



UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE CUENCA

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA

Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo

**UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA, INDUSTRIA
Y CONSTRUCCIÓN**

CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

**Análisis de incidencia inductiva por campos electromagnéticos,
desde las líneas de 230 kV hacia las de 13.8 kV que llega al
primario del transformador alimentador de circuitos auxiliares de
la subestación Zhoray**

**TRABAJO DE TITULACIÓN O PROYECTO DE INTEGRACIÓN
CURRICULAR PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO ELÉCTRICO**

AUTOR: WILSON REMIGIO REYES RIVERA

DIRECTOR: ING. ARTURO XAVIER GUTIÉRREZ ÁLVAREZ, Mgs.

CUENCA - ECUADOR

2022

DIOS, PATRIA, CULTURA Y DESARROLLO



UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA

Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo

**UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA, INDUSTRIA
Y CONSTRUCCIÓN**

CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

**Análisis de incidencia inductiva por campos electromagnéticos,
desde las líneas de 230 kV hacia las de 13.8 kV que llega al
primario del transformador alimentador de circuitos auxiliares de
la subestación Zhoray**

**TRABAJO DE TITULACIÓN O PROYECTO DE INTEGRACIÓN
CURRICULAR PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO ELÉCTRICO**

AUTOR: WILSON REMIGIO REYES RIVERA

DIRECTOR: ING. ARTURO XAVIER GUTIÉRREZ ÁLVAREZ, Mgs.

CUENCA - ECUADOR

2022

DIOS, PATRIA, CULTURA Y DESARROLLO

DECLARATORIA DE AUTORÍA Y RESPONSABILIDAD

Wilson Remigio Reyes Rivera portador de la cédula de ciudadanía N° **0301554655**. Declaro ser el autor de la obra: "Análisis de incidencia inductiva por campos electromagnéticos, desde las líneas de 230 kV hacia las de 13.8 kV que llega al primario del transformador alimentador de circuitos auxiliares de la subestación Zhoray", sobre la cual me hago responsable sobre las opiniones, versiones e ideas expresadas. Declaro que la misma ha sido elaborada respetando los derechos de propiedad intelectual de terceros y eximo a la Universidad Católica de Cuenca sobre cualquier reclamación que pudiera existir al respecto. Declaro finalmente que mi obra ha sido realizada cumpliendo con todos los requisitos legales, éticos y bioéticos de investigación, que la misma no incumple con la normativa nacional e internacional en el área específica de investigación, sobre la que también me responsabilizo y eximo a la Universidad Católica de Cuenca de toda reclamación al respecto.

Cuenca, 20 de julio de 2022


F:

Wilson Remigio Reyes Rivera

0301554655

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Wilson Remigio Reyes Rivera, bajo mi supervisión.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Arturo A', is positioned above a horizontal line.

Ing. Arturo Xavier Gutiérrez Álvarez Mgs.

DIRECTOR

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de titulación a mi compañera de vida Gabriela Calle, al igual que a mis tres angelitos de amor Renatita, Santiaguito y Lucianita, por ser mi fuerza, fortaleza y la más grande bendición que Dios me pudo regalar. También les dedico a ustedes amados padres, este logro que mucho esfuerzo a costado y que me hubiese encantado celebrarlo con ustedes: Wilson Oswaldo Reyes Saldaña (†) y Marianita de Jesús Rivera Maza (†). De la misma forma dedico este logro cumplido a toda mi familia: hermanos, abuelitos, tíos y demás seres queridos. Ya que detrás de un estudiante siempre habrá una familia brindando apoyo.

AGRADECIMIENTOS

Gracias amado padre Dios, por la oportunidad de permitirme cumplir una etapa importante de mi vida. Gracias amada esposa Gabrielita Calle, por siempre creer en mí y apoyarme incondicionalmente. Agradezco también a la empresa pública CELEC EP, Unidad de negocio Transelectric Zona Suroriental, y a su representante el ingeniero Vicente LLivichuzhca, al igual que al ingeniero José Mejía Morales. De igual forma agradezco al grupo de profesionales: Gustavo, Juan Alberto y Juan Fernando Luzuriaga representantes de la compañía CINARQ, por todo su apoyo en la realización de este trabajo de titulación. Agradezco también a mi tutor designado el ingeniero Javier Gutiérrez por su tiempo y guía en el proceso de elaboración de esta tesis. Dios les bendiga siempre a todos aquellos que participaron en este trabajo de titulación, que a lo mejor no los esté nombrando y también a todos los que de alguna forma me apoyaron en el proceso de estudios a lo largo de estos cinco años de preparación profesional.

RESUMEN

En el presente proyecto se realizó el análisis de incidencia inductiva de campos electromagnéticos entre dos diferentes líneas de transporte de energía eléctrica, siendo estos: transmisión en 230kV y distribución en 13.8kV. Los cuales comparten franja de servidumbre por un trayecto de 0.8km en dirección de la subestación Zhoray.

Posterior a la inspección visual del entorno donde se desarrolla la problemática, se procedió a realizar el levantamiento topográfico con metodología LiDAR, el mismo que enlaza los GPS diferenciales al sensor de escaneo instalado en el dron, logrando de esta forma capturar toda la información del entorno de las líneas de 230 kV y 13,8 kV, en modelo 3D y con un alto nivel de precisión.

Con la información obtenida del levantamiento topográfico y procesada por software, se realiza el seccionamiento en sentido transversal del área en estudio a una distancia de 20 metros entre cada corte, los que posteriormente fueron utilizados para la elaboración de las simulaciones de campos electromagnéticos en el software FEMM. Constatando de forma visual y escalar, el comportamiento de los campos electromagnéticos entre las dos líneas a diferentes distancias.

Bajo la regulación vigente nacional de franjas de servidumbre y distancias de seguridad para conductores energizados en líneas de transmisión y distribución (ARCONEL 018/18). Se presenta dos propuestas de solución a la problemática existente. La primera es, respetar la franja de servidumbre de la línea de transmisión en base al análisis y resultados mostrados en el documento y la segunda es, reubicar la línea de distribución hacia la distancia calculada, también ilustrada en el estudio.

Palabras clave: Campos electromagnéticos, redes eléctricas, franjas de servidumbre, metodología LiDAR, software FEMM

ABSTRACT

In this project, the inductive incidence of electromagnetic fields was analyzed between two different electric power transmission lines: 230kV transmission and 13.8 kV distribution. These lines share an easement strip for a distance of 0.8 km in the direction of the Zhoray substation.

After the visual inspection of the environment where the problem develops, a topographic survey with LiDAR methodology linking the differential GPS to the scanning sensor installed on the drone was performed, thus, capturing all the information of the environment of the 230 kV and 13.8 kV lines, in 3D model, and with a high level of accuracy.

Whit the information from the topographic survey and processed by the software, the transversal sectioning of the area under study was carried out at a distance of 20 meters between each cut, which was subsequently used for developing electromagnetic fields between the two lines at different distances was visually and scaled verified.

Following the current national regulation of easement strips and safety distances for energized conductors in transmission and distribution lines (ARCONEL 018/18), two proposed solutions to the existing problem are presented. The first one is to respect the easement strip of the transmission line based on the analysis and results shown in the document, and the second is to relocate the distribution line to the calculated distance, as illustrated in the study.

Keywords: Electromagnetic fields, power grids easement strips, LiDAR methodology, FEMM software

ÍNDICE GENERAL

DECLARATORIA DE AUTORÍA Y RESPONSABILIDAD	ii
CERTIFICACIÓN	iii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTOS	v
RESUMEN	vi
ABSTRACT.....	vii
ÍNDICE GENERAL.....	viii
ÍNDICE FIGURAS	xiv
ÍNDICE DE FORMULAS	xx
ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS.....	xxi
CAPÍTULO 1	1
1.1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.2 Formulación del problema.....	2
1.2.1 Delimitación del problema.....	2
1.3 Justificación	2
1.4 Objetivos.....	3
1.4.1 Objetivo General.....	3
1.4.2 Objetivos Específicos.....	3
CAPÍTULO 2	4
2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....	4
2.1 Sistema nacional de transmisión	4
2.1.1 Sistema de transmisión de 230 kV.....	6
2.1.2 Línea de transmisión Molino – Zhoray a 138 kV y 230 kV.	8
2.1.2.1 Subestación Molino, 230kV, 342,0 MVA.....	8
2.1.2.2 Subestación Zhoray, 230kV, 353MVA.	8
2.1.2.3 Línea de transmisión en 230 kV Molino – Zhoray.	9
2.1.3 Sistema nacional de distribución.....	9

2.1.3.1 Línea de distribución en 13.8 kV Mazar – Zhoray.	9
2.1.3.2 Conductores eléctricos.....	10
2.1.4 Distancias de seguridad en líneas de transmisión de 230 kV.....	11
2.1.4.1 Franjas de servidumbre.....	11
2.1.4.2 Radiaciones no ionizantes.	11
2.1.4.2.1 Zona ocupacional.	12
2.1.4.2.2 Zona de rebasamiento.....	12
2.1.4.2.3 Niveles de referencia para exposición ocupacional y pública a campos eléctricos y magnéticos de 60 Hz.	12
2.1.4.2.4 Niveles de referencia para limitar la exposición en campos eléctricos y magnéticos de 60 Hz para líneas de alta tensión.	12
2.2 Campos eléctrico y magnético.....	13
2.2.1 Definición de campo eléctrico.....	13
2.2.2 Flujo eléctrico.....	13
2.2.3 Ley de Gauss para el campo eléctrico.....	14
2.2.4 Intensidad del campo eléctrico.	14
2.2.5 Definición de campo magnético.....	14
2.2.6 Ley circuital del Ampere.	14
2.2.7 Ley de Gauss para el campo magnético.....	15
2.2.8 Ley de Bio – Savart.	15
2.2.9 Las ecuaciones de Maxwell.....	16
2.2.10 Ley de Faraday.	16
2.2.11 Líneas de transmisión y campos electromagnéticos.	17
2.2.11.1 Descripción física de la propagación en líneas de transmisión.	17
2.2.12 Métodos de resolución de ecuaciones.	18
2.2.12.1 Método de elementos finitos.	18
2.2.12.1.1 Condiciones de borde.	20
2.2.12.1.2 Condiciones de borde de primer orden.	20
2.3 Software FEMM (FINITE ELEMENT METHOD MAGNETICS).....	20

2.3.1 Estructura interna del programa.	20
2.3.2 Interfaz del software FEMM.	21
2.3.3 Delimitado tipo malla, para cálculo de campos electromagnéticos.	21
2.3.4 Cálculo algorítmico del software FEMM.	22
2.3.5 Etapas de programación de FEMM (Finite Element Method Magnetics).	22
2.3.5.1 Tipos de problemas.	23
2.3.5.1.1 Problemas electroestáticos.	23
2.3.5.1.2 Problemas magnetostáticos.	24
2.3.6 Características electromagnéticas usadas en el software FEMM.....	25
2.3.6.1 Permitividad eléctrica.	25
2.3.6.2 Permeabilidad magnética.	25
2.3.6.3 Conductividad eléctrica.	26
2.4 Importación de archivos CAD formato dxf a FEMM	26
2.4.1 Pasos para importación de archivo CAD dxf a FEMM.....	26
Primer paso.....	26
Segundo paso.....	26
2.5 Características de los materiales utilizados en el diseño de cada perfil.....	27
2.5.1 Delimitado tipo malla, para cálculo de campos electromagnéticos en perfiles.	28
2.5.2 Cálculo algorítmico de los campos electromagnéticos.	29
2.5.3 Ventanas para monitoreo de los cálculos algorítmicos.	29
2. 6 Georreferenciación.....	30
2.6.1 Sistema GPS.....	30
2.6.1.1 Componentes de un sistema GPS.	30
2.6.2 Obtención de coordenadas.	31
2.6.3 Tipos de posicionamiento de un sistema GPS.	31
2.6.3.1 GPS posicionamiento absoluto.....	32
2.6.3.2 GPS posicionamiento diferencial.....	32
2.7 Vehículo aéreo no tripulado (UAS).....	33

2.7.1 Clasificación de los UAS.	33
2.8 Sensor LIDAR	34
2.8.1 Componentes de un sistema LiDAR.	35
CAPÍTULO 3	36
3. LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO DE LAS LÍNEAS DE TRANSMISIÓN Y DISTRIBUCIÓN CON METODOLOGÍA LIDAR Y SIMULACIÓN DE CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS UTILIZANDO EL SOFTWARE FEMM	36
3.1 Levantamiento topográfico con tecnología LiDAR	36
3.1.1 Equipos utilizados en el estudio.	37
3.1.2 Descripción del proyecto.....	37
3.1.2.1 Objetivos.....	37
3.2 Modelo Digital de Superficie (MDS) y el Modelo Digital de TERRENO (MDT)	38
3.3 Análisis de la zona de levantamiento.....	39
3.3.1 Ubicación de vértices de control.	39
3.4 Captura de información LiDAR y fotografía aérea	41
3.4.1 Planificación para captura de fotografías aéreas.	41
3.4.1.1 Captura de información LiDAR y fotogramétrica.....	42
3.4.1.2 Alistamiento y diagnóstico inicial del proyecto.	42
3.4.1.3 Marco de Referencia GNSS para levantamiento LiDAR.	43
3.4.1.4 Planificación de vuelo LiDAR y fotogramétrico.	43
3.4.2 Captura de información LiDAR.	45
3.4.2.1 Ejecución de vuelos y toma de datos.	45
3.4.2.2 Toma de datos GNSS.....	45
3.4.2.3 Toma de datos IMU.	46
3.4.2.4 Post - proceso de datos LiDAR.....	46
A. GNSS + IMU (cálculo Inercial)	46
B. Puntos láser	47
C. Modelo Digital de Superficie Preliminar (MDS).....	48
D. Clasificación y edición para definición de Modelos	49

