caso de condiciones meteorológicas

extremas. En el ambiente industrial los criterios objetivos para la determinación de un nivel medido para actividades corporales al aire libre pueden ser de gran ayuda, ya que ofrecen una guía clara para tomar las medidas correspondientes.



Figura 4.8. Medidor de estrés térmico WBGT.

4.5 PROCEDIMIENTO DE MEDICIÓN DE CAMPOS ELÉCTRICOS Y MAGNÉTICOS EN EL CAMPO

Se establecen procedimientos para estas mediciones de campos electromagnéticos de frecuencia industrial para líneas eléctricas de corriente alterna, donde se aplican cerca del nivel del suelo según requiera la norma estándar [23].

Para poder medir estos campos eléctricos y campos magnéticos se considera seguir un procedimiento donde se basa las mediciones en tiempo real, esto recomienda la norma *IEEE Std. 644-1994 Standard Procedures for Measurement of Power Frequency Electric and Magnetic Fields From AC Power Lines*, esto se detalla a continuación.

4.5.1 Medición de campos eléctricos

Según la norma IEEE Std. 644-1994, para la medición de campo eléctrico se debe realizar a una altura de 1 metro sobre el nivel del suelo. La distancia que debe tomarse entre el medidor de campo eléctrico y el operador debe ser al menos de 2.5 m. [23].

4.5.1.1 Perfil longitudinal

Para realizar esta medición se debe considerar la altura de 1 metro sobre el nivel del suelo paralelo a la línea y en la mitad del vano, las medidas de este perfil deben realizarse

al menos cinco mediciones desde el centro avanzando en ambas direcciones tal que se cubra toda la longitud del vano [23][6], como se puede observar en la siguiente figura.



Figura 4.9. Medición perfil longitudinal y lateral [13].

4.5.1.2 Perfil lateral

El perfil lateral se mide en los puntos de interés a lo largo de un tramo, siendo perpendicular a la línea y a una altura de 1 metro sobre el nivel del suelo. Generalmente estas mediciones se lo hacen en los puntos más altos de intensidad del campo eléctrico basado en el perfil longitudinal. Prácticamente el campo eléctrico es mayor en la mitad del vano. Las mediciones de los perfiles laterales deberán realizarse a una distancia lateral de por lo menos 30 metros que pueda cubrir la franja de servidumbre tomando cinco mediciones equidistantes. La figura 4.16. indica la medición del campo eléctrico lateralmente [6][23][13].

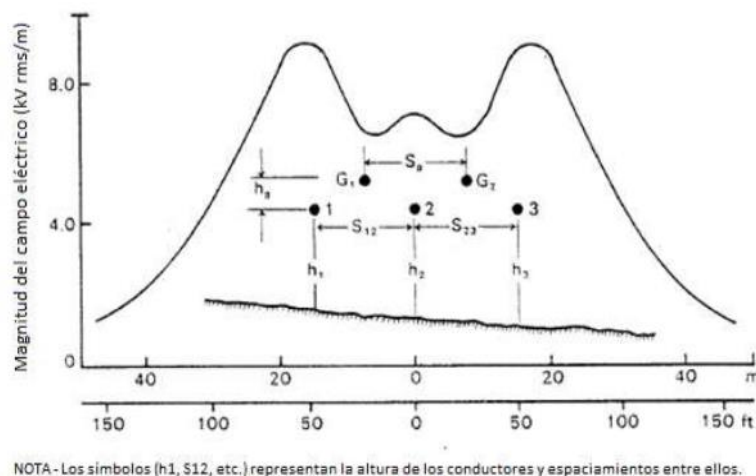


Figura 4.10. Medición perfil lateral [23].

4.5.2 Medición de campos magnéticos

Para realizar estas mediciones de campo magnético hace referencia al mismo procedimiento para medir la intensidad del campo eléctrico.

4.5.2.1 Perfil longitudinal

Para realizar esta medición se debe considerar la altura de 1 metro sobre el nivel del suelo paralelo a la línea y en la mitad del vano, las medidas de este perfil deben realizarse al menos cinco mediciones desde el centro avanzando en ambas direcciones tal que se cubra toda la longitud del vano [23][6].

4.5.2.2 Perfil lateral

El perfil lateral se mide en los puntos de interés a lo largo de un tramo, siendo perpendicular a la línea y a una altura de 1 metro sobre el nivel del suelo. Generalmente estas mediciones se lo hacen en los puntos más altos de intensidad del campo eléctrico basado en el perfil longitudinal. Prácticamente el campo eléctrico es mayor en la mitad del vano. Las mediciones de los perfiles laterales deberán realizarse a una distancia lateral de por lo menos 30 metros que pueda cubrir la franja de servidumbre tomando cinco mediciones equidistantes [6][23][13].

Para el presente caso de estudio se realizan las mediciones de campos eléctricos y magnéticos como indica la norma IEEE Std. 644, para validar los datos medidos y calculados con la simulación. Para las mediciones se toma en cuenta tres estructuras de las cuales se hace la medición vano adelante y vano atrás de las torres mencionadas anteriormente, por lo cual se hace referencia los perfiles laterales y longitudinales dependiendo de la tensión de la línea y de tal manera que se cubra los 30 metros de franja de servidumbre.

4.6 SIMULACIÓN DE CAMPOS ELÉCTRICOS Y MAGNÉTICOS EN EL SOFTWARE FEMM

Para realizar la simulación de campos electromagnéticos en este software se debe tener en cuenta lo siguiente:

- La simulación no es variable en el tiempo;
- El problema se realiza en coordenadas cartesianas;
- Los conductores tienen longitud infinita;

Anteriormente se consideró las tres estructuras para la simulación, para ser importadas al software se debe tener en escala real y en AutoCAD en formato .dxf, para luego ser importadas al programa facilitando dibujar directamente en el software.

Para realizar la simulación de campos electromagnéticos se debe tener en cuenta el tipo de problemas que FEMM puede resolver; para el presente estudio se escoge el (*Electrostatics Problem*) problema electrostático y problema magnético como se puede observar en la figura 4.7.

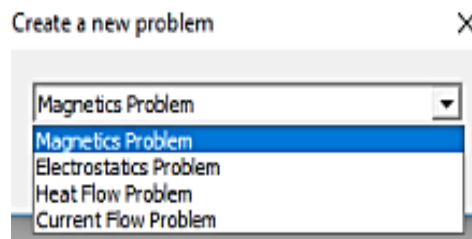


Figura 4.11. Selección del tipo de problema en el software FEMM.

A continuación, después de haber seleccionado el tipo de problema se procede a seleccionar File en el menú y la opción *Import DXF*, luego aparece un cuadro de dialogo donde se debe introducir el valor de la tolerancia, el valor predeterminado que muestra el software es suficiente. En la figura 4.8 se presenta el archivo CAD importado a FEMM.

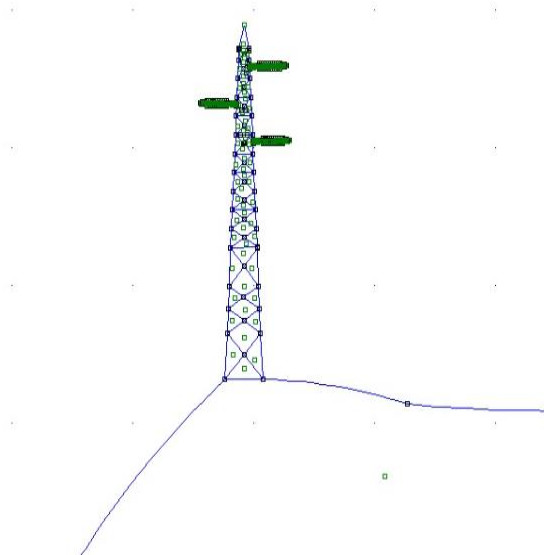


Figura 4.12. Estructura importada al software FEMM.

En el momento de la simulación de los campos eléctricos y campos magnéticos generados por una línea de transmisión, cabe mencionar que se debe conocer los valores o parámetros eléctricos que pueden afectar la intensidad de estos campos.

Al simular se debe escoger los materiales que se van a utilizar en las diferentes estructuras. Para el caso del problema electrostático se requiere tener el valor de la permitividad y para el problema magnético el valor de la permeabilidad. En las figuras 4.9 y 4.10 muestran como seleccionar el material.

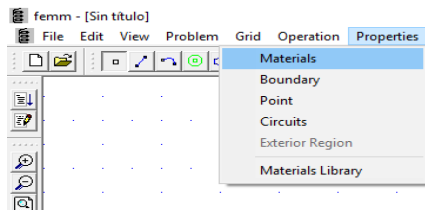


Figura 4.13. Selección del tipo de material.

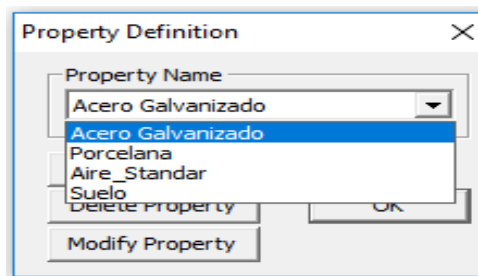


Figura 4.14. Lista de materiales.

A continuación, se definen las condiciones de los conductores según los voltajes de fase más altos de la línea, por ende, se considera el voltaje pico de operación de la línea por fase, y cuando el voltaje es cero en condición con respecto al suelo.

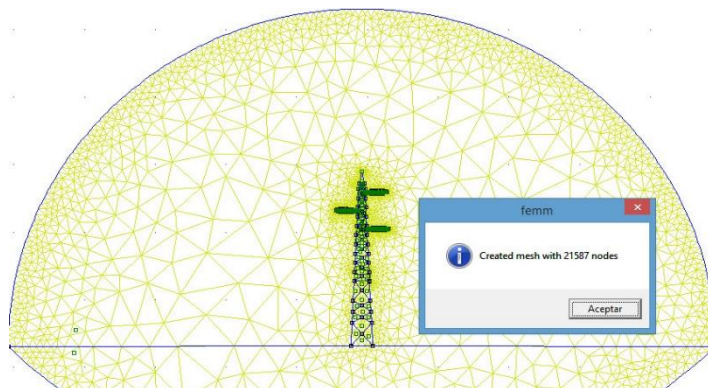


Figura 4.15. Torre de transmisión mallada en FEMM.

Finalmente, se obtienen los resultados que genera el programa donde se obtiene los valores del campo eléctrico y el campo magnético, tal y como se muestra en la figura 4.12. Los valores se pueden interpretar mediante las gráficas que facilita el software.

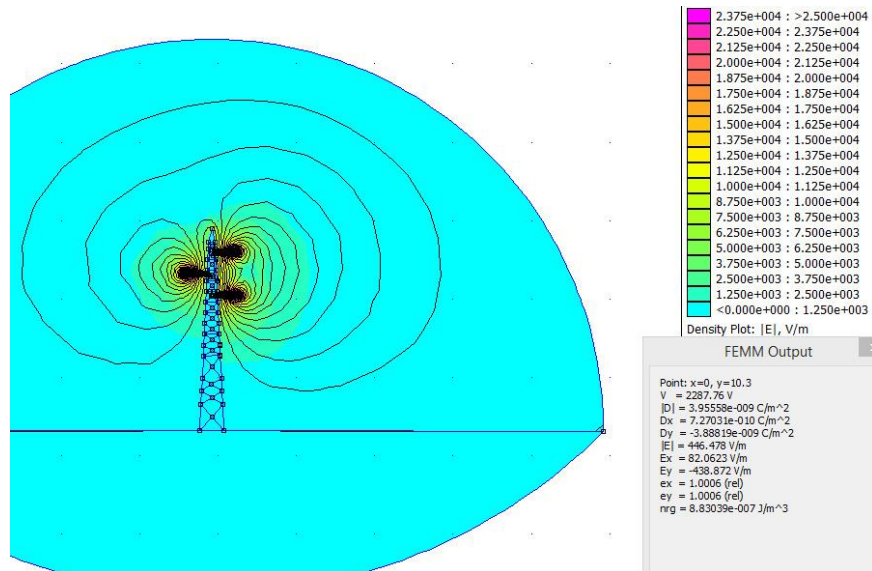


Figura 4.16. Valores obtenidos de la torre de transmisión.

4.7 CÁLCULO DEL CAMPO ELÉCTRICO Y MAGNÉTICO CON EL MÉTODO DE IMÁGENES REFLEJADAS

En esta sección se presenta el método para el cálculo de los campos electromagnéticos a frecuencia industrial. Las líneas de transmisión generan campos eléctricos y campos magnéticos por lo cual serán evaluados con criterios prácticos.

4.7.1 Cálculos de campos eléctricos

En este apartado se centra en el campo eléctrico a cierta distancia de los conductores. Por lo general, se describen métodos en la mayoría de los casos, el campo eléctrico producido por las líneas de transmisión utilizando un análisis simplificado [25]. Se basa en los siguientes análisis:

- Los campos eléctricos en las proximidades de las líneas de transmisión de CA son calculados asumiendo que no hay carga espacial, las cargas que se encuentran sólo en las superficies de los conductores, en el suelo y sobre objetos conectados a tierra. Cuando presenta el efecto corona, crea una carga espacial cerca del

conductor que afecta el campo eléctrico, pero de una manera insignificante, incluso en mal tiempo cuando el efecto corona es mayor.

- Para la simulación del campo eléctrico, el conductor se puede expresar con un conjunto de conductores de longitud infinita, siendo paralelo al suelo plano.
- Tener en cuenta que la tierra es un perfecto conductor porque es necesario que las cargas se redistribuyan en la tierra bajo la acción de un cambio en el campo aplicado (tiempo de relajación $\tau = \rho\epsilon$) es extremadamente pequeño (0.1 a 100 ns) en comparación con el periodo de la frecuencia.
- Una vez que se contabiliza la presencia de la tierra utilizando las imágenes de los conductores, el campo eléctrico es variable en el tiempo generado por una línea de transmisión de energía, puede ser tratado como cuasi estático, es decir, como esencialmente un campo estático porque la longitud de onda es mucho mayor que las dimensiones de bajo consideración.

El campo eléctrico en un punto en el espacio se puede calcular a partir de las cargas.

Las cargas se calculan conociendo el voltaje, V_k , aplicado a cada conductor, k , y la geometría del problema [25]. Está requerido para resolver la ecuación matricial:

$$[Q] = [P]^{-1}[V] \quad (4.1)$$

Donde:

$[Q]$ es la matriz de las cargas de la línea (culombio / metro).

$[V]$ es la matriz de los voltajes de los conductores (voltios).

$[P]$ es la matriz de los coeficientes de potencial de Maxwell (metro / faradio).

Las cargas y los voltajes son cantidades alternas en la frecuencia de potencia y puede expresarse mediante números complejos, con una parte real e imaginaria. Por ejemplo, el voltaje de un conductor: $V_{(t)} = \sqrt{2}V \cos(\omega t + \varphi)$ y pueden escribirse también $\tilde{V} = \tilde{V}_r + j\tilde{V}_i$. V_r es el valor rms del componente real (ángulo de fase igual a cero) y V_i es el valor rms de la componente imaginaria (ángulo de fase igual a 90°):

$$V_r(t) = \sqrt{2}V \cos(\varphi)\cos(\omega t) \quad (4.2)$$

$$V_i(t) = \sqrt{2}V \sin(\varphi)\cos(\omega t + 90) \quad (4.3)$$

En esta ecuación se puede escribir tanto para cantidades real e imaginarias.

$$[Q_r] = [P]^{-1}[V_r] \text{ y } [Q_i] = [P]^{-1}[V_i] \quad (4.4)$$

Los conductores pueden tener cualquier voltaje, incluido el cero. Los conductores con voltaje cero incluyen cables para protección contra rayos o cables usados intencionalmente para blindaje de campos eléctricos.

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

$$P_{kk} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \cdot \ln\left(\frac{4H_k}{d_k}\right) \quad (4.5)$$

$$P_{kl} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \cdot \ln\left(\frac{S'_{kl}}{S_{kl}}\right) \quad (4.6)$$

Donde:

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

P_{kl} es el coeficiente de potencial mutuo entre los conductores k y l.

d_k es el diámetro del conductor k

H_k es la altura sobre el suelo del conductor k.

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

S'_{kl} es la distancia entre el conductor k y la imagen del conductor l ver figura 4.5.

$$\epsilon = 8,854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$$

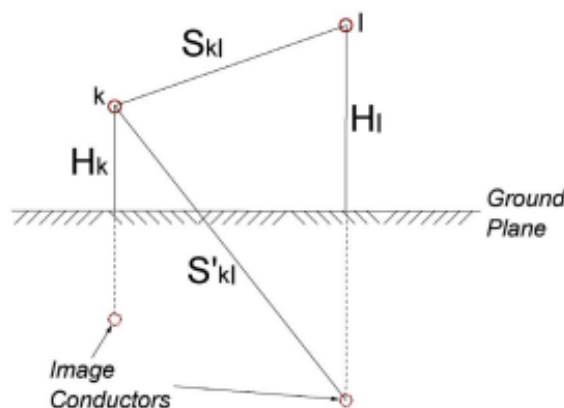


Figura 4.17. Conductores y sus imágenes.

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

$$d_{eq} = d_b \cdot \sqrt[n]{\frac{n \cdot d}{d_b}} \quad (4.7)$$

$$d_b = \frac{s}{\sin\left(\frac{\pi}{n}\right)} \quad (4.8)$$

donde d_b es el diámetro del haz de conductores, n es el número de subconductores del paquete, d es el diámetro del haz de subconductores, y s es el espacio entre subconductores y d_{eq} es el diámetro equivalente [25].

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

$$\vec{E}_{kx} = \frac{(\tilde{Q}_{rk} + j\tilde{Q}_{ik})}{2\pi\epsilon} \cdot \left[\frac{X_M}{X_M^2 + (H_K - H_M)^2} - \frac{X_M}{X_M^2 + (H_K + H_M)^2} \right] \quad (4.9)$$

$$\vec{E}_{ky} = \frac{(\tilde{Q}_{rk} + j\tilde{Q}_{ik})}{2\pi\epsilon} \cdot \left[\frac{X_M - H_K}{X_M^2 + (H_K - H_M)^2} - \frac{X_M - H_K}{X_M^2 + (H_K + H_M)^2} \right] \quad (4.10)$$

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

$$\vec{E}_x = \sum_k \vec{E}_{kx} = E_{rx} + jE_{ix} \quad (4.11)$$

$$\vec{E}_y = \sum_k \vec{E}_{ky} = E_{ry} + jE_{iy} \quad (4.12)$$

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

$$E_{\text{rms}} = \sqrt{E_{\text{rx}} + E_{\text{ix}} + E_{\text{ry}} + E_{\text{iy}}} \quad (4.13)$$

4.7.2 Cálculos de campos magnéticos

Los campos magnéticos en las líneas de transmisión, en la mayoría de los casos pueden calcularse con suficiente precisión utilizando métodos que se basan en el análisis bidimensional. Los campos magnéticos pueden calcularse con las suposiciones sobre en lo que se basa este análisis y son los siguientes [25]:

- Los conductores forman líneas rectas infinitamente largas paralelas entre sí.
- La tierra es un mal conductor de campos magnéticos. La presencia de la tierra se puede simular mediante imágenes de conductores colocados a una profundidad compleja, que puede ser aproximado por una profundidad real. El cálculo del campo magnético es relativamente sencillo si la amplitud y el ángulo de fase de las corrientes se conocen en todos los conductores.

Una vez que se contabiliza la presencia de la tierra utilizando las imágenes de los conductores, la variable magnética en el tiempo es generado por una línea de transmisión que puede tratarse como cuasiestático, es decir, como esencialmente un campo estático porque la longitud de onda es mucho mayor que las dimensiones bajo consideración [25].

La figura muestra al conductor y su imagen, colocados en la profundidad de la imagen, la profundidad de la imagen es aproximadamente igual a 1.31δ , donde δ es la profundidad de la piel de la tierra dada por la ecuación (4.14).

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \cdot f \cdot \mu}} \quad (4.14)$$

Donde:

f : es la frecuencia

ρ : es la resistividad del suelo

μ : es la permeabilidad del suelo

En la mayoría de los casos prácticos, la permeabilidad del suelo es cercana al del aire ($\mu = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$). Por ejemplo, para una frecuencia de 60 Hz y una resistividad del

suelo de $100 \Omega \text{ m}$, la profundidad de la imagen es de 850 m. Esta es una distancia tan grande que, por muchos propósitos prácticos, la contribución de la imagen al conductor y al campo magnético puede ser despreciado.

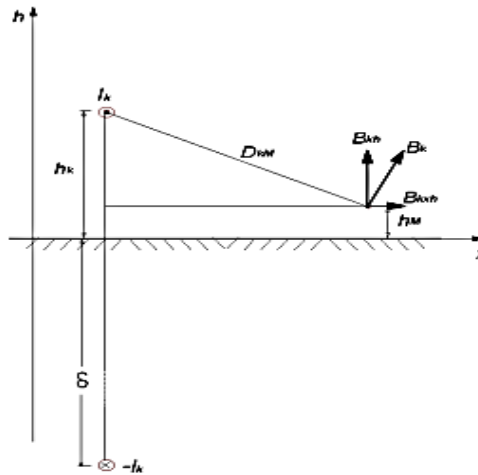


Figura 4.18. Campo magnético de un conductor infinitamente largo sobre la tierra [25].

Considere un conductor, k , con la corriente I_k y la fase ángulo φ_k . La corriente se puede expresar como la suma de sus componentes reales e imaginarios:

$$\tilde{I}_k = I_{kr} + jI_{ki} \quad (4.15)$$

El campo magnético producido por esta corriente tiene un valor real y un componente imaginario. La componente real del campo magnético, B_{kr} , es causada por la componente real de la corriente, I_{kr} , y se evalúa como se indica en la Figura 4.5 y Ecuación (4.16). El campo, B_{kr} , en un punto M se representa por un vector que se encuentra en el plano perpendicular al conductor k y perpendicular a la línea que une M con el conductor k .

La magnitud de B_{kr} viene dada por la Ecuación (4.16).

$$B_{kr} = 2 \cdot 10^{-7} I_{kr} / D_{km} \quad (4.16)$$

D_{km} es la distancia entre el conductor k y el punto M . El campo se expresa en teslas, la corriente en amperios y la distancia en metros. Si el campo se expresara en mG, la Ecuación 4.16 se convertiría en la expresión simple (4.17).

$$B_{kr} = 2\tilde{I}_{kr}/D_{km} \quad (4.17)$$

Usando un sistema de coordenadas ortogonales, x (distancia lateral) y h (altura sobre el suelo), como se indica en la Figura 4.5, la magnitud del campo magnético, B_{kr} , y de sus componentes horizontal y vertical, B_{krx} y B_{krh} , vienen dadas por:

$$B_{kr} = \frac{2 \cdot 10^{-7} I_{kr}}{\sqrt{(x_M - x_k)^2 + (h_M - h_k)^2}} \quad (4.18)$$

$$B_{krx} = \frac{2 \cdot 10^{-7} I_{kr} (x_M - x_k)}{\sqrt{(x_M - x_k)^2 + (h_M - h_k)^2}} \quad (4.19)$$

$$B_{krh} = \frac{2 \cdot 10^{-7} I_{kr} (h_M - h_k)}{\sqrt{(x_M - x_k)^2 + (h_M - h_k)^2}} \quad (4.20)$$

Cabe señalar que no hay campo en la dirección paralela al conductor.

Se hacen los mismos cálculos para calcular la parte imaginaria del campo magnético, B_{ki} , y sus componentes horizontal y vertical, B_{kix} y B_{kih} . El componente imaginario de la actual, I_{ki} , debe usarse en lugar del componente real.

Si una línea eléctrica contiene n conductores, con corrientes I_k y ángulos de fase φ_k ($k = 1, n$), las componentes real e imaginaria del campo magnético horizontal y vertical en el punto M se calculan por separado para cada conductor. Las resultantes reales e imaginarias, y los campos magnéticos verticales y horizontales en el punto M son:

$$B_{rx} = \sum_{k=1}^n B_{krx} \quad B_{rh} = \sum_{k=1}^n B_{krh} \quad B_{ix} = \sum_{k=1}^n B_{kix} \quad B_{ih} = \sum_{k=1}^n B_{kih} \quad (4.21)$$

Un medidor de campo magnético colocado en el punto M con su sonda orientado a medir la componente horizontal medirá un campo magnético, B_x , dado por:

$$B_x = \sqrt{B_{rh}^2 + B_{ih}^2} \quad (4.22)$$

El campo magnético resultante es:

$$B = \sqrt{B_x^2 + B_h^2} = \sqrt{B_{rx}^2 + B_{ix}^2 + B_{rh}^2 + B_{ih}^2} \quad (4.23)$$

4.8 CÁLCULO DEL CAMPO ELÉCTRICO Y MAGNÉTICO CON EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

Al usar este procedimiento, el sector en estudio es discretizada en pequeñas zonas finitas conocidas como recursos, principalmente en triángulos o cuadriláteros conectados entre sí por aspectos de alianza denominados nodos. Las incógnitas del problema dejan de ser funcionalidades matemáticas y pasan a ser el costo de estas funcionalidades en los nodos. Por medio de la interpolación de los valores conocidos en los nodos se puede llegar a conocer un costo aproximado del modelo examinado. A más grande número de recursos finitos conseguidos más grande precisión, sin embargo, se incrementa la dificultad en el planteamiento y resolución del problema [33].

Un componente limitado viene determinado por sus nodos y por su contorno, compuesto por líneas que los incorporan. Uno de los más importantes conflictos al utilizar este procedimiento es la decisión de los coeficientes. Por esto, el problema se define de manera matricial, de tal forma que al ingresar a un ordenador este arroje un grupo de ecuaciones lineales o no, con el objetivo de que logre ser resuelto [33].

- **MEF aplicado a una línea de transmisión**

En el empleo del Método de elementos finitos, el área transversal a una línea es discretizada mediante elementos finitos triangulares de primer grado.

La formulación del modelo mediante elementos finitos, la magnitud del campo eléctrico y del campo magnético en cualquier punto de coordenadas (x, y) en el área de trabajo se expresa como:

$$E_{(x,y)} = E_1 N_1(x, y) + E_2 N_2(x, y) + E_3 N_3(x, y) \quad (4.24)$$

$$H_{(x,y)} = H_1 N_1(x, y) + H_2 N_2(x, y) + H_3 N_3(x, y) \quad (4.25)$$

Donde, E_1, E_2, E_3, H_1, H_2 y H_3 son las aproximaciones de las magnitudes de campo eléctrico y magnético en cada uno de los vértices del elemento triangular en el cual está contenido el punto (x, y) . N_1, N_2 y N_3 , son funciones de forma para este elemento, que toma valores de acuerdo a:

$$N_1(x, y) = \frac{a_1 + b_1 x + c_1 y}{2\Delta} \quad (4.26)$$

$$N_2(x, y) = \frac{a_2 + b_2 x + c_2 y}{2\Delta} \quad (4.27)$$

$$N_3(x,y) = \frac{a_3 + b_3x + c_3y}{2\Delta} \quad (4.28)$$

Donde, Δ es el área de cada elemento triangular y el valor de las constantes a_i , b_i y c_i esta dado por las coordenadas de cada vértice del elemento triangular, de manera que:

$$\Delta = \frac{1}{2} \det \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \\ x_3 & y_3 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.29)$$

Así entonces, aplicando el método de los residuos ponderados con el enfoque de Galerkin a las ecuaciones diferenciales, donde las integraciones se realizan sobre los elementos de dominio Ω , se obtiene:

$$\frac{1}{\mu} \int_{\Omega}^0 w \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial E}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial E}{\partial y} \right) \right) d\Omega - (j\omega\sigma - \omega^2\varepsilon) \int_{\Omega}^0 w E d\Omega = 0 \quad (4.30)$$

$$\frac{1}{\mu} \int_{\Omega}^0 w \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial H}{\partial y} \right) \right) d\Omega - (j\omega\sigma - \omega^2\varepsilon) \int_{\Omega}^0 w H d\Omega = 0 \quad (4.31)$$

De manera compacta en notación matricial:

$$[K + M]E = 0 \quad (4.32)$$

$$[K + M]H = 0 \quad (4.33)$$

Donde:

$$\begin{aligned} [K] &= \frac{1}{\mu} \int_{\Omega}^0 \left(\frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial E}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial y} \frac{\partial E}{\partial y} \right) \\ &= \frac{1}{4\mu\Delta} \begin{bmatrix} b_1b_1 + c_1c_1 & b_1b_2 + c_1c_2 & b_1b_3 + c_1c_3 \\ b_1b_2 + c_1c_2 & b_2b_2 + c_2c_2 & b_2b_3 + c_2c_3 \\ b_1b_3 + c_1c_3 & b_2b_3 + c_2c_3 & b_3b_3 + c_3c_3 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.34)$$

$$[M] = -(j\omega\sigma - \omega^2\varepsilon) \int_{\Omega} w E d\Omega = \frac{(j\omega\sigma - \omega^2\varepsilon)}{12} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (4.35)$$

Finalmente, para la magnitud de campo magnético, se deducen las mismas matrices [33].

5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo se validan las mediciones recopiladas en campo, con los datos obtenidos según la simulación y los cálculos desarrollados en las diferentes estructuras seleccionadas las cuales conforman la línea de subtransmisión S/E La Península – S/E Loreto.

5.1 MEDICIÓN DE CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS EN LA LÍNEA DE SUBTRANSMISIÓN A 69 kV LA PENÍNSULA – LORETO

Para realizar estas mediciones se tomó en cuenta los procedimientos a seguir en las Normas Internacionales (sección 4.4), acordemente para obtener valores basados en la realidad. La medición de los campos electromagnéticos se mide en perfil longitudinal (debajo de la línea) tomando en cuenta la longitud del vano y hacer las mediciones necesarias tal que cubra toda la longitud del. Por otro lado, también se mide de perfil lateral, esta medición hace referencia a la estructura que se va a medir el campo eléctrico y campo magnético cubriendo el ancho de la franja de servidumbre dependiendo el nivel de tensión de la línea, para este estudio el nivel de tensión es de 69 kV y el ancho es de 16m lo que quiere decir es que se hará las mediciones 8m al lado izquierdo y 8m al lado derecho.

Para el procedimiento de la recopilación de datos, se consideró la normativa IEEE 644, teniendo en cuenta los lineamientos para la medición del campo eléctrico y magnético, ya que, al realizar las mediciones, el equipo EMF 450 METER debe estar a 1 metro sobre el nivel del suelo y separado del cualquier persona u objeto que intervengan en la toma de valores, la distancia mínima debe ser de al menos 2.5 metros con respecto al equipo [6].

Al terminar la toma de datos en todos los puntos que se tienen como referencia se obtendrá una memoria de cálculos en la cual se podrá observar los valores medidos, a primera vista estos deben estar dentro de los límites establecidos por las normas nacionales e internacionales. En la Tabla 5.1 se expone los niveles de referencia para la exposición a campos eléctricos y magnéticos generadas por las líneas de transmisión de alta tensión según su franja de servidumbre [13].

Tabla 5.1. Niveles de referencia para la limitar la exposición a campos eléctricos y magnéticos de 60 Hz para líneas de alta tensión, medidos en el límite de su franja de servidumbre.

Nivel de tensión (kV)	Intensidad de campo eléctrico (E) V/m	Densidad de flujo magnético (B) μ T	Ancho de Franja de Servidumbre (m)
230	4167	83	30
138	4167	83	20
69	4167	83	16

Las distancias para franjas de servidumbre en función del nivel de tensión se observan en la siguiente figura [33].

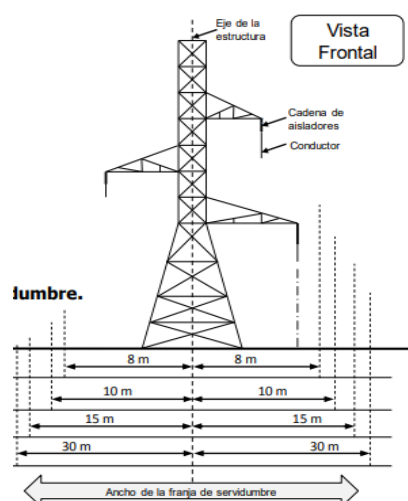


Figura 5.1. Anchos de la franja de servidumbre [33].

Las mediciones que se realizaron son en tres tipos de estructuras que fueron tomadas en diferentes horarios, los cuales cuentan con distintas condiciones atmosféricas, altitud sobre el nivel del mar, vegetación, tipo de suelo etc. Para esto se elaboró tres fichas técnicas lo cual menciona la Normativa Técnica Ambiental estableciendo todo lo que puede afectar en las mediciones de los campos electromagnéticos y en las estructuras analizadas.

5.1.1 Aspectos a ser considerados para las mediciones de campo eléctrico y magnético

Para la presentación de los resultados tomados de las mediciones de campo eléctrico y magnético, los informes deben contener la mayor cantidad de información posible, que permita evaluar el procedimiento utilizado. Se puede mencionar como ejemplo: el

instrumento utilizado, fecha, hora, ubicación de las mediciones, condiciones climáticas etc.

Tabla 5.2. Ficha técnica para la medición de campos electromagnéticos E-1075.

Formulario para toma de datos de campos electromagnéticos				E-1075		
Fecha: 2022-03-07						
1) UBICACIÓN DEL SITIO						
Provincia:	Ciudad:	Cantón:	Latitud:	Longitud:		
Tungurahua	Ambato	Ambato	-1.2490800	-78.6167500		
2) CONDICIONES ATMOSFERICAS						
Temperatura	[°C]	39				
Humedad relativa	[%RH]	69%				
Presión Atmosférica	[hpas]	1014,7				
Velocidad del viento	[m/s]	2.3				
Estado del clima: Parcialmente nublado, presencia de lluvia						
3) ESTRUCTURA DE MEDICION Y ASOCIADAS (ADELANTE/ATRAS)						
No. de Construcción	No. AS BUILT	Nomenclatura de la torre	Altitud (msnm)	Vano adelante (m)	Vano atrás (m)	Observación
E1	A60-2C	E-0071	2376.889	-	-	Torres atrás
E2	A60M-2C	E-1075	2515.516	90	280	Punto medio, referencia
E3	RSU-2C	E-0271	2516.602	-	-	Torre adelante
4) INFORME TECNICO DE LAS MEDICIONES REALIZADAS						
Vano atrás						
Fecha de medición:	Hora de inicio:		Hora de finalización:		Observaciones:	
2021-03-07	10:00		11:00		-	
Vano adelante						
Fecha de medición:	Hora de inicio:		Hora de finalización:		Observaciones:	
2021-03-07	11:00		12:00		-	
5) CROQUIS DE LA UBICACIÓN DE LA ESTRUCTURA REFERENCIADA						

Tabla 5.3. Ficha técnica para la medición de campos electromagnéticos E-268.

Formulario para toma de datos de campos electromagnéticos				E-268		
				Fecha: 2021-03-07		
1) UBICACIÓN DEL SITIO						
Provincia:	Ciudad:	Cantón:	Latitud:	Longitud:		
Tungurahua	Ambato	Ambato	-1.2490800	-78.6167500		
2) CONDICIONES ATMOSFERICAS						
Temperatura	[°C]	37,2				
Humedad relativa	[%RH]	68 %				
Presión Atmosférica	[hpas]	1012.7				
Velocidad del viento	[m/s]	2,2				
Estado del clima: Parcialmente nublado						
3) ESTRUCTURA DE MEDICION Y ASOCIADAS (ADELANTE/ATRAS)						
No. de Construcción	No. AS BUILT	Nomenclatura de la torre	Altitud (msnm)	Vano adelante (m)	Vano atrás (m)	Observación
E6	A10-1C	E-269	2554	-	-	Torres atrás
E7	TRAU-1C	E-268	2572	130	170	Punto medio, referencia
E8		E-267	2584	-	-	Torre adelante
4) INFORME TECNICO DE LAS MEDICIONES REALIZADAS						
Vano atrás						
Fecha de medición:	Hora de inicio:		Hora de finalización:		Observaciones:	
2021-03-07	12:00		13:00		-	
Vano adelante						
Fecha de medición:	Hora de inicio:		Hora de finalización:		Observaciones:	
2021-03-07	13:00		14:00		-	
5) CROQUIS DE LA UBICACIÓN DE LA ESTRUCTURA REFERENCIADA						

Tabla 5.4. Ficha técnica para la medición de campos electromagnéticos E-0263.

Formulario para toma de datos de campos electromagnéticos				E-0263		
				Fecha: 2021-03-07		
2) UBICACIÓN DEL SITIO						
Provincia:	Ciudad:	Cantón:	Latitud:	Longitud:		
Tungurahua	Ambato	Ambato	-1.2490800	-78.6167500		
6) CONDICIONES ATMOSFERICAS						
Temperatura	[°C]	29,2				
Humedad relativa	[%RH]	55 %				
Presión Atmosférica	[hpas]	1014				
Velocidad del viento	[m/s]	1,8				
Estado del clima: Parcialmente nublado						
7) ESTRUCTURA DE MEDICION Y ASOCIADAS (ADELANTE/ATRAS)						
No. de Construcción	No. AS BUILT	Nomenclatura de la torre	Altitud (msnm)	Vano adelante (m)	Vano atrás (m)	Observación
E11	SAU-1C	E-264	2604	-	-	Torres atrás
E12	SAU-1C	E-263	2605	80	90	Punto medio, referencia
E13	SAU-1C	E-262_A	2607	-	-	Torre adelante
8) INFORME TECNICO DE LAS MEDICIONES REALIZADAS						
Vano atrás						
Fecha de medición:	Hora de inicio:		Hora de finalización:		Observaciones:	
2021-03-07	14:00		15:00		-	
Vano adelante						
Fecha de medición:	Hora de inicio:		Hora de finalización:		Observaciones:	
2021-03-07	15:00		16:00		-	
9) CROQUIS DE LA UBICACIÓN DE LA ESTRUCTURA REFERENCIADA						

Para la evaluación de los campos magnéticos y eléctricos es importante indicar los parámetros del sistema como tensiones, corrientes, momento de medición, estos son

necesarios para realizar la simulación de los campos electromagnéticos, estos datos se pueden encontrar en la página web de la Empresa Eléctrica Ambato S.A., con el respectivo permiso del personal establecido.

Tabla 5.5. Parámetros de corriente y tensión, página web de la Empresa Eléctrica Ambato S.A..

Parámetros corriente y tensión				
Estructura	Día de medición	Voltaje (kV)	Corriente (A)	Potencia (MVA)
E-1075	2022-03-07	70,028	77,970	9,425
E-0268	2022-03-07	70,447	78,850	9,471
E-0263	2022-03-07	70,290	77,880	9,409

Para realizar la simulación del campo eléctrico se requiere el voltaje fase-neutro por lo que se debe calcular, teniendo como datos los valores del reporte operativo del día de la medición, se aplica la siguiente ecuación para obtener los datos necesarios para la simulación del campo eléctrico.

$$V_{f-n} = \frac{V_b * \sqrt{2}}{\sqrt{3}} \quad (5.1)$$

Tabla 5.6. Resultados fase-neutro para la simulación del campo eléctrico.

Estructura	Voltaje fase-neutro (kV)
E-0263	57,392
E-0268	57,520
E-1075	57,178

En la Tabla 5.6 se indica los valores obtenidos del voltaje fase-neutro para cada estructura a analizar. Para la simulación del campo eléctrico y magnético, es necesario el cálculo de la densidad de corriente, se necesita los valores de la corriente que circula por cada fase. En la Tabla 5.7 se presenta los valores de la corriente. Para este estudio se tiene el conductor ACAR 300 MCM, el diámetro es de 15,96 mm.

Tabla 5.7. Resultados de la densidad de corriente para la simulación del campo magnético.

Estructura	Densidad de corriente (MA/m ²)
E-0263	0,512
E-0268	0,518
E-1075	0,512

5.2 VALIDACIÓN DE LAS SIMULACIONES REALIZADAS

En este punto las figuras muestran la distribución del campo eléctrico y el campo magnético en las estructuras seleccionadas, se utilizó el software FEMM. Para conocer los valores se simulo de manera longitudinal y lateral tomando como referencia cada una de las torres. Dado que los valores ingresados en el programa se obtuvieron mediante cálculos y otros valores obtenidos directamente de la Empresa Eléctrica Ambato S.A., como se detallan en la Tabla 5.5, Tabla 5.6, Tabla 5.7, respectivamente.

5.2.1 Campo eléctrico – Vista lateral

5.2.1.1 Estructura E-1075

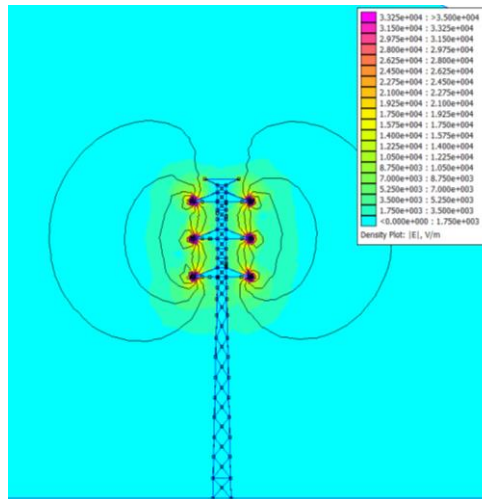


Figura 5.2. Distribución del campo eléctrico en la estructura E-1075, perfil lateral.

5.2.1.2 Estructura E-0268

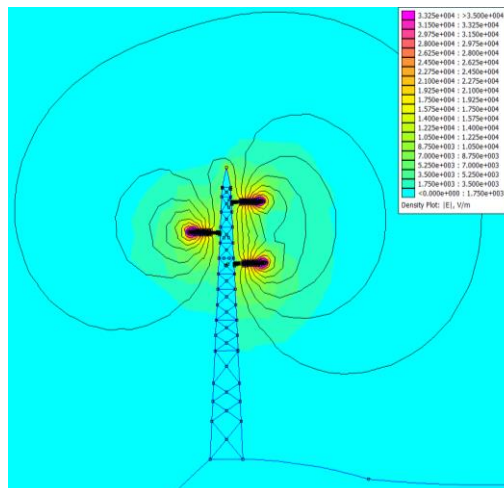


Figura 5.3. Distribución del campo eléctrico en la estructura E-0268, perfil lateral.

5.2.1.3 Estructura E-0263

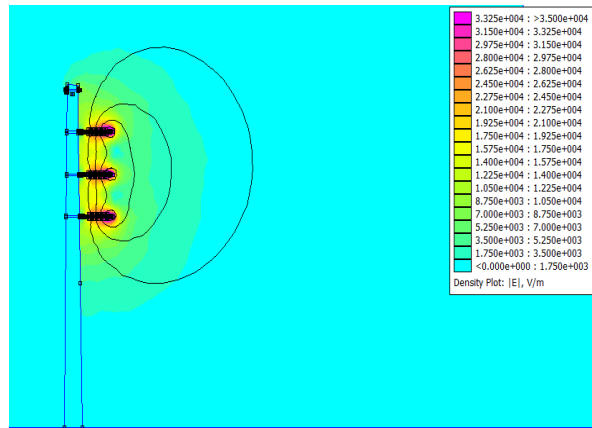


Figura 5.4. Distribución del campo eléctrico en la estructura E-0263, perfil lateral.

La Figura 5.2, Figura 5.3 y Figura 5.4, muestran la distribución del campo eléctrico en las estructuras estudiadas. En esta simulación se debe tomar muy en cuenta el perfil lateral para obtener valores y para poder validar con las mediciones realizadas.

En las figuras mostradas se presenta la distribución del campo eléctrico desde la torre, lo cual se observa que entre más alto sea la torre, el campo eléctrico disminuye con relación al suelo. Esto se puede comparar con la Figura 5.2 y Figura 5.4, lo cual la altura de las torres es distinta dependiendo del tipo de suelo que se encuentre la estructura.

Con respecto al suelo no existe la presencia del campo eléctrico como se observan en la Figura 5.2, Figura 5.3 y Figura 5.4.

5.2.2 Campo magnético – Vista lateral

5.2.2.1 Estructura E-1075

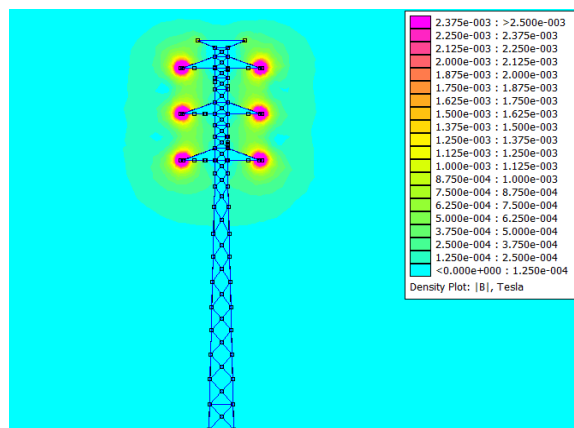


Figura 5.5. Distribución del campo magnético en la estructura E-1075, perfil lateral.

5.2.2.2 Estructura E-0268

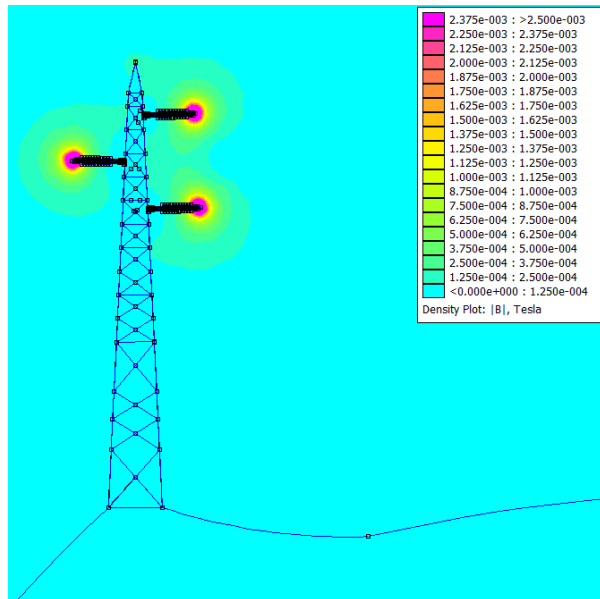


Figura 5.6. Distribución del campo magnético en la estructura E-0268, perfil lateral.

5.2.2.3 Estructura E-0263

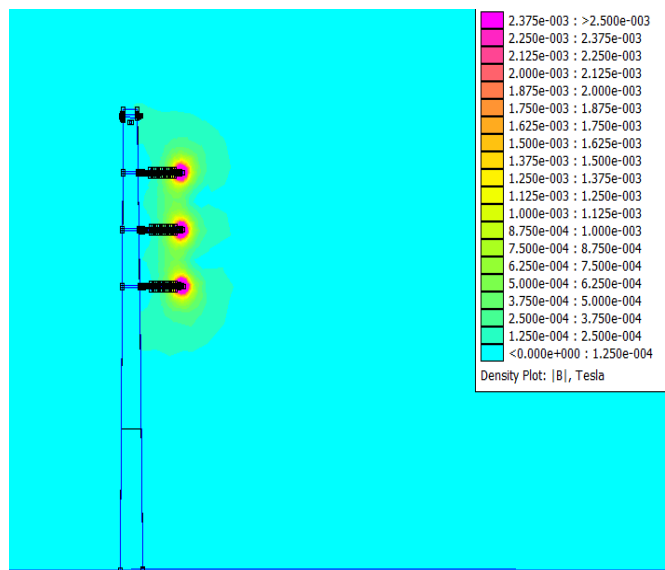


Figura 5.7. Distribución del campo magnético en la estructura E-0263, perfil lateral.

La Figura 5.5, Figura 5.6 y Figura 5.7, muestran la distribución del campo magnético en las tres estructuras evaluadas. Se observa que existe una mayor presencia del campo magnético cerca de los conductores, todo esto se relaciona por la corriente que circula por las mismas.

5.2.3 Campo eléctrico – Vista longitudinal

5.2.3.1 Estructura E-1075

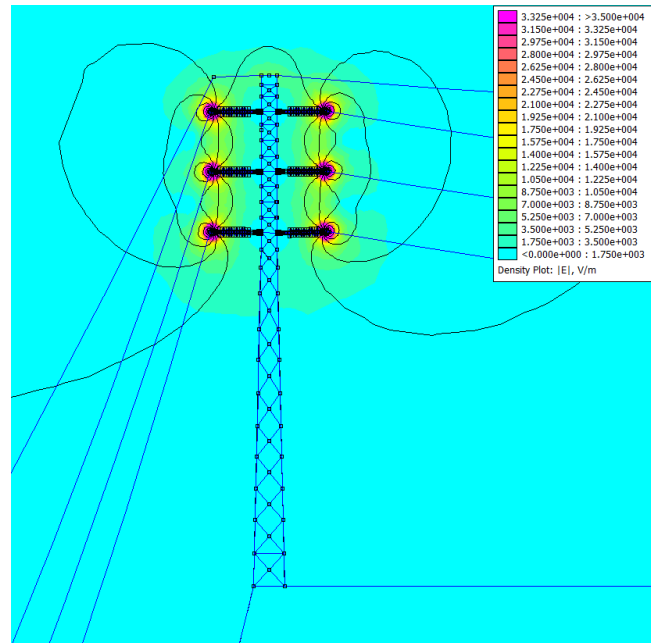


Figura 5.8. Distribución del campo eléctrico en la estructura E-1075, perfil longitudinal.

5.2.3.2 Estructura E-0268

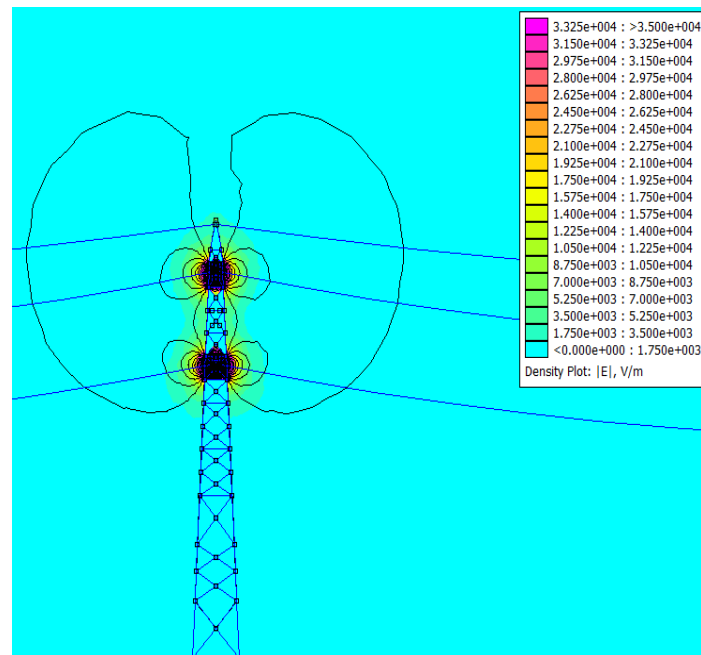


Figura 5.9. Distribución del campo eléctrico en la estructura E-0268, perfil longitudinal.

5.2.3.3 Estructura E-0263

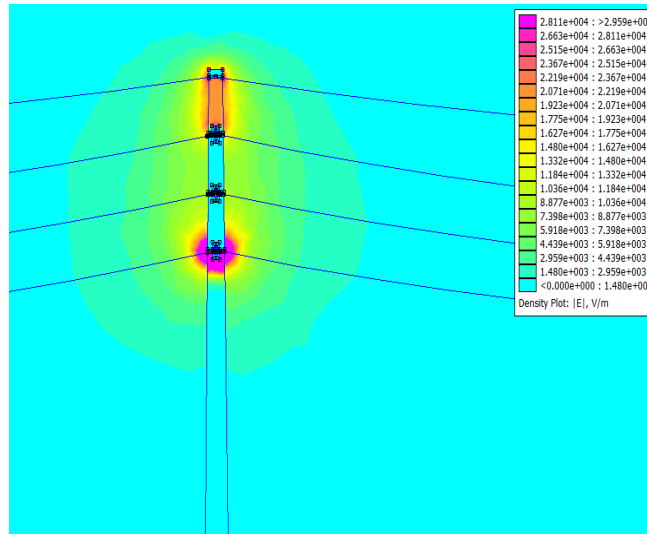


Figura 5.10. Distribución del campo eléctrico en la estructura E-0263, perfil longitudinal.

La Figura 5.8, Figura 5.9 y la Figura 5.10 presentan la distribución del campo eléctrico en las estructuras seleccionadas. Esto es, se realizan las mediciones del campo eléctrico vano adelante (con dirección a la subestación Loreto) y vano atrás (con dirección hacia la subestación Península). A medida que hay un acercamiento mayor entre el conductor y el suelo, se registran valores mayores del campo eléctrico.

5.2.4 Campo magnético – Vista longitudinal

5.2.4.1 Estructura E-1075

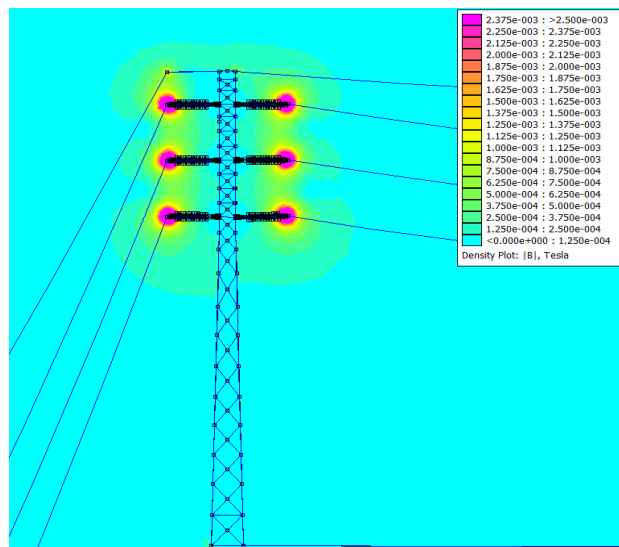


Figura 5.11. Distribución del campo magnético en la estructura E-1075, perfil longitudinal.

5.2.4.2 Estructura E-0268

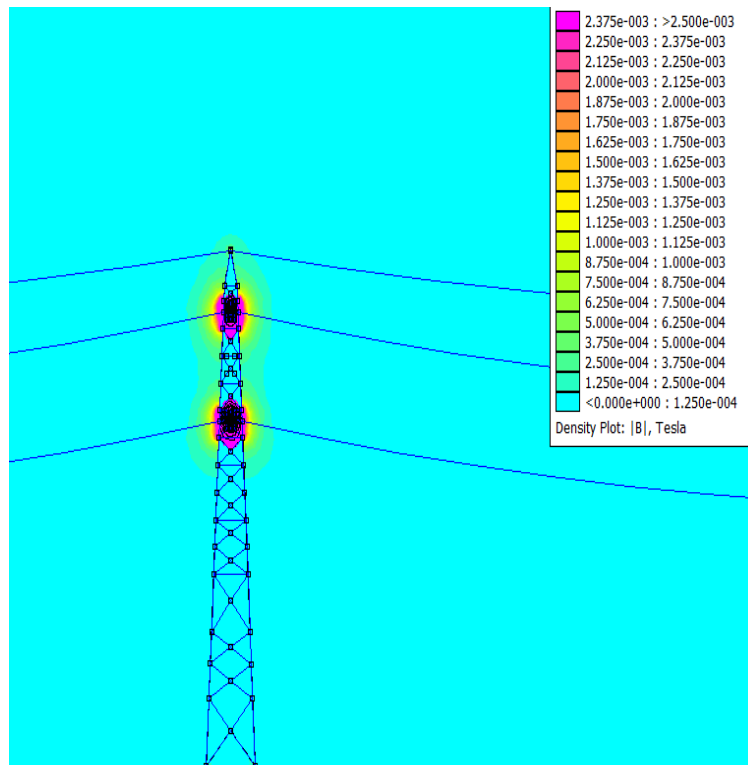


Figura 5.12. Distribución del campo magnético en la estructura E-0268, perfil longitudinal.

5.2.4.3 Estructura E-0263

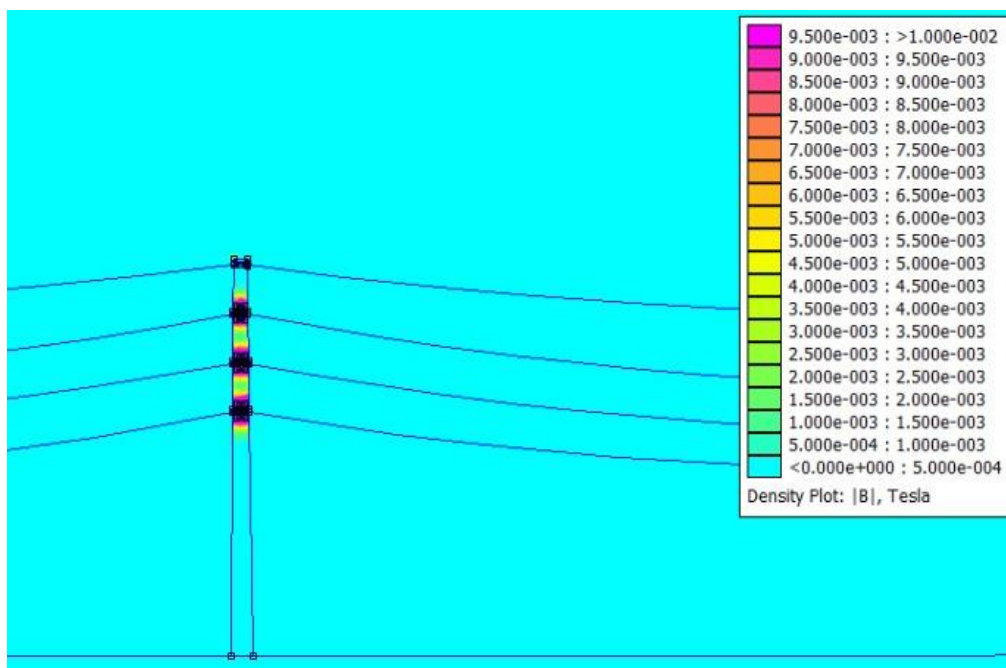


Figura 5.13. Distribución del campo magnético en la estructura E-0263, perfil longitudinal.

La Figura 5.11, Figura 5.12 y Figura 5.13, presentan la distribución del campo magnético en las estructuras estudiadas. En la estructura E-0263 se observa que el campo magnético es menor debido a la corriente que circula por los conductores.

5.2.5 Validación de resultados

En este apartado se detallan los resultados obtenidos de los datos medidos y simulados del campo eléctrico y magnético respectivamente, con el fin de poder validar los resultados, y determinar el error que existe entre estos dos tipos de datos.

Para el análisis del campo eléctrico hay factores los cuales se deben tomar en cuenta, existen ciertos tipos de suelos que facilitan la conducción eléctrica. Diferentes tipos de sales, metales y minerales pueden ayudar a que el suelo sea un mejor conductor.