E. Clasificación y edición para definición de Modelos	49
3.4.3 Resultados del levantamiento LiDAR.	50
3.4.3.1 Criterio de seccionamiento para obtención de perfiles transversales.	51
3.4.3.2 Productos MDS, MDT.	51
3.4.3.2.1 Modelo Digital del Terreno (MDT).	51
3.4.3.2.2 Ortofoto y planimetría.	51
3.5 Registro de perfiles obtenidos del levantamiento topográfico con tecnología LiDAR	52
3.6 Cálculo de distancia mínima de seguridad para líneas de transmisión de 230 kV	54
3.7 Distancias excepcionales para franjas de servidumbre	56
3.8 Identificación de perfiles más cercanos entre líneas de transmisión y distribución.....	57
3.9 Simulación de campos eléctricos y magnéticos en el software FEMM	57
3.9.1 Selección de perfiles a simular.	58
3.9.1.1 Primer escenario.	58
3.9.1.1.1 Distancia más lejana entre líneas de transmisión y distribución.....	58
3.9.1.2 Segundo escenario.	58
3.9.1.2 .1 Distancia media entre líneas de transmisión y distribución.....	58
3.9.1.3 Tercer escenario.....	58
3.9.1.3.1 Distancia más cercana entre líneas de transmisión y distribución. .	58
3.10 Validación simulación	58
3.10.1 Simulación de campo eléctrico.	59
3.10.1.1 Perfil 42 – más lejano.....	59
3.10.1.2 Perfil 1 – distancia media.....	60
3.10.1.3 Perfil 21 – más cercano.....	61
3.10.1.4 Perfil 38 – distancia calculada.....	62
3.10.2 Simulación de campo magnético.....	63
3.10.2.1 Perfil 42 – más lejano.....	65

3.11 Contraste de resultados.....	69
3.11.1 Resultados obtenidos en la simulación de campo eléctrico.....	69
CAPÍTULO 4.....	73
4. PROPUESTAS DE SOLUCIÓN	73
4.1 Propuesta uno	73
4.1.1 Reubicación de la línea de distribución de 13.8 kV.	73
4.1.2 Análisis de problemática existente.....	75
4.1.3 Análisis perfil P21.	78
4.1.4 Análisis Perfil P/Propuesto.....	78
4.2 Propuesta dos	78
4.2.1 Análisis perfil P38.	82
CAPÍTULO 5.....	83
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	83
5.1 Conclusiones.....	83
5.2 Recomendaciones.....	84
6. Referencias	a
Anexo A.....	a
Anexo B.....	b
Anexo C.....	a
Anexo D.....	a
Anexo E.....	a
AUTORIZACION DE PUBLICACION EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL.....	b

ÍNDICE FIGURAS

Figura 1 Capacidad instalada de generación	4
Figura 2 Zonas operativas del Ecuador	5
Figura 3 Subestaciones y zonas operativas	6
Figura 4 Torres de transmisión 230 kV.	9
Figura 5 Poste para sistema de distribución 13.8 kV.....	10
Figura 6 Distancias de fajas de servidumbre de acuerdo con la capacidad de transmisión	11
Figura 7 Ley de Biot – Savart	15
Figura 8 Circuito básico de una línea de transmisión	18
Figura 9 (a) Dominio voltajes aplicados, (b) Dominio discretizado	19
Figura 10 Elemento finito con coordenadas.....	19
Figura 11 Estructura interna FEMM	20
Figura 12 Botón run mesh generator	21
Figura 13 Malla de triángulos en una circunferencia	21
Figura 14 Botón Run análisis.....	22
Figura 15 Tipos de problemas en FEMM.....	26
Figura 16 Visualización de archivo importado a FEMM	27
Figura 17 Editor de valores asignados a los conductores.	27
Figura 18 Editor de propiedades asignadas a los materiales del entorno	28
Figura 19 Mallado para cálculos electromagnéticos en perfiles.....	28
Figura 20 Visualización de resultados.....	29
Figura 21 Ventana grafica para visualizar la densidad de los campos electromagnéticos.....	30
Figura 22 Ventana de valores eléctricos, por ubicación cartesiana en la simulación.	30
Figura 23 Componentes de un sistema GPS	31
Figura 24 Esquema de la intersección espacial inversa	31
Figura 25 GPS posicionamiento absoluto	32
Figura 26 Posicionamiento diferencial.....	32
Figura 27 Sensor LiDAR.....	34
Figura 28 Definición de Modelos	38

Figura 29 Zona de estudio.....	39
Figura 30 Esquema - Plan de vuelo.....	44
Figura 31 Software para determinar la ubicación del UAV.....	47
Figura 32 Software de obtención de puntos láser.....	48
Figura 33 Área de levantamiento (amarillo), líneas de vuelo y puntos de control	49
Figura 34 Clasificación de la nube de puntos láser.....	50
Figura 35 Ortofoto y planimetría.....	52
Figura 36 <i>Ubicación geográfica líneas de transmisión 230 kV</i>	55
Figura 37 Perfil P42, Visualización de resultados eléctricos, distancia entre líneas: 19,3992m. Con voltaje de 0,1V en líneas de Distribución.....	59
Figura 38 Perfil P42, Visualización de resultados eléctricos, distancia entre líneas: 19,3992m. con voltaje de 7,967 kV en líneas de Distribución.....	59
Figura 39 Perfil P1, Visualización de resultados eléctricos, distancia entre líneas: 12,8568 m. con voltaje de 0,1V en líneas de Distribución.....	60
Figura 40 Perfil P1, Visualización de resultados eléctricos, distancia entre líneas: 12,8568 m. Con voltaje de 7,967 kV en líneas de Distribución.....	60
Figura 41 Perfil P21, Visualización de resultados eléctricos, distancia entre líneas: 4,6090 m. Con voltaje de 0,1V en líneas de Distribución.....	61
Figura 42 Perfil P21, Visualización de resultados eléctricos, distancia entre líneas: 4,6090 m. Con voltaje de 7,967 kV en líneas de Distribución.....	61
Figura 43 Perfil P38, Visualización de resultados eléctricos, distancia entre líneas: 8,3472 m. Con voltaje de 0,1V en líneas de Distribución.....	62
Figura 44 Perfil P38, Visualización de resultados eléctricos, distancia entre líneas: 8,34 m. Con voltaje de 7,967 kV en líneas de Distribución.....	62
Figura 45 Densidad de corriente en líneas de 230 kV.....	64
Figura 46 Perfil P42, Visualización de resultados eléctricos, distancia entre líneas: 19,3992m con densidad de corriente de 0,001 MA/m ² en líneas de Distribución.....	65
Figura 47 Perfil P42, Visualización de resultados eléctricos, distancia entre líneas: 19,3992 m, con densidad de corriente de 1,102777457 MA/m ² en líneas de Distribución.....	65
Figura 48 Perfil P1, Visualización de resultados eléctricos, distancia entre líneas: 12,8568 m, con densidad de corriente de 0,001 MA/m ² en líneas de Distribución.....	66

Figura 49 Perfil P1, Visualización de resultados eléctricos, distancia entre líneas: 12,8568 m con densidad de corriente de 1,102777457 MA/m ² en líneas de Distribución.	66
Figura 50 Perfil P21, Visualización de resultados eléctricos, distancia entre líneas: 4,6090 m con densidad de corriente de 0,001 MA/m ² en líneas de Distribución.	67
Figura 51 Perfil P1, Visualización de resultados eléctricos, distancia entre líneas: 4,6090 m con densidad de corriente de 1,102777457 MA/m ² en líneas de Distribución.	67
Figura 52 Perfil P38, Visualización de resultados eléctricos, distancia entre líneas: 8,34 m con densidad de corriente de 0,001 MA/m ² en líneas de Distribución.	68
Figura 53 Perfil 38, Visualización de resultados eléctricos, distancia entre líneas: 8,34 m con densidad de corriente de 1,102777457 MA/m ² en líneas de Distribución.	68
Figura 54 Campo eléctrico con alimentación en circuito de distribución.....	69
Figura 55 Campo eléctrico sin alimentación en circuito de distribución.....	70
Figura 56 Valores de simulación de campo eléctrico en todos los perfiles.	70
Figura 57 Campo magnético con corriente en líneas de distribución.	71
Figura 58 Campo magnético sin corriente en líneas de distribución.	71
Figura 59 <i>Valores de simulación de campo magnético en todos los refiles.</i>	72
Figura 60 Perfil propuesto a 15 metros de distancia entre líneas de 230kV y 13.8 kV	74
Figura 61 Ubicación propuesta para línea de distribución.....	74
Figura 62 Ubicación propuesta para línea de distribución en formato CAD.	75
Figura 63 Datos técnicos terminal tipo bota («CODO APARTARRAYOS OCC 25KV 200A ELASTIMOLD - 273ESA18 273ESA18», s. f.).....	76
Figura 64 <i>Componentes del conector y clasificación de voltajes («CODO APARTARRAYOS OCC 25KV 200A ELASTIMOLD - 273ESA18 273ESA18», s. f.)</i>	76
Figura 65 Perfiles que están dentro de la distancia de seguridad calculada.	79
Figura 66 Niveles porcentuales de incidencia de campo eléctrico en los perfiles P42, P1, P21 y P38.	80
Figura 67 Perfiles que sobrepasan los límites de la distancia de seguridad calculada.	82
Figura 68 GPS Diferencial Datos técnicos.	a
Figura 69 Dron datos técnicos.....	b
Figura 70 Sensor LiDAR datos técnicos	a
Figura 71 Laminas 01,02,03,04 con ortofoto y Perfiles transversales	a

Figura 72 Simulaciones de campo eléctrico y magnético en todos los perfiles obtenidos en el levantamiento topográficoa

ÍNDICE TABLAS

Tabla 1 Líneas de transmisión de 230 kV.....	7
Tabla 2 Líneas de Transmisión que interconectan con la Subestación Molino	8
Tabla 3 Líneas de transmisión que interconectan la Subestación Zhoray.....	8
Tabla 4 Niveles de Tensión.	9
Tabla 5 Conductores eléctricos líneas 230kV-13,8kV.	10
Tabla 6 Niveles de referencia para exposición ocupacional y pública a campos eléctricos y magnéticos de 60 Hz.....	12
Tabla 7 Niveles de referencia para limitar la exposición en campos eléctricos y magnéticos de 60 Hz para líneas de alta tensión	13
Tabla 8 Clasificación de problemas y sus respectivos algoritmos de cálculo.	22
Tabla 9 Magnitudes empleadas por el software FEMM.....	23
Tabla 10 Clasificación de los UAS.....	34
Tabla 11 Equipos utilizados en el levantamiento topográfico.....	37
Tabla 12 Coordenadas de puntos de control (GCP)	41
Tabla 13 Parámetros principales – Plan de vuelo captura LiDAR	44
Tabla 14 Codificación y área levantada mediante sensor LiDAR	45
Tabla 15 Resultados obtenidos del levantamiento topográfico con tecnología LiDAR	53
Tabla 16 Distancia vertical de seguridad	54
Tabla 17 Datos técnicos líneas 230 Kv.....	55
Tabla 18 Factor de corrección	56
Tabla 19 Franjas de servidumbre para distancias excepcionales.....	56
Tabla 20 Perfiles que se encuentran dentro de la distancia de seguridad calculada.....	57
Tabla 21 Densidad de corriente de los conductores de transmisión y distribución.	65
Tabla 22 Resultados obtenidos en la simulación de campo eléctrico.....	69
Tabla 23 Resultados obtenidos en la simulación de campo magnético.	71
Tabla 24 Valores de campo magnético, en perfiles que se encuentran dentro de la distancia de seguridad.....	72
Tabla 25 <i>Valores obtenidos en simulación respetando franja de servidumbre.</i>	73

Tabla 26 Perfil 21 y Perfil propuesto, contraste de imágenes y valores.	76
Tabla 27 Resultados porcentuales entre los perfiles P21 y P/propuesto, con relación a la tolerancia del conector tipo bota.	77
Tabla 28 Perfiles que están dentro de la distancia de seguridad calculada (resumida)	79
Tabla 29 Resultados porcentuales de incidencia de campo eléctrico.	80
Tabla 30 Valores en simulación del perfil 38, cumple con la distancia calculada.	81
Tabla 31 Resultados porcentuales del perfil P38, con relación a la tolerancia del conector tipo bota ..	81

ÍNDICE DE FORMULAS

Ecuación 1 Campo eléctrico de acuerdo a una carga cualquiera q	13
Ecuación 2 Flujo eléctrico	13
Ecuación 3 Ley de Gauss para campo eléctrico	14
Ecuación 4 Densidad de corriente eléctrica.	14
Ecuación 5 Divergencia	15
Ecuación 6 Biot – Savart	16
Ecuación 7 Maxwell para campos variantes con el tiempo 1	16
Ecuación 8 Maxwell para campos variantes con el tiempo 2	16
Ecuación 9 Maxwell para campos variantes con el tiempo 3	16
Ecuación 10 Maxwell para campos variantes con el tiempo 4.....	16
Ecuación 11 Ley de Faraday.....	17
Ecuación 12 Elementos finitos, variaciones lineales de dominio.....	19
Ecuación 13 Sistema matricial.....	19
Ecuación 14 Relación densidad de flujo y campo eléctrico	23
Ecuación 15 Campo electrostático usando valor escalar V	24
Ecuación 16 Forma diferencial con valores escalares	24
Ecuación 17 Ecuación de Poisson.....	24
Ecuación 18 Laplace	24
Ecuación 19 Permeabilidad magnética.....	25
Ecuación 20 Densidad de flujo	25
Ecuación 21 Densidad de corriente eléctrica para problemas magnetostáticos.	25
Ecuación 22 Permitividad eléctrica	25
Ecuación 23 Permeabilidad magnética.....	25
Ecuación 24 Conductividad eléctrica.....	26
Ecuación 25 Formula de la distancia vertical de seguridad.....	55
Ecuación 26 Flujo de potencia	63
Ecuación 27 Área de conductor.....	63

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1 Dron.....	33
Fotografía 2 Puntos de control terrestre.....	40
Fotografía 3 Terminal tipo bota deteriorado.....	75

CAPÍTULO 1

1.1 INTRODUCCIÓN

La unidad de negocio Transelectric, perteneciente a la Empresa Pública Estratégica Corporación Eléctrica del Ecuador- CELEC EP, cuenta con la administración de las subestaciones a nivel nacional, las mismas que se encargan de la recepción y transmisión de energía eléctrica hacia las distintas Empresas de Distribución a lo largo y ancho del país. Estas subestaciones son de dos tipos: las convencionales y las de tipo GIS (Gas Insulated Switchgear), siendo estas últimas más actualizadas en cuanto a equipos y requerimiento de menor espacio para su implementación.