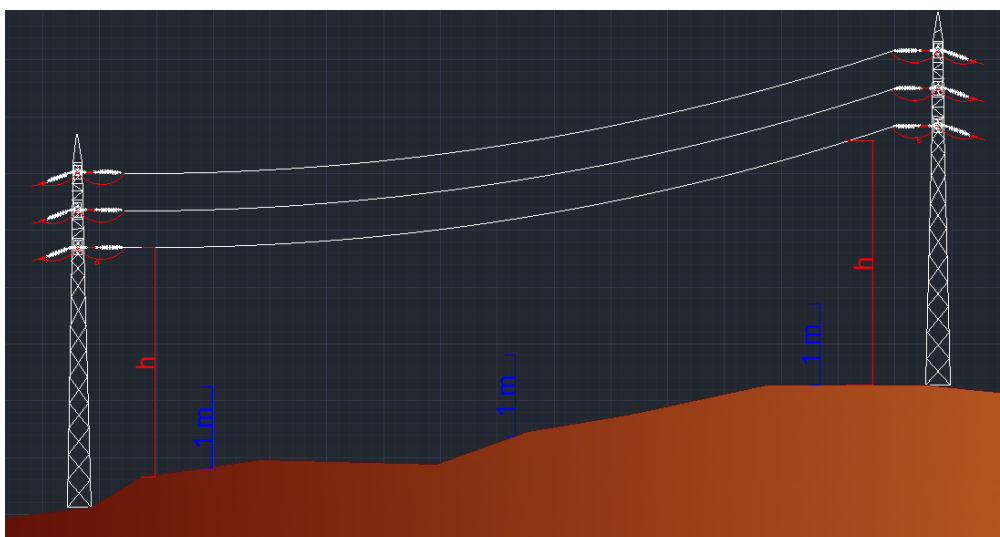


Figura 5.14. Representación de la medición a 1 m sobre el nivel del suelo.

En la figura se observa las mediciones a 1 m sobre el nivel del suelo, siguiendo la metodología de la Norma IEEE 644, lo cual indica el procedimiento de la recopilación de datos, teniendo en cuenta los lineamientos para la medición del campo eléctrico y magnético.

Además, la Figura 5.14 representa el suelo a desnivel y las diferentes alturas que existe desde el suelo al conductor, por aquello, las mediciones del campo eléctrico y campo magnético serán diferentes con relación a la altura que existe en relación suelo – conductor. Al contrario, esto no pasa con suelo a nivel, las mediciones serán casi iguales con variación en las mediciones a lo largo del tramo del vano.

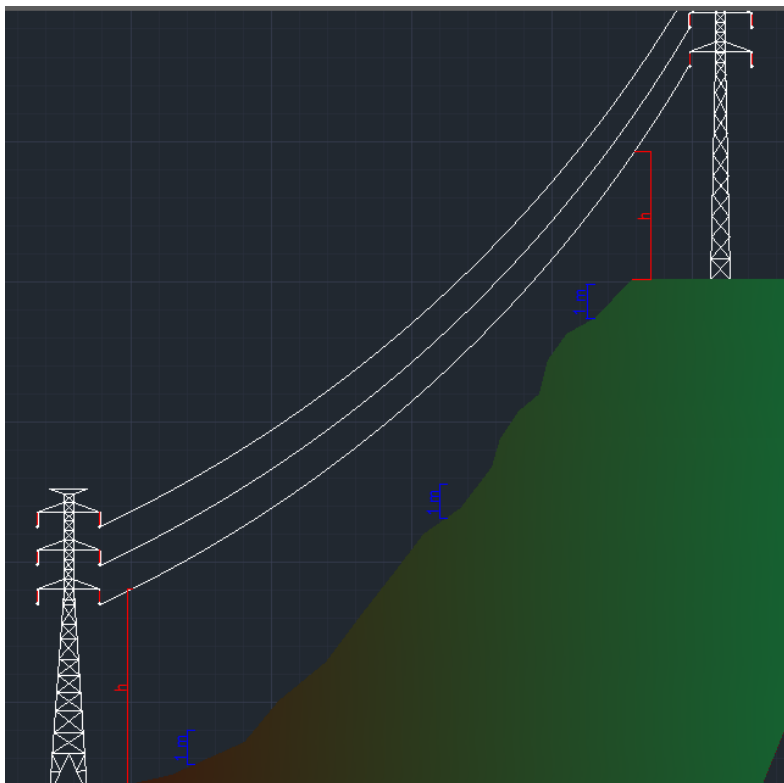


Figura 5.15. Representación de la medición a 1 m sobre el nivel del suelo con pendiente.

El tipo de suelo presente en cada de las estructuras son diferentes. Se tienen suelos secos, moderadamente húmedos. Al medir la diferencia de potencial existente entre los conductores y el suelo, se obtiene que, a menor altura sobre el nivel del suelo el campo eléctrico es mayor, mientras que, si aumenta la altura el campo eléctrico es menor, con referencia al conductor.

Como se puede observar en la figura 5.14 y 5.15, la planimetría donde están acentuadas las torres es diferente, pero tienen el mismo análisis, en función de la longitud el conductor tiende a formar la catenaria específicamente en la mitad de las dos estructuras, se tiene que la distancia entre el conductor y el suelo tiende a ser menor y se tendrá mayor campo electromagnético.

La medición de campos eléctricos y magnéticos incluirá de modo particular los sitios en donde se observe el efecto acumulativo con otras fuentes de radiaciones no ionizantes de 60 Hz, y en que además se identifique la presencia de asentamientos humanos en sus proximidades. Para la medición de campos electromagnéticos se deberán considerar aquellos sitios ubicados, sea a lo largo del recorrido de la línea de transmisión, y en que se encuentren viviendas o asentamientos humanos [13].

5.2.5.1 Estructura E-1075 (Campo eléctrico – Perfil longitudinal - vano adelante)**Tabla 5.8.** Resultados del campo eléctrico medidos y simulados de la estructura E-1075.

CAMPO ELÉCTRICO				
PERFIL LONGITUDINAL-VANO ADELANTE				
TORRE E-1075 A TORRE E-0271		LONGITUD		90 m
UBICACIÓN DEL PUNTO DE MEDICION	DISTANCIA RECORRIDA DEL VANO (m)	E (V/m) A UN METRO DE ALTURA		% ERROR
		MEDIDO	SIMULADO	
0	DENTRO DE LA TORRE	5	0,000	100%
1	9	175	159,400	9%
2	18	165	158,750	4%
3	27	228	209,400	8%
4	36	235	240,680	2%
5	45	365	334,390	8%
6	54	358	367,270	3%
7	63	263	251,760	4%
8	72	223	206,460	7%
9	81	164	178,130	9%
10	90	8	-	-

Con el fin de determinar los niveles de campo eléctrico y campo magnético fueron evaluados en tres estructuras. Se realizó una tabla comparativa del campo eléctrico, para el perfil longitudinal vano adelante, las mediciones se realizaron en 10 puntos tales que cubra la longitud del vano respectivamente, el punto cero es dentro de la torre.

El material de las estructuras con el que se realizó la simulación es de acero galvanizado, el cual trabaja como una jaula de Faraday, teniendo un apantallamiento completamente de 0 V/m, mientras que en la medición obtenemos un valor de 5 V/m, como indicamos previamente los campos eléctricos varían mucho con la posición, ya que se tratan del resultado de una compleja interacción entre varias fuentes de campo, lo cual permite obtener un valor cercano a cero dentro de la estructura. Todos los datos de las mediciones y simulaciones se observan en la Tabla 5.8.

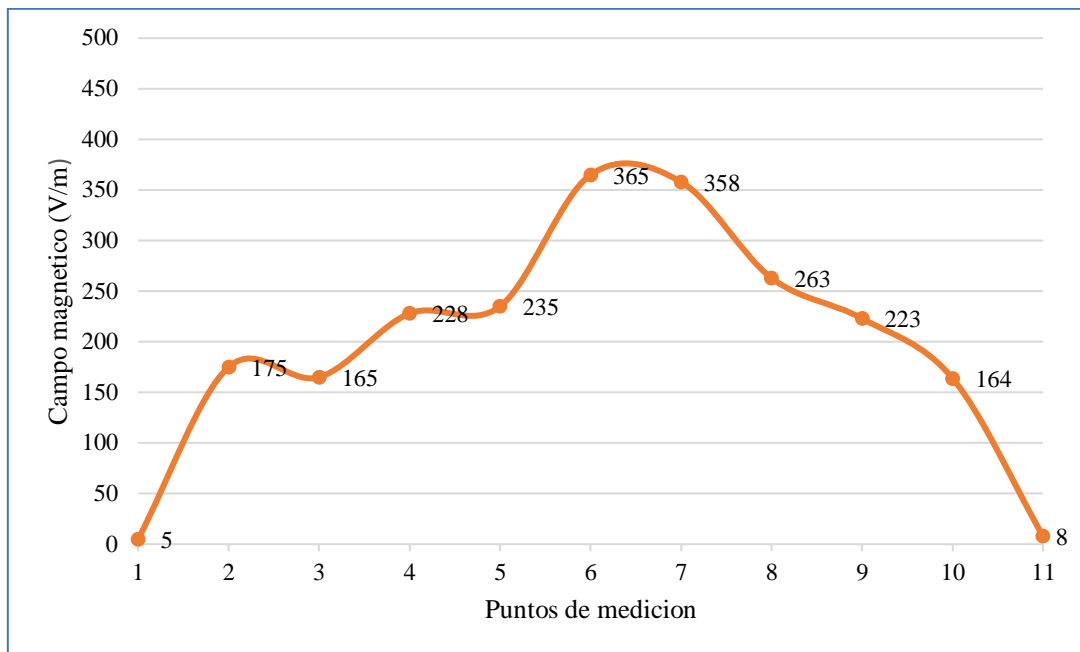


Figura 5.16. Gráfica del campo eléctrico – vano adelante.

La Figura 5.16 indica el resultado de las mediciones del campo eléctrico, de acuerdo a los datos obtenidos en el punto de medición 1 el valor recopilado es de 175 V/m, los datos varían debido a la distancia de medición según la longitud del vano, de acuerdo a la Figura 5.16 el punto más alto de campo eléctrico es de 365 V/m, seguido por 358 V/m y 263 V/m, lo que indica que estos valores están en la mitad del vano, dando como resultado que mientras más cercano este la línea de transmisión con respecto al suelo el campo eléctrico será mayor y mientras más alto sea la línea con relación al suelo el valor del campo será menor. Para observar de mejor manera en la Figura 5.14 muestra la altura que existe en la mitad del vano. Por ende, las mediciones son altas en la mitad del vano.

En este sentido, con la finalidad de evaluar la variación del campo eléctrico en cada una de las estructuras, se observó que existen viviendas, vegetación y otros elementos propios del lugar que intervienen en la toma de datos, cabe recalcar que estos objetos propios del lugar influyen directamente en los niveles de campo eléctrico medidos, para el caso de la simulación solo se trabaja con los elementos que constituyen una línea de transmisión y no se toman en cuenta los diferentes elementos que existen en el lugar.

5.2.5.2 Estructura E-1075 (Campo eléctrico – Perfil longitudinal – vano atrás)**Tabla 5.9.** Resultados del campo eléctrico medidos y simulados de la estructura E-1075.

CAMPO ELECTRICO				
PERFIL LONGITUDINAL-VANO ATRÁS				
TORRE E-1075 A TORRE E-0071		LONGITUD		280 m
UBICACIÓN DEL PUNTO DE MEDICION	DISTANCIA RECORRIDA DEL VANO (m)	E (V/m) A UN METRO DE ALTURA		% ERROR
		MEDIDO	SIMULADO	
0	DENTRO DE LA TORRE	5	0,000	100%
1	28	353	345,850	2%
2	56	127	116,240	8%
3	84	147	139,650	5%
4	112	112	119,380	7%
5	140	85	101,980	20%
6	168	92	110,080	20%
7	196	83	117,500	42%
8	224	184	159,310	13%
9	252	217	196,220	10%
10	280	2	-	-

Con el fin de determinar los niveles de campo eléctrico y campo magnético fueron evaluados en tres estructuras. Se realizó una tabla comparativa del campo eléctrico, para el perfil longitudinal vano atrás, las mediciones se realizaron en 10 puntos tales que cubra la longitud del vano respectivamente, el punto cero es dentro de la torre.

Adicionalmente, para la misma estructura se realizaron las mediciones vano atrás y en puntos críticos de difícil acceso, para el criterio del punto cero para vano atrás se tomó como referencia los resultados que se obtuvieron en vano adelante, ya que cumple con los mismos principios dentro de estructura.

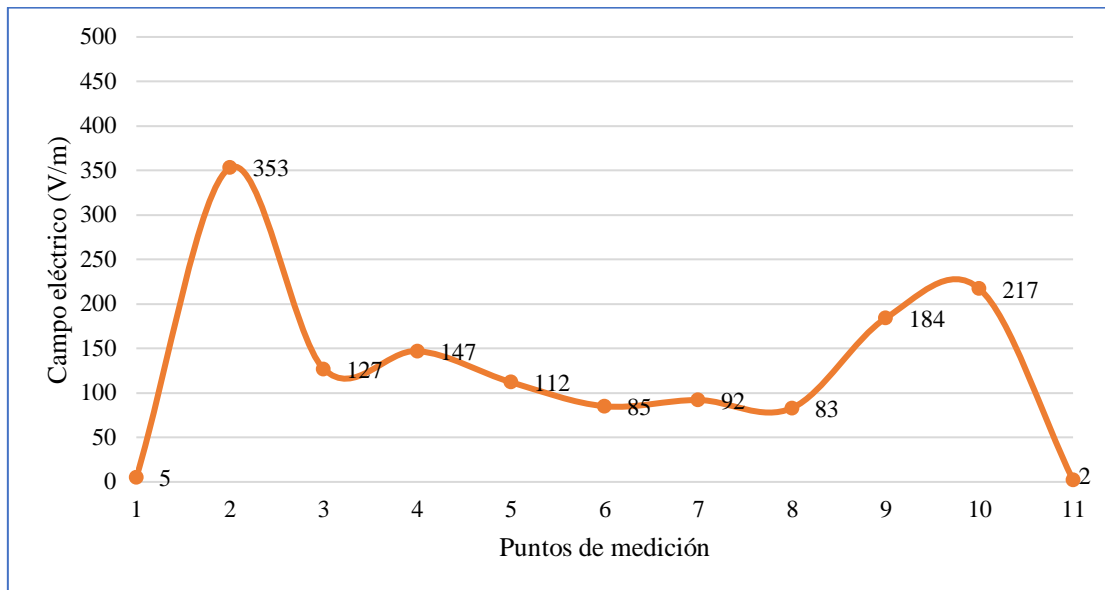


Figura 5.17. Gráfica del campo eléctrico – vano atrás.

Para obtener una mejor visión de la variación del campo eléctrico existente a lo largo del vano atrás, se procedió a graficar la distribución del campo medido que se obtuvo como se muestra en la Figura 5.17, en este caso, los valores máximos de campo eléctrico se registraron en el punto 1 con 353 V/m seguido en el punto 9 con 217 V/m. Cabe recalcar que en cada punto se registró diferentes alturas desde el suelo con relación al conductor dando como resultado una variación de campo eléctrico en estos puntos. En Anexos en la Figura D3, D4 y D5, representa la variación de alturas que existe entre el suelo y el conductor tal como se muestra en la figura 5.15.

En lo que respecta a los valores mínimos del campo eléctrico en el punto 6 con 85 V/m seguido en el punto 7 con 92 V/m y en el punto 8 con 83 V/m, representa la distorsión de las mediciones en los puntos afectados, debido a que el campo al nivel suelo se ve disminuyendo por la pendiente de la zona, en estos tres puntos mencionados se localizó la presencia de objetos como: plantas, arboles, vegetación y humedad en la zona lo que afectan directamente en la medición del campo eléctrico, por aquello los valores son mínimos es debido a la interferencia de los mismos, dando como resultado una variación drástica en las mediciones. En la Figura 5.18 y Figura 5.19 se observa la cantidad de interferencias que hubo en el lugar donde se realizó las mediciones.



Figura 5.18. Interferencias en las mediciones zona geográfica vano atrás (E-1075).



Figura 5.19. Interferencias en las mediciones zona geográfica vano atrás (E-1075).

5.2.5.3 Estructura E-1075 (Campo eléctrico – Perfil lateral – lado derecho e izquierdo)

Tabla 5.10. Resultados del campo eléctrico medidos y simulados de la estructura E-1075.

CAMPO ELÉCTRICO				
LADO DERECHO – IZQUIERDO				
DENTRO DE LA TORRE		LONGITUD		30 m
UBICACIÓN DEL PUNTO DE MEDICIÓN	DISTANCIA RECORRIDA DEL VANO (m)	E (V/m) A UN METRO DE ALTURA		% ERROR
		MEDIDO	SIMULADO	
10	30	5	4,61	8%
9	27	7	6,54	7%
8	24	7	7,71	10%
7	21	8	8,27	3%
6	18	10	9,20	8%
5	15	19	20,74	9%
4	12	41	40,36	2%
3	9	71	72,24	2%
2	6	120	131,65	10%
1	3	164	156,56	5%
-1	3	169	159,56	6%
-2	6	131	126,88	3%
-3	9	82	77,32	6%
-4	12	41	43,33	6%
-5	15	27	25,16	7%
-6	18	19	20,41	7%
-7	21	16	16,96	6%
-8	24	16	14,58	9%
-9	27	13	12,14	7%
-10	30	10	9,42	6%

En la Tabla 5.10 se presentan los resultados obtenidos del campo eléctrico, básicamente todos los valores se distribuyen para el lado derecho y lado izquierdo de la estructura, tal que cubra la franja de servidumbre según el nivel de tensión, para nuestro estudio la franja es de 16 m.

En este caso el campo eléctrico se disipa en función de la distancia, cada medición se la hizo a tres metros y podemos observar cómo decrecen los valores medidos y simulados.

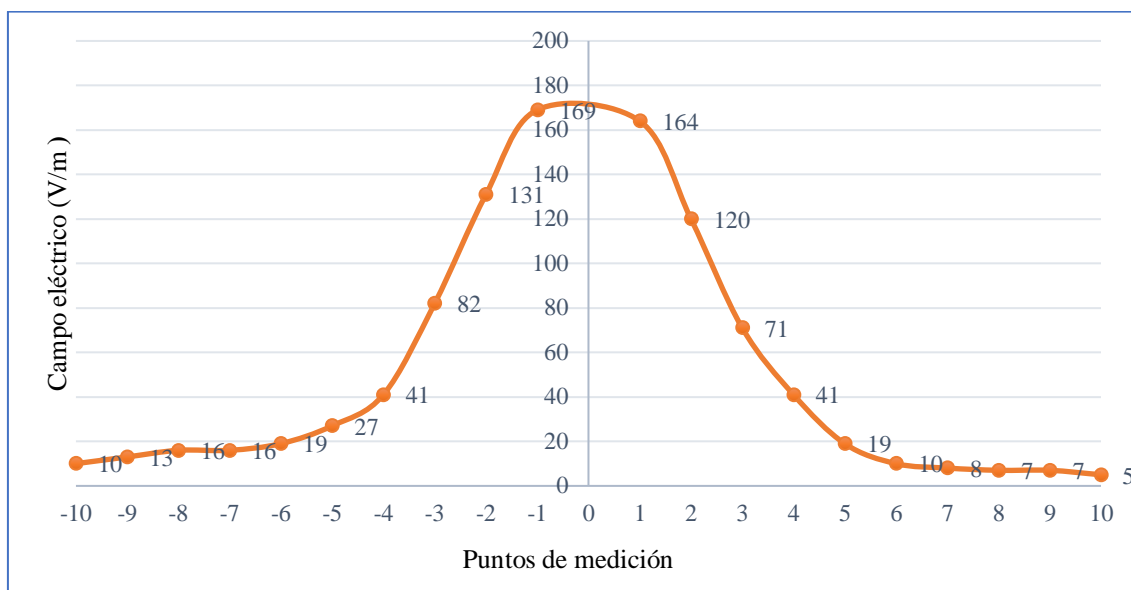


Figura 5.20. Gráfica del campo eléctrico – Perfil lateral estructura E-1075.

La curva muestra como varia la intensidad de campo eléctrico, lo cual indica que el valor máximo es de 164 V/m y 169 V/m siendo cerca de la estructura y va disminuyendo cada vez que se aleja de la torre en dirección hacia la derecha y de igual manera en dirección hacia el lado izquierdo, obteniendo valores mínimos como 10 V/m y 5 V/m respectivamente.

5.2.5.4 Estructura E-0268 (Campo magnético – Perfil longitudinal – vano adelante)

Tabla 5.11. Resultados del campo magnético medidos y simulados de la estructura E-0268.

CAMPO MAGNETICO				
PERFIL LONGITUDINAL - VANO ADELANTE				
TORRE E-268 A TORRE E-267		LONGITUD		130 m
PUNTO DE MEDICION	DISTANCIA DEL VANO (m)	B (μT) A UN METRO DE ALTURA		% ERROR
		MEDIDO	SIMULADO	
1	13	0,38	0,39	3%
2	26	0,35	0,34	3%
3	39	0,37	0,35	5%
4	52	0,30	0,28	7%
5	65	0,40	0,37	8%
6	78	0,38	0,39	3%
7	91	0,30	0,32	7%
8	104	0,41	0,43	5%
9	117	0,39	0,42	8%
10	130	0,33	0,35	6%

Con respecto al campo magnético la Tabla 5.11 muestra los resultados obtenidos en las mediciones, el campo magnético más intenso ocurre justo alrededor de los conductores debido al flujo de corriente que circula por la misma. El valor máximo obtenido es 0,40 uT y es en la mitad del vano, esto conforme la distancia va disminuyendo con relación al suelo.

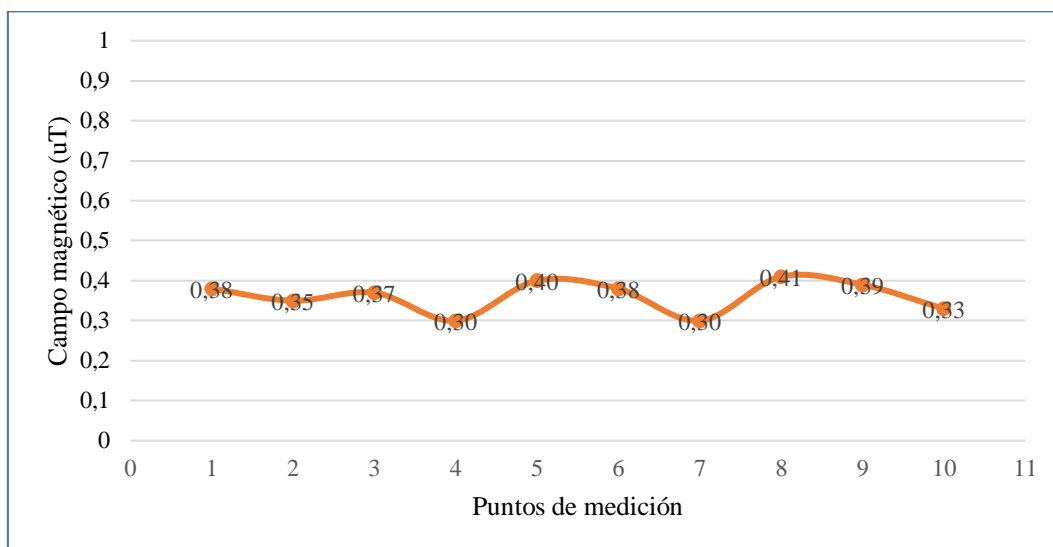


Figura 5.21. Gráfica del campo magnético– vano adelante.

La Figura 5.21 indica el resultado de las mediciones del campo magnético, de acuerdo a los datos obtenidos en el punto de medición 1 el valor recopilado es de 0,38 uT, los datos varían debido a la distancia de medición según la longitud del vano y el desnivel del suelo, de acuerdo a la Figura 5.21 los puntos más altos son en la mitad del vano, mientras que los valores mínimos son de 0,30 uT seguido de 0,33 uT.

Una vez analizados los resultados de los valores obtenidos por medio del equipo EMF 450, se obtiene que los valores no varían de forma abrupta ya que el campo magnético no se ve afectado por interferencias que puedan intervenir en sus mediciones. Por lo cual sus valores son casi constantes, pero esto se ve afectado según el desnivel del suelo y la altura con respecto a los conductores ya que las mediciones del campo magnético están relacionadas con la posición geográfica del equipo EMF 450.

5.2.5.5 Estructura E-0268 (Campo magnético – Perfil lateral – lado derecho e izquierdo)

Tabla 5.12. Resultados del campo magnético medidos y simulados de la estructura E-0268.

CAMPO MAGNÉTICO				
LADO DERECHO – IZQUIERDO				
DENTRO DE LA TORRE			LONGITUD	30 m
UBICACIÓN DEL PUNTO DE MEDICION	DISTANCIA RECORRIDA DEL VANO (m)	B (uT) A UN METRO DE ALTURA		% ERROR
		MEDIDO	SIMULADO	
5	15	0,09	0,08	3%
4	12	0,15	0,16	7%
3	9	0,22	0,23	5%
2	6	0,29	0,31	7%
1	3	0,36	0,37	11%
-1	3	0,35	0,36	3%
-2	6	0,29	0,26	10%
-3	9	0,22	0,20	9%
-4	12	0,18	0,17	6%
-5	15	0,11	0,12	9%

En la Tabla 5.12 se presentan los resultados obtenidos del campo magnético, básicamente todos los valores se distribuyen para el lado derecho y lado izquierdo de la estructura, tal que cubra la franja de servidumbre según el nivel de tensión, para nuestro estudio la franja es de 16m.

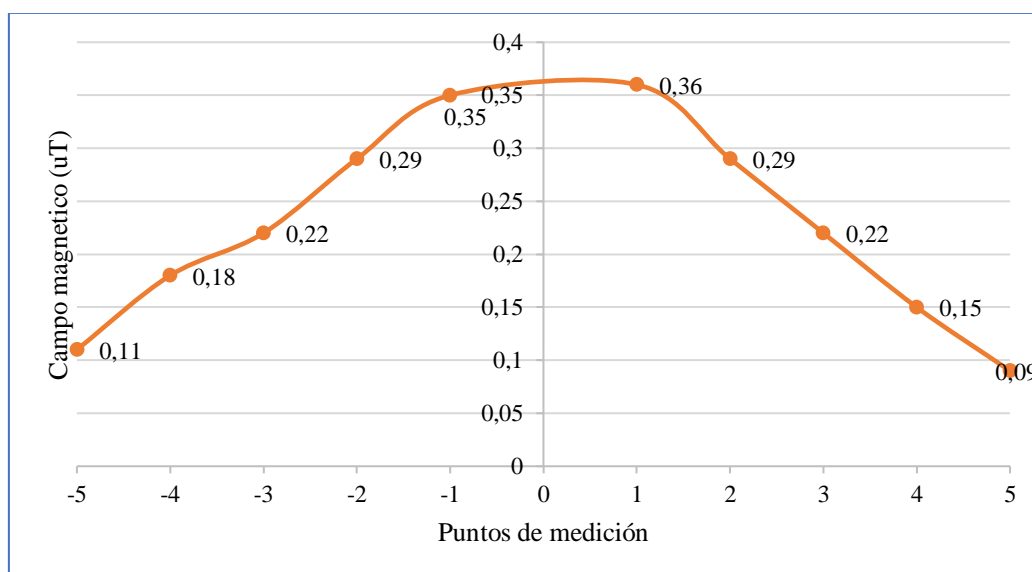


Figura 5.22. Gráfica del campo magnético– perfil lateral.

Para una mejor visión de la variación del campo magnético en el perfil lateral, la curva muestra como varia el campo magnético, lo cual indica que el valor máximo es de 0,36 uT y 0,35 uT siendo estos valores cerca de la estructura y va disminuyendo cada vez que se aleja de la torre en dirección hacia el lado derecho y de igual manera en dirección hacia el lado izquierdo, obteniendo valores mínimos como 0,11 uT y 0,09 uT respectivamente.

Para el caso de la simulación de igual forma se tienen valores decrecientes desde su primer punto de medición, mientras se va alejando va disminuyendo su valor de campo magnético, por ende, se obtiene un valor de margen de error mínimo de 3%.

El estudio se realizó en tres diferentes torres, pero el análisis a realizar en cada una de las estructuras será el mismo procedimiento, los datos y graficas del campo eléctrico y magnético de cada torre se encuentran en la parte de anexos.

5.2.6 Validación de resultados de los cálculos y simulación

Para comprobar los valores medidos y calculados tanto del campo eléctrico y campo magnético que se obtuvieron, se realizó el cálculo manual de los mismos para cada una de las estructuras con el método de la Imágenes Reflejadas, analizada en la sección 4.4, siendo tal que, estos cálculos solo existen para el perfil lateral.

Para la validación de los datos que se obtuvieron en el cálculo se tiene como apoyo el programa EXCEL, para poder obtener mínimos errores de cálculo al ingresar las fórmulas que se necesitan para resolver este tipo de problemas de campo magnético y eléctrico.

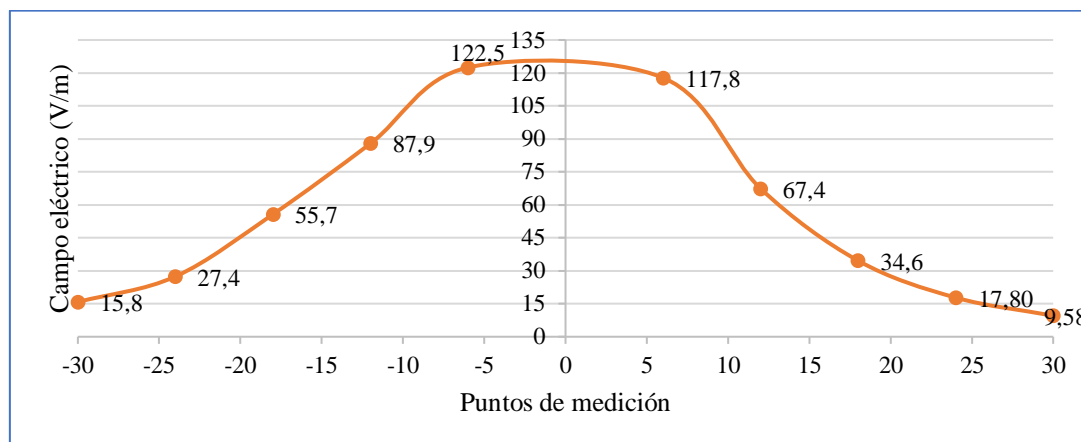
Para este caso se comparan los datos obtenidos en las mediciones realizadas en campo, con los datos obtenidos en el cálculo, con esto se puede observar el margen de error existente entre los datos medidos y calculados. Para realizar esta comparación tomamos los datos de la estructura E-0268, las demás comparaciones se encuentran en la parte de anexos.