Sin embargo, los dos tipos de subestaciones deben contar con las respectivas áreas y equipos necesarios para su correcto funcionamiento. Una de las partes principales y motivo de esta investigación, está en los circuitos auxiliares, ya que toda subestación debe contar con este sistema de alimentación, el cual, en muchos de los casos, son contratados a las Empresas Distribuidoras y en otros son provistos por el circuito terciario de uno de los transformadores de la subestación.

En la provincia del Cañar, a una latitud de $2^{\circ}35'37.9''S$ $78^{\circ}38'20.2''W$ encontramos a la subestación Zhoray, esta subestación es de tipo GIS, la misma que para la alimentación de los circuitos auxiliares, cuenta con una línea distribución de 22 kV, provista por la Empresa Eléctrica Azogues. Sin embargo, con el afán de optimizar los recursos internos de la Unidad de Negocio Transelectric, optaron por traer un circuito trifásico en 13.8 kV desde la generadora Mazar hacia la subestación Zhoray, compartiendo de esta forma, la misma franja de servidumbre del doble circuito de transmisión en 230kV, que viene desde la subestación Molino. Debido a la cercanía que existe entre las líneas de 230 kV y 13.8 kV, se presume la existencia de un problema por inducción de campos electromagnéticos, en la línea de 13.8 kV, ocasionando el deterioro del aislamiento por perforación y carbonización, en uno de los conectores tipo bota, que alimenta una de las fases del transformador de circuitos auxiliares de la subestación Zhoray.

Para el desarrollo de este trabajo de titulación se hará uso de una nueva metodología en levantamiento de topografía, las misma que ya es utilizada en países desarrollados como China y los Estados Unidos entre otros, lo cual garantiza la precisión y efectividad del estudio. Ya que gracias a esta nueva tecnología podremos ubicar de forma precisa los conductores de los dos circuitos tanto de transmisión como distribución.

Posterior al levantamiento topográfico con metodología LiDAR, se realizará en el software FEMM, las simulaciones necesarias que nos ayuden a entender el fenómeno físico llamado

campo electromagnético y sus distintos rangos. Finalizado el estudio, podremos corroborar la existencia o no de campos electromagnéticos entre las líneas de transmisión y distribución, con lo cual, se podrá proponer una o varias soluciones a dicha problemática.

1.2 Formulación del problema

Conocedores del impacto que tienen los campos electromagnéticos, en todas y cada una de las aplicaciones utilizadas por el hombre, surge la necesidad de obtener de forma escalonada, el impacto de estos campos magnéticos entre líneas del mismo potencial eléctrico y de diferentes potenciales.

Y es el caso de la subestación Zhoray en la provincia del Cañar, debido a que por acción de los campos electromagnéticos incidentes entre las líneas de 230 kV y 13.8 kV, se genera una sobreexposición a la línea de menor voltaje, ocasionando reiterados problemas de carbonización de una de las puntas terminales que llegan al primario del transformador reductor de 13.8 kV a 220V/127V alimentador de circuitos auxiliares. Esta situación impide que se pueda lograr el objetivo principal por el cual fue instalada esta red media tensión.

Se deberá realizar investigación referente a campos electromagnéticos, distancias entre líneas y hacer uso de la plataforma FEMM, que nos permite analizar campos magnéticos y eléctricos, brindándonos una simulación estática del comportamiento de estos campos, apoyados en un diseño de las líneas de transmisión y distribución en escala natural, simulación que nos permitirá identificar, la solución para mitigar el problema de inducción electromagnética en la línea de distribución de 13.8 kV.

1.2.1 Delimitación del problema.

En este proyecto se realizará una minuciosa investigación sobre la influencia de los campos electromagnéticos entre líneas de transmisión y distribución, apegados a la Regulación Nro. ARCONEL /18- Franjas de servidumbre en líneas del servicio de energía eléctrica y distancia de seguridad entre las redes eléctricas y edificaciones. Y se realizará un levantamiento del trayecto de las dos líneas por una longitud de 0.8 km. Y en base a estos datos obtenidos, se preparará una simulación en la plataforma FEMM. Finalmente se presentará una propuesta de una posible solución, basado en los datos obtenidos en la investigación y contrastados por los obtenidos en la simulación.

1.3 Justificación

La subestación de Zhoray al igual que todas las subestaciones a nivel nacional e internacional, deben contar con un sistema de alimentación para los circuitos auxiliares, garantizando de esta forma la continuidad y calidad de servicios primarios de la subestación,

entendemos por circuitos auxiliares a la iluminación total de la subestación, aires acondicionados, UPS y equipos contra incendios.

Como mencionamos anteriormente la importancia de los circuitos auxiliares es vital para el correcto funcionamiento de la subestación Zhoray, ya que al no contar con un correcto sistema de circuitos auxiliares estaría viéndose afectada la calidad y la confiabilidad de la misma.

Al momento esta línea de distribución que llega desde la generadora Mazar, no ha podido funcionar de manera correcta, presentando varios problemas por inducción de campos electromagnéticos, provocados por la línea de transmisión de 230 kV.

Por esta razón, se realizará todo el estudio del caso y en el afán de contrastar lo investigado se realizará una simulación de análisis de campos electromagnéticos en la plataforma FEMM.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General.

Desarrollar una propuesta técnica, que ayude a identificar la incidencia de campos electromagnéticos en la línea de distribución, a través de la simulación y proponer una solución para evitar esta problemática.

1.4.2 Objetivos Específicos.

- Revisar información correspondiente a la regulación vigente en el país en cuanto a redes de distribución respecta.
- Fomentar el uso de nuevas metodologías y tecnología, que permitan mejorar la confiabilidad del levantamiento de información georreferenciada o topográfica, aplicables al sector eléctrico.
- Investigar en tesis y artículos de carácter científico que involucre el estudio de campos electromagnéticos en líneas de transmisión y distribución.
- Hacer una simulación en base al levantamiento e investigación previamente realizada.
- Proponer mejoras de ser requeridas para solventar el inconveniente presentado.

CAPÍTULO 2

2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.1 Sistema nacional de transmisión

El sistema nacional de transmisión está catalogado como el conjunto de instalaciones eléctricas, las mismas que están integrados por: Subestaciones principales de elevación y reducción de voltaje, subestaciones de paso, líneas de transmisión y otros elementos que están relacionados con la transmisión de la energía eléctrica, como equipos de: compensación transformación, protección, maniobra, medición, conexión, control y comunicaciones (5.- *PLAN-DE-EXPANSION-DE-LA-TRANSMISION.pdf*, s. f.).

Es importante referenciar en aras de un estudio actual del Sistema Nacional Interconectado una visión general del sistema eléctrico ecuatoriano, para lo cual tomaremos datos de la página oficial de la corporación eléctrica del Ecuador CELEC EP, donde destaca que la Capacidad de generación instalada en el Ecuador siendo esta de 6.366,20 MW, este valor incluye los tres tipos de generación operativas en el país como son: hidráulica, eólica y térmica (*Generación*, s. f.-a).

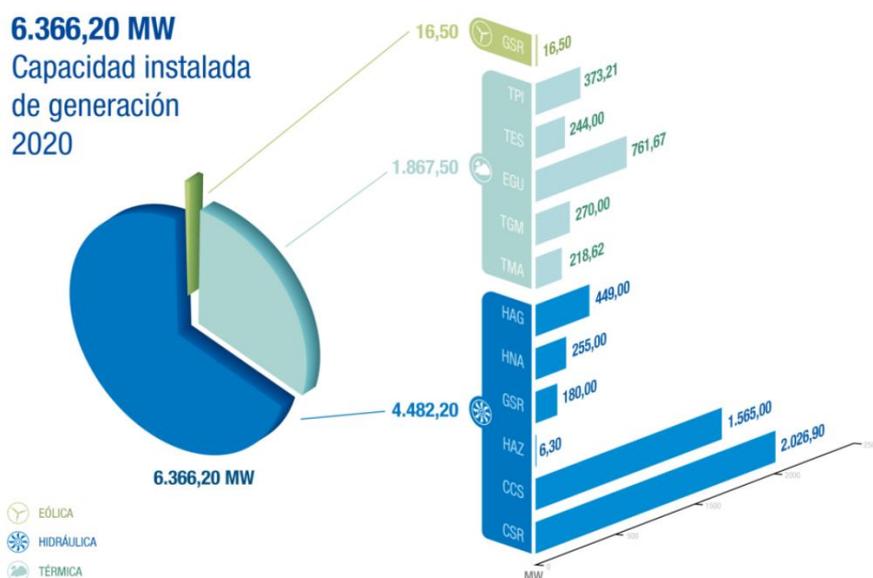


Figura 1 Capacidad instalada de generación

Fuente: (*Generación*, s. f.-b)

En la actualidad a enero del 2022, el sistema de transmisión nacional cuenta con los siguientes rangos de voltaje y distancias respectivas de recorrido en sus líneas de transmisión, siendo así las de 500 kV en 610,17 km, las de 230 kV en 3.249,00 km y las de 138 kV en

2.408,82 km, un total de 6.267,99 km de distancia. Adicional a esta información existen 70 subestaciones en las cuales se encuentran incluidas cuatro subestaciones móviles y su capacidad total instalada de transformación es de 16.886,20 MVA (*Transmisión*, s. f.-a).

También es importante mencionar las transacciones internacionales con la que cuenta el sistema nacional, estas transacciones van direccionadas de acuerdo a la demanda de carga del país que lo necesite y en cualquiera de los casos ya sea con nuestro vecino del norte Colombia o del Sur Perú, esta demanda será sumada al total de carga requerida por el país exportador (*01.-Parte-1-Informe-Anual-2018.pdf*, s. f.).

El sistema nacional de transmisión (SNT) se encuentra integrado por cuatro zonas operativas bien identificadas las mismas que son: Zona Noroccidental, Zona Nororiental, Zona Suroccidental y la Zona Suroriental. De esta forma cada zona cuenta con sus respectivas pertenencias operativas tales como: subestaciones y generadoras (*Transmisión*, s. f.-b).

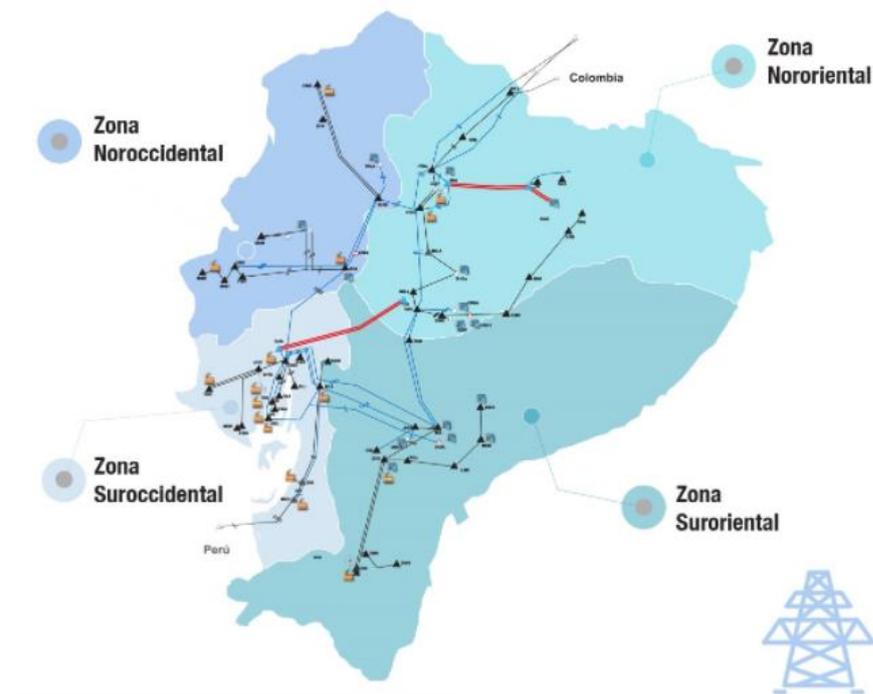


Figura 2 Zonas operativas del Ecuador

Fuente: (5.-PLAN-DE-EXPANSION-DE-LA-TRANSMISION.pdf, s. f.)

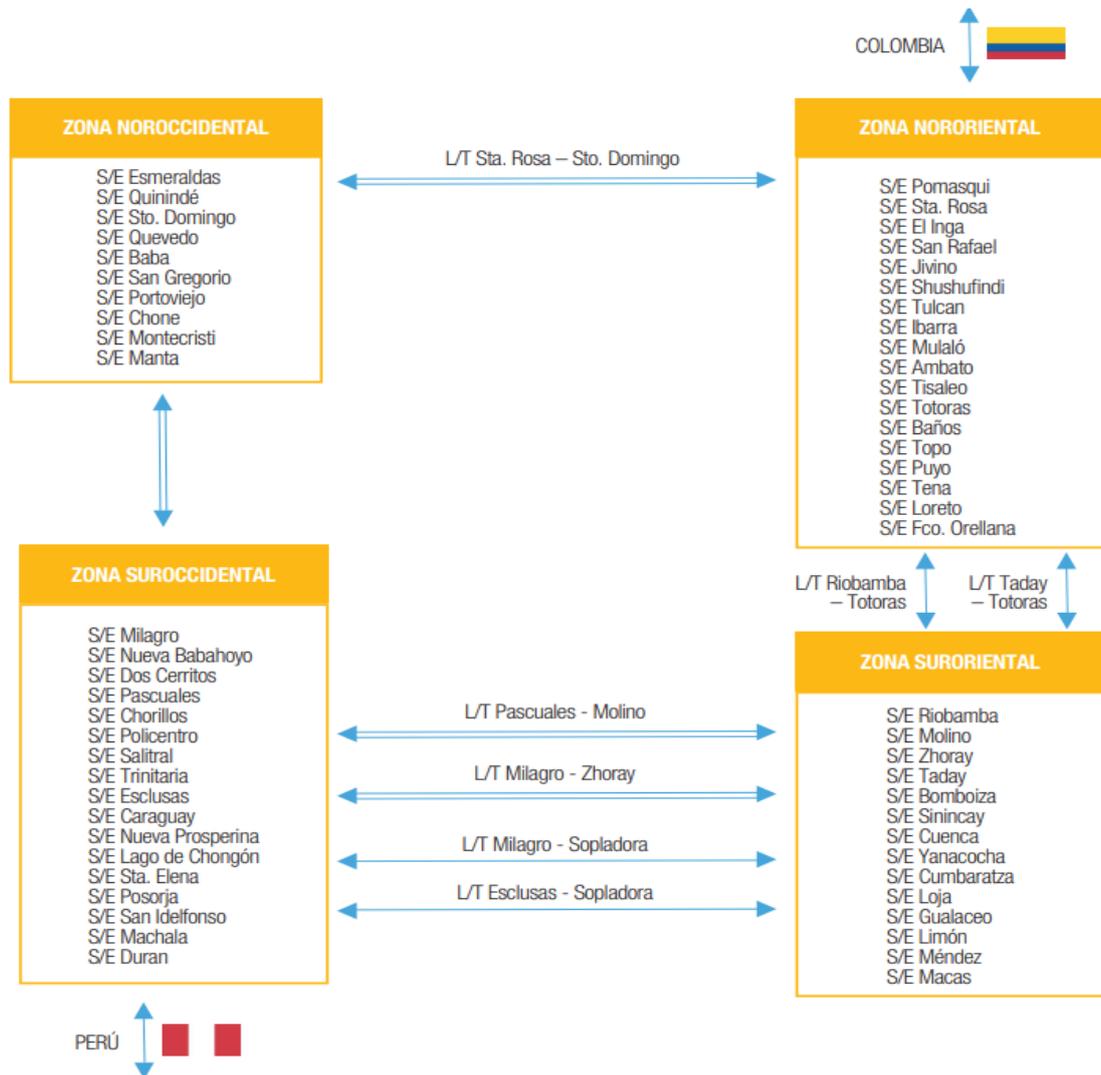


Figura 3 Subestaciones y zonas operativas

Fuente: (5.-PLAN-DE-EXPANSION-DE-LA-TRANSMISION.pdf, s. f.).

2.1.1 Sistema de transmisión de 230 kV.

El sistema de transmisión de 230 kV, es el más grande de todo el país, como ya se mencionó anteriormente este sistema cuenta con alrededor de 3.249,00 km de recorrido el mismo que se encuentra interconectando la mayor parte del sistema de transmisión del país. A continuación, en la tabla 1 detallaremos el listado de subestaciones que cuentan con transmisión 230 kV (*Transmisión*, s. f.-b).

Tabla 1 Líneas de transmisión de 230 kV

Nombre de la línea	Voltaje (kV)	Longitud (km)	Capacidad (MVA)	Circuitos (No.)	Conductor de Fase	
					Tipo	Calibre (MCM)
Baba - Quevedo	230	43,00	353,0	1	ACSR	1113
Chorrillos - Esclusas	230	37,90	297,0	1	ACSR	750
Chorrillos - Pascuales C1-C2	230	4,80	332,0	2	ACSR	1200
Chorrillos - Pascuales C3-C4	230	4,60	332,0	2	ACSR	1200
Esclusas-Termoguayas	230	0,20	247,0	1	ACSR	750
Inga - Pomasqui	230	34,84	494,0	2	ACSR	2 X 750
Inga - Santa Rosa	230	32,04	494,0	2	ACSR	2 X 750
Jivino - Shushufindi	230	28,00	297,0	1	ACSR	750
Machala - Zorritos 1/	230	53,19	332,0	2	ACSR	1200
Manduriacu - Sto. Domingo	230	68,64	494,0	2	ACSR	2 X 750
Milagro - Dos Cerritos	230	42,90	353,0	1	ACSR	1113
Milagro - Durán	230	36,80	494,0	1	ACSR	2 X 750
Milagro - Machala	230	135,20	494,0	1	ACSR	2 X 750
Milagro - Minas San Francisco	230	153,30	332,0	1	ACSR	1200
Milagro - Pascuales	230	52,80	353,0	1	ACSR	1113
Milagro - Zhoray	230	120,70	353,0	2	ACSR	1113
Minas San Francisco - Machala	230	60,40	332,0	1	ACSR	1200
Molino - Pascuales	230	188,50	342,0	2	ACSR	1113
Molino - Taday	230	41,40	332,0	2	ACSR	1200
Molino - Zhoray	230	15,00	353,0	2	ACSR	1113
Pascuales - Dos Cerritos	230	9,90	353,0	1	ACSR	1113
Pomasqui - Jamondino 1 2/	230	212,20	332,0	2	ACSR	1200
Pomasqui - Jamondino 2 3/	230	214,00	332,0	2	ACSR	1200
Quevedo - Chorrillos	230	143,40	232,0	2	ACAR	1200
Quevedo - San Gregorio	230	113,48	232,0	2	ACAR	1200
Riobamba - Totoras	230	42,90	342,0	1	ACSR	1113
San Francisco - Totoras	230	44,60	282,0	2	ACSR	795
San Rafael - Jivino	230	82,20	297,0	2	ACSR	750
Santa Rosa - Pomasqui	230	45,90	332,0	2	ACSR	1200
Santa Rosa - Sto. Domingo	230	78,34	342,0	2	ACSR	1113
Santa Rosa - Totoras	230	110,09	342,0	2	ACSR	1113
Santo Domingo - Baba	230	62,00	353,0	1	ACSR	1113
Santo Domingo - Esmeraldas	230	156,80	332,0	2	ACSR	1200
Santo Domingo - Quevedo	230	104,630	353,0	2	ACSR	1113
Sopladora - Esclusas	230	182,70	494,0	1	ACSR	2 X 75
Sopladora - Milagro	230	181,70	494,0	1	ACSR	2 X 75
Taday - Bomboiza	230	111,60	332,0	2	ACSR	1200
Taday - Riobamba	230	135,50	332,0	1	ACSR	1200
Taday - Totoras	230	178,40	332,0	1	ACSR	1200
Trinitaria - Esclusas	230	7,40	494,0	1	ACSR	2 X 75
Zhoray - Mazar	230	2,00	353,0	2	ACSR	1113
Zhoray - Sinincay	230	52,00	332,0	1	ACSR	1200

Fuente:(5.-PLAN-DE-EXPANSION-DE-LA-TRANSMISION.pdf, s. f.).

2.1.2 Línea de transmisión Molino – Zhoray a 138 kV y 230 kV.

2.1.2.1 Subestación Molino, 230kV, 342,0 MVA.

La subestación Molino se encuentra ubicada en un poblado llamado Guarumales, perteneciente al Cantón Sevilla de Oro en la Provincia del Azuay, Ecuador. Es una de las subestaciones que se encuentran junto a la generadora, de la cual es alimentada y posteriormente distribuye la energía eléctrica a las distintas subestaciones con las que se interconectan. En la tabla 2 encontraremos a detalle las interconexiones de la subestación Molino y sus distintos rangos de transmisión.

Tabla 2 Líneas de Transmisión que interconectan con la Subestación Molino

Nombre de la Línea	Voltaje (kV)	Longitud (km)	Capacidad (MVA)	Circuitos (No.)
Molino - Pascuales	230	188,50	342,0	2
Molino - Taday	230	41,40	332,0	2
Molino - Zhoray	230	15,00	353,0	2
Molino – Cuenca	138	67,08	100,0	2

Fuente:(5.-PLAN-DE-EXPANSION-DE-LA-TRANSMISION.pdf, s. f.).

2.1.2.2 Subestación Zhoray, 230kV, 353MVA.

La subestación Zhoray está localizada en provincia del Cañar, Ecuador. Es de transferencia tipo GIS en 230 kV y tiene una capacidad de transformación instalada de 353,0 MVA.

En la tabla 3 podemos visualizar las interconexiones con las cuales cuenta la subestación.

Tabla 3 Líneas de transmisión que interconectan la Subestación Zhoray

Nombre de la Línea	Voltaje (kV)	Longitud (km)	Capacidad (MVA)	Circuitos (No.)
Molino - Zhoray	230	15,00	353,0	2
Zhoray –Mazar	230	2,00	353,0	2
Zhoray - Sinincay	230	52,00	332,0	1
Milagro -Zhoray	230	120,70	353,0	2

Fuente: (5.-PLAN-DE-EXPANSION-DE-LA-TRANSMISION.pdf, s. f.).

2.1.2.3 Línea de transmisión en 230 kV Molino – Zhoray.

Esta línea interconecta las dos subestaciones Molino – Zhoray, la misma que tiene una distancia de 15 km de recorrido, cuenta con dos circuitos de un As por línea, en calibre 1113 MCM. Y son transportados por torres tipo AR2 – MS, como se muestra en la figura 4.

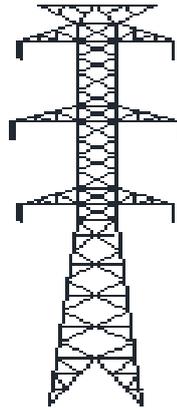


Figura 4 Torres de transmisión 230 kV.

Fuente: Elaboración propia software AutoCAD

2.1.3 Sistema nacional de distribución.

El sistema nacional de distribución está a cargo de las Empresa de Distribución y Comercialización del Ecuador de acuerdo a las áreas de concesión otorgadas, la tabla 4, ilustra los niveles de tensión de acuerdo a su clasificación, debiendo resaltar los de 0.6 kV hasta 40 kV que son objeto de estudio.

Tabla 4 Niveles de Tensión.

Descripción	Nivel de Tensión
Alta Tensión	500kV - 230kV - 139kV - 139kV - 69kV
Media Tensión	0.6kV- 40kV
Baja Tensión	120-220-600V

Fuente: Elaboración propia

2.1.3.1 Línea de distribución en 13.8 kV Mazar – Zhoray.

Esta línea está comprendida por tres conductores R, S, T. Que vienen desde la subestación Molino, pasa por la generadora Mazar y finalmente llega a la Subestación Zhoray. El propósito de esta línea en media tensión fue alimentar el transformador de circuitos auxiliares de la

Subestación Zhoray, circuito que actualmente se encuentra alimentado por la comercializadora empresa eléctrica Azogues. De esta forma se evitarían gastos internos por pago de tarifas eléctricas con la mencionada comercializadora y la optimización de los recursos internos de la corporación. La figura 5 ilustra el tipo de postes utilizados para el transporte de la línea de 13.8 kV.

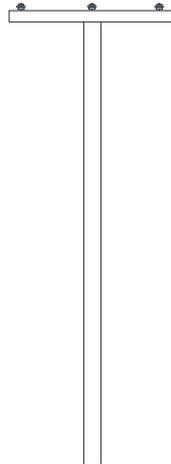


Figura 5 Poste para sistema de distribución 13.8 kV.

Fuente: Elaboración propia en el software AutoCAD

2.1.3.2 Conductores eléctricos.

Los conductores eléctricos utilizados en las dos líneas, tanto las de 230 kV como las de 13,8 kV están especificados conjuntamente con sus características técnicas en la siguiente tabla.

Tabla 5 Conductores eléctricos líneas 230kV-13,8kV.

Conductor	Calibre MCM	Diámetro	Resistencia (ohm/km) ASTM B-232	Capacidad (Amp)	
				Normal	Emergencia
Bluejay Finch	1113 000	32,8422 mm	0.05127 0.05133	858	1110
Sparrow	66 360	8.0264 mm	0.8320	200	325

Fuente: Elaboración propia

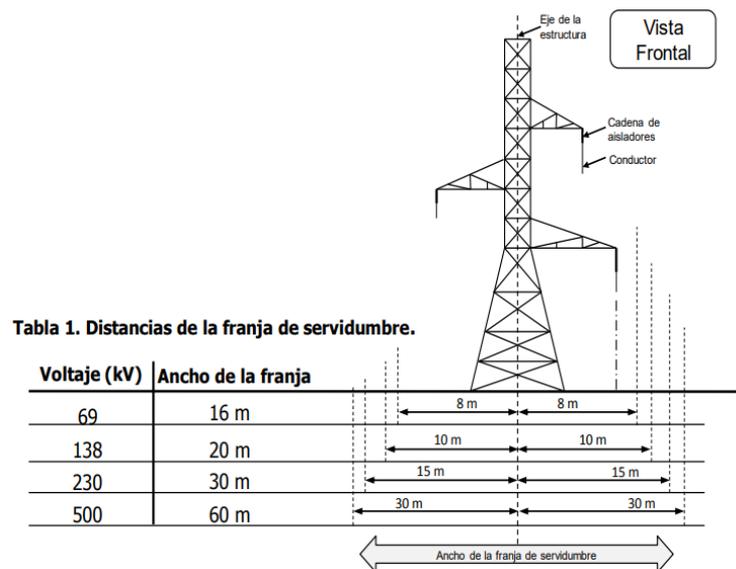
2.1.4 Distancias de seguridad en líneas de transmisión de 230 kV.

2.1.4.1 Franjas de servidumbre.

La faja de servidumbre esta conceptualizada como aquella superficie de sentido horizontal y simétrica con referencia al eje de la línea de alto voltaje. Definida por norma técnica con el afán de prevenir contactos accidentales con partes energizadas, salvaguardar la integridad de las personas y garantizar la confiabilidad del trayecto de la línea de transmisión(018-18-Proyecto-de-Regulacion-Franjas-de-Servidumbre-y-distancias-de-seguridad-entre-las-redes-electricas.pdf, s. f.).