Al comparar los resultados obtenidos en la tabla 5.13, se puede verificar que el error es significativo por la misma razón que en las mediciones hubo interferencias de objetos, edificaciones, plantas, etc. Por lo que no permite obtener valores cercanos a los cálculos obtenidos. Por ende, los datos de los cálculos siguen por debajo de los límites que establece la normativa, el comportamiento del campo eléctrico y magnético será igual al simulado que ira decreciendo en función de la longitud.

Tabla 5.13. Datos de CEM obtenidos en los cálculos y simulación.

Estructura E-0268						
Distancia	Ec (V/m)	Em (V/m)	Error (%)	Bc (μ T)	Bm (μ T)	Error (%)
-30	15,8	2	87%	0,05	0,01	80%
-24	27,4	8	71%	0,09	0,02	78%
-18	55,7	42	25%	0,14	0,06	57%
-12	87,9	75	15%	0,22	0,15	32%
-6	122,5	142	16%	0,38	0,29	24%
0	-	-	-	-	-	-
6	117,8	95	19%	0,32	0,29	9%
12	67,4	54	20%	0,24	0,18	25%
18	34,6	16	54%	0,17	0,10	41%
24	17,80	8	55%	0,12	0,09	25%
30	9,58	5	48%	0,08	0,06	25%

Como se observa en la tabla 5.13 los valores de campo eléctrico y magnético son de la torre E-0268 del perfil lateral, para realizar el cálculo se tomó el método de imágenes reflejadas dando valores casi cercanos a los medidos en campo, teniendo un margen de error mínimo del 15%.

**Figura 5.23.** Gráfica del campo eléctrico calculado– perfil lateral.

Como se observa en la figura 5.23, el comportamiento del campo eléctrico decrece en función de la longitud, es decir mientras más cerca se este de la torre tendremos mayor campo eléctrico e ira decreciendo en función de que nos alejemos de la torre hacia el lado derecho o izquierdo, en este caso se tiene en el primer punto un valor de 112.5 V/m el mismo que decrece hasta 15.8 V/m, y el mismo caso para el lado izquierdo se tiene un valor de 117.8 V/m y decrece hasta 9.58 V/m.

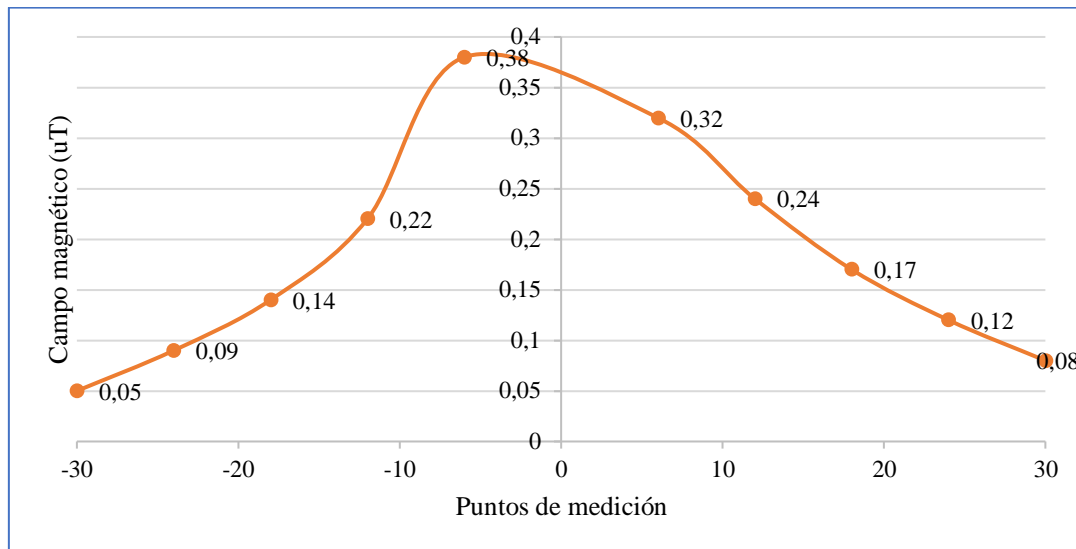


Figura 5.24. Gráfica del campo magnético calculado– perfil lateral.

Para el caso del campo magnético su análisis es igual al del campo eléctrico, decrecerá en función de la longitud, de igual forma se segmentó la distancia de 30 metros en 5 partes, teniendo su primer valor a los 6 metros el mismo que es de $0,38 \mu\text{T}$, que decrece hasta $0,01 \mu\text{T}$ y para el lado derecho se tiene un primer valor de $0,32 \mu$, que decrece hasta $0,08 \mu\text{T}$.

5.2.7 Justificación de la simulación y cálculos

La comparación de los perfiles de campo eléctrico y campo magnético simulados y calculados es afectada no solo por los errores de simulación, sino también por las simplificaciones usualmente hechas para tales cálculos, como suponer terreno plano y ausencia de algún objeto.

Si el suelo no es plano, el campo al nivel del suelo se ve incrementado en las lomas y reducido en las depresiones. Otras fuentes de error en los cálculos son: suponer constante la temperatura del conductor durante las mediciones, tensión de línea constante y balanceada. [35].

Para la justificación de estos resultados se toma en cuenta el análisis y criterios de resolución del campo eléctrico y campo magnético considerando que la simulación y cálculos utilizan metodologías diferentes, por parte de la simulación con el software FEMM que se basa en el método de elementos finitos mientras tanto que los cálculos teóricos se basan principalmente en el método de las imágenes reflejadas. Debido a que la metodología de los cálculos versus metodología del software FEMM son distintas y la

forma que desarrollan para obtener los resultados del CEM varían dependiendo los cálculos que emplean cada una de ellas respectivamente.

- **Método de Elementos Finitos (FEMM)**

En el presente estudio el software FEMM se basa en el método de elementos finitos para resolver problemas de valor límite, es decir soluciona problemas cuando se conocen los valores de sus condiciones de frontera. Es comúnmente utilizado cuando se analizan problemas continuos (geometrías cerradas) [6]. El Método de los elementos finitos (MEF) es uno de los métodos numéricos más populares para la simulación por computador.

La ventaja principal del MEF, sobre otros métodos numéricos en aplicaciones técnicas, es la capacidad de manejar problemas de geometría circular y no lineal dependiente del tiempo. Por lo tanto, este método, es conveniente para resolver el problema de los efectos del campo magnético alrededor de una línea de transmisión, causada por una sección circular de conductores de alta tensión. Especialmente, cuando la magnitud de los campos debe ser cuidadosamente determinada en un delimitado dominio o región. Aunque los métodos convencionales sean más simples que el uso del MEF, se ven limitados a un sistema de geometría simple [36].

En la práctica, varias estructuras metálicas pueden ser encontradas en la línea debajo de la torre de acero, como ser, líneas de comunicación cercanas, u otras líneas de paso con voltaje inferior. Con este hecho, el MEF es una de las potenciales herramientas de simulación numérica para analizar problemas de campo magnético de regiones de materiales combinados [33].

Este trabajo utiliza el método de elementos finitos, para desarrollar un modelo de línea de transmisión a 60 kV que describe el comportamiento físico del campo electromagnético en los alrededores de una línea eléctrica. Así, de la resolución de las ecuaciones diferenciales de segundo grado resultantes del modelo, es posible cuantificar el campo electromagnético en los alrededores de la línea y, en particular, en cualquier punto en la cercanía de la línea que pueda resultar de interés [33]. A continuación se presenta un resumen de las fórmulas que se aplicaran en la presente sección para el cálculo del campo eléctrico y campo magnético, por ende, las ecuaciones diferenciales de segundo grado se encuentran detalladas en el apartado 4.8.

$$E_{(x,y)} = E_1 N_1(x, y) + E_2 N_2(x, y) + E_3 N_3(x, y) \quad (5.1)$$

$$H_{(x,y)} = H_1N_1(x,y) + H_2N_2(x,y) + H_3N_3(x,y) \quad (5.2)$$

- **Método de Imágenes Reflejadas**

Los campos eléctricos en las proximidades de las líneas de transmisión de CA son calculados asumiendo que no hay carga espacial, las cargas que se encuentran sólo en las superficies de los conductores, en el suelo y sobre objetos conectados a tierra. Cuando presenta el efecto corona, crea una carga espacial cerca del conductor que afecta el campo eléctrico, pero de una manera insignificante, incluso en mal tiempo cuando el efecto corona es mayor.

Una vez que se contabiliza la presencia de la tierra utilizando las imágenes de los conductores, el campo eléctrico es variable en el tiempo generado por una línea de transmisión de energía, puede ser tratado como cuasi estático, es decir, como esencialmente un campo estático porque la longitud de onda es mucho mayor que las dimensiones de bajo consideración.

Por otra parte, el método de las imágenes reflejadas, consiste en realizar el cálculo manual de los mismos para cada una de las líneas de las subestaciones eléctricas según el método de las Imágenes Reflejadas de la teoría electromagnética. Para lo cual primero es necesario calcular las matrices de coeficientes de potencial y de capacitancias por unidad de longitud para el posterior cálculo de cargas, necesarias para encontrar el campo eléctrico y magnético inducido en torno a sus conductores [1].

Las ecuaciones que utiliza este método está detallado en la sección 4.7.

5.2.8 Análisis de resultados y contrastación con las normativas vigentes

En este apartado hace una referencia de manera específica la comparación de los valores medidos de los campos eléctricos y campos magnéticos con los valores límites de la normativa nacional e internacional, cuyos valores deben estar dentro de los límites de referencia establecidos. Con esta observación se contrasta los resultados de las zonas analizadas en esta investigación, tomando en cuenta los valores máximos de las mediciones en cada estructura siendo los límites establecidos como riesgo de exposición.

Para la contrastación de los valores medidos se toma en cuenta el nivel de tensión en el caso de estudio, para esta investigación se hizo las mediciones en la línea de subtransmisión a 69 kV.

Tabla 5.14. Contraste según normativa nacional en la estructura E-1075.

ESTRUCTURA E-1075						
Áreas de medición	Valores recopilados de campo eléctrico (V/m)	Valores límite según normativa internacional (V/m)	Valores recopilados de campo magnético (μT)	Valores límite según normativa internacional (μT)	Observaciones	Norma de referencia
Vano adelante	365	4167	0,51	83	Cumple	Tribunal Constitucional, Ministerio del Ambiente. Registro oficial N°41, 2007
Vano atrás	353	4167	0,53	83	Cumple	
Lado izquierdo	169	4167	0,34	83	Cumple	
Lado derecho	164	4167	0,33	83	Cumple	

Lo que se pretende analizar del campo eléctrico y campo magnético son los datos máximos obtenidos en la medición, es identificar si los valores del CEM medidos en las diferentes áreas de medición como lo indica la Tabla 5.14 se encuentran dentro de los límites recomendados con la normativa local e internacional.

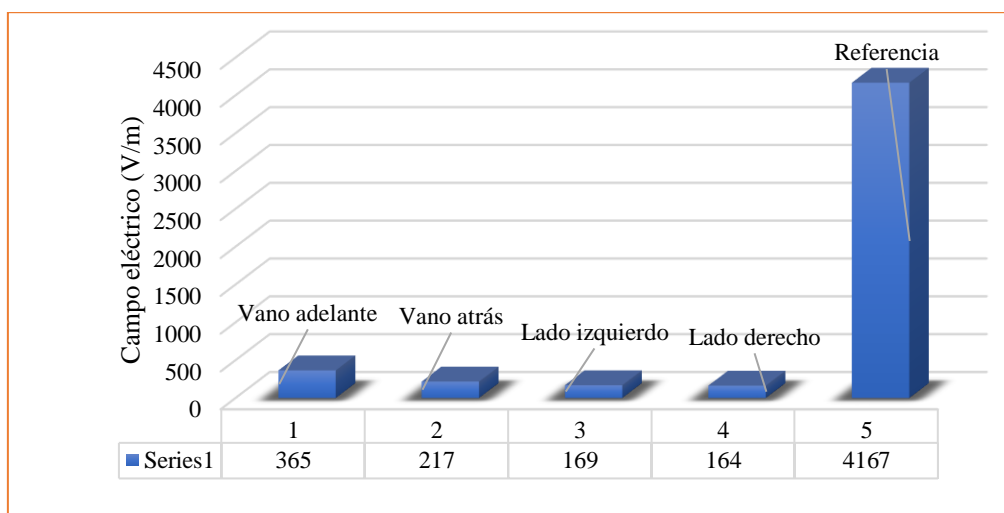


Figura 5.25. Grafica del nivel de referencia del campo eléctrico.

Para obtener una mejor visión del nivel de referencia con comparación con los valores máximos medidos del campo eléctrico que obtuvo, se procedió a graficar los datos, en este caso, los valores son 365 V/m seguido de 217 V/m, 169 V/m y 164 V/m, el valor

máximo en todas las áreas de medición se registró en vano adelante, pero ninguno de los valores medidos supero los límites establecidos para el campo eléctrico según la norma local.

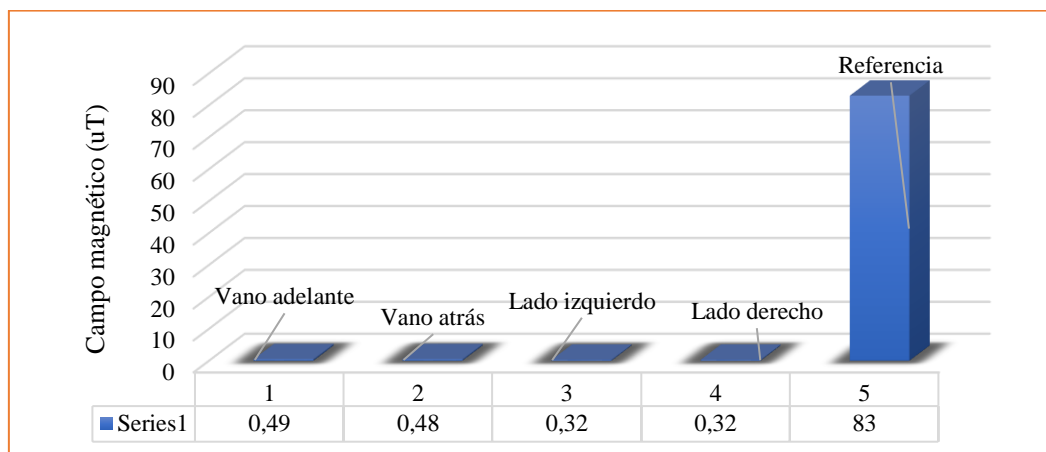


Figura 5.26. Gráfica del nivel de referencia del campo magnético.

En cuanto se refiere al campo magnético los valores máximos que se alcanzaron fueron de 0,49 uT seguido de 0,48 uT y 0,32 uT, ubicados en los puntos de medición respectivamente como indica la Tabla 5.14. En ambos casos los valores no superan los límites permisibles establecidos por la Normativa Técnica Ambiental, por lo tanto, no representan ninguna situación de riesgo para el personal que habita por el lugar. Para la contrastación con la normativa internacional se analizó la estructura E-0268.

Tabla 5.15. Contraste según normativa internacional en la estructura E-0268.

ESTRUCTURA E-0268						
Áreas de medición	Valores recopilados de campo eléctrico (V/m)	Valores límite según normativa internacional (V/m)	Valores recopilados de campo magnético (μT)	Valores límite según normativa internacional (μT)	Observaciones	Norma de referencia
Vano adelante	211	8333	0,41	417	Cumple	ICNIRP 2010 (International Commission on non-ionizing radiation protección)
Vano atrás	458	8333	2.17	417	Cumple	
Lado izquierdo	145	8333	0,35	417	Cumple	
Lado derecho	101	8333	0,36	417	Cumple	

Los valores medidos máximos que se obtuvieron de estas mediciones en la estructura E-0268 vano atrás es de 449 V/m para el campo eléctrico y en cuanto al campo magnético su valor máximo es de 0,38 μT para vano adelante.

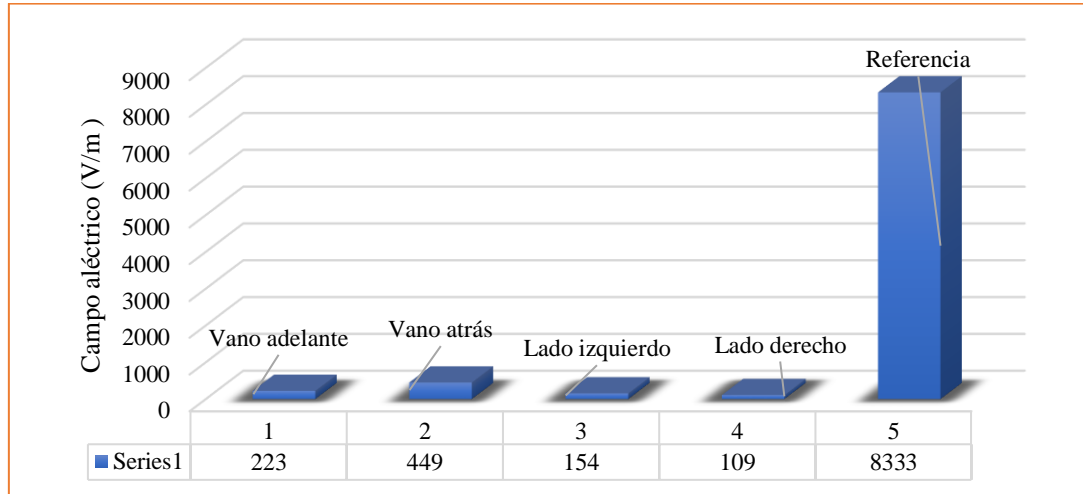


Figura 5.27. Gráfica del nivel de referencia del campo eléctrico.

En este caso los valores no superan los límites permisibles por la ICNIRP, obteniendo como valor máximo de 449 V/m seguido de 223 V/m, siendo estos valores medidos a lo largo del vano, por ende, los valores son superiores al perfil lateral. La grafica muestra como varían los valores debido a la metodología de medición, en este caso fue en perfil longitudinal y para perfil lateral.

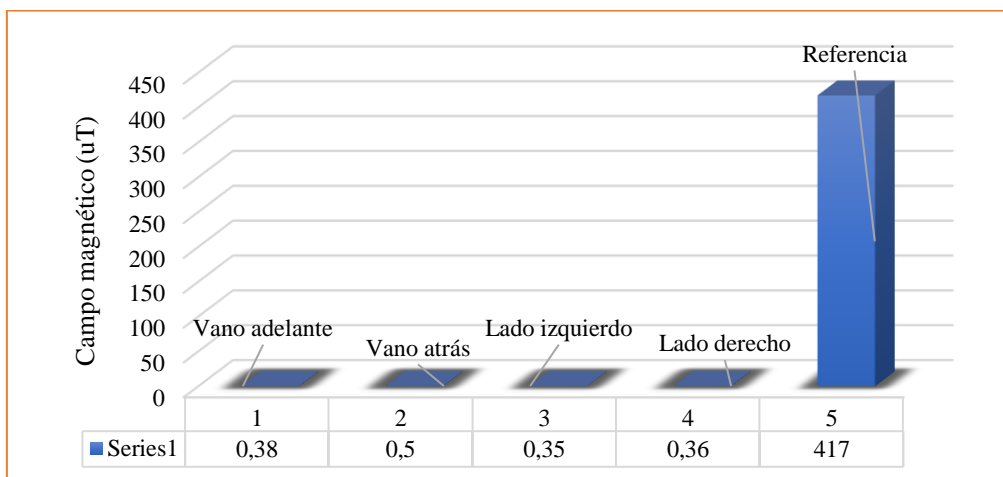


Figura 5.28. Gráfica del nivel de referencia del campo magnético.

Los valores medidos máximos que se obtuvieron de estas mediciones en la estructura E-0268 es de 0,38 μT seguido de 0,36 μT para el campo magnético. En ambos casos los valores no superan los límites permisibles establecidos por la ICNIRP, por lo tanto, no representan ninguna situación de riesgo para el personal que habita por el lugar.

Tabla 5.16. Contraste según normativa nacional en la estructura E-0268.

ESTRUCTURA E-0263						
Áreas de medición	Valores recopilados de campo eléctrico (V/m)	Valores límite según normativa internacional (V/m)	Valores recopilados de campo magnético (μT)	Valores límite según normativa internacional (μT)	Observaciones	Norma de referencia
Vano adelante	150	4167	0,55	83	Cumple	Tribunal Constitucional, Ministerio del Ambiente. Registro oficial N°41, 2007
Vano atrás	156	4167	0,24	83	Cumple	
Lado izquierdo	16	4167	0,48	83	Cumple	
Lado derecho	145	4167	0,21	83	Cumple	

Para el caso de la estructura E-0263 tenemos que los datos de campo eléctrico y magnético medidos no sobrepasan los límites establecidos por la normativa nacional establecida, en este caso tenemos que el valor máximo de campo eléctrico es en vano adelante con 156 V/m.

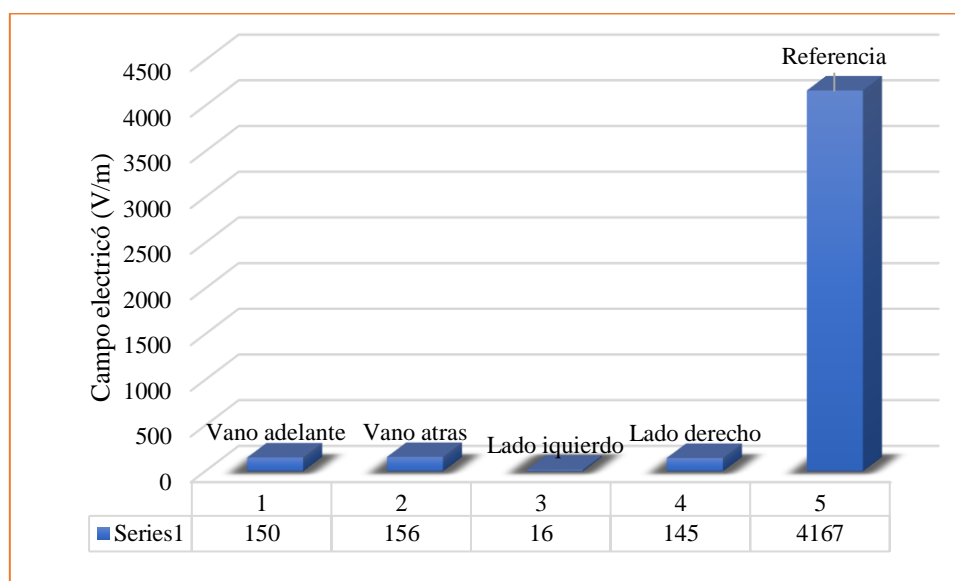


Figura 5.29. Gráfica del nivel de referencia del campo eléctrico estructura E-0263.

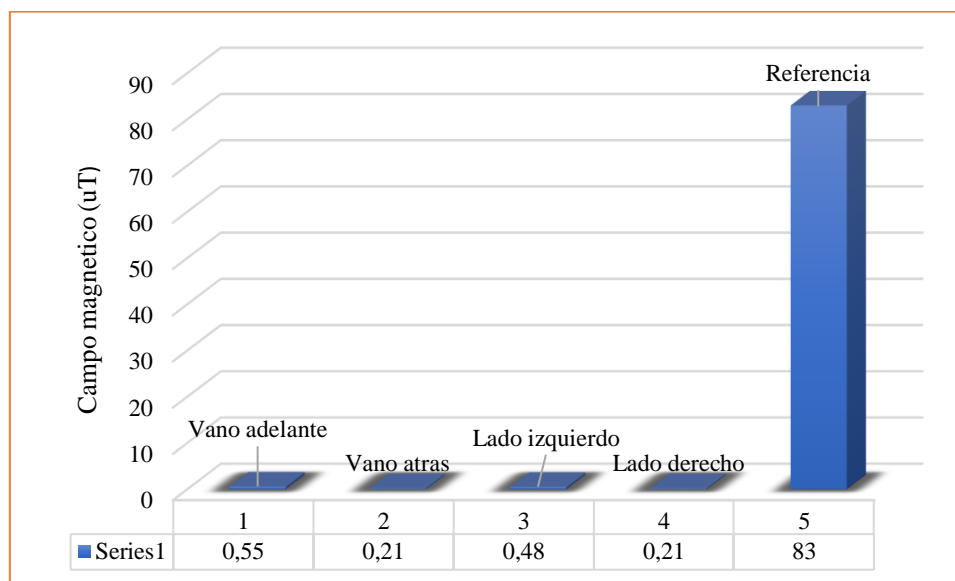


Figura 5.30. Gráfica del nivel de referencia del campo magnético estructura E-0263.

Para el caso del campo magnético tenemos un valor máximo de 0.48 uT en el perfil lateral lado izquierdo, cabe recalcar que todos los datos obtenidos en campo están bajo los límites establecidos por la normativa nacional e internacional.

De las anteriores tablas se deduce que los valores del campo eléctrico y campo magnético en las tres estructuras estudiadas y en las diferentes áreas de medición se encuentran por debajo de los límites de exposición a campos electromagnéticos según en la normativa establecida. Por ello, no existe ningún riesgo a personas que transitan por las áreas donde se encuentra la línea de subtransmisión.

Estos valores tomados como referencia se consideró a la exposición pública ya que los afectados son los transeúntes que circulan por este lugar, sin embargo, para la exposición ocupacional también se encuentra dentro del rango admisible por lo que cumple con la normativa.

Todos los resultados medidos varían según la zona de medición, donde interviene el área despejada o con obstáculo, por ello interfieren en el momento de la medición, cabe recalcar que los valores tomados se realizaron a un metro sobre el nivel del suelo siguiendo el procedimiento de la normativa IEEE 644, también hay que tener en cuenta el nivel de tensión y de corriente de la línea, por lo cual el campo eléctrico está directamente relacionado con el voltaje y el campo magnético directamente con la corriente.

En este sentido es necesario recalcar que todos los datos fueron levantados en tiempo donde la carga es máxima, es decir son datos que pueden variar con el aumento de carga.

Sin embargo, los valores se encuentran bajo todos los límites de referencia aun estando en carga máxima.

En consecuencia, en este estudio de investigación no es necesario tomar medidas correctivas para reducir la radiación de campos electromagnéticos generado por la línea de subtransmisión, disponiendo a este lugar como seguro para el desarrollo de los habitantes de este lugar.

Una vez analizado los resultados obtenidos de las mediciones de los campos eléctricos y campos magnéticos de las tres estructuras estudiadas, en caso de sobre pasar los niveles de exposición a campos electromagnéticos las empresas aplicaran un plan de adecuación o de corrección, para evitar que la exposición supere los niveles de referencia establecidos en la presente norma [13].

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

En base a la información obtenida de fuentes bibliográficas acerca de las radiaciones no ionizantes generadas en las líneas de subtransmisión tenemos que, lo establecido por las normativas, *ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection)* e *IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers)* y en la normativa local TULSMA (Texto Unificado de Legislación Secundaria de Medio Ambiente), los valores permitidos del campo eléctrico están por debajo de 4167 V/m y para el campo magnético deben ser inferiores a 83 μ T para una franja de servidumbre de 16m, para una línea de subtransmisión a 69 kV el cual es nuestro caso de estudio.

Las radiaciones no ionizantes generadas por las líneas de subtransmisión a 69 kV, se distribuyen de forma radial es decir alrededor del conductor, en este estudio la simulación se hizo en el software FEMM, ya que si bien es cierto las simulaciones permiten obtener valores aproximados a la realidad, la medición y los cálculos realizados ayudaron a contrastar los valores simulados, teniendo como resultado que los datos de la corriente, tensión, materiales de la torre, tipo de conductor, permeabilidad y permitividad de suelo y aire, son factores que interactúan directamente en los resultados de la simulación.

En la obtención de datos en las tres estructuras evaluadas y con el equipo EMF 450 METER, se visualizó la zona geográfica de cada punto medido, la normativa IEEE Std. 644-1994 indica que se debe realizar la toma de datos en dos perfiles: longitudinal y lateral, a 1m sobre el nivel del suelo y a 2.5m lejos del equipo de medición, los datos medidos en campo de las tres estructuras se observan que existe un valor máximo de campo eléctrico en el perfil longitudinal de 458 V/m y un valor máximo de campo magnético de 0.55 μ T, y para el perfil lateral un valor máximo de campo eléctrico de 169 V/m y para el campo magnético un valor máximo de 2.17 μ T.

Los factores como la altitud sobre el nivel del mar, la configuración geométrica de los conductores, la distancia entre fases, el número de subconductores por haz, la altura desde el nivel del suelo al conductor produce una variación en los valores del campo eléctrico y magnético bajo una línea de transmisión. Las líneas más compactas presentan un menor campo eléctrico a nivel del suelo. En el perfil lateral para el campo eléctrico y campo magnético los resultados van disminuyendo mientras se ve alejado de la estructura hasta el extremo de la franja de servidumbre.

Al medir la diferencia de potencial existente entre los conductores y el suelo, se obtiene que, en la estructura E-1075 que se encuentra a menor altitud sobre el nivel del mar, el campo eléctrico es menor con un valor de 365 V/m, mientras que, la estructura E-0268 que se encuentra a mayor altitud tiene un valor de campo eléctrico de 458 V/m, esto se da debido al tipo de suelo, por ende, en la mitad del vano se va obtener un valor alto de campo eléctrico y magnético dependiente directamente del suelo a nivel o desnivel.

La validación de los datos de campo eléctrico y magnético, se hizo en base a los datos medidos en campo con los datos obtenidos en la simulación y cálculos teóricos, donde hay que compararlos y obtener el margen de error, lo cual permite una contrastación más eficaz con los valores de las normativas establecidas, teniendo como resultado que todo el tramo de la línea de subtransmisión eje subestación Península – subestación Loreto, sus valores de campo eléctrico y magnético se encuentran dentro de los límites permisibles por las normativas vigentes, por lo que no hay riesgo a exposiciones del campo electromagnético y no hay riesgo alguno para las personas que habitan estos sitios, por ende, no hay que tomar medidas correctivas ni preventivas en los lugares evaluados.

6.2 RECOMENDACIONES

Se recomienda tomar en cuenta todas las interferencias que se pueden encontrar en el campo como las condiciones ambientales etc., Para el caso de la simulación se debe tomar en cuenta que serán convalidados con los datos tomados en campo y hay que tener como referencia los horarios que se realizaron las mediciones, para poder obtener los datos de potencia, voltaje y corriente que en ese lapso de tiempo transcurrían por la línea de subtransmisión a 69 kV, estos valores serán de suma importancia para la obtención de datos asemejados a la realidad y no tener un rango de error exagerado con los valores medidos.

En la simulación, cálculo y medición hay que tomar en cuenta que cada escenario es diferente y que siempre habrá aspectos que interfieran de manera directa o indirecta en la obtención de algún resultado y esto conlleve a que en varios datos resultantes existan un menor o mayor margen de error, por lo cual se recomienda seguir la metodología de mediciones del CEM de la Normativa IEEE 644 para la obtención de datos.

Los equipos con los que se realizaron las diferentes mediciones como la temperatura, humedad, presión barométrica, altura al nivel del mar y los campos electromagnéticos en los puntos analizados, tienen que tener un tiempo de acondicionamiento de acuerdo a las recomendaciones del fabricante, evitando desviaciones en las mediciones de campo que conllevan a que den medidas erróneas y cualquier tipo de movimiento brusco puede estar ligado a una desconfiguración ya que son equipos altamente sensibles.

Los parámetros de potencia, corriente y tensión con los que se trabajó en este estudio fueron obtenidos directamente del sistema informático de la empresa eléctrica Ambato ya que, al trabajar con medidas obtenidas en campo, simulación y cálculo analítico es necesario tener valores reales y de esta forma poder reflejar un estudio basado de información de ámbito teórico y práctico y que haya sustentación de la misma.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. Morales and P. Gavela, *Determinación de campos electromagnéticos en sistemas eléctricos, Aplicación a casos reales*, Abya-Yala. Quito, 2015.
- [2] M. Ruz and F. Vázquez, *EFFECTOS SOBRE LA SALUD HUMANA DE LOS CAMPOS MAGNÉTICOS Y ELÉCTRICOS DE MUY BAJA FRECUENCIA (ELF)*, Consejería de Empleo. Sevilla, 2009.
- [3] M. Repacholi, “ENCICLOPEDIA DE SALUD Y SEGURIDAD EN EL TRABAJO,” *CAMPOS ELECTRICOS Y MAGNETICOS DE VLF Y ELF*, vol. 1. Madrid, 1998.
- [4] N. Minchala and C. Velasco, “ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN DE CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS EN SUBESTACIONES ELÉCTRICAS DE MEDIA Y ALTA TENSIÓN,” Latacunga, 2021.
- [5] S. Castaño, J. Gómez, and A. Real, “CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS GENERADOS POR LAS LÍNEAS ELÉCTRICAS DE ALTA TENSIÓN. POSIBLES EFECTOS SOBRE LA SALUD Y EL MEDIO AMBIENTE,” *CIEMAT*, Madrid.
- [6] K. Cabezas and P. Jiménez, “MODELACIÓN, SIMULACIÓN Y MEDICIÓN DE LOS CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS EN UNA LÍNEA DE EXTRA ALTO VOLTAJE MEDIANTE EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS, CASO DE APLICACIÓN A LÍNEA DE TRANSMISIÓN DE 500 kV SAN RAFAEL EL INGA,” Quito, 2019.
- [7] C. Chicaiza and C. Cruz, “ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DEL PLAN DE EXPANSIÓN DEL SISTEMA DE SUBTRANSMISIÓN, CONSIDERANDO EL INCREMENTO DE LA DEMANDA POR LA INCORPORACIÓN DE LAS COCINAS DE INDUCCIÓN EN LA EEASA. PERTENECIENTE A LA PROVINCIA DE TUNGURAHUA DURANTE EL PERÍODO 2015-2025.,” Latacunga, 2016.
- [8] R. Nicaragua Carballo and F. Rivera Ramírez, “Propuesta de Metodología Para el Análisis y Estudio de la Calidad de la Energía Eléctrica,” Managua.
- [9] G. Mosquera Ávila, “OPTIMIZACIÓN DE PROYECTOS DE MANTENIMIENTO DE REDES DE DISTRIBUCIÓN ELECTRICA BASADO EN EL RIESGO DE LA OCURRENCIA DE FALLAS DE SUS EQUIPOS,” Cuenca, 2015.

- [10] H. del Pozo Barrezueta, “LEY ORGANICA DEL SERVICIO DE ENERGIA ELECTRICA.” Quito, Jan. 16, 2015.
- [11] G. Domínguez Jaramillo, “ESTUDIO DE UNA METODOLOGÍA PARA LA MEDICIÓN DE RADIO INTERFERENCIA EN LAS LÍNEAS DE TRANSMISIÓN DE ALTA TENSIÓN SANTA ROSA- POMASQUI, PERTENECIENTE AL SISTEMA NACIONAL DE TRANSMISIÓN DEL ECUADOR.,” Quito, 2014.
- [12] Plan Maestro de Electricidad, “PLAN DE EXPANSION DE LA TRANSMISION,” *Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables*.
- [13] V. Dávila García, “TRIBUNAL CONSTITUCIONAL, MINISTERIO DEL AMBIENTE. REGISTRO OFICIAL N°41, 2007,” Mar. 2007.
- [14] J. Velásquez, “ESTUDIO DE RADIACIÓN POR CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS DENTRO DEL ÁREA DE DERECHO DE VÍA DE LAS LÍNEAS DE TRANSMISIÓN ELÉCTRICA EN EL DEPARTAMENTO DE GUATEMALA,” Guatemala, 2005.
- [15] J. Grainger and W. J. Stevenson, *ANALISIS DE SISTEMAS DE POTENCIA*, McGraw-Hill. México DC, 2001.
- [16] S. Nasar, *SISTEMAS ELESTRICOS DE POTENCIA*, McGraw-Hill. México, 1991.
- [17] Ingendesa, *CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS PRODUCIDOS POR LÍNEAS DE TRANSMISIÓN ELÉCTRICA*, IISE-DIA., vol. Anexo I.
- [18] H. Young and R. Freedm, *Física universitaria, con física moderna*, Décimo segundo., vol. 2. Naucalpan de Juárez, 2009.
- [19] M. Revueltas, I. Ávila, R. Baqués, and R. Beltrán, “Los campos electromagnéticos de frecuencia extremadamente baja y su impacto sobre la salud de los seres humanos,” La Habana, 2014.
- [20] C. Valerio and M. Rojas, “Líneas de Transmisión y Campos Electromagnéticos,” *ice*, 2009.
- [21] G. Arenas, *ELECTRICIDAD Y MAGNETISMO*, Primera edición. Bogotá, 2008.
- [22] Grupo Pandora S.A., *Campos eléctricos y Magnéticos de 50 Hz*. 2001.
- [23] “IEEE Standard Procedures for Measurement of Power Frequency Electric and Magnetic Fields From AC Power Lines,” *ANSI/IEEE Std. 644*, 1987.
- [24] “UNE-CLC/TR 50453 IN informe UNE,” 2008. [Online]. Available: www.aenor.es

- [25] M. R. Lings, “EPRI Project EPRI AC Transmission Line Reference Book-200 kV and Above, Third Edition,” 2005. [Online]. Available: www.epri.com
- [26] INTERNATIONAL COMMISSION ON NON-IONIZING RADIATION PROTECTION (ICNIRP), “RECOMENDACIONES PARA LIMITAR LA EXPOSICION A CAMPOS ELÉCTRICOS, MAGNETICOS Y ELECTROMAGNÉTICOS (hasta 300 GHz),” *HEALTH PHYSICS*, 2010.
- [27] CELEC EP TRANSELECTRIC, “Estudio de Impacto Ambiental Definitivo para la Construcción, Operación & Mantenimiento, y Retiro del Proyecto Línea de Transmisión Milagro – Babahoyo a 230 kV, de 40,84 km.,” *Eficiencia Energética y Ambiental Efficācitas Consultora Cía. Ltda.*, Guayaquil, Sep. 2014.
- [28] G. Aponte, A. Escobar, H. Bolaños, and A. Mora, “Evaluación del campo magnético al que están expuestos los trabajadores de subestaciones y circuitos energizados de las empresas de energía,” *Revista CIER*, vol. 53, pp. 18–19, 2009.
- [29] D. Meeker, *Finite Element Method Magnetics*. 2015.
- [30] S. Naula and E. Tubón, “DISEÑO DE UN SENSOR DE CAMPO MAGNÉTICO MEDIANTE EL ESTUDIO DE LA CORRIENTE INDUCIDA PARA DETECTAR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS,” Latacunga, 2020.
- [31] AGENCIA DE REGULACION Y CONTROL DE ELECTRICIDAD, “Atlas del Sector Eléctrico Ecuatoriano 2018,” Quito, pp. 73–75, 2018.
- [32] “MEMORIA DE CÁLCULO PROYECTO: SUMINISTRO ESTRUCTURAS LÍNEA 69 KV S/E AMBATO-S/E PENÍNSULA-DERIVACIÓN ORIENTE-LORETO DISEÑO DE TORRE TIPO ‘A60M-2C’ UBICACIÓN: AMBATO QUITO-ECUADOR MEMORIA DE CALCULO TORRE TIPO ‘A60M-2C’ LÍNEA 69 KV S/E AMBATO-S/E PENÍNSULA-DERIVACIÓN ORIENTE-LORETO,” 2020.
- [33] R. Sanhueza, I. Harnisch, and S. Rojo, “Método de elementos finitos para el cálculo del campo electromagnético alrededor de una línea de transmisión eléctrica Finite element method for calculating the electromagnetic field around an Electrical transmission line,” 2021.
- [34] “Proyecto de Regulación Franjas de Servidumbre en líneas del servicio de energía eléctrica y distancias de seguridad entre las redes eléctricas y edificaciones”.
- [35] “CÁLCULO DE LOS VALORES MÁXIMOS DE CAMPO MAGNÉTICO UTILIZANDO EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS”.

- [36] J. Sarrate and R. Clariso, “El Método de los Elementos Finitos en problemas electromagnéticos: planteamiento y aplicaciones,” *Departamento de Matemática Aplicada III*, vol. 17, 2001.
- [37] Extech, “USER MANUAL Multi-Field EMF Meter Model EMF450.” [Online]. Available: www.extech.com
- [38] “ANEMOMETRO DIGITAL DE COPA 4 EN 1.”
- [39] “HT30-es-ES_V3.6 4/16 2.”

8. ANEXOS

Anexo A. Tablas de especificaciones de equipos de mediciones.

Anexo A.1. Especificaciones del equipo de medición EMF 450 METER [34].

EMF 450 METER	
Especificaciones	
Tipo de sensor: LF-campos magnéticos	
Escala:	20mG/200mG/2000mG/2 μ T/20 μ T/200Mt
Resolución de pantalla:	0.02/0.1/1
Escala de frecuencia:	50/60 Hz
Precisión:	\pm (15%+100 dígitos)
Tipo de sensor: LF-sensor de campo eléctrico	
Escala:	50V/m a 2000V/m
Resolución de pantalla:	1V/m
Escala de frecuencia:	50/60 Hz
Precisión:	\pm (7%+50 dígitos)
Tipo de sensor: Intensidad de RF	
Escala:	0.02 μ W/m ² a 554.6mW/m ²
	0.02 μ W/cm ² a 55.4 μ W/cm ²
	36.1mV/m a 14.46V/m
	0.02mA/m a 38.35mA/m
	-51dB a 16dBm
Resolución de pantalla:	0.02 μ W/m ² , 0.2 μ A/m, 0.2mV/m, 0.002 μ W/cm ² , 2dB
Escala de frecuencia:	50MHz a 3.5GHz
Precisión:	\pm 2dB a 2.45GHz

Anexo A.2. Especificaciones del equipo Anemómetro Digital [35].

Especificaciones generales		
Pantalla:	LCD tamaño: 28mm x 19mm	
Unidades del Anemómetro	m/s (metros por segundo) Km/h (kilómetros por hora) FPM (pies por minuto) Mph (millas por hora) Knot (millas náuticas por hora)	
Unidades de temperatura	°C, °F	
Unidades del barómetro	hPa, mmHg, inHg	
Unidades de humedad	%HR	
Punto de rocío	°C, °F	
Circuito	Chip de microprocesador con circuito LSI	
Estructura del sensor	Anemómetro	Sonda tipo copa con diseño de cojinete de bolas de baja fricción.
	Barómetro	Semiconductor
	Humedad	Sensor de capacidad de humedad, semiconductor
	Temperatura	Semiconductor
Retención de datos	Congela la lectura en la pantalla	
Memoria de registros	Valor máximo y mínimo	
Tiempo de muestreo	Aprox. 1 segundo	
Apagado	Auto apagado para guardar vida de la batería o apagado manual (función REC)	
Temperatura de operación	0 a 50 °C	
Humedad de operación	Menor a 80% HR	
Alimentación	Batería DC 1,5 V (UM4/AAA) x 4 piezas	
Corriente de alimentación	Aproximadamente DC 5,2 Ma	

Anexo A.3. Especificaciones del Medidor de estrés térmico WBGT [36].

Especificaciones Generales	
Temperatura de globo y bulbo húmedo (TGBH)	0°C a 50°C (32°F a 122°F)
Precisión de TGBH	Calculado de parámetros medidos
Temperatura de globo negro (TG)	-30°C a 550°C (-22°F a 1022°F)
Precisión TG IN	± 2°C (4°F)
OUT	± 3°C (5,5°F)
Temperatura del aire (TA)	0°C a 50°C (32°F a 122°F)
Precisión	± 1°C (1,8°F)
Humedad relativa (RH)	0 a 100%RH
Precisión HR	± 3% (25°C, 10 to 95%RH)
Resolución	0,1°F/°C; 0,1%HR
Temperatura de operación	0°C a 50°C (32°F a 122°F)
Humedad de operación	Max. 80% RH
Fuente de energía	Dos baterías AAA
Vida de la batería	Aprox. 1000 horas
Dimensiones	Medidor: 254 x 48,7 x 29,4mm (10x1,9x1,1’)
Peso	136g (4,8 oz)
Accesorios Optativos	Software PC y cable (407752)

Anexo B. Diagramas estructurales importadas de AUTOCAD

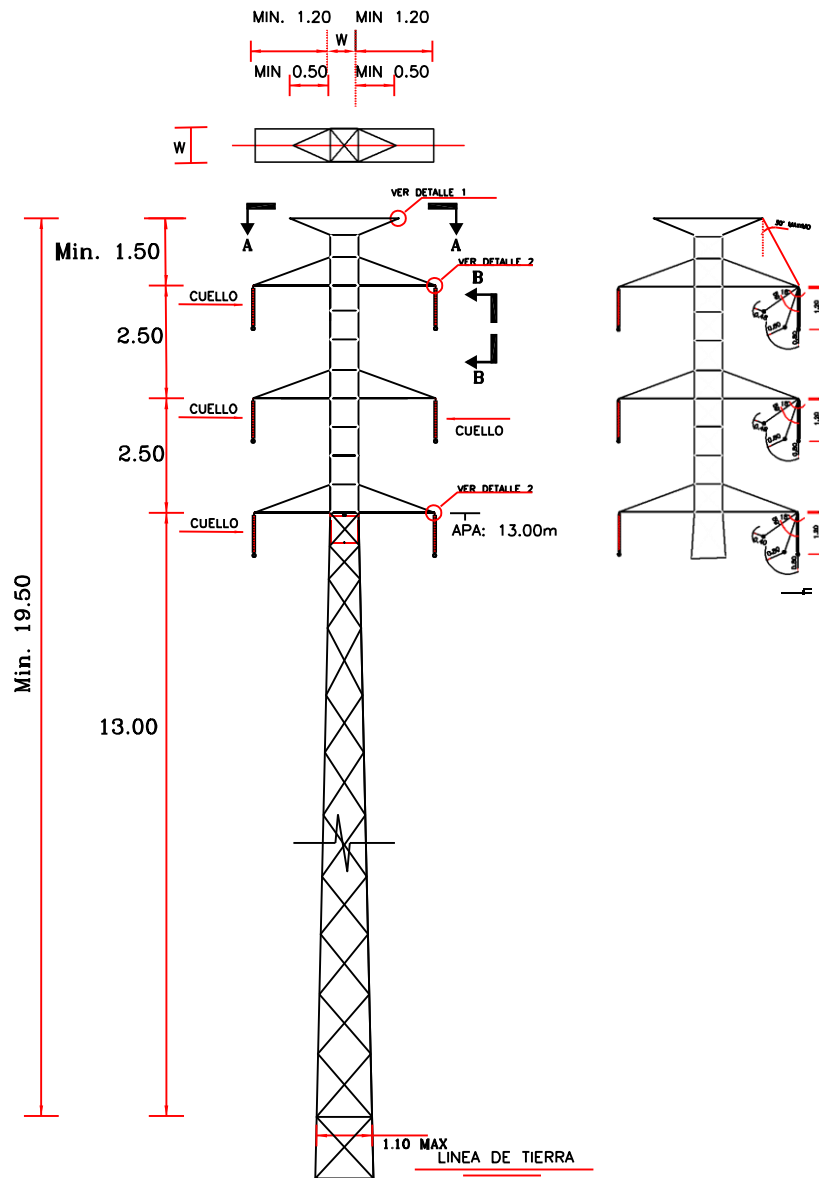


Figura B.1. Estructura E-1075 modelo A60M-2C.

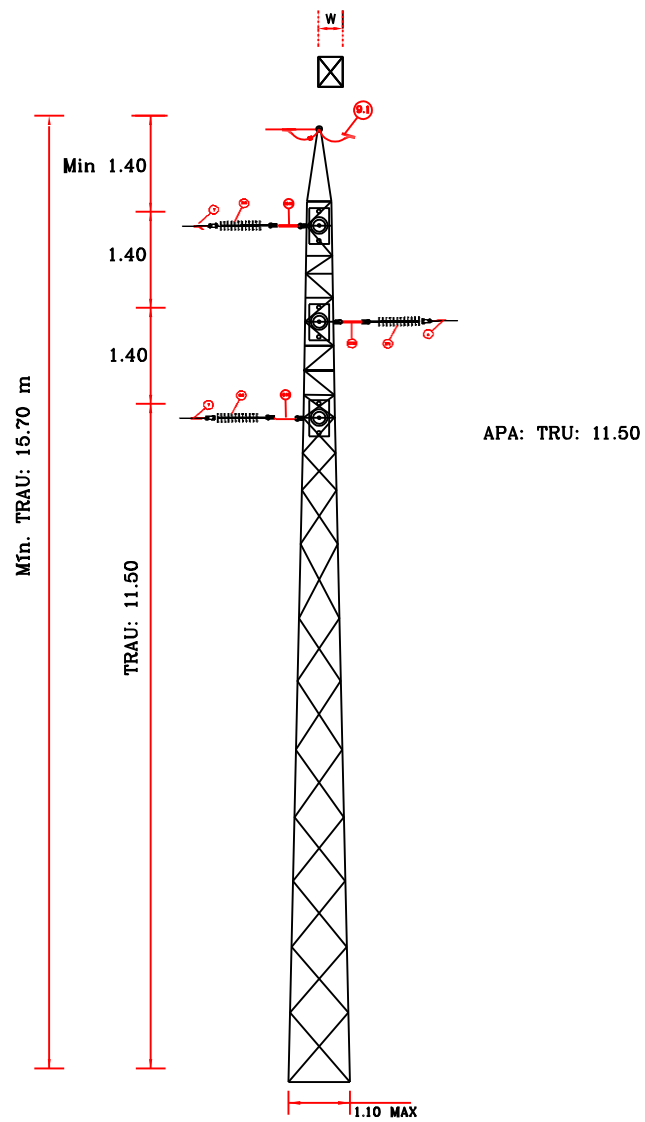


Figura B.2. Estructura E-0268 modelo TRAU-1C.

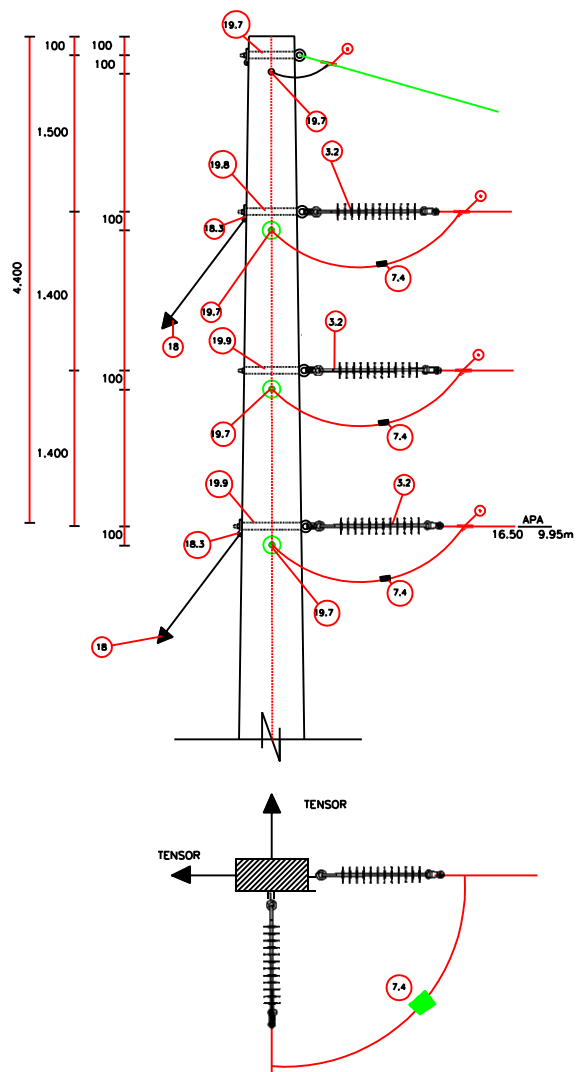


Figura B.3. Estructura E-0268 modelo SAU-1C.

Anexo C. Diagrama trazada de la línea S/E Península - S/E Loreto

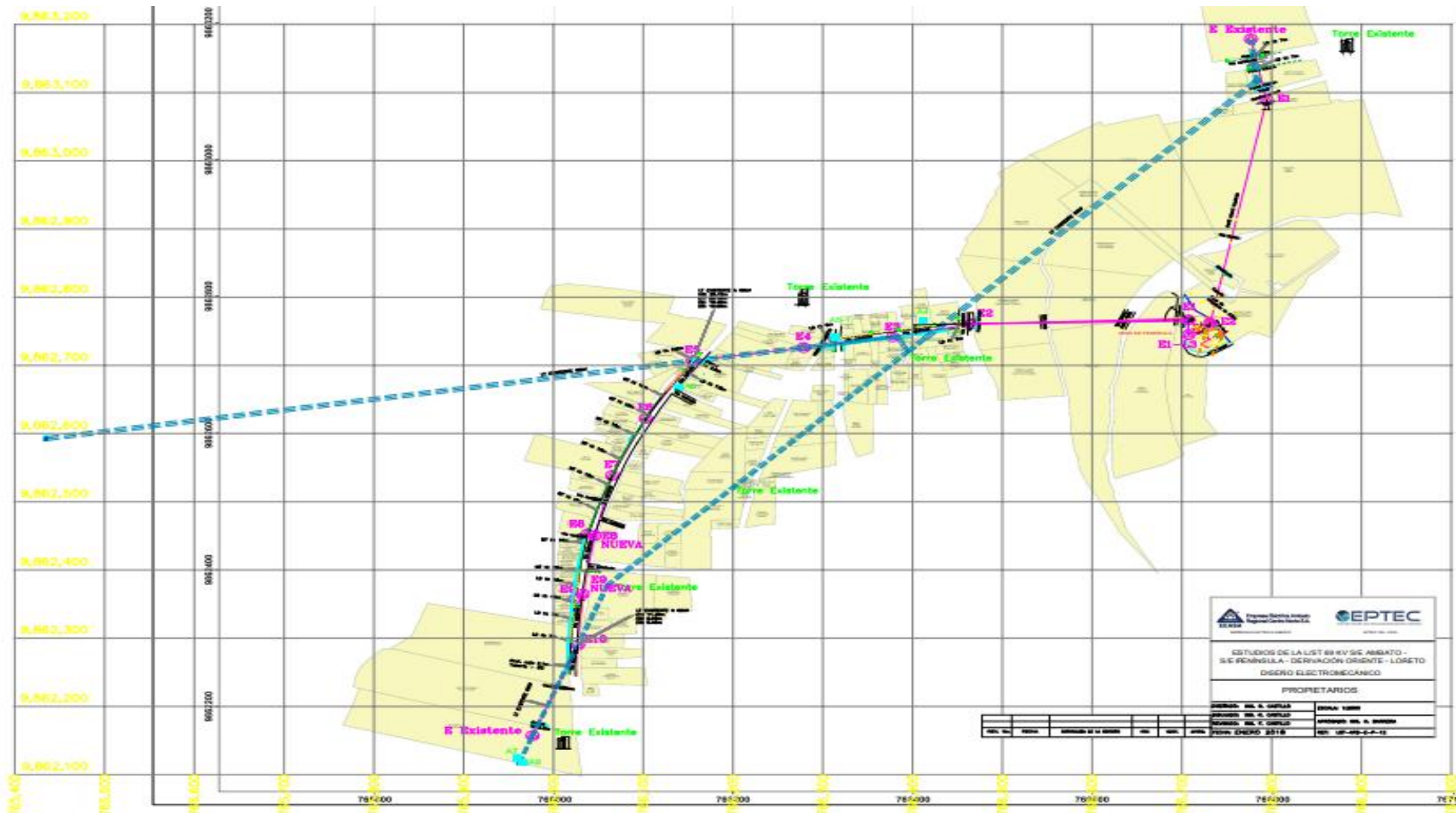


Figura C.1. Diagrama trazado de la línea a 69 Kv S/E Península – S/E Loreto.

Anexo D. Fotos de la recopilación de datos de la línea S/E Península - S/E Loreto.



Figura D.1. Toma de datos dentro de la Torre E-1075.

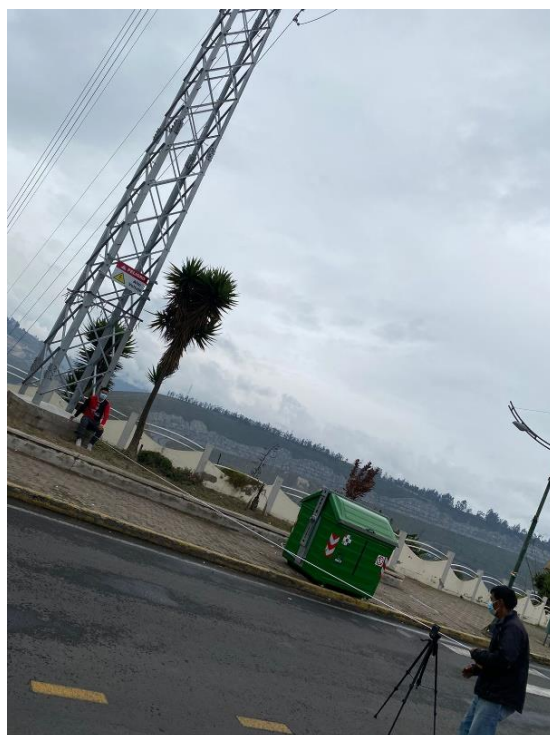


Figura D.2. Toma de datos vano adelante Estructura E-1075.



Figura D.3. Aspectos geográficos vano atrás Estructura E-1075.



Figura D.4. Elementos propios de la zona vano atrás Torre E-1075.



Figura D.5. Apantallamiento del equipo por flora vano atrás Torre E-1075.



Figura D.6. Toma de datos vano atrás Estructura E-1075.



Figura D.7. Toma de datos perfil lateral lado derecho Torre E-1075.



Figura D.8. Toma de datos perfil lateral lado izquierdo Torre E-1075.



Figura D.9. Colocación del equipo EMF 450 METER Torre E-0268.



Figura D.10. Aspectos geográficos vano atrás Torre E-0268.



Figura D.11. Aspectos geográficos vano atrás Torre E-0268.



Figura D.12. Toma de datos vano atrás Torre E-0268.



Figura D.13. Aspectos geográficos vano adelante Torre E-0268.

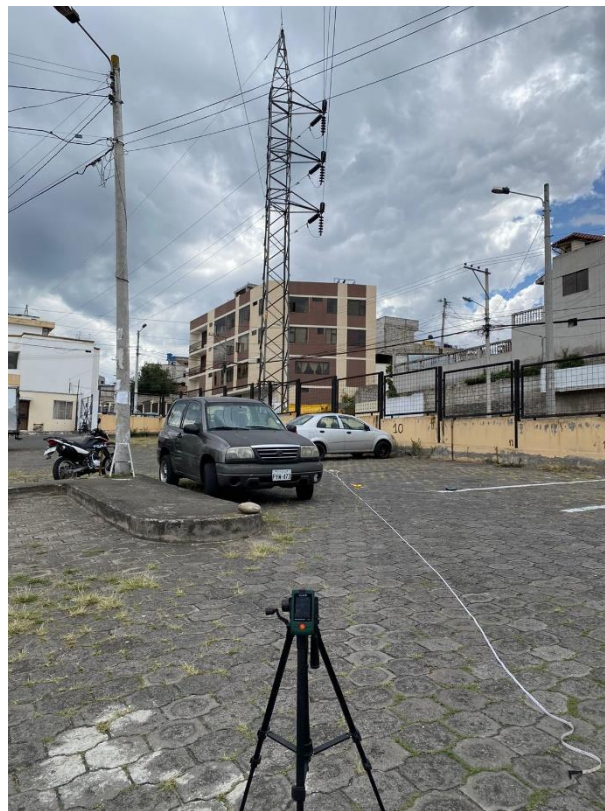


Figura D.14. Toma de datos vano adelante Torre E-0268.