En la figura 6 podemos observar las distintas magnitudes de fajas de servidumbre, de acuerdo a la capacidad de transporte de las líneas.

Figura 6 Distancias de fajas de servidumbre de acuerdo con la capacidad de transmisión



Fuente: (018-18-Proyecto-de-Regulacion-Franjas-de-Servidumbre-y-distancias-de-seguridad-entre-las-redes-electricas.pdf, s. f.).

2.1.4.2 Radiaciones no ionizantes.

Las radiaciones no ionizantes (RNI), son aquellas que abarcan todos los campos del espectro electromagnético, el mismo que no posee la suficiente energía para provocar la ionización de la materia. Tienen una característica en particular que es la de poseer longitudes

de onda mayores de los 100 nanómetros con frecuencias menores a los 3×10^{15} Hz y finalmente una energía por fotón por debajo de los 12 electronvoltios (eV) (DNTI, s. f.).

2.1.4.2.1 Zona ocupacional.

La zona ocupacional es aquella que está destinada para la realización de actividades laborales, donde cuyas radiaciones no ionizantes pasan por debajo de los parámetros o límites de exposición aplicables, sin embargo, no está cubierto los límites aplicables de exposición al público en general (DNTI, s. f.).

2.1.4.2.2 Zona de rebasamiento.

Esta zona está comprendida por la sobreexposición a las radiaciones no ionizantes, en la cuales no está permitida la circulación de trabajadores, mucho menos del público en general (DNTI, s. f.).

2.1.4.2.3 Niveles de referencia para exposición ocupacional y pública a campos eléctricos y magnéticos de 60 Hz.

La tabla 6, muestra los diferentes tipos de exposición.

Tabla 6 Niveles de referencia para exposición ocupacional y pública a campos eléctricos y magnéticos de 60 Hz.

Tipo de Exposición	Intensidad de Campo Eléctrico (E)(V^{TM-1})	Intensidad de Campo Magnético (H)($A m^{-1}$)	Densidad de Flujo Magnético (B) (Microteslas)
Público en General	4167	67	83
P. Ocupacionalmente Expuesto	8333	333	714

Fuente: (DNTI, s. f.).

2.1.4.2.4 Niveles de referencia para limitar la exposición en campos eléctricos y magnéticos de 60 Hz para líneas de alta tensión.

La tabla 7, refleja los valores de intensidad de campo eléctrico y densidad de flujo magnético, de acuerdo al nivel de transmisión de energía, es importante decir que estos valores son referenciados al límite de la franja de servidumbre (DNTI, s. f.).

Tabla 7 Niveles de referencia para limitar la exposición en campos eléctricos y magnéticos de 60 Hz para líneas de alta tensión

Nivel de Tensión kV	Intensidad de Campo Eléctrico (E)(V m ⁻¹)	Densidad de Flujo Magnético (B) (Microteslas)	Ancho de Faja de Servidumbre (Metros)
230	4167	83	30
138	4167	83	20
69	4167	83	16

Fuente: (DNTI, s. f.).

2.2 Campos eléctrico y magnético

2.2.1 Definición de campo eléctrico.

En base a los experimentos y registros teóricos sobre el campo eléctrico, podemos decir que es la fuerza de atracción y repulsión de cuerpo cargado de energía, provocando de esta forma un intercambio de fuerzas entre los cuerpos. Sus unidades de medida son los Newtons/Coulomb, $\frac{N}{C}$, pero también se los podría expresar en $\frac{V}{m}$ (Cabezas Rubio & Jiménez Corrales, 2019).

En términos matemáticos se podría decir que el campo eléctrico es toda aquella cantidad vectorial que encontramos en cualquier punto del espacio, en este sentido podemos decir que el campo eléctrico es la fuerza que actúa sobre una carga puntual unitaria y positiva (El campo eléctrico (artículo), s. f.).

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

Ecuación 1 Campo eléctrico de acuerdo a una carga cualquiera q

Donde:

\vec{E} = Campo eléctrico

\vec{F} = Fuerza

q = Carga

2.2.2 Flujo eléctrico.

Está ligado a la propiedad de cualquier campo vectorial a una superficie determinada, la misma que podría ser abierta o cerrada (Cabezas Rubio & Jiménez Corrales, 2019), el flujo está dado por la siguiente expresión.

$$\Phi_E = \oint \vec{E} \cdot d\vec{A} \quad (2)$$

Ecuación 2 Flujo eléctrico

Donde:

Φ_E : Flujo eléctrico.

\vec{E} : Campo eléctrico

$d\vec{A}$: Área superficial.

2.2.3 Ley de Gauss para el campo eléctrico.

La teoría de la ley de Gauss en base al estudio de relación entre el flujo del campo eléctrico neto en una superficie cerrada y la carga encerrada sobre la misma superficie (Espinoza, s. f.).

La siguiente ecuación demuestra que la magnitud de campo eléctrico es igual en todos los puntos de la superficie de cualquier circunferencia de radio r (Espinoza, s. f.):

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

Ecuación 3 Ley de Gauss para campo eléctrico

2.2.4 Intensidad del campo eléctrico.

La intensidad de campo eléctrico viene a ser definido como aquel vector fuerza sobre cada unidad de carga positiva de prueba. Pero antes será importante aclarar que una carga positiva de prueba es aquella que se mueve lentamente alrededor de una carga fija, demostrando la existencia de un campo de fuerza sobre ella.

2.2.5 Definición de campo magnético.

Antes de definir el campo magnético, debemos recordar la bipolaridad de un campo magnético siendo estos el polo positivo (Norte) y el polo negativo (Sur). Luego diremos que un campo magnético es la resultante matemática de una cantidad de fuerza aplicada en una carga en movimiento (Cabezas Rubio & Jiménez Corrales, 2019).

2.2.6 Ley circuital del Ampere.

O también llamada ley del trabajo de Ampere, es una de las más utilizadas al momento de resolver problemas con campos magnéticos, pero si debe tener especial consideración de la simetría del problema y en este sentido identificar las variables y componentes con las que se cuenta (Hayt, s. f.).

$$\nabla \times B = \mu_0 J \quad (4)$$

Ecuación 4 Densidad de corriente eléctrica.

Donde:

$\nabla \times H$: Rotacional del campo magnético.

J: densidad de corriente eléctrica.

2.2.7 Ley de Gauss para el campo magnético.

Vamos a estudiar la ley de Gauss para el campo magnético, pero en este caso lo haremos desde a la divergencia del campo magnético, la misma que nos ayuda a entender desde donde parte hasta donde termina las líneas de campo. Si la divergencia arroja valores positivos habrá más líneas que nacen del campo que las que mueren, mientras que al obtener valores negativos morirán más líneas de campo que las que nacen. Y si el valor es cero, pues no existirá ninguna de ellas (Cabezas Rubio & Jiménez Corrales, 2019).

$$\nabla \cdot H = 0 \quad (5)$$

Ecuación 5 Divergencia

2.2.8 Ley de Bio – Savart.

La ley de Biot – Savart establece que en cualquier punto P la magnitud de la intensidad de campo magnético que produce 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 (Hayt, s. f.).

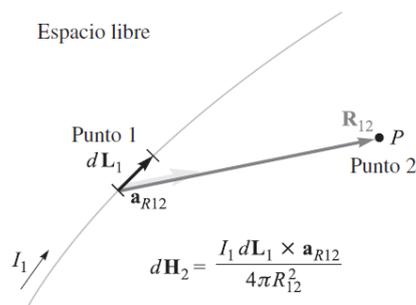


Figura 7 Ley de Biot – Savart

Fuente: (Hayt, s. f.)

Donde:

La ley de Biot-Savart expresa la intensidad de campo magnético dH_2 producida por un elemento diferencial de corriente $I_1 dL_1$. La dirección de dH_2 es hacia adentro de la página (Hayt, s. f.).

Ley de Biot – Savart

$$dH = \frac{IdL \times \alpha_R}{4\pi R^2} = \frac{IdL \times R}{4\pi R^3} \quad (6)$$

Ecuación 6 Biot – Savart

2.2.9 Las ecuaciones de Maxwell.

En base a la literatura revisada, las ecuaciones de Maxwell son parte de la inspiración del trabajo experimental de Faraday, quien por cierto era 40 años mayor a Maxwell, resaltando con puntual interés en la imagen mental que tenía de las líneas de fuerza, que Faraday desarrolló en su teoría eléctrica y magnética (Hayt, s. f.).

De aquí surgen las cuatro ecuaciones fundamentales de la teoría electromagnética:

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (7)$$

Ecuación 7 Maxwell para campos variantes con el tiempo 1

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (8)$$

Ecuación 8 Maxwell para campos variantes con el tiempo 2

Ecuaciones sin dependencia temporal:

$$\nabla \cdot D = \rho_v \quad (9)$$

Ecuación 9 Maxwell para campos variantes con el tiempo 3

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (10)$$

Ecuación 10 Maxwell para campos variantes con el tiempo 4

2.2.10 Ley de Faraday.

En el año 1820, Michael Faraday manifiesta la creencia de que, si una corriente tenía la facultad de generar un campo magnético, inversamente un campo magnético podría también ser capaz de generar una corriente (Hayt, s. f.).

Diez años después desarrolló un experimento en el que se incluía un campo magnético variable, el mismo que consistía en enrollar dos alambres o conductores por separado, alrededor de un toroide de hierro y adicióno un galvanómetro en un circuito, y en el otro una batería. Cuando cerró el circuito de la batería, pudo observar una deflexión momentánea del galvanómetro, mientras que al abrir el circuito nuevamente observó que una similar deflexión del galvanómetro, pero en sentido contrario (Hayt, s. f.).

Finalmente podemos concluir que un campo magnético que varía con el tiempo, produce una fuerza electromotriz (fem), capaz de generar una corriente en un circuito cerrado (Hayt, s. f.).

$$fem = -\frac{d\Phi}{dt} V \quad (11)$$

Ecuación 11 Ley de Faraday

2.2.11 Líneas de transmisión y campos electromagnéticos.

Las líneas de transmisión y los campos electromagnéticos siempre estarán ligados mientras exista de por medio el voltaje y la corriente que circula a través de las mismas, y su frecuencia estará establecida de acuerdo al sector o región a las cuales pertenezcan, en el caso de Ecuador la frecuencia establecida es de 60 Hz (Company & UHV, 1982).

Los campos tanto eléctrico como magnético está relacionado a las características de las líneas, en el caso del campo eléctrico sus valores dependerán del número de conductores por fase, número de circuitos, diámetro del conductor, etc. Mientras que en los campos magnéticos su valor será referente a la cantidad de corriente que transporta la línea (Cabezas Rubio & Jiménez Corrales, 2019).

2.2.11.1 Descripción física de la propagación en líneas de transmisión.

Es importante contar con los conocimientos básicos de sobre la propagación de las ondas en una línea de transmisión, para lo cual, y por temas de explicación tomaremos como ejemplo una línea de transmisión sin pérdidas, lo cual significa que el total de la potencia de entrada, llegara hasta el extremo de salida.

Explicación:

Usamos una batería V_0 , y la conectamos al inicio del circuito por medio de un interruptor S_1 en un tiempo $t = 0$. Al cerrar el interruptor S_1 , ocurre que el voltaje $V^+ = V_0$, con referencia al tiempo sabemos que este voltaje no aparece de forma inmediata en todas las partes del circuito o de las líneas, sino que se desplaza a una cierta velocidad, desde la batería hacia la resistencia de carga R . El frente de onda que podemos observar en la figura 8 es simbolizado por la línea discontinua vertical este nos ilustra de forma didáctica la frontera de línea energizada y la que está por energizar. Lo mismo ocurre con la corriente de carga, I^+ . En este sentido diremos que tanto la corriente como el voltaje son discontinuos a través del frente de onda (Hayt, s. f.).

El frente de onda se desplazará de izquierda a derecha a una velocidad v , hasta llegar al extremo más lejano. Lo importante de este estudio es el saber que la línea de transmisión al ser completamente cargada, experimentará valores de capacitancia e inductancia respectivamente (Hayt, s. f.).

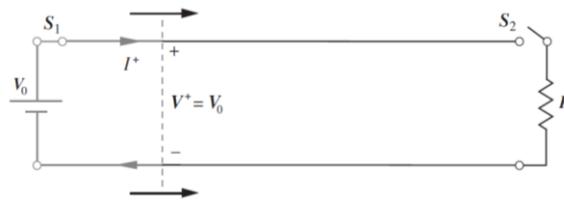


Figura 8 Circuito básico de una línea de transmisión

Fuente: (Hayt, s. f.).

2.2.12 Métodos de resolución de ecuaciones.

Para la resolución de ecuaciones concernientes a campos electromagnéticos (Ecuaciones de Maxwell) existen dos métodos que ya los hemos mencionado anteriormente y son: analítico y numérico.

Métodos analíticos [25]

- Método de coeficientes de potencial de Maxwell
- Método de Mark y Mengelle
- Método de las imágenes sucesivas.

Métodos numéricos [25]

- Método de simulación y cargas
- Método de elementos de borde
- Método de los elementos finitos

2.2.12.1 Método de elementos finitos.

El método de elementos finitos se caracteriza por encontrar soluciones, siempre y cuando se conozcan los valores de sus condiciones de frontera (Cabezas Rubio & Jiménez Corrales, 2019).

El desarrollo de este método consiste en discretizar el área de análisis, en pequeños fragmentos o regiones finitas llamadas elementos, de forma triangular o cuadriláteros enlazados entre sí por nodos conectores, en base a la interpolación de los valores conocidos de los nodos, se lograría saber un valor aproximado del modelo en estudio. La exactitud de la resolución dependerá del número de elementos finitos obtenidos (Cabezas Rubio & Jiménez Corrales, 2019).

La siguiente grafica 9 (a) expresa el dominio usando dos dieléctricos diferentes con voltajes aplicados a dos fronteras, mientras que cuando el dominio es discretizado se generan muchos elementos con sus respectivas fronteras 9(b) (Cabezas Rubio & Jiménez Corrales, 2019).