Figura D.15. Toma de datos perfil lateral lado izquierdo Torre E-0268.



Figura D.16. Toma de datos perfil lateral lado izquierdo Torre E-0268.



Figura D.17. Ubicación del equipo EMF 450 METER Torre E-0263.

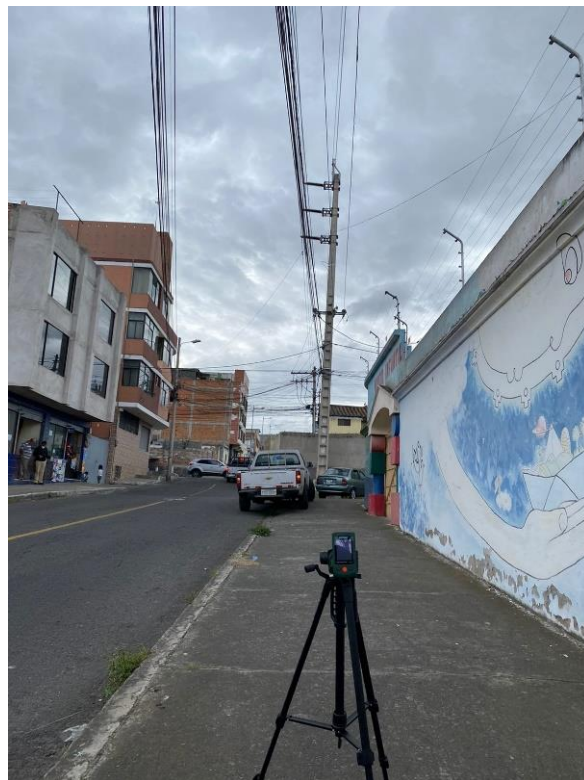


Figura D.18. Aspectos geográficos vano atrás Estructura E-0263.

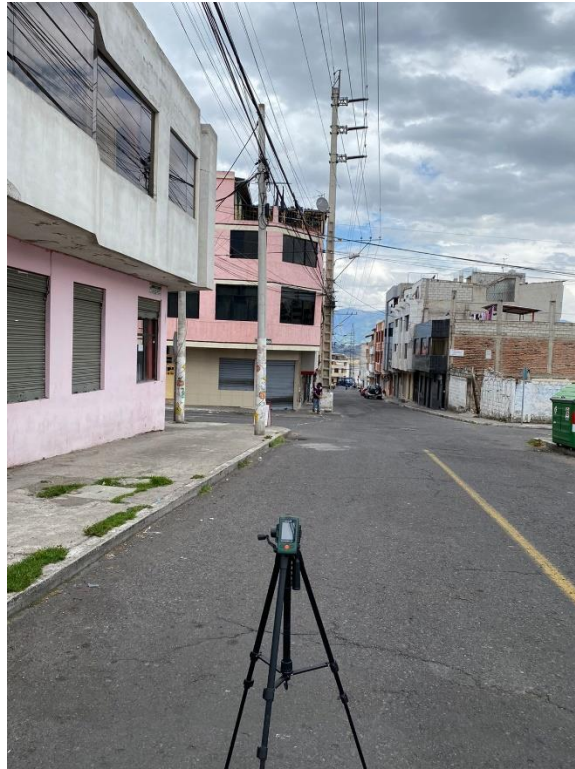


Figura D.19. Aspectos geográficos vano atrás Estructura E-0263.



Figura D.20. Toma de datos perfil lateral lado derecho Torre E-0263.



Figura D.21. Toma de datos perfil lateral lado izquierdo Torre E-0263.



Figura D.22. Toma de datos vano atrás Torre E-0263.

Anexo E. Diagramas de flujo del procedimiento para la simulación y cálculos

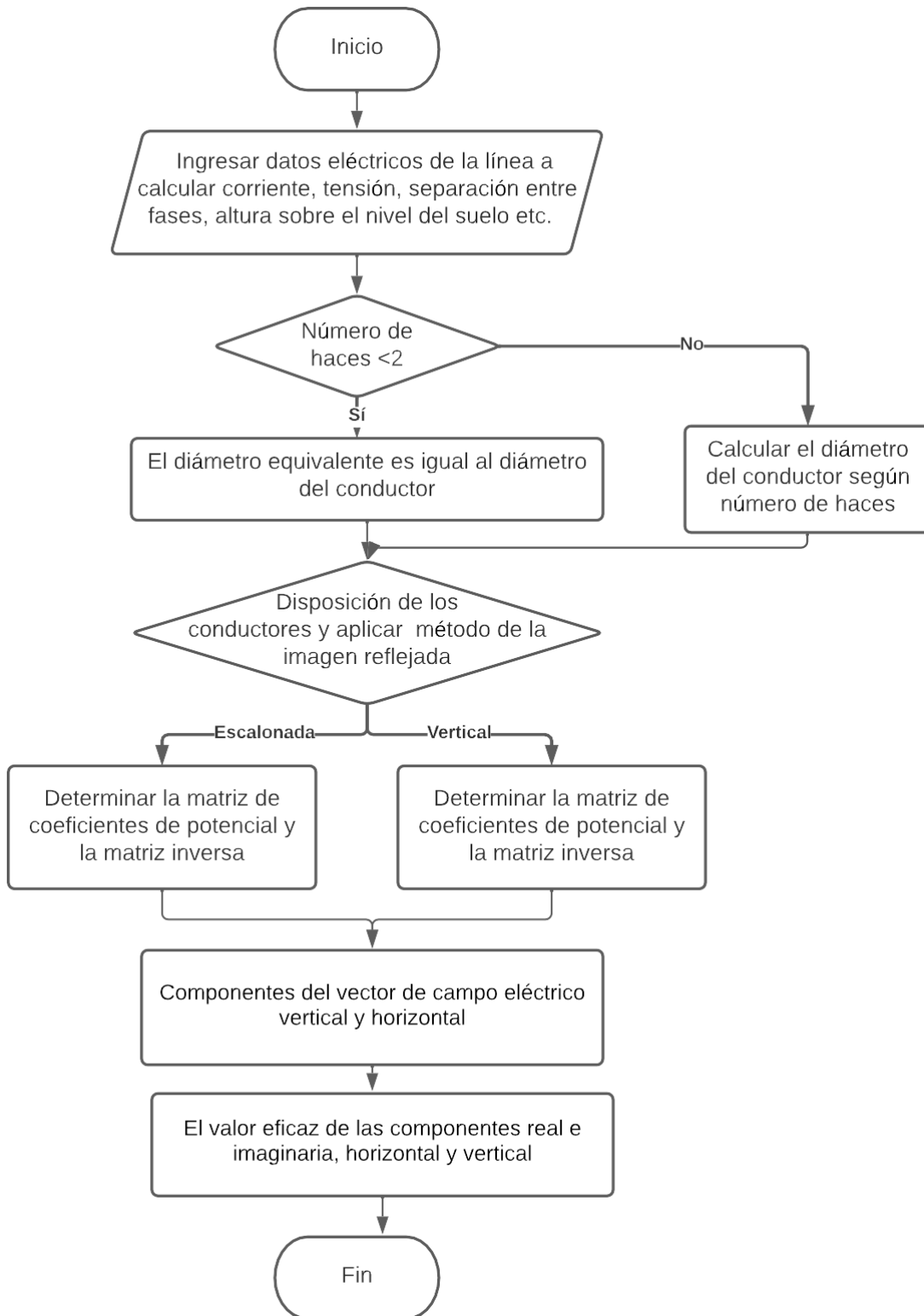


Figura E.1. Procedimiento para las mediciones de CEM en líneas de transmisión.

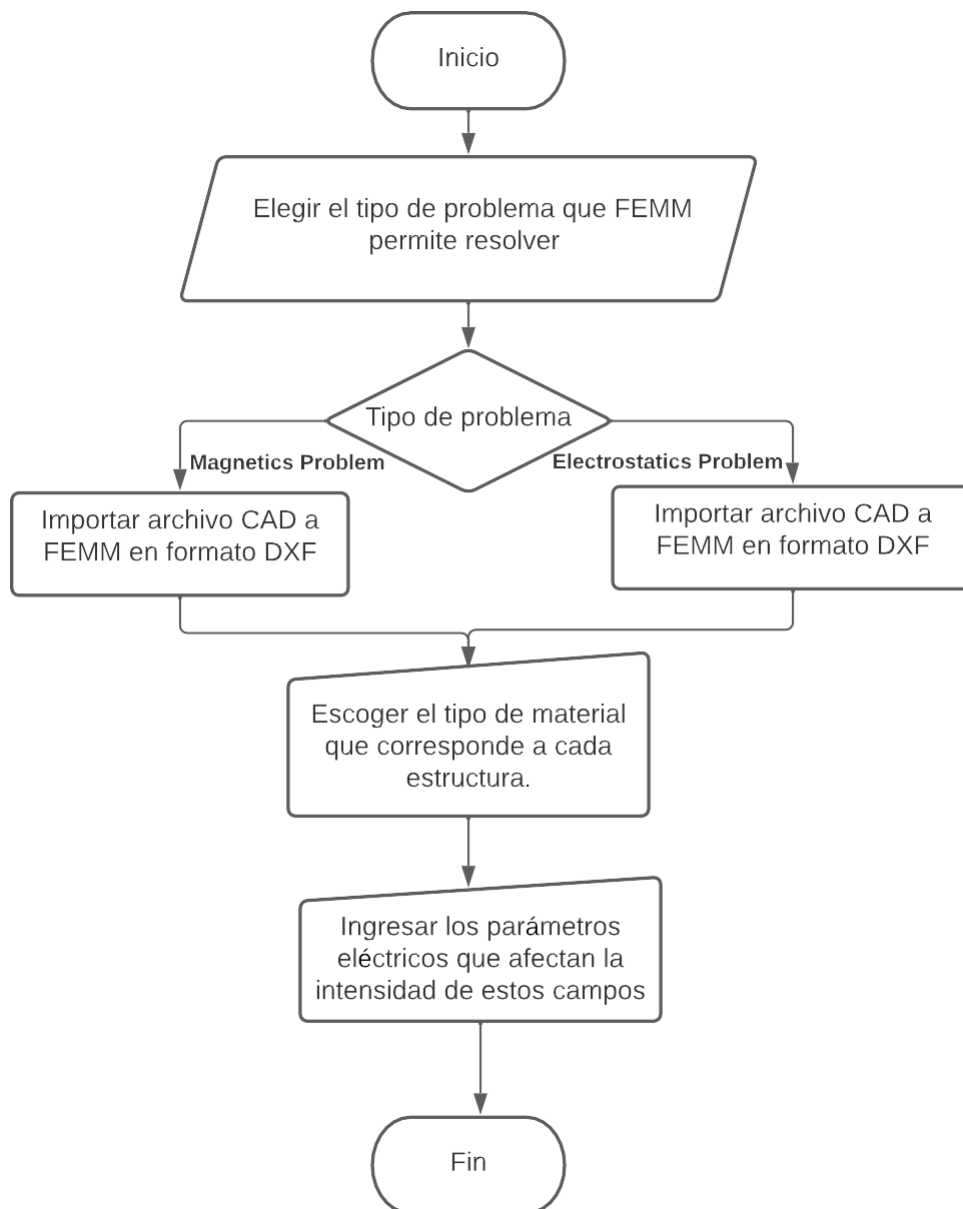


Figura E.2. Procedimiento para la simulación de CEM en líneas de transmisión.

Anexo F. Validación de los datos medidos y simulados campo eléctrico
Tabla F.1. Datos de campo eléctrico medidos y simulados Torre E-1075.

CAMPO ELECTRICO						
PERFIL LONGITUDINAL-VANO ADELANTE						
TORRE E-1075 A TORRE E-0271				LONGITUD	90 m	
PUNTO DE MEDICION	DISTANCIA RECORRIDA DEL VANO (m)	COORDENADA X FEMM	COORDENADA Y FEMM	E (V/m) A UN METRO DE ALTURA		% ERROR
				MEDIDO	SIMULADO	
0	DENTRO DE LA TORRE	11.60	5.4	5	0,000	100%
1	9	20,60	5.4	175	159,400	9%
2	18	29.6	5.4	165	158,750	4%
3	27	43.6	5.4	228	209,400	8%
4	36	47.6	5.4	235	240,680	2%
5	45	56.6	5.4	365	334,390	8%
6	54	73.6	5.4	358	367,270	3%
7	63	81.6	5.4	263	251,760	4%
8	72	86.6	5.4	223	206,460	7%
9	81	95.6	5.4	164	178,130	9%
10	90	101,60		8	-	-

Tabla F.2. Datos de campo eléctrico medidos y simulados Torre E-1075.

CAMPO ELECTRICO						
PERFIL LONGITUDINAL-VANO ATRÁS						
TORRE E-1075 A TORRE E-0071				LONGITUD	280 m	
PUNTO DE MEDICION	DISTANCIA RECORRIDA DEL VANO (m)	COORDENADA X FEMM	COORDENADA Y FEMM	E (V/m) A UN METRO DE ALTURA		% ERROR
				MEDIDO	SIMULADO	
0	DENTRO DE LA TORRE	11,5	4,5	5	0,000	100%
1	28	7,3	4,5	353	345,850	2%
2	56	-6,9	-39	127	116,240	8%
3	84	-7,7	-43	147	139,650	5%
4	112	-17,8	-77	112	119,380	7%
5	140	-31	-102,6	85	101,980	20%
6	168	-52	-139,1	92	110,080	20%
7	196	-55,9	-138,6	83	117,500	42%
8	224	-68	-151,9	184	159,310	13%
9	252	-105,9	-190	217	196,220	10%
10	280			2	-	

Tabla F.3. Datos de campo eléctrico medidos y simulados Torre E-1075.

CAMPO ELECTRICO						
LADO DERECHO						
DENTRO DE LA TORRE				LONGITUD	30 m	
PUNTO DE MEDICION	DISTANCI A RECORRI DA DEL VANO (m)	COORDENA DA X FEMM	COORDENA DA Y FEMM	E (V/m) A UN METRO DE ALTURA		% ERROR
				MEDIDO	SIMULAD O	
1	3	34,95	4,48	164	156,56	5%
2	6	37,95	4,48	120	131,65	10%
3	9	44,95	4,48	71	72,24	2%
4	12	49,95	4,48	41	40,36	2%
5	15	53,95	4,48	19	20,74	9%
6	18	56,95	4,48	10	9,20	8%
7	21	57,25	4,48	8	8,27	3%
8	24	57,45	4,48	7	7,71	10%
9	27	57,80	4,48	7	6,54	7%
10	30	58,35	4,48	5	4,61	8%

Tabla F.4. Datos de campo eléctrico medidos y simulados Torre E-1075.

CAMPO ELECTRICO						
LADO IZQUIERDO						
DENTRO DE LA TORRE				LONGITUD	30 m	
UBICACION DEL PUNTO DE MEDICION	DISTANCI A RECORRI DA DEL VANO (m)	COORDENA DA X FEMM	COORDENA DA Y FEMM	E (V/m) A UN METRO DE ALTURA		% ERROR
				MEDIDO	SIMULAD O	
1	3	-15,95	4,48	169	159,56	6%
2	6	-18,95	4,48	131	126,88	3%
3	9	-24,95	4,48	82	77,32	6%
4	12	-30,50	4,48	41	43,33	6%
5	15	-33,95	4,48	27	25,16	7%
6	18	-34,95	4,48	19	20,41	7%
7	21	-35,80	4,48	16	16,96	6%
8	24	-36,50	4,48	16	14,58	9%
9	27	-37,25	4,48	13	12,14	7%
10	30	-37,80	4,48	10	9,42	6%

Tabla F.5. Datos de campo eléctrico medidos y simulados Torre E-0268.

CAMPO ELECTRICO						
PERFIL LONGITUDINAL-VANO ADELANTE						
TORRE E-268 A TORRE E-267				LONGITUD	130 m	
UBICACIÓN DEL PUNTO DE MEDICIÓN	DISTANCIA RECORRIDA DEL VANO (m)	COORDENADA X FEMM	COORDENADA Y FEMM	E (V/m) A UN METRO DE ALTURA		% ERROR
				MEDIDO	SIMULADO	
0	DENTRO DE LA TORRE			5	0	
1	13	17,4	7,1	145	154,23	6%
2	26	36,4	7,1	167	172,29	3%
3	39	42,4	7,1	198	216,94	10%
4	52	60,4	7,1	211	223,51	6%
5	65	70,4	7,1	149	177,66	19%
6	78	73,4	7,1	137	159,1	16%
7	91	81,8	7,1	129	123,61	4%
8	104	95,4	7,1	153	163,12	7%
9	117	98,4	7,1	167	177,82	6%
10	130			2		100%

Tabla F.6. Datos de campo eléctrico medidos y simulados Torre E-0268.

CAMPO ELECTRICO						
PERFIL LONGITUDINAL-VANO ATRÁS						
TORRE E-268 A TORRE E-269				LONGITUD	170 m	
UBICACIÓN DEL PUNTO DE MEDICIÓN	DISTANCIA RECORRIDA DEL VANO (m)	COORDENADA X FEMM	COORDENADA Y FEMM	E (V/m) A UN METRO DE ALTURA		% ERROR
				MEDIDO	SIMULADO	
0	DENTRO DE LA TORRE	2,1	5,3	2	0	100%
1	17	2,1	5,3	188	201,41	7%
2	34	-10,1	5,7	136	142,18	5%
3	51	-33,1	5,7	230	225,12	2%
4	68	-41,4	5,7	349	345,85	1%
5	85	-45,1	7,1	462	431,32	7%
6	102	-50,7	9,1	458	449,99	2%
7	119	-53,1	7,1	265	257,11	3%
8	136	-81,5	6,8	292	266,63	9%
9	153	-86,1	4,1	289	287,15	1%
10	170			5	-	-

Tabla F.7. Datos de campo eléctrico medidos y simulados Torre E-0268.

CAMPO ELECTRICO						
LADO DERECHO						
DENTRO DE LA TORRE				LONGITUD	30 m	
UBICACIÓN DEL PUNTO DE MEDICIÓN	DISTANCIA A RECORRIDA DEL VANO (m)	COORDENADA X FEMM	COORDENADA Y FEMM	E (V/m) A UN METRO DE ALTURA		% ERROR
				MEDIDO	SIMULADO	
1	3	43,70	3,2	101	109,20	8%
2	6	46,70	3,2	95	88,82	7%
3	9	49,70	6,2	93	91,82	1%
4	12	52,70	3,2	54	57,68	7%
5	15	55,70	-4,2	27	24,90	8%
6	18	51,1	-6,8	16	15,30	4%
7	21	55,4	-9,3	13	12,72	2%
8	24	54,3	-13,9	8	7,56	6%
9	27	54,7	-10,9	5	5,46	9%
10	30	53,7	-18,2	5	4,49	10%

Tabla F.8. Datos de campo eléctrico medidos y simulados Torre E-0268.

CAMPO ELECTRICO						
LADO IZQUIERDO						
DENTRO DE LA TORRE				LONGITUD	30 m	
UBICACIÓN DEL PUNTO DE MEDICIÓN	DISTANCIA A RECORRIDA DEL VANO (m)	COORDENADA X FEMM	COORDENADA Y FEMM	E (V/m) A UN METRO DE ALTURA		% ERROR
				MEDIDO	SIMULADO	
1	3	0,5	-1,4	145	154,23	6%
2	6	-3,5	-1,4	142	134,46	5%
3	9	-6,5	-2,4	106	115,71	9%
4	12	-9,4	-6,4	75	79,97	7%
5	15	-12,5	-11,52	63	67,56	7%
6	18	-30	-9,7	42	45,70	9%
7	21	-40,2	-8,6	10	9,15	9%
8	24	-29,1	-11,4	8	7,22	10%
9	27	-24,5	-28,4	2	2,17	9%
10	30	-27,5	-32,4	2	1,95	3%

Tabla F.9. Datos de campo eléctrico medidos y simulados Torre E-0263.

CAMPO ELECTRICO						
PERFIL LONGITUDINAL-VANO ADELANTE						
TORRE E-263 A TORRE E-262_A				LONGITUD	80 M	
UBICACIÓN DEL PUNTO DE MEDICIÓN	DISTANCIA RECORRIDA DEL VANO (m)	COORDENADA X FEMM	COORDENADA Y FEMM	E (V/m) A UN METRO DE ALTURA		% ERROR
				MEDIDO	SIMULADO	
0	DENTRO DE LA TORRE	7,8	4,6	2	0,00	100%
1	8	63,8	4,6	126	131,50	4%
2	16	64,8	4,6	135	128,94	4%
3	24	58,2	4,6	142	145,60	3%
4	32	59,8	4,6	145	141,39	2%
5	40	54,8	4,6	150	159,12	6%
6	48	57,8	4,6	143	146,68	3%
7	56	58,8	4,6	137	141,39	3%
8	64	66,8	4,6	129	124,60	3%
9	72	74,8	4,6	131	114,43	13%
10	80	82,8	4,6	5	-	

Tabla F.10. Datos de campo eléctrico medidos y simulados Torre E-0263.

CAMPO ELECTRICO						
PERFIL LONGITUDINAL-VANO ATRÁS						
TORRE E-263 A TORRE E-264				LONGITUD	90 m	
UBICACIÓN DEL PUNTO DE MEDICIÓN	DISTANCIA RECORRIDA DEL VANO (m)	COORDENADA X FEMM	COORDENADA Y FEMM	E (V/m) A UN METRO DE ALTURA		% ERROR
				MEDIDO	SIMULADO	
0	DENTRO DE LA TORRE	6,6	4,6	2	0,000	100%
1	9	-45,9	4,6	127	132,950	5%
2	18	-44,3	4,6	135	137,810	2%
3	24	-43,6	4,6	144	140,080	3%
4	36	-40,6	4,6	156	149,970	4%
5	45	-39,6	4,6	153	154,530	1%
6	54	-45,6	4,6	144	133,850	7%
7	63	-47,6	4,6	138	127,440	8%
8	72	-49,6	4,6	129	123,770	4%
9	81	-55,6	4,6	117	111,690	5%
10	90	-96,6	4,6	2	-	-

Tabla F.11. Datos de campo eléctrico medidos y simulados Torre E-0263.

CAMPO ELECTRICO						
LADO DERECHO						
DENTRO DE LA TORRE				LONGITUD	30 m	
UBICACIÓN DEL PUNTO DE MEDICIÓN	DISTANCI A RECORRIDA DEL VANO (m)	COORDENADA X FEMM	COORDENADA Y FEMM	E (V/m) A UN METRO DE ALTURA		% ERROR
				MEDIDO	SIMULADO	
1	3	44,8	3,6	145	133,030	8%
2	6	47,8	3,6	105	91,520	13%
3	9	50,8	3,6	72	61,540	15%
4	12	53,8	3,6	40	35,850	10%
5	15	54,8	3,6	25	27,620	10%
6	18	56,8	3,6	18	16,510	8%
7	21	57,5	3,6	15	13,110	13%
8	24	58,1	3,5	10	11,120	11%
9	27	58,2	3,2	8	8,830	10%
10	30	58,2	2,8	5	6,170	23%

Tabla F.12. Datos de campo eléctrico medidos y simulados Torre E-0263.

CAMPO ELECTRICO						
LADO IZQUIERDO						
DENTRO DE LA TORRE				LONGITUD	30 m	
UBICACIÓN DEL PUNTO DE MEDICIÓN	DISTANCI A RECORRIDA DEL VANO (m)	COORDENADA X FEMM	COORDENADA Y FEMM	E (V/m) A UN METRO DE ALTURA		% ERROR
				MEDIDO	SIMULADO	
1	3	-7,8	3,6	16	14,68	8%
2	6	-10,8	3,6	14	14,24	2%
3	9	-13,8	3,6	12	13,10	9%
4	12	-16,8	3,6	11	11,69	6%
5	15	-19,8	3,6	9	9,98	11%
6	18	-22,8	3,6	8	8,21	3%
7	21	-25,8	3,6	6	6,41	7%
8	24	-28,8	3,6	5	4,83	3%
9	27	-31,8	3,6	3	3,50	17%
10	30	-33,8	3,6	2	2,59	30%

Anexo G. Validación y márgenes de error datos medidos y simulados campo magnético.

Tabla G.1. Datos de campo magnético medidos y simulados Torre E-1075.

CAMPO MAGNETICO						
PERFIL LONGITUDINAL - VANO ADELANTE						
TORRE E-1075 A TORRE E-0271				LONGITUD		90 m
UBICACIÓN DEL PUNTO DE MEDICION	DISTANCIA RECORRIDA DEL VANO (m)	COORDENADA X FEMM	COORDENADA Y FEMM	B (uT) A UN METRO DE ALTURA		% ERROR
				MEDIDO	SIMULADO	
1	9	48,50	3,8	0,34	0,32	6%
2	18	46,70	3,8	0,36	0,35	3%
3	27	46,10	3,8	0,39	0,36	8%
4	36	72,20	3,8	0,46	0,43	7%
5	45	44,50	3,8	0,43	0,40	7%
6	54	73,70	6,1	0,51	0,46	10%
7	63	63,40	9,8	0,51	0,49	4%
8	72	74,40	8,8	0,51	0,47	8%
9	81	83,4	3,8	0,49	0,44	10%
10	90	92,4	3,8	0,42	0,41	2%

Tabla G.2. Datos de campo magnético medidos y simulados Torre E-1075.

CAMPO MAGNETICO						
PERFIL LONGITUDINAL-VANO ATRÁS						
TORRE E-1075 A TORRE E-0071				LONGITUD		280 m
UBICACIÓN DEL PUNTO DE MEDICION	DISTANCIA RECORRIDA DEL VANO (m)	COORDENADA X FEMM	COORDENADA Y FEMM	B (uT) A UN METRO DE ALTURA		% ERROR
				MEDIDO	SIMULADO	
1	28	5,2	4,6	0,53	0,48	9%
2	56	0,70	-1,4	0,27	0,25	7%
3	84	-46,50	-112,7	0,21	0,23	10%
4	112	-43,80	-113,8	0,18	0,17	6%
5	140	-30,80	-91,6	0,13	0,14	8%
6	168	-36,30	-104	0,11	0,10	9%
7	196	-62,50	-136,6	0,16	0,14	13%
8	224	-71,40	-159,8	0,10	0,11	10%
9	252	-69,70	-157,3	0,15	0,14	7%
10	280	-56,70	-137,2	0,38	0,35	8%

Tabla G.3. Datos de campo magnético medidos y simulados Torre E-1075.

CAMPO MAGNETICO						
LADO DERECHO						
DENTRO DE LA TORRE						
UBICACIÓN DEL PUNTO DE MEDICIÓN	DISTANCIA RECORRID A DEL VANO (m)	COORDENADA X FEMM	COORDENADA Y FEMM	B (uT) A UN METRO DE ALTURA		% ERROR
				MEDIDO	SIMULADO	
1	3	11,8	11,6	0,33	0,320	3%
2	6	13,8	11,6	0,32	0,300	6%
3	9	16,8	11,6	0,26	0,250	4%
4	12	19,8	11,6	0,20	0,180	10%
5	15	22,8	11,6	0,15	0,150	0%
6	18	25,8	11,6	0,10	0,110	10%
7	21	28,8	11,6	0,08	0,089	11%
8	24	31,8	11,6	0,05	-	
9	27	34,8	11,6	0,04	-	
10	30	37,8	11,6	0,04	-	

Tabla G.4. Datos de campo magnético medidos y simulados Torre E-1075.

CAMPO MAGNETICO						
LADO IZQUIERDO						
DENTRO DE LA TORRE			LONGITUD		30 m	
UBICACIÓN DEL PUNTO DE MEDICIÓN	DISTANCIA RECORRID A DEL VANO (m)	COORDENADA X FEMM	COORDENADA Y FEMM	B (uT) A UN METRO DE ALTURA		% ERROR
				MEDIDO	SIMULADO	
1	3	6,8	11,6	0,34	0,320	6%
2	6	2,8	11,6	0,23	0,250	9%
3	9	0,8	11,6	0,20	0,210	5%
4	12	-3,2	11,6	0,16	0,140	13%
5	15	-6,2	11,6	0,11	0,100	9%
6	18	-9,2	11,6	0,10	0,090	10%
7	21	-12,2	11,6	0,08	0,080	0%
8	24	-15,2	11,6	0,06	-	
9	27	-18,2	11,6	0,04	-	
10	30	-21,2	11,6	0,03	-	

Tabla G.5. Datos de campo magnético medidos y simulados Torre E-0268.

CAMPO MAGNETICO						
PERFIL LONGITUDINAL - VANO ADELANTE						
TORRE E-268 A TORRE E-267				LONGITUD	130 m	
UBICACIÓN DEL PUNTO DE MEDICION	DISTANCIA A RECORRIDO A DEL VANO (m)	COORDENADA X FEMM	COORDENADA Y FEMM	B (uT) A UN METRO DE ALTURA		% ERROR
				MEDIDO	SIMULADO	
1	13	15,7	6,5	0,38	0,39	3%
2	26	19,40	6,5	0,35	0,34	3%
3	39	18,20	6,5	0,37	0,35	5%
4	52	24,10	6,5	0,30	0,28	7%
5	65	16,70	6,5	0,40	0,37	8%
6	78	77,30	6,5	0,38	0,39	3%
7	91	78,00	6,5	0,30	0,32	7%
8	104	79,8	10,5	0,41	0,43	5%
9	117	72,8	15,6	0,39	0,42	8%
10	130	69,6	15,6	0,33	0,35	6%

Tabla G.6. Datos de campo magnético medidos y simulados Torre E-0268.