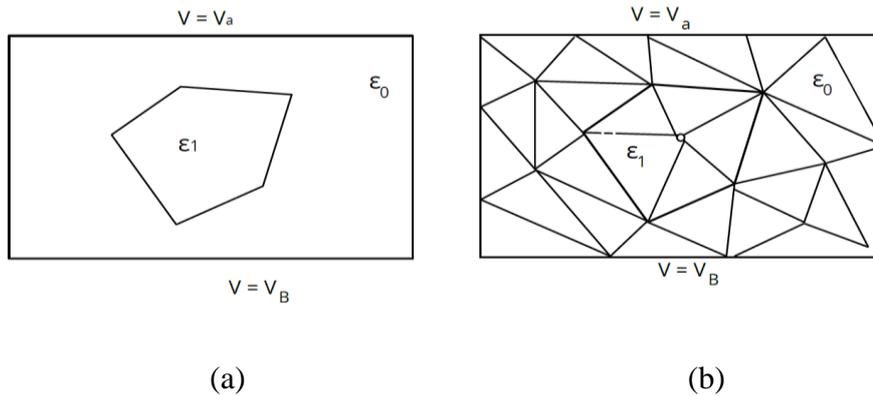


Figura 9 (a) Dominio voltajes aplicados, (b) Dominio discretizado

Fuente: (Zafaruddin, s. f.).

La siguiente igualdad será de consideración para las variaciones lineales de dominio.

$$V(x, y) = a_1 + a_2x + a_3y \quad (12)$$

Ecuación 12 Elementos finitos, variaciones lineales de dominio

En la siguiente figura 10 se representa un elemento finito con sus respectivas coordenadas, el mismo que debe satisfacer la ecuación de primer orden (ecuación 6), para lo cual obtendremos un sistema de tres ecuaciones con tres incógnitas:

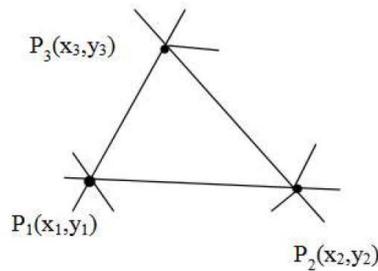


Figura 10 Elemento finito con coordenadas

Fuente: (manual42.pdf, s. f.).

Sistema de tres ecuaciones con tres incógnitas

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & X_1 & y_1 \\ 1 & X_2 & y_2 \\ 1 & X_3 & y_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} \quad (13)$$

Ecuación 13 Sistema matricial

El resultado del sistema de tres ecuaciones con tres incógnitas será lo más cercano al problema, dependerá de la consistencia empleada en las condiciones de borde (Zafaruddin, s. f.).

2.2.12.1.1 Condiciones de borde.

También llamadas condiciones de contorno o de frontera las misma que no son más que variables conocidas (Cabezas Rubio & Jiménez Corrales, 2019).

2.2.12.1.2 Condiciones de borde de primer orden.

También llamadas condiciones de Dirichlet, estas condiciones imponen el valor de su función en ciertas regiones del dominio de análisis (Cabezas Rubio & Jiménez Corrales, 2019).

2.3 Software FEMM (FINITE ELEMENT METHOD MAGNETICS)

La plataforma FEMM (Finite Element Method Magnetics) es uno de los programas de acceso libre que podemos encontrar en el internet y descargar, para posteriormente instalarlo en nuestro computador. Al contar con un grupo de programas internos nos permite resolver problemas electromagnéticos de baja frecuencia, esto en dos dimensiones: planas y dominios asimétricos.

FEMM, está capacitado para analizar, procesar y solucionar problemas de campos magnéticos, electrostáticos, flujos de calor y corriente.

2.3.1 Estructura interna del programa.

La figura 11 muestra la estructura interna del software y sus distintos componentes virtuales.

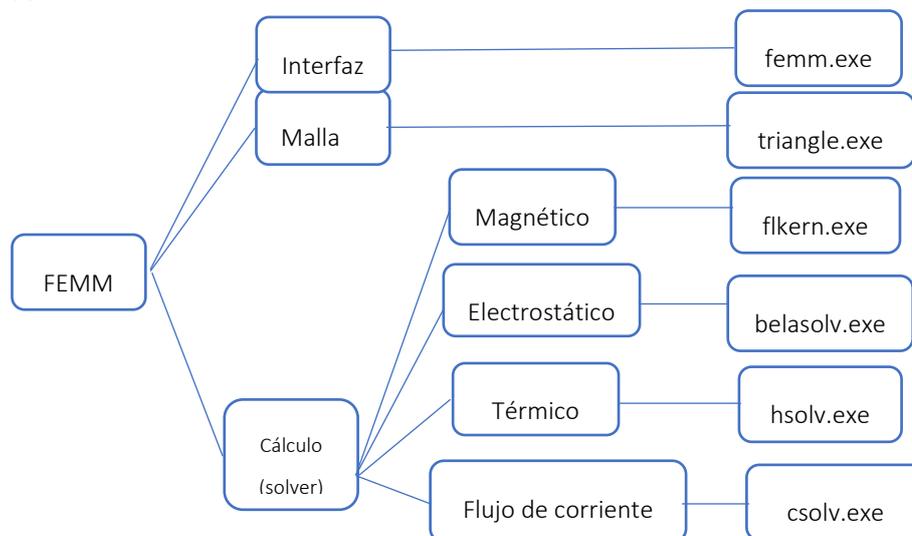


Figura 11 Estructura interna FEMM

Fuente: (manual42.pdf, s. f.).

2.3.2 Interfaz del software FEMM.

La interfaz gráfica del software FEMM, cuenta con algunas herramientas básicas de dibujo, las mismas que le permiten desarrollar el problema propuesto de forma gráfica, a la escala deseada, herramientas complementarias como la visualización, selección, definición de propiedades de los materiales a utilizar. La interfaz cuenta con dos pantallas de una de diseño y programación en la cual se crea el sistema a analizar teniendo presente que este diseño debe estar delimitado para su cálculo de campos. Y la otra pantalla en la cual se puede visualizar los resultados (manual42.pdf, s. f.).

Es importante mencionar que la interfaz en sus dos etapas preproceso y postproceso cuenta con tres secciones idénticas, siendo estas: Magnético, Electrostático y Térmico (manual42.pdf, s. f.).

2.3.3 Delimitado tipo malla, para cálculo de campos electromagnéticos.

Como se vio en la figura 11, FEMM cuenta con un programa interno llamado triangle.exe, el mismo que posterior al diseño y mediante el botón Run Mesh generator, realiza la división del área a calcular en triángulos, haciendo un barrido a base de algoritmos, de todo el diseño que se va simular. La figura 12 muestra la imagen de botón virtual en la barra de herramientas y la figura 13 el resultado de proceso mencionado (Cabezas Rubio & Jiménez Corrales, 2019).

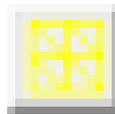


Figura 12 Botón run mesh generator

Fuente: Captura de software FEMM

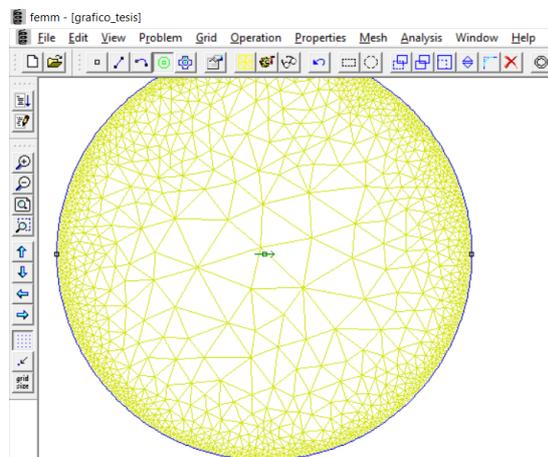


Figura 13 Malla de triángulos en una circunferencia

Fuente: Captura de software FEMM

Existe la opción de modificar los parámetros de mallas de acuerdo a las necesidades de estudio, esto se realiza usando la siguiente ruta Problem/Min Angle. Esta opción es condicionada a un rango ente 1° y 33,8° (manual42.pdf, s. f.).

2.3.4 Cálculo algorítmico del software FEMM.

FEMM cuenta internamente con un grupo de aplicaciones de cálculo algorítmico, específicamente creados de acuerdo a la necesidad del problema que se piensa resolver, en la tabla 8, encontramos su clasificación.

Tabla 8 Clasificación de problemas y sus respectivos algoritmos de cálculo.

Tipos de problemas	Aplacaciones de cálculo algorítmico
Magnético	fkern.exe
Electrostático	belasolv.exe
Térmico	hsolv.exe
Flujo de corriente	cslov.exe

Fuente: (manual42.pdf, s. f.)

Finalmente, los cálculos son ejecutados usando el botón Run análisis figura 14.



Figura 14 Botón Run análisis

Fuente: Captura del software FEMM

2.3.5 Etapas de programación de FEMM (Finite Element Method Magnetics).

Las etapas de programación del software FEMM son tres:

Procesador: en esta etapa inicial, se hace uso de las herramientas y comandos con los que cuenta el programa, el diseño de estudio debe ser creado o importado en formato dxf, del Software AutoCAD, teniendo presente que al trazar las superficies deben estar cerradas, basadas en datos relevantes a escala natural. En este sentido se debe programar los materiales o elementos de acuerdo a sus características reales físicas que poseen, incluido el ambiente que los rodea (manual42.pdf, s. f.).

Aplacaciones de cálculo algorítmico: ahora bien, si ya contamos con un diseño terminado, se procede crear nodos y elementos finitos de acuerdo a sus características.

Posteriormente se realizará la compilación y resolución de los sistemas de ecuaciones que se desean calcular (manual42.pdf, s. f.)

Post procesador: Llegado a esta etapa, lo que corresponde es monitorear y analizar los resultados obtenidos en la simulación (manual42.pdf, s. f.).

2.3.5.1 Tipos de problemas.

Como ya hemos mencionado anteriormente FEMM, tiene la facultad de resolver algunos casos especiales de las ecuaciones de Maxwell, logrando de esta manera conocer cuál sería el comportamiento de un campo electromagnético en un lugar determinado de análisis. Adicional a los valores de campo eléctrico y magnético, el software muestra una gama de unidades que componen un análisis mucho más completo (manual42.pdf, s. f.).

Tabla 9 Magnitudes empleadas por el software FEMM

Símbolo	Magnitud	Unidades SI
E	Campo eléctrico	N/C, V/m
B	Inducción magnética	T
H	Intensidad de campo magnético	A/m
J	Densidad de corriente	A/m ²
ρ	Densidad de carga	C/m, C/m ² , C/m ³
ε	Permitividad eléctrica	F/m
μ	Permeabilidad magnética	H/m, N/A ²
σ	Conductividad media	S/m
K	Conductividad térmica	W/(m*K)
T	Temperatura	K
Q	Calor generado por unidad de volumen	W/m ³

Fuente: (manual42.pdf, s. f.)

2.3.5.1.1 Problemas electrostáticos.

Conocedores de la relación existente entre la intensidad del campo eléctrico E y la densidad de flujo eléctrico D, para el estudio de los campos electrostáticos, los asociaremos a las ecuaciones de Maxwell, no sin antes partir de la ley de Gauss, que establece el flujo eléctrico total que sale de una superficie cerrada, es igual a la carga neta contenida dentro de aquella superficie (Espa, s. f.) para ello usaremos las ecuaciones de campos estáticos (manual42.pdf, s. f.).

La relación E y D, se representa en la siguiente ecuación 31, para ello debemos aclarar que la relación se cumplirá siempre y cuando sea de tipo lineal (manual42.pdf, s. f.).

$$D = \epsilon E \tag{14}$$

Ecuación 14 Relación densidad de flujo y campo eléctrico

El programa hace uso del valor escalar V , y se define por la relación existente con el campo eléctrico.

$$E = -\nabla V \quad (15)$$

Ecuación 15 Campo electrostático usando valor escalar V

Sustituyendo 31 y 32, en la ecuación 12 obtendremos:

$$\nabla \cdot \epsilon(-\nabla V) = \rho \quad (16)$$

Ecuación 16 Forma diferencial con valores escalares

Al saber que el medio de la región de trabajo es homogéneo, se retira la permitividad de las derivadas parciales incluidas en la divergencia, resultando la siguiente ecuación (manual42.pdf, s. f.).

$$\nabla \cdot \nabla V = -\frac{\rho}{\epsilon} \quad \text{ó} \quad \nabla^2 V = -\frac{\rho}{\epsilon} \quad (17)$$

Ecuación 17 Ecuación de Poisson

Ecuación de Poisson para determinar la función potencial.

$$\nabla^2 V = 0 \quad (18)$$

Ecuación 18 Laplace

“ Finalmente, se realizan los cálculos internos en el programa FEMM, al momento de ingresar el valor del voltaje V sobre un dominio con fuentes y condiciones de contorno definidas por el usuario” (Cabezas Rubio & Jiménez Corrales, 2019).

2.3.5.1.2 Problemas magnetostáticos.

Al saber que es un análisis estático, se debe recordar que el programa requiere contar con un valor escalar de corriente, pero con una frecuencia cero, despreciando de esta forma las corrientes inducidas, ya que los campos no cambian en el tiempo (manual42.pdf, s. f.).

Los problemas magnetostáticos tienen la particularidad de en su análisis, debido a que al no tener una relación lineal entre la intensidad de campo H y la densidad de flujo B , la permeabilidad μ está en función de B , como se representa en la siguiente ecuación 36 (manual42.pdf, s. f.).

$$\mu = \frac{B}{H(B)} \quad (19)$$

Ecuación 19 Permeabilidad magnética

Usando el potencial escalar magnético A, con relación a la densidad de flujo B:

$$B = \nabla \times A \quad (20)$$

Ecuación 20 Densidad de flujo

Se reescribe en la ecuación 19, por facilidades de cálculo y tendremos:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu(B)} \nabla \times A \right) = J \quad (21)$$

Ecuación 21 Densidad de corriente eléctrica para problemas magnetostáticos.