CAMPO MAGNETICO						
PERFIL LONGITUDINAL-VANO ATRÁS						
TORRE E-268 A TORRE E-269				LONGITUD	170 m	
UBICACIÓN DEL PUNTO DE MEDICION	DISTANCIA A RECORRIDO A DEL VANO (m)	COORDENADA X FEMM	COORDENADA Y FEMM	B (uT) A UN METRO DE ALTURA		% ERROR
				MEDIDO	SIMULADO	
1	17	1,2	16	0,50	0,48	4%
2	34	1	17,1	0,52	0,49	6%
3	51	4,3	16,1	0,82	0,81	1%
4	68	3,9	19,8	1,55	1,47	5%
5	85	4,5	19,4	2,17	2,19	1%
6	102	4,3	19	1,68	1,66	1%
7	119	4,7	18,3	1,70	1,61	5%
8	136	4,7	17,5	1,31	1,27	3%
9	153	5,1	17,5	1,38	1,34	3%
10	170	4,7	17,3	1,10	1,17	6%

Tabla G.7. Datos de campo magnético medidos y simulados Torre E-0268.

CAMPO MAGNETICO						
LADO DERECHO						
DENTRO DE LA TORRE				LONGITUD	30 m	
UBICACIÓN DEL PUNTO DE MEDICIÓN	DISTANCIA A RECORRIDA DEL VANO (m)	COORDENADA X FEMM	COORDENADA Y FEMM	B (uT) A UN METRO DE ALTURA		% ERROR
				MEDIDO	SIMULADO	
1	3	13	8,1	0,36	0,37	3%
2	6	21,6	14	0,29	0,31	7%
3	9	27	17,3	0,22	0,23	5%
4	12	28,6	13,7	0,15	0,16	7%
5	15	33,1	8,6	0,09	0,08	11%
6	18	-	-	0,06	-	-
7	21	-	-	0,05	-	-
8	24	-	-	0,02	-	-
9	27	-	-	0,02	-	-
10	30	-	-	0,01	-	-

Tabla G.8. Datos de campo magnético medidos y simulados Torre E-0268.

CAMPO MAGNETICO						
LADO IZQUIERDO						
DENTRO DE LA TORRE						
UBICACIÓN DEL PUNTO DE MEDICIÓN	DISTANCIA RECORRIDA DEL VANO (m)	COORDENADA X FEMM	COORDENADA Y FEMM	B (uT) A UN METRO DE ALTURA		% ERROR
				MEDIDO	SIMULADO	
1	3	3,4	14,2	0,35	0,36	3%
2	6	2,4	12,3	0,29	0,26	10%
3	9	2,2	10,5	0,22	0,20	9%
4	12	2,6	8,9	0,18	0,17	6%
5	15	1,4	6,4	0,11	0,12	9%
6	18	8,3	12,3	0,10	0,09	10%
7	21	-	-	0,09	-	-
8	24	-	-	0,09	-	-
9	27	-	-	0,07	-	-
10	30	-	-	0,06	-	-

Tabla G.9. Datos de campo magnético medidos y simulados Torre E-0263.

CAMPO MAGNETICO						
PERFIL LONGITUDINAL - VANO ADELANTE						
TORRE E-263 A TORRE E-262_A				LONGITUD		80 M
UBICACIÓN DEL PUNTO DE MEDICION	DISTANCIA RECORRIDA DEL VANO (m)	COORDENADA X FEMM	COORDENADA Y FEMM	B (uT) A UN METRO DE ALTURA		% ERROR
				MEDIDO	SIMULADO	
1	8	19,5	3,8	0,38	0,36	5%
2	16	15,7	9,8	0,47	0,46	2%
3	24	10,2	8,3	0,55	0,57	4%
4	32	12,7	7,4	0,50	0,52	4%
5	40	11,2	8,5	0,53	0,55	4%
6	48	15,7	6,2	0,48	0,46	4%
7	56	18	6,2	0,43	0,40	7%
8	64	14,6	6,4	0,49	0,48	2%
9	72	13,1	5,9	0,52	0,53	2%
10	80	16,3	7,4	0,45	0,44	2%

Tabla G.10. Datos de campo magnético medidos y simulados Torre E-0263.

CAMPO MAGNETICO						
PERFIL LONGITUDINAL-VANO ATRÁS						
TORRE E-263 A TORRE E-264				LONGITUD		95 m
UBICACIÓN DEL PUNTO DE MEDICION	DISTANCIA RECORRIDA DEL VANO (m)	COORDENADA X FEMM	COORDENADA Y FEMM	B (uT) A UN METRO DE ALTURA		% ERROR
				MEDIDO	SIMULADO	
1	9	-37,5	3	0,20	0,22	10%
2	18	-39,5	2,3	0,17	0,18	6%
3	24	-39,9	1,7	0,16	0,17	6%
4	36	-43,5	3,2	0,18	0,19	6%
5	45	-40,4	2,4	0,19	0,20	5%
6	54	-37,2	1,7	0,20	0,19	5%
7	63	-36,6	2,6	0,21	0,23	10%
8	72	-39,1	1,9	0,18	0,17	6%
9	81	-35,5	1,1	0,24	0,23	4%
10	90	-36,1	1,7	0,21	0,22	5%

Tabla G.11. Datos de campo magnético medidos y simulados Torre E-0263.

CAMPO MAGNETICO						
LADO DERECHO						
DENTRO DE LA TORRE						
UBICACIÓN DEL PUNTO DE MEDICION	DISTANCIA RECORRIDA DEL VANO (m)	COORDENADA X FEMM	COORDENADA Y FEMM	B (uT) A UN METRO DE ALTURA		% ERROR
				MEDIDO	SIMULADO	
1	3	13,7	3,5	0,21	0,23	10%
2	6	16,7	3,5	0,17	0,16	6%
3	9	19,7	3,5	0,17	0,18	6%
4	12	22,7	3,5	0,15	0,16	7%
5	15	25,7	3,5	0,13	0,14	8%
6	18	28,7	3,5	0,13	0,12	8%
7	21	31,7	3,5	0,13	0,10	23%
8	24	-	-	0,11	0,10	9%
9	27	-	-	0,10	-	-
10	30	-	-	0,08	-	-

Tabla G.12. Datos de campo magnético medidos y simulados Torre E-0263.

CAMPO MAGNETICO						
LADO IZQUIERDO						
DENTRO DE LA TORRE				LONGITUD	30 m	
UBICACIÓN DEL PUNTO DE MEDICION	DISTANCIA RECORRIDA DEL VANO (m)	COORDENADA X FEMM	COORDENADA Y FEMM	B (uT) A UN METRO DE ALTURA		% ERROR
				MEDIDO	SIMULADO	
1	3	-4,6	8,7	0,48	0,50	4%
2	6	-4,1	6,5	0,43	0,45	5%
3	9	-5	5,5	0,37	0,36	3%
4	12	-6,3	4	0,29	0,27	7%
5	15	-7,1	3,5	0,25	0,24	4%
6	18	-8,7	3,4	0,18	0,17	6%
7	21	-7,9	4,9	0,15	0,12	20%
8	24	-	-	0,12	-	-
9	27	-	-	0,08	-	-
10	30	-	-	0,05	-	-

Anexo H. Graficas en EXCEL datos medidos campo eléctrico.

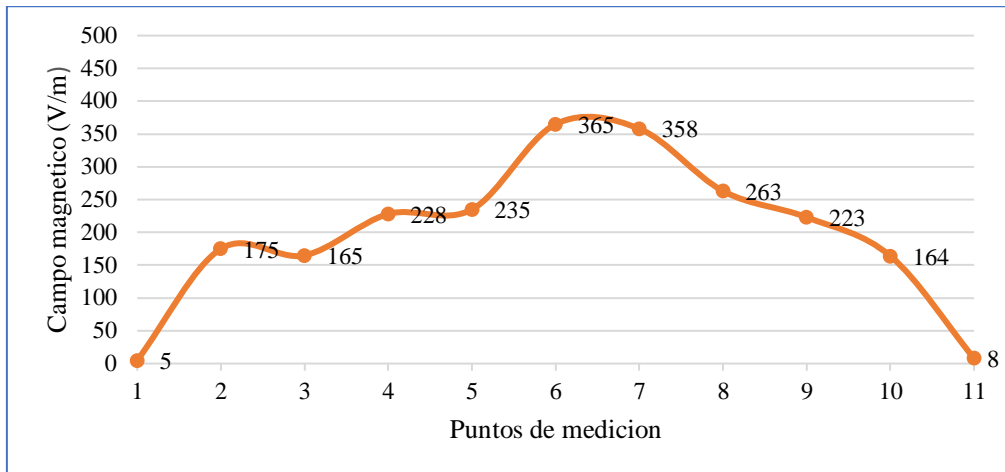


Figura H.1. Grafica datos medidos campo eléctrico vano adelante Torre E-1075.

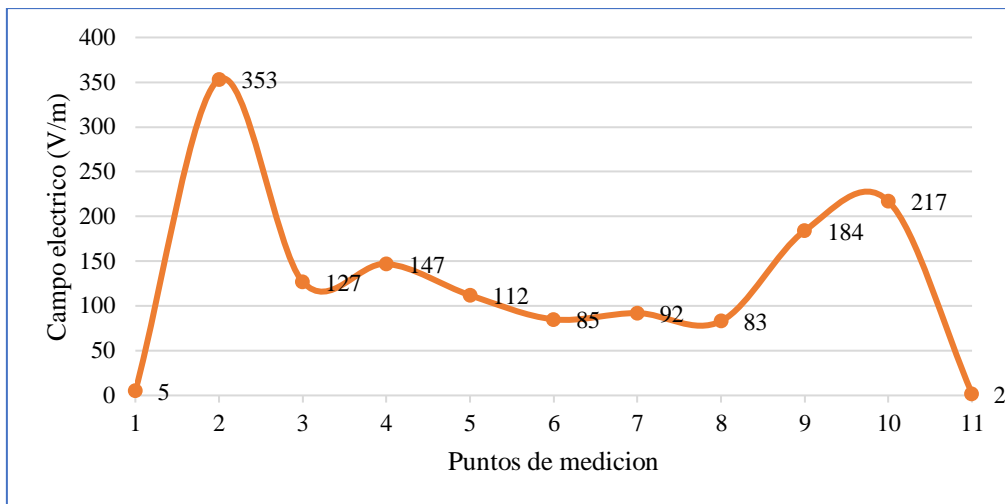


Figura H.2. Grafica datos medidos campo eléctrico vano atrás Torre E-1075.

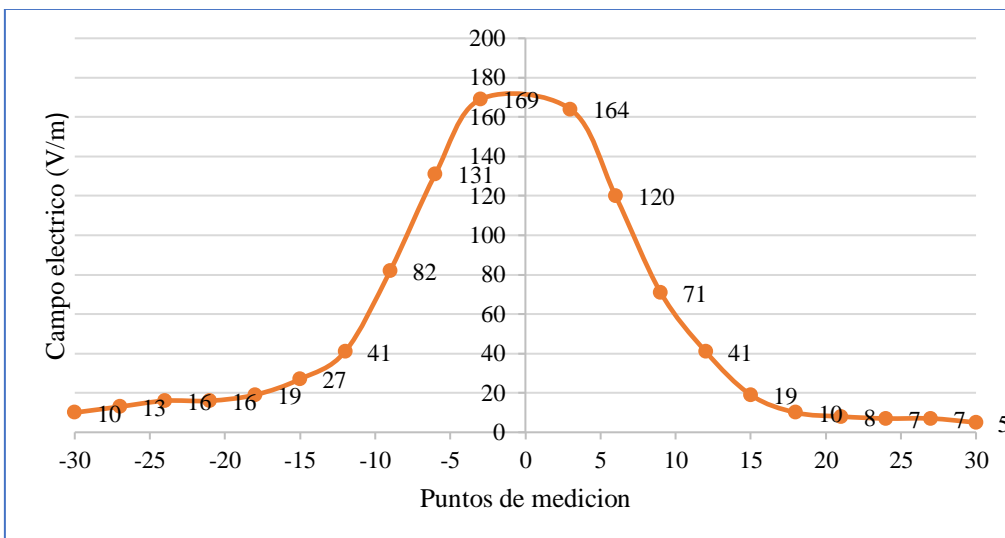


Figura H.3. Grafica campo eléctrico perfil lateral lado izquierdo y derecho Torre E-1075.

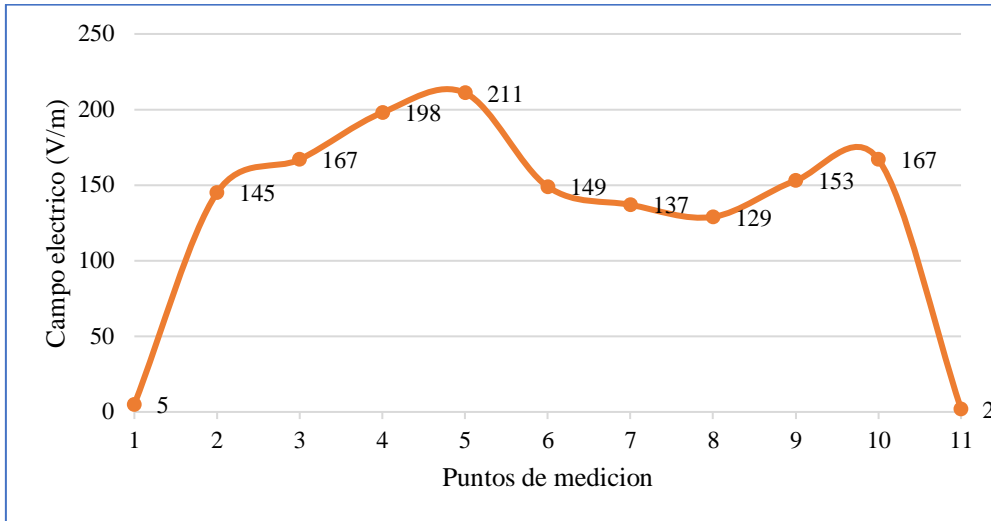


Figura H.4. Grafica datos medidos campo eléctrico vano adelante Torre E-0268.

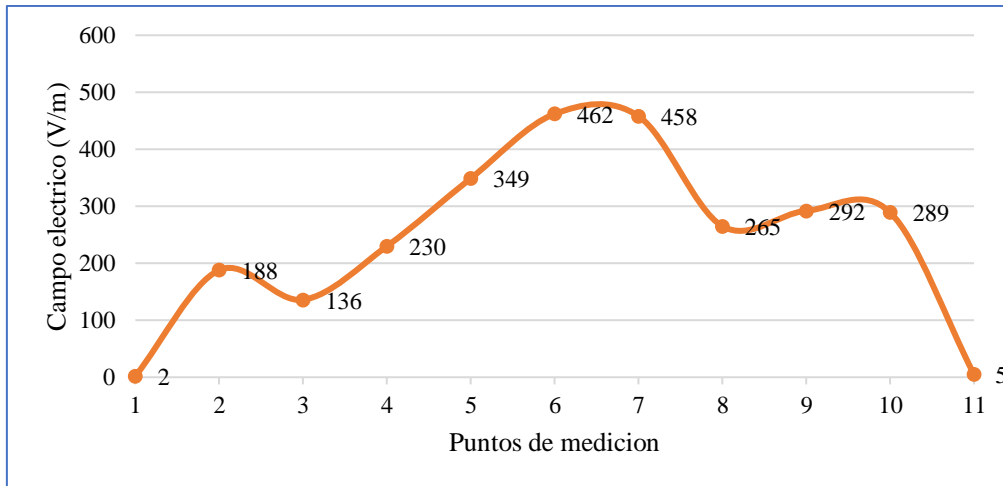


Figura H.5. Grafica datos medidos campo eléctrico vano atrás Torre E-0268.

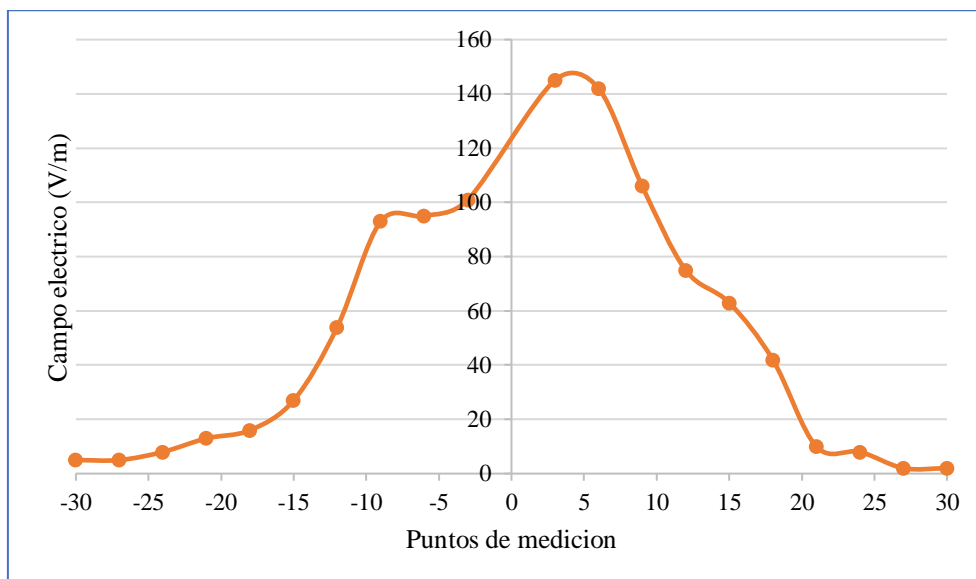


Figura H.6. Grafica campo eléctrico perfil lateral lado izquierdo y derecho Torre E-0268.

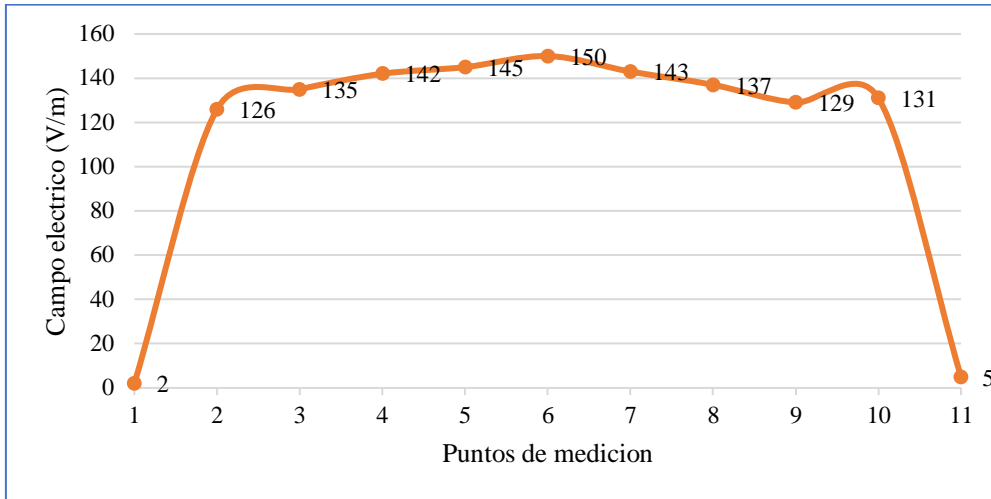


Figura H.7. Grafica datos medidos campo eléctrico vano adelante Torre E-0263.

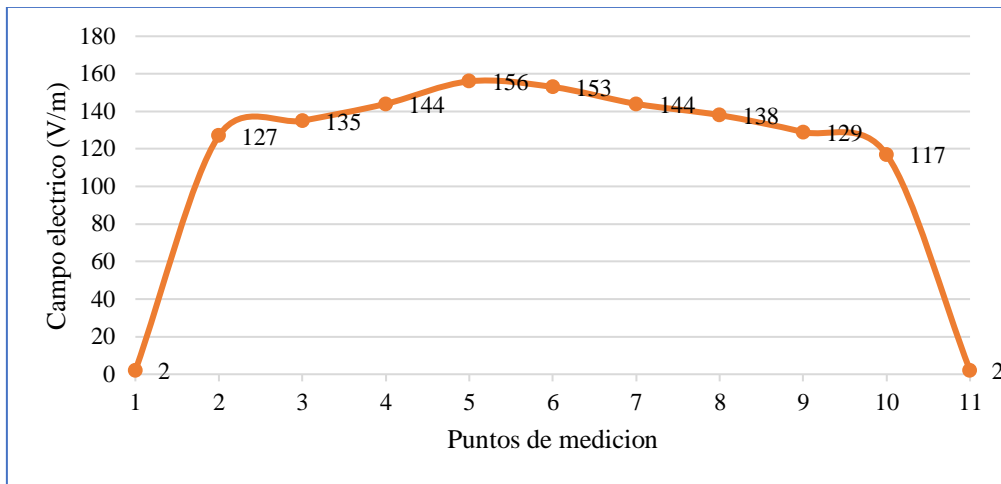


Figura H.8. Grafica datos medidos campo eléctrico vano atrás Torre E-0263.

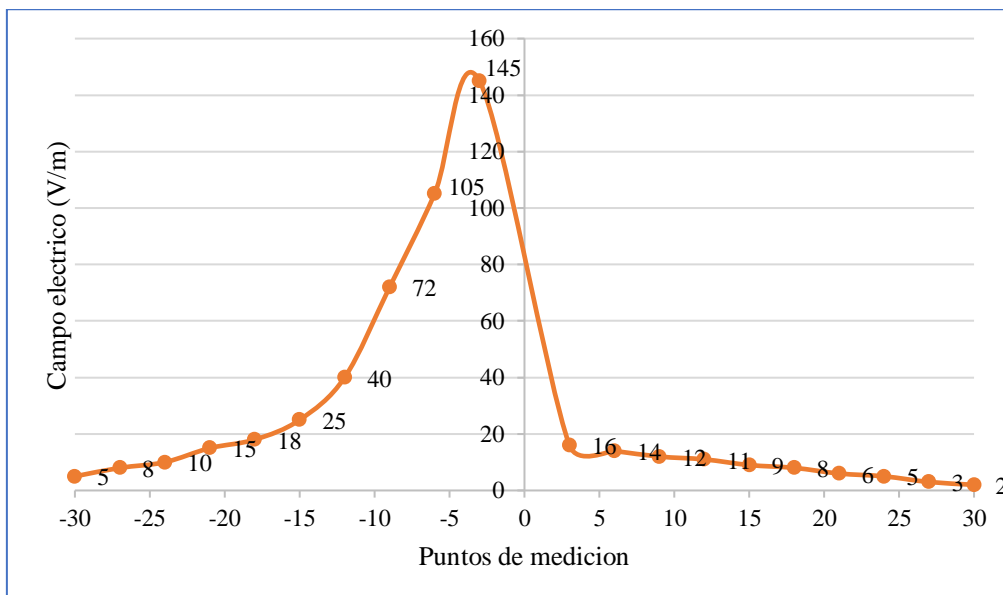


Figura H.9. Grafica campo eléctrico perfil lateral lado izquierdo y derecho Torre E-0263.

Anexo I. Graficas en EXCEL datos medidos campo magnético.

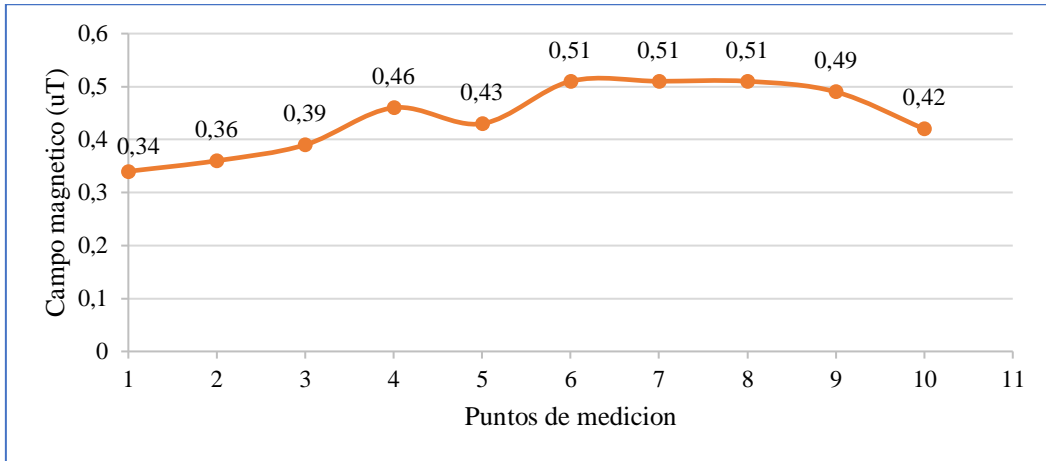


Figura I.1. Grafica datos medidos campo magnético vano adelante Torre E-1075.

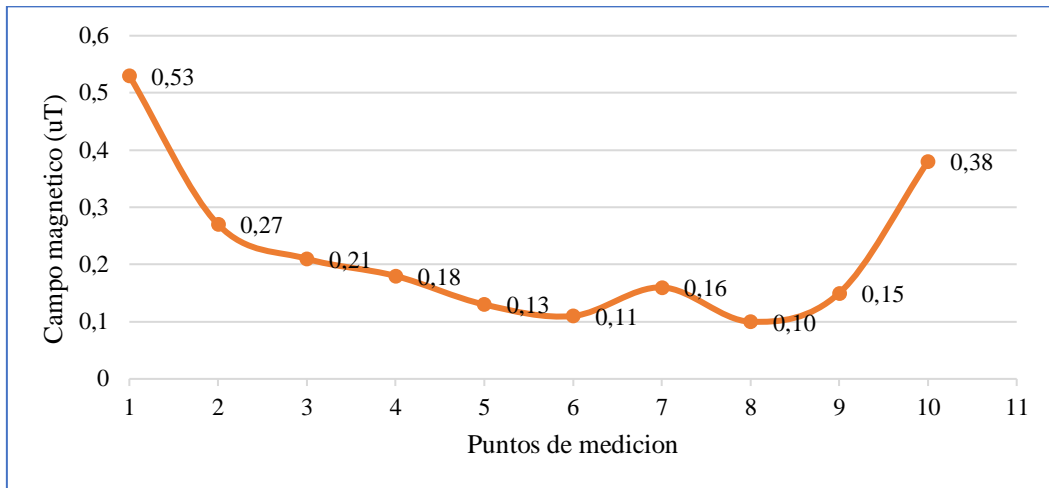


Figura I.2. Grafica datos medidos campo magnético vano atrás Torre E-1075.

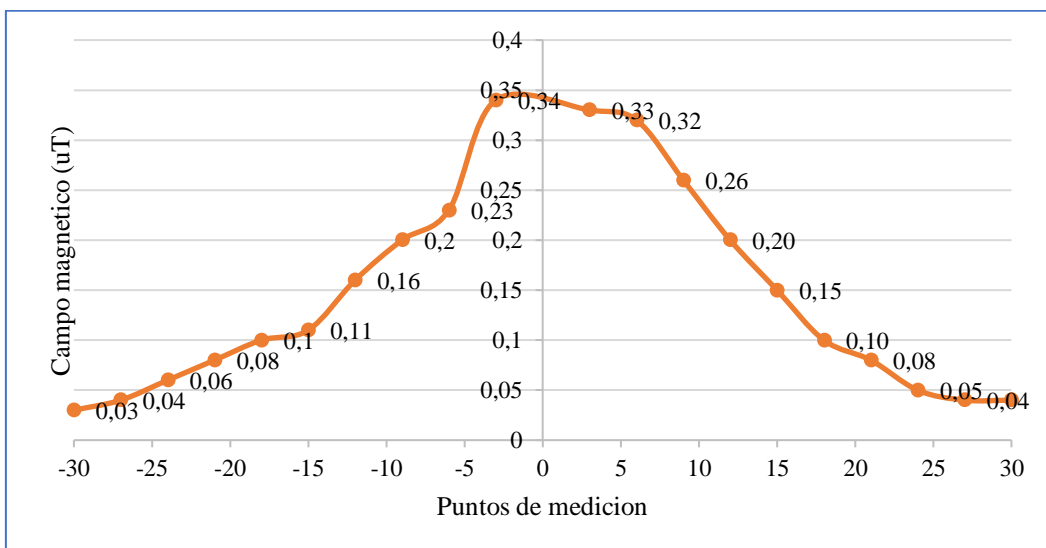


Figura I.3. Grafica campo magnético perfil lateral lado izquierdo y derecho Torre E-1075.

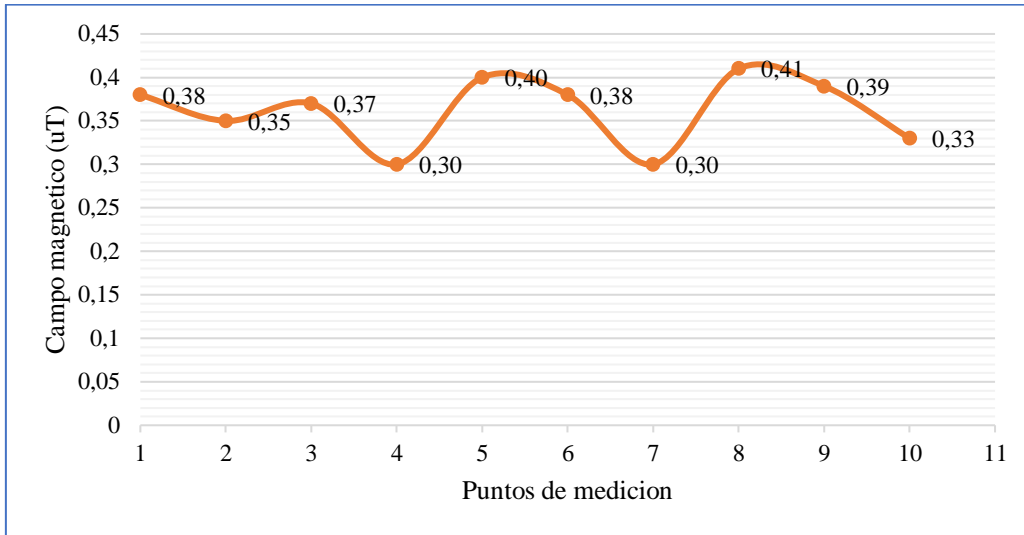


Figura I.4. Grafica datos medidos campo magnético vano adelante Torre E-0268.