2.3.6 Características electromagnéticas usadas en el software FEMM.

2.3.6.1 Permitividad eléctrica.

La permitividad eléctrica es una característica de los materiales y su respuesta hacia la exposición a un campo eléctrico y está representada por la siguiente ecuación (Hayt, s. f.):

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r \quad (22)$$

Ecuación 22 Permitividad eléctrica

Donde

ε_0 : Permitividad en el vacío = $8.8541878176 \times 10^{-12} \frac{F}{m}$

ε_r : Permitividad relativa del material

2.3.6.2 Permeabilidad magnética.

Al igual que la permitividad eléctrica, la permeabilidad magnética es un parámetro físico que indica como un material afecta y es afectado por un campo magnético, a continuación, su representación matemática:

$$\mu = \mu_0 \mu_r \quad (23)$$

Ecuación 23 Permeabilidad magnética

μ_0 : permeabilidad en el vacío: $4\pi \times 10^{-7} \frac{H}{m}$

μ_r : Permeabilidad relativa del material

2.3.6.3 Conductividad eléctrica.

La conductividad eléctrica va asociada a las propiedades que tienen los materiales y su capacidad de permitir el flujo de electrones, sobre su superficie. Su ecuación es:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (24)$$

Ecuación 24 Conductividad eléctrica

Donde ρ : Resistividad del material

2.4 Importación de archivos CAD formato dxf a FEMM

Antes de importar el archivo, se debe saber cuál es la necesidad de importar un dibujo en formato CAD dxf, ya que el software FEMM, también cuenta con herramientas de dibujo, no así al ser su mayor fortaleza el uso de algoritmos de cálculo de los diferentes campos, cuenta con una capacidad limitada de herramientas de diseño, es por esta razón que se optó por elaborar en formato CAD y a escala natural.

2.4.1 Pasos para importación de archivo CAD dxf a FEMM.

La siguiente secuencia de pasos para la importación de archivos CAD dxf a FEMM, se aplica tanto para el estudio de campos eléctricos como magnéticos. Cada paso ira representado con su respectiva captura de pantalla.

Primer paso.

Abrir un archivo nuevo en el software FEMM y seleccionar el tipo de estudio que desea realizar.

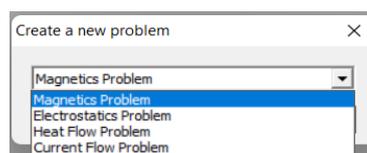


Figura 15 Tipos de problemas en FEMM

Fuente: Captura software FEMM

Segundo paso

Ir a la pestaña File y seleccionar la opción Import DXF, luego proceda a buscar la carpeta que contiene sus archivos DXF en su computador, seleccione el archivo y marque la opción abrir, se demorará unos minutos en procesar la información y en mostrarla.

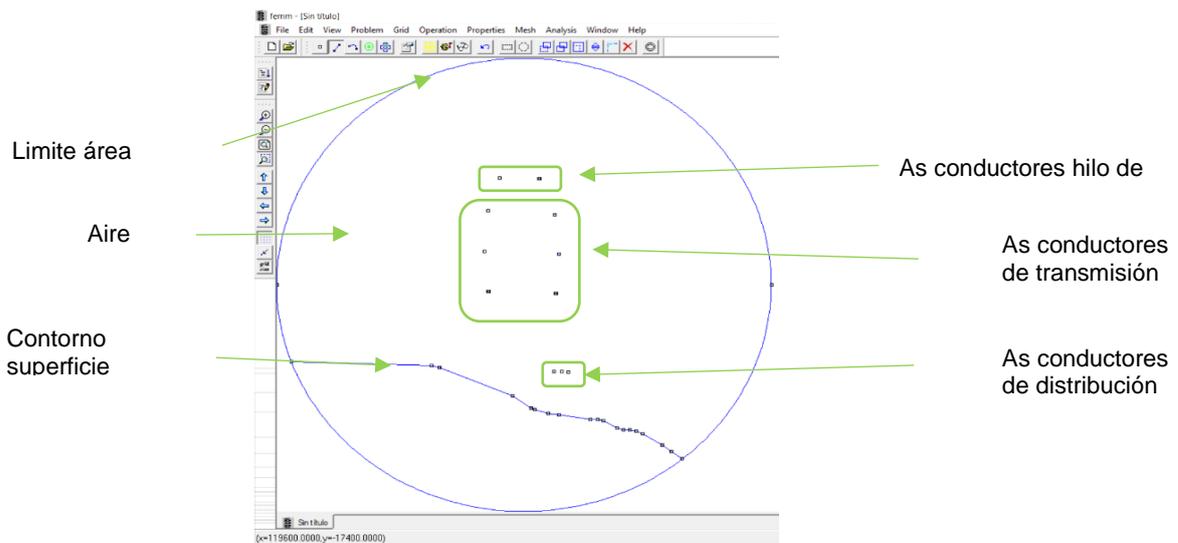


Figura 16 Visualización de archivo importado a FEMM

Fuente: captura software FEMM

2.5 Características de los materiales utilizados en el diseño de cada perfil

Cada archivo importado cuenta con dos perfiles de análisis en este caso partiremos con los perfiles P0 -P1, de igual forma repetiremos estos pasos para los siguientes perfiles en estudio. En la pestaña Properties, seleccionamos la opción Boundary. Aquí le daremos valores de voltaje a los conductores de las líneas de 230 kV y 13,8 kV, y también a los límites del área a calcular. Las figuras 35, 36 y 37 ilustran lo antes descrito.

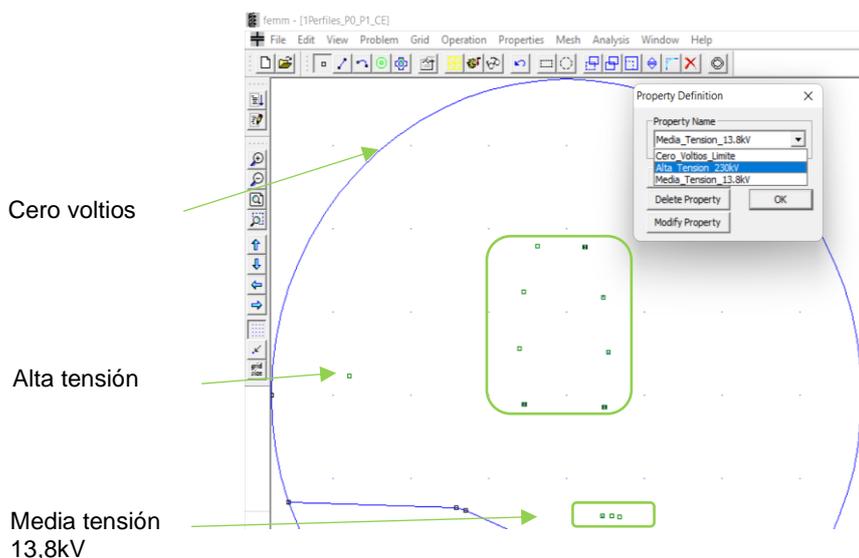


Figura 17 Editor de valores asignados a los conductores.

Fuente: captura software FEMM

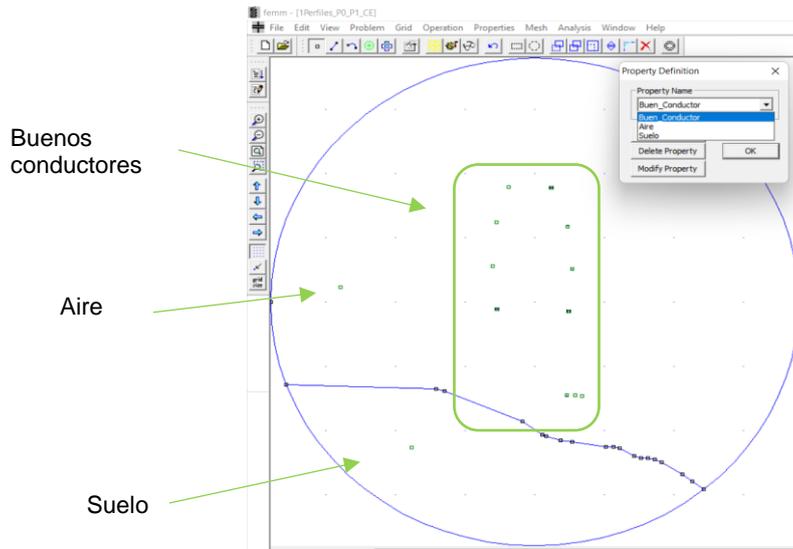


Figura 18 Editor de propiedades asignadas a los materiales del entorno

Fuente: captura software FEMM

2.5.1 Delimitado tipo malla, para cálculo de campos electromagnéticos en perfiles.

Una vez asignadas las características técnicas a los materiales con sus respectivos valores, como se muestra en las figuras 17 y 18, se procede a realizar la compilación y cálculo de nodos en el diseño, es importante mencionar que si existe alguna área interna del diseño que no tenga designada una característica el cálculo de nodos y el seccionamiento en triángulos del área a calcular, no será exitosa y le saldrá una ventana que le mostrará el problema existente.

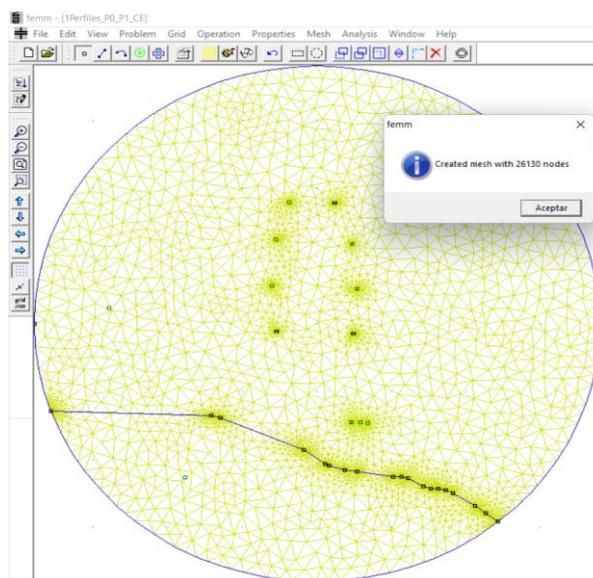


Figura 19 Mallado para cálculos electromagnéticos en perfiles

Fuente: captura software FEMM

2.5.2 Cálculo algorítmico de los campos electromagnéticos.

Finalizado el análisis de seccionamiento triangular, se procede a pulsar el botón Run analysis el cual se encarga de realizar los cálculos algorítmicos de acuerdo a las características ingresadas en las propiedades de los materiales. Posterior al cálculo pulsamos el botón View results, para poder visualizar de forma gráfica los campos eléctricos entre las líneas (230kV-13,8kV).

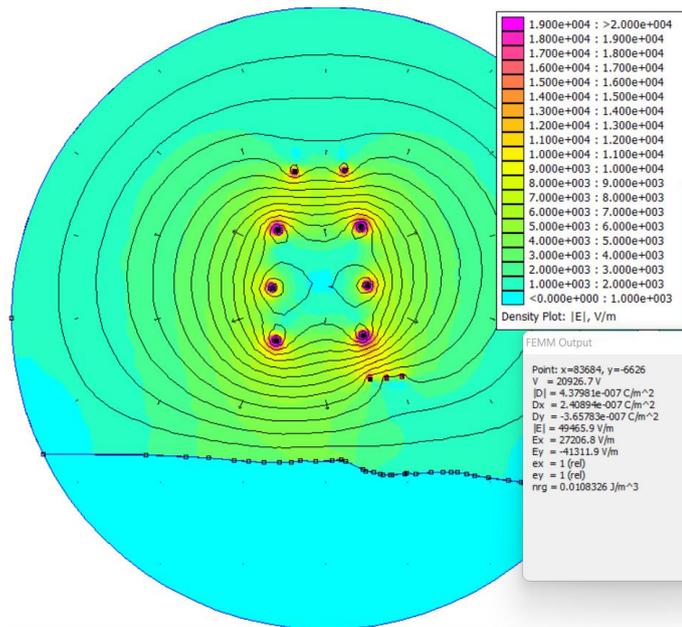


Figura 20 Visualización de resultados.

Fuente: captura software FEMM

2.5.3 Ventanas para monitoreo de los cálculos algorítmicos.

FEMM cuenta con dos ventanas de visualización, la primera refleja los valores obtenidos en la simulación acompañado de una paleta de colores en la cual mediante descripción del manual del software nos indica en orden descendente, los niveles más altos de exposición del campo eléctrico, manteniendo el mismo concepto con los campos magnéticos, como se muestra en la figura 21. La segunda ventana tiene la facultad de reflejar valores de acuerdo a un lugar específico donde se desee monitorear de acuerdo a la ubicación del puntero del mouse en la simulación como nos indica la figura 22.

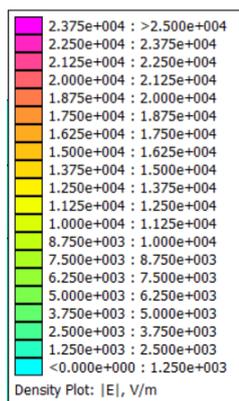


Figura 21 Ventana grafica para visualizar la densidad de los campos electromagnéticos.

Fuente: captura software FEMM

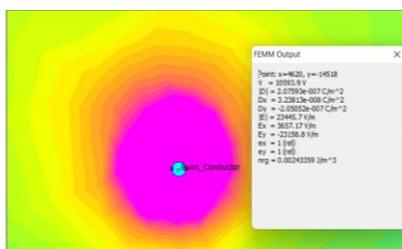


Figura 22 Ventana de valores eléctricos, por ubicación cartesiana en la simulación.