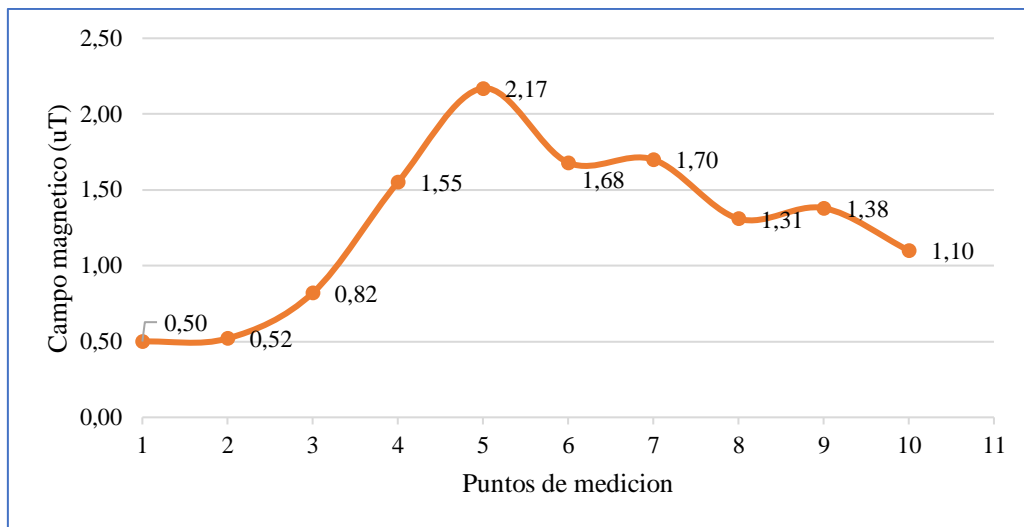


Figura I.5. Grafica datos medidos campo magnético vano atrás Torre E-0268.

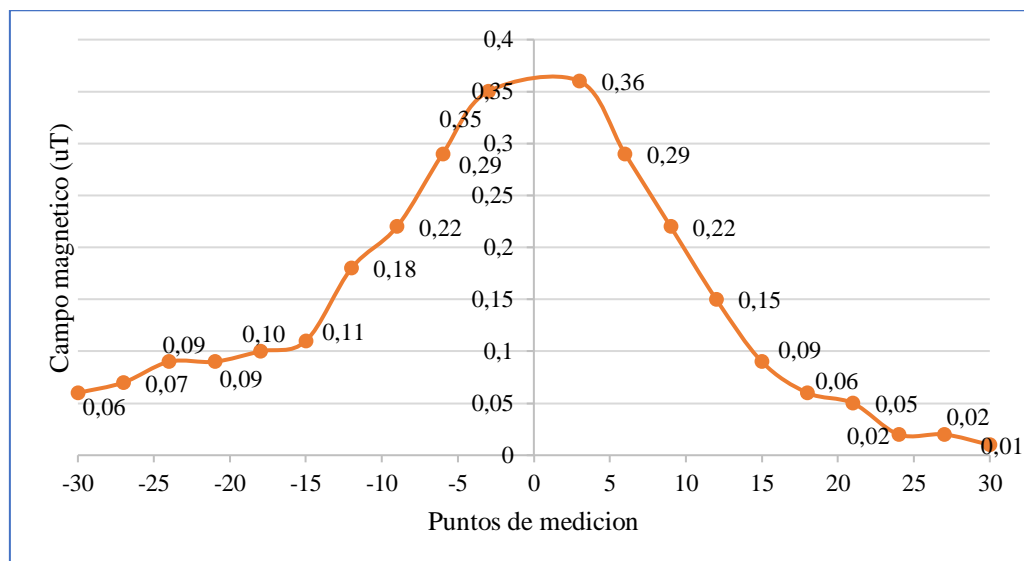


Figura I.6. Grafica campo magnético perfil lateral lado izquierdo y derecho Torre E-0268.

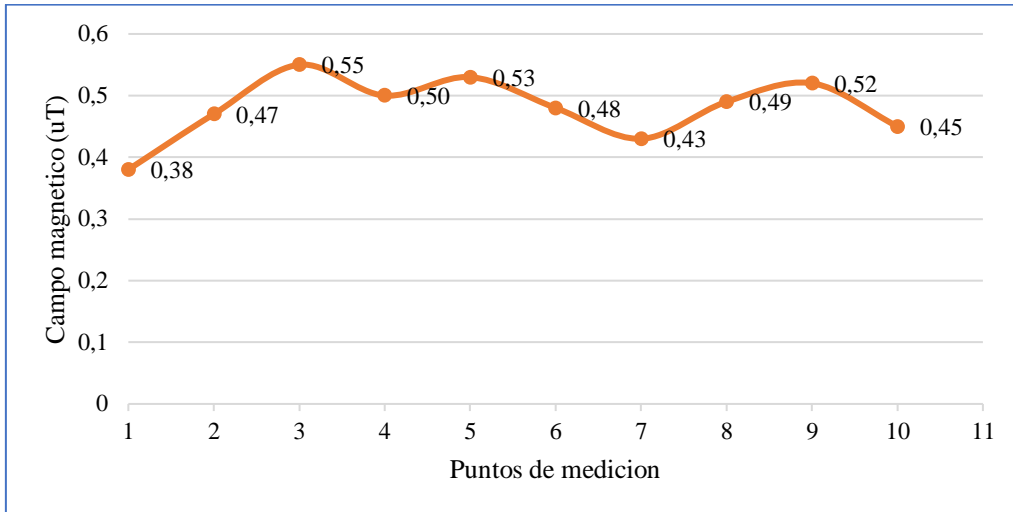


Figura I.7. Grafica datos medidos campo magnético vano adelante Torre E-0263.

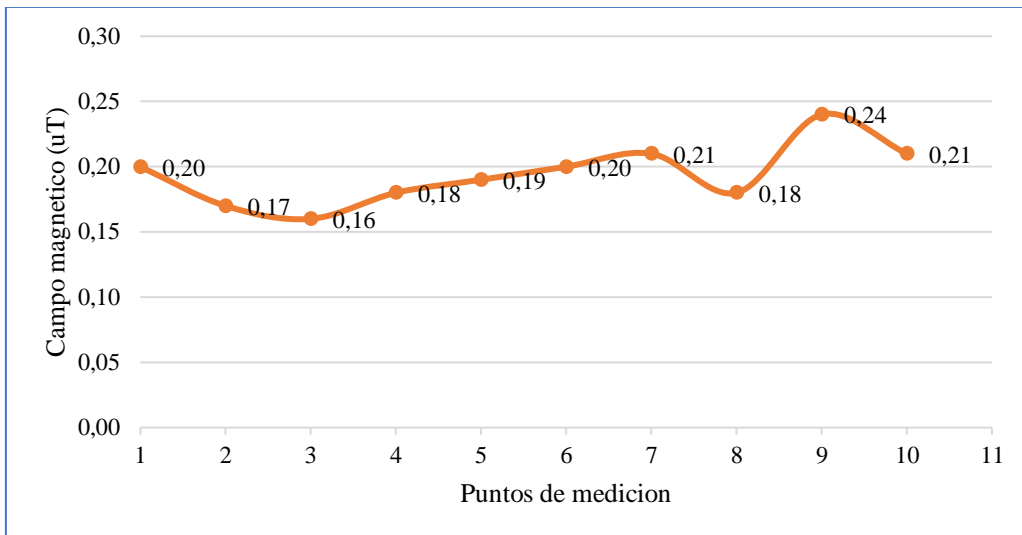


Figura I.8. Grafica datos medidos campo magnético vano atrás Torre E-0263.

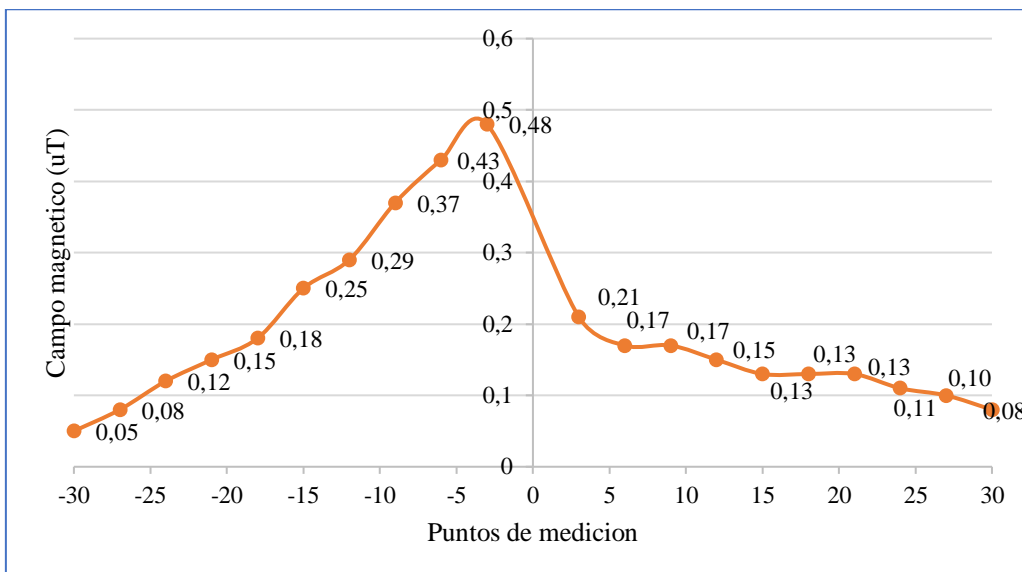


Figura I.9. Grafica campo magnético perfil lateral lado izquierdo y derecho Torre E-0263.

Anexo J. Validación de los datos medidos y calculados.**Tabla J.1.** Datos medidos y calculados campo eléctrico y magnético Estructura E-1075.

Estructura E-1075						
Distancia	Ec (V/m)	Em (V/m)	Error (%)	Bc (μT)	Bm (μT)	Error (%)
-30	12,7	5	61%	0,07	0,03	57%
-24	24,5	16	35%	0,10	0,06	40%
-18	35,8	19	47%	0,14	0,10	29%
-12	74,2	41	45%	0,18	0,16	11%
-6	114,5	131	14%	0,27	0,23	15%
0	-	-	-	-	-	-
6	135,6	120	12%	0,28	0,32	14%
12	75,9	41	46%	0,26	0,20	23%
18	27,4	10	64%	0,18	0,10	44%
24	14,8	7	53%	0,11	0,05	55%
30	12,4	5	60%	0,09	0,04	56%

Tabla J.2. Datos medidos y calculados campo eléctrico y magnético Estructura E-0268.

Estructura E-0268						
Distancia	Ec (V/m)	Em (V/m)	Error (%)	Bc (μT)	Bm (μT)	Error (%)
-30	15,8	2	87%	0,05	0,01	80%
-24	27,4	8	71%	0,09	0,02	78%
-18	55,7	42	25%	0,14	0,06	57%
-12	87,9	75	15%	0,22	0,15	32%
-6	122,5	142	16%	0,38	0,29	24%
0	-	-	-	-	-	-
6	117,8	95	19%	0,32	0,29	9%
12	67,4	54	20%	0,24	0,18	25%
18	34,6	16	54%	0,17	0,10	41%
24	17,80	8	55%	0,12	0,09	25%
30	9,58	5	48%	0,08	0,06	25%

Tabla J.3. Datos medidos y calculados campo eléctrico y magnético Estructura E-0263.

Estructura E-0263						
Distancia	Ec (V/m)	Em (V/m)	Error (%)	Bc (μT)	Bm (μT)	Error (%)
-30	3,5	2	43%	0,12	0,05	58%
-24	10,3	5	51%	0,17	0,12	29%
-18	12,4	8	35%	0,25	0,18	28%
-12	15,5	11	29%	0,35	0,29	17%
-6	22,4	14	38%	0,52	0,43	17%
0	-	-	-	-	-	-
6	112,8	105	7%	0,25	0,17	32%
12	55,8	40	28%	0,17	0,15	12%
18	28,6	18	37%	0,15	0,13	13%
24	15,80	10	37%	0,08	0,11	38%
30	9,50	5	47%	0,06	0,08	33%

Anexo K. Graficas EXCEL datos calculados.

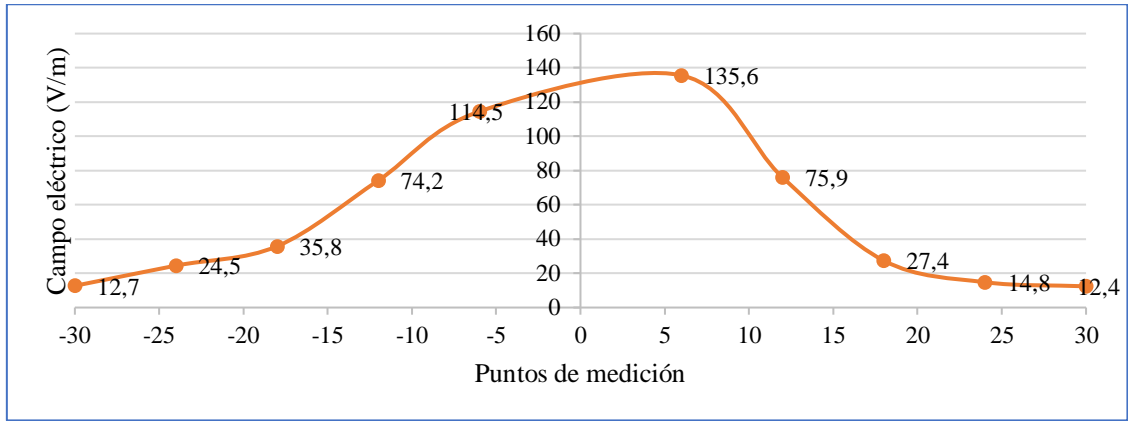


Figura K.1. Grafica datos calculados campo eléctrico perfil lateral Torre E-1075.

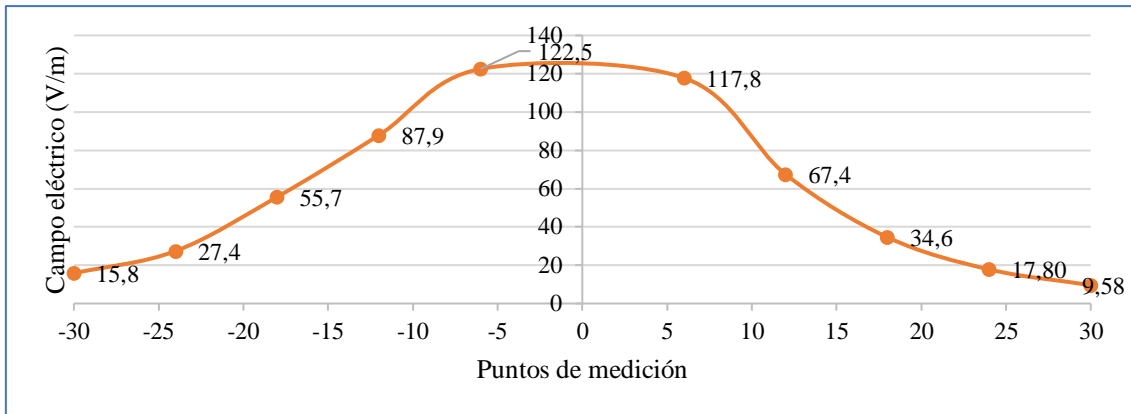


Figura K.2. Grafica datos calculados campo eléctrico perfil lateral Torre E-0268.

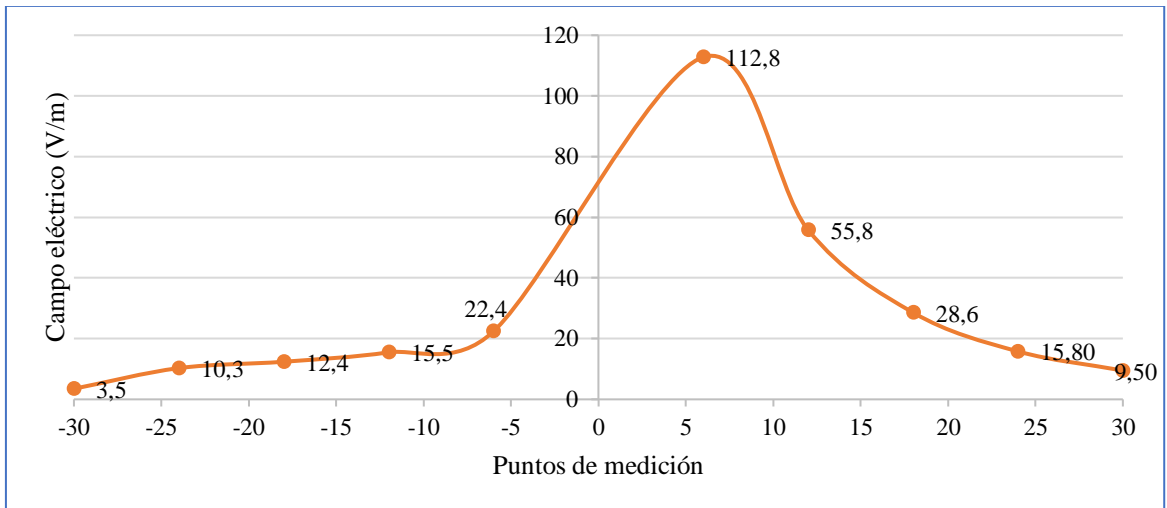


Figura K.3. Grafica datos calculados campo eléctrico perfil lateral Torre E-0263.

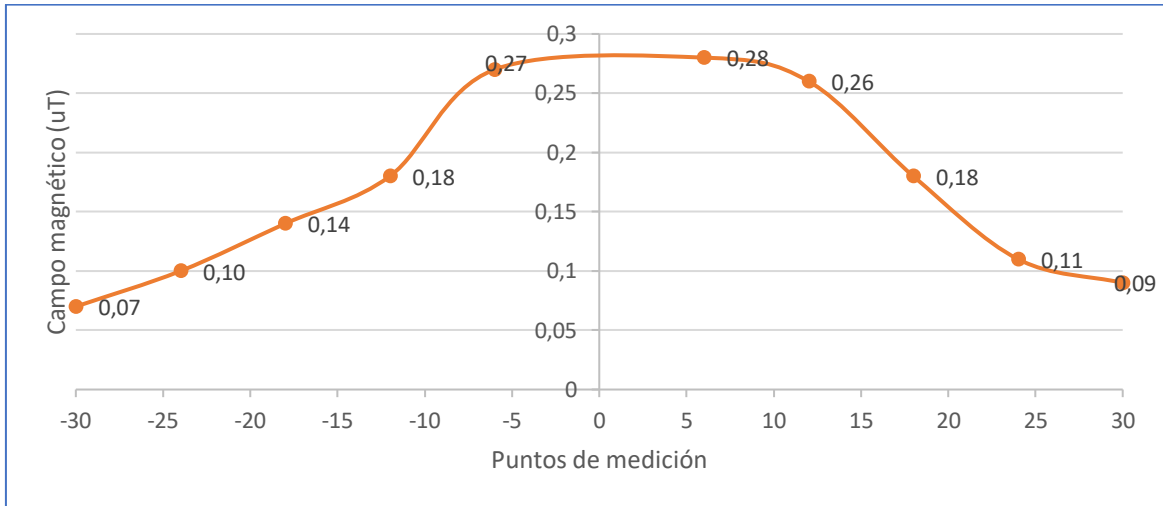


Figura K.4. Grafica datos calculados campo magnético perfil lateral Torre E-1075.

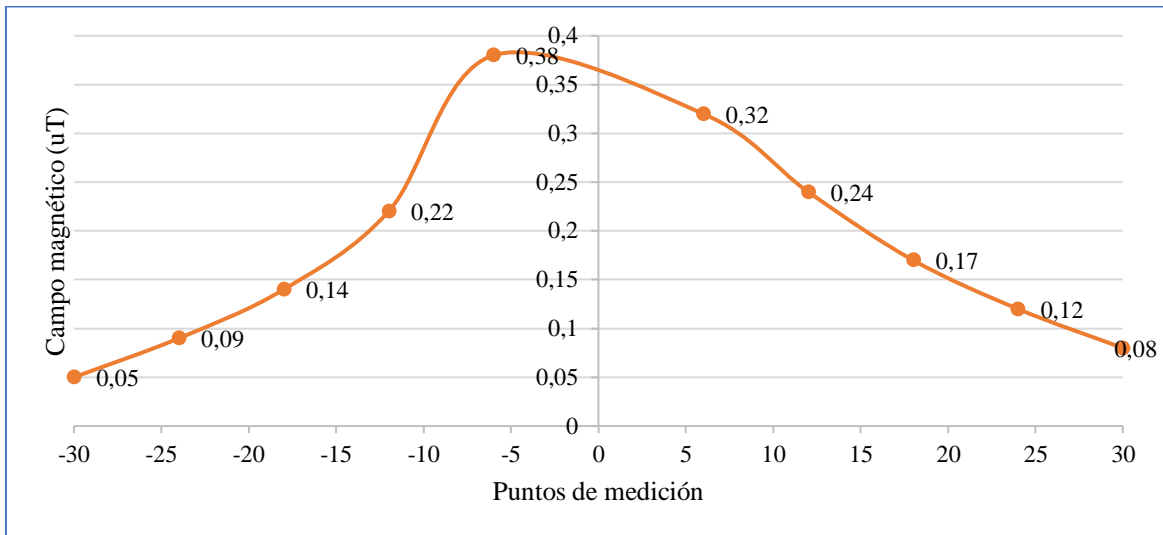


Figura K.5. Grafica datos calculados campo magnético perfil lateral Torre E-0268.

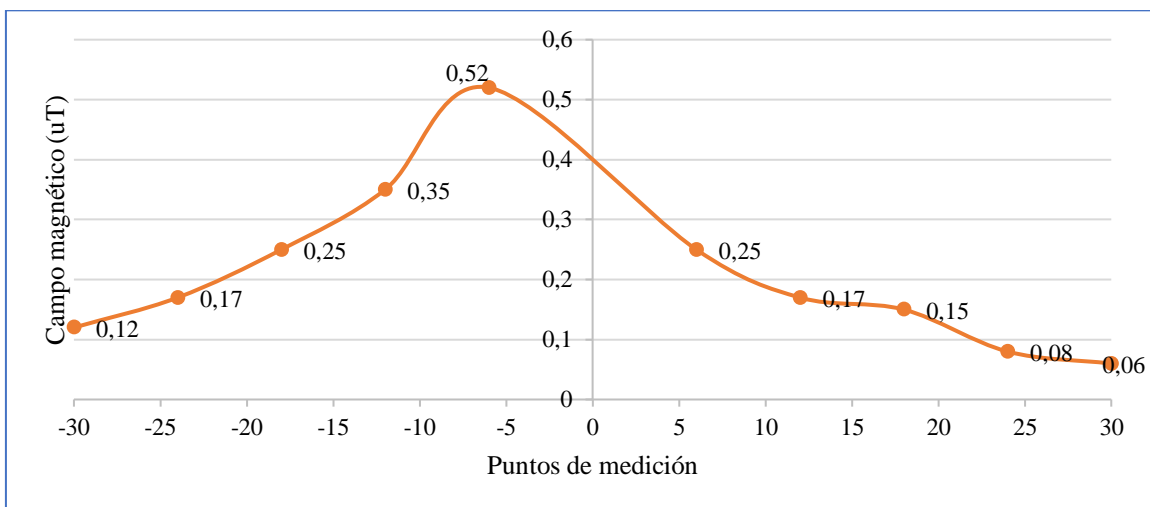


Figura K.5. Grafica datos calculados campo magnético perfil lateral Torre E-0263.

Anexo L. Interfaz de Excel.

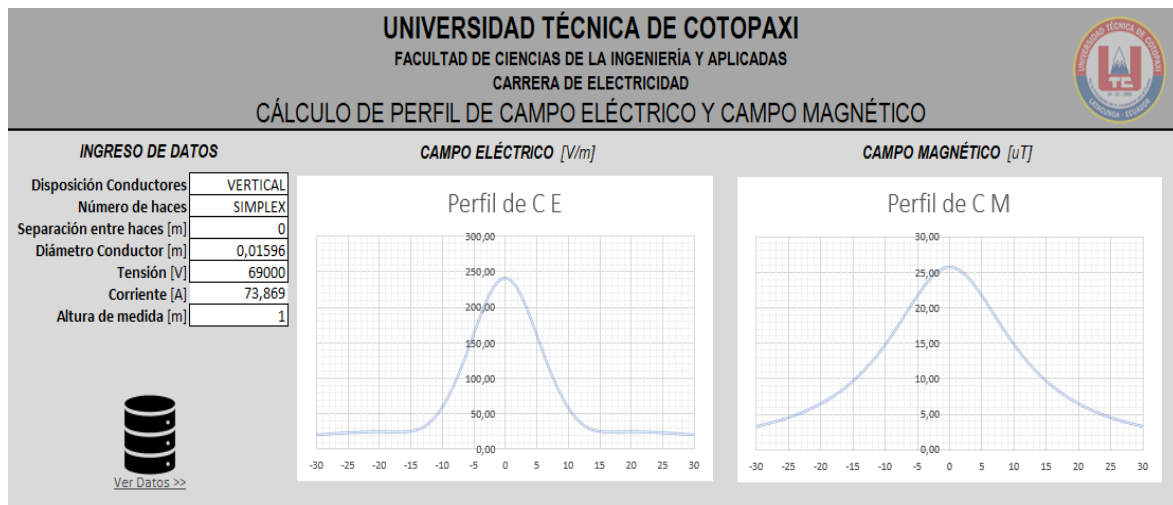


Figura L.1. Memoria de cálculo en Excel.

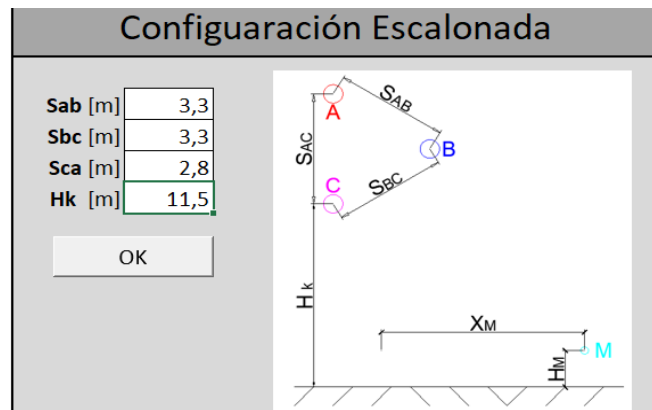


Figura L.2. Ventana para ingresos de datos de las distancias.

Anexo M. Resolución del ejercicio EPRI

Ejemplo: Considere una línea trifásica de 525 kV con las fases (a, b, c) en una configuración plana, 10 m entre fases, 10,6 m de altura sobre el suelo y paquetes de tres conductores, 3,3 cm de diámetro, con 45 cm de separación. El campo se calcula en un punto a 20m de la línea central, y a 2 m sobre el suelo.

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

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

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

Los coeficientes de potencial se calculan:

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

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

Los coeficientes de potencial mutuo se calculan:

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

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

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

Los coeficientes de potencial forman una matriz cuadrada:

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

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

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

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

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

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

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

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

$$V_{ib} = 0$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$\vec{E}_{ay} = 838 - j1 \ 189 \text{ V/m}$$

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

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

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

$$\vec{E}_{by} = 3 \ 967 + j5 \ 927 \text{ V/m}$$

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

$$E_y = 1 \ 750 + j4 \ 438 \text{ V/m}$$

$$E_{rms} = \sqrt{(-381 - 939)^2 + (1 \ 750 + 4 \ 438)^2} = 4 \ 877 \text{ V/m}$$

Anexo N. Certificado de la Empresa Eléctrica Ambato Regional Centro Norte S.A.



EMPRESA ELECTRICA AMBATO REGIONAL CENTRO NORTE S.A.

Trabajando con energía..!

Ambato, 21 de febrero de 2022

AVAL DE IMPLEMENTACIÓN

En calidad de Director del Departamento de Subtransmisión de la EMPRESA ELÉCTRICA AMBATO REGIONAL CENTRO NORTE S.A., EEASA, a petición verbal de los interesados, certifico que:

Los señores Tiban Mangui Ronny Daniel, y Yanchapaxi Lloacana Alex Mecias, portadores de la cédula de ciudadanía No. 180487263-6 y No. 172745360-5 respectivamente, realizaron el Trabajo Investigativo de grado con el tema: **“EVALUACIÓN DE RADIACIONES NO IONIZANTES GENERADAS POR LAS LÍNEAS DE ENERGÍA ELÉCTRICA DE SUBTRANSMISIÓN A 69 kV, EN EL EJE DE LA SUBESTACIÓN LA PENÍNSULA - SUBESTACIÓN LORETO UBICADO EN LA CIUDAD DE AMBATO”**. Bajo la supervisión de esta área, siguiendo todos los lineamientos y requerimientos establecidos por la EEASA.

Atentamente,

MSc. Héctor Barrera F.
DIRECTOR DEPARTAMENTO DE SUBTRANSMISIÓN