Fuente: captura software FEMM

2. 6 Georreferenciación

Como un concepto general de georreferenciación, podemos decir que es la identificación de todos los puntos que se encuentran en los distintos escenarios del planeta, ya sean ellos: aéreos, terrestres, marítimos y fluviales. Y en este sentido la ubicación se lo realiza por medio de las coordenadas referidas a un único sistema mundial (Georreferenciación.pdf, s. f.).

2.6.1 Sistema GPS.

El sistema global de posicionamiento (GPS), fue utilizado por primera vez en el año 1960 por el ejército Estadunidense. Este sistema consiste en la navegación por satélite con el afán de determinar el posicionamiento cualquier zona sobre la superficie terrestre(Georreferenciación.pdf, s. f.).

2.6.1.1 Componentes de un sistema GPS.

Por lo general un sistema GPS, está compuesto de la siguiente manera:

- Satélites
- Estaciones de control
- Usuarios

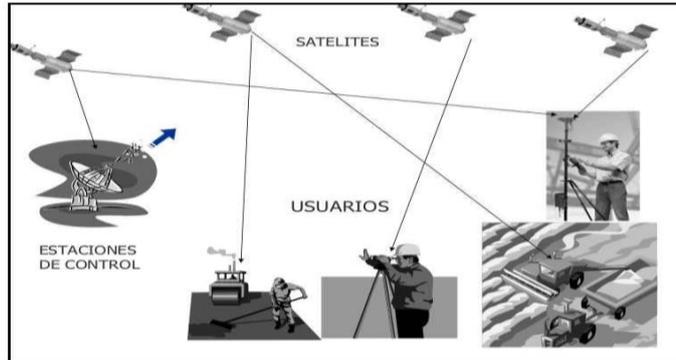


Figura 23 Componentes de un sistema GPS

Fuente: (Peñafiel et al. - FUNDAMENTOS DEL SISTEMA GPS Y APLICACIONES EN LA T.pdf, s. f.)

2.6.2 Obtención de coordenadas.

La obtención de coordenadas utilizando un sistema GPS, se logra mediante el método matemático llamado intersección espacial inversa y consiste en medir tres puntos de coordenadas ya conocidas con referencia al nuevo punto por ubicar. (Georreferenciación.pdf, s. f.).

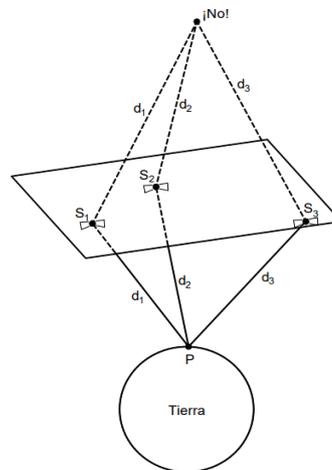


Figura 24 Esquema de la intersección espacial inversa

Fuente: (Georreferenciación.pdf, s. f.).

2.6.3 Tipos de posicionamiento de un sistema GPS.

Los sistemas de posicionamiento global (GPS), están cada vez más involucrados en el levantamiento de información georreferenciada, para lo cual se debe considerar el tipo de aplicación en el que se empleará el sistema correcto (Peñafiel et al. - FUNDAMENTOS DEL SISTEMA GPS Y APLICACIONES EN LA T.pdf, s. f.).

2.6.3.1 GPS posicionamiento absoluto.

Llamamos posicionamiento absoluto, al cálculo de la posición del punto geolocalizado, en base a las medidas de pseudodistancia procedentes del código C/A, o código P. La precisión de medición está relacionada con la disponibilidad selectiva y el código que se emplee, la misma que estará en un rango de 15 a 100 m de precisión (Peñafiel et al. - FUNDAMENTOS DEL SISTEMA GPS Y APLICACIONES EN LA T.pdf, s. f.).

En la actualidad existen equipos receptores que alcanzan precisiones entre los 3 - 5 m en tempo real, y esto se debe al gran avance tecnológico que hemos experimentamos en los últimos tiempos (Peñafiel et al. - FUNDAMENTOS DEL SISTEMA GPS Y APLICACIONES EN LA T.pdf, s. f.).



Figura 25 GPS posicionamiento absoluto

Fuente: (Tipos De GPS - Bing images, s. f.).

2.6.3.2 GPS posicionamiento diferencial.

El posicionamiento diferencial hace referencia a una metodología en la cual intervienen más de un instrumento GPS, buscando de esta forma reducir el rango de error del sistema. Ya que el equipo móvil estará enlazado al fijo, obteniendo así un nivel de precisión alto que radica entre los 5 – 30 mm (Peñafiel et al. - FUNDAMENTOS DEL SISTEMA GPS Y APLICACIONES EN LA T.pdf, s. f.).

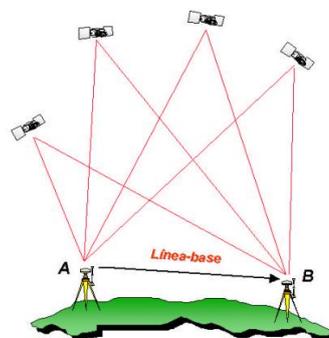


Figura 26 Posicionamiento diferencial

Fuente: (Peñafiel et al. - FUNDAMENTOS DEL SISTEMA GPS Y APLICACIONES EN LA T.pdf, s.f.)

2.7 Vehículo aéreo no tripulado (UAS)

Los vehículos aéreos no tripulados o más conocidos en el medio popular como Dron, son sin duda uno de los más grandes avances tecnológicos en la actualidad y es aquí donde la robótica, electrónica y aeronáutica, se ponen a disposición, con el afán de lograr modelos actualizados en pro de la aplicación a la cual se piensa destinar(Sánchez, 2017) .

Existen una amplia gama de drones en el mercado y su aplicación cada vez ha ido ganando más terreno, puesto que un vehículo aéreo no tripulado es capaz de cumplir un sinnúmero de tareas en los diferentes campos profesionales como, por ejemplo: en la agricultura, topografía, cinematografía aérea, búsqueda de personas, transporte comercial, entre algunas otras aplicaciones. Es importante también mencionar que estas aeronaves, pueden ser controladas de forma autónoma o también por un piloto a distancia ubicado en una estación en tierra (Sánchez, 2017).



Fotografía 1 Dron.

Fuente: Tomada en el lugar de estudio

2.7.1 Clasificación de los UAS.

La clasificación de los UAS, podría ser un tema de controversia, debido a que existe una gran diversidad en modelos, sin embargo, una forma de clasificarlos podría ser de acuerdo a sus condiciones físicas, la cual obedece a temas regulatorios a los que deben estar sujetos para su utilización.

La tabla 10 muestra un modelo de clasificación de los UAS.

Tabla 10 Clasificación de los UAS

Clasificación	Características físicas	Características de operación
Ala fija	<ul style="list-style-type: none"> •UA con alas •Requiere de pista para aterrizar o despegar 	Resistencia: larga
Ala rotatoria	<ul style="list-style-type: none"> •Tipo helicóptero •Posibilidad de despegue y aterrizaje vertical •Rotores pueden ser: <ul style="list-style-type: none"> •principal y de cola, coaxiales, en tándem o múltiples 	Capacidad de vuelo estacionario y alta maniobrabilidad
Globos aerostáticos	Mas livianos que el aire. Por lo general de gran tamaño	Larga resistencia baja velocidad
Alas aleteantes	Alas pequeñas flexibles y morfológicas. Pueden tener configuraciones híbridas	

Fuente: (Sánchez, 2017).

2.8 Sensor LIDAR

Por sus siglas en ingles LIDAR (Light Detection and Ranging o Laser Imaging Detection and Ranging), es un dispositivo electrónico capaz de emitir un láser hacia una superficie cualquiera y medir su distancia en base al tiempo de retorno de la señal reflejada. Generalmente su aplicación está en la geología y sismología, sin embargo, en base al gran potencial de este dispositivo, se lo ha logrado sumar como una gran herramienta para levantar todo tipo de información sobre la superficie terrestre («LIDAR», 2022).

Un sistema LiDAR, no es más que un escáner aerotransportado, el mismo que obtiene una nube de puntos de la superficie que se está sobrevolando. El escaneo se realiza combinando dos movimientos uno longitudinal que este marcado por la trayectoria de la aeronave utilizada y otro transversal que es parte interna del dispositivo y que mediante un espejo se logra un barrido en sentido contrario («LIDAR», 2022).



Figura 27 Sensor LiDAR

Fuente: (AlphaAir 450: sistema LiDAR aerotransportado | CHCNAV, s. f.)

2.8.1 Componentes de un sistema LiDAR.

Un sistema LiDAR cuenta con los siguientes componentes:

- Escáner láser aerotransportado (ALS)
- GPS Diferencial
- Sistema de navegación inercial
- Cámara de video
- Medio aéreo

CAPÍTULO 3

3. LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO DE LAS LÍNEAS DE TRANSMISIÓN Y DISTRIBUCIÓN CON METODOLOGÍA LIDAR Y SIMULACIÓN DE CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS UTILIZANDO EL SOFTWARE FEMM

3.1 Levantamiento topográfico con tecnología LiDAR

La información cartográfica es la columna vertebral de los estudios técnicos de infraestructuras, es el insumo a partir del cual se localizan, proyectan y desarrollan las áreas involucradas en los diferentes proyectos; por lo tanto, es necesario garantizar que se cumplan los criterios establecidos en las especificaciones técnicas y demás documentos socializados al inicio de los trabajos para todos los productos geográficos ofrecidos; además, es necesario garantizar un adecuado control de calidad, tanto en las actividades realizadas en campo (levantamiento), como en oficina (análisis y procesamiento).

Es notorio que la tecnología ha ido avanzando en forma creciente para satisfacer los exigentes requerimientos y necesidades del hombre moderno e industria en general. Este constante crecimiento trae como consecuencia la revisión, creación e integración de herramientas que buscan perfeccionar y optimizar los productos, tiempos y procedimientos.

La Geodesia, Topografía, Cartografía y afines (GEOMÁTICA), han recibido un gran aporte con la introducción de varias herramientas tecnológicas tales como los sensores remotos aerotransportados (sistemas LiDAR, entre otros) y sistemas de posicionamiento global por satélite (GNSS); por lo cual ha planteado y generado metodologías para que dichas herramientas permitan obtener productos y/o entregables que, a además considerando la aceleración tecnológica de la última década ha permitido la miniaturización del hardware con la posibilidad de ampliar aún más formas y campos de aplicación.

Los levantamientos topográficos realizados mediante sensores remotos aerotransportados sean en helicópteros y los realizados con el empleo de drones, empleando equipos LiDAR concebidos para aplicaciones topográficas son equivalentes a los producidos con métodos convencionales; la experiencia en este tipo de trabajos nos ha demostrado que, al final de todo el proceso, los productos generados cumplen con las especificaciones de precisión y calidad, además, aportan a los estudios con insumos y beneficios adicionales, que no podrían ser obtenidos mediante técnicas de levantamiento topográfico netamente tradicionales como levantamientos con estaciones totales o mediante metodología RTK (Real Time Kinematic).

3.1.1 Equipos utilizados en el estudio.

A continuación, en la tabla 11 detallaremos de forma técnica los equipos utilizados en el levantamiento topográfico de las líneas de transmisión de 230 kV y las de media tensión de 13.8 kV, en el anexo A encontraremos las fichas técnicas para mayor información.

Tabla 11 Equipos utilizados en el levantamiento topográfico

EQUIPO	DESCRIPCION	IMAGEN
GPS Diferencial	336 canales L-Banda RTX IP 67, inmune a disturbios magnéticos.	
Dron BB4, multirotor	Cuadricóptero de 4 hélices. Peso máximo que levanta 7,1 kg. Velocidad máxima 14 m/sec	
Sensor LiDAR	Sensor scanner Peso 0,95 kg Precisión 15 mm Resolución 6252 * 4168	

Fuente: Elaboración propia

El área de levantamiento es de tipo rural, con escasa densidad de viviendas, zonas dedicadas a la agricultura y ganadería.

3.1.2 Descripción del proyecto.

Debido a las características propias del proyecto, el cual requería la recopilación de información correspondiente a la morfología presente en el área así como de los objetos sobre ella localizados, con especial énfasis en la ubicación de las diferentes Líneas de Transmisión emplazadas, es decir se requería para el estudio un Modelo Digital de Superficie MDS y el Modelo Digital de Terreno (MDT), optándose por realizar la captura de información empleando un sistema LiDAR aerotransportado no tripulado (empleando UAV-Unmanned Aerial Vehicle).

3.1.2.1 Objetivos.

Obtener un Modelo Digital de Superficie (MDS) y el Modelo Digital de Terreno (MDT) correspondiente a escala 1:1000 para una franja de 60 metros de ancho que cubra una longitud de 900 metros de la Línea de Transmisión de 230kV que llega a la Subestación Zhoray.

Una vez obtenida la nube de puntos LiDAR se realiza la correspondiente clasificación:

- Terreno
- Vegetación Baja
- Vegetación Media
- Vegetación Alta
- Cables de conducción eléctrica

Una vez obtenido la clase del Terreno, se generaría el MDT con la finalidad de poder hacer el correcto estudio de las diferentes Líneas de Transmisión, logrando de esta forma definir adecuadamente la ubicación del suelo.

Por otra parte, mediante la definición de las otras clases de puntos que forman parte del MDS, sería factible determinar la ubicación de los diferentes cables, torres y postes de los sistemas de transmisión eléctrica, aspecto relevante para poder realizar el análisis de interferencia electromagnética.

3.2 Modelo Digital de Superficie (MDS) y el Modelo Digital de TERRENO (MDT)

Un modelo digital de elevación es una representación visual y matemática de los valores de altura con respecto al nivel medio del mar, que permite caracterizar las formas del relieve y los elementos u objetos presentes en el mismo.

Modelo digital de superficie (MDS) que representa todos los elementos existentes o presentes en la superficie de la tierra (vegetación, edificaciones, infraestructura y el terreno propiamente).

El modelo digital del terreno (MDT) recrea la forma del terreno una vez que fueron removidos todos los elementos ajenos al mismo como son la vegetación, edificaciones y demás elementos que no forman parte del terreno.

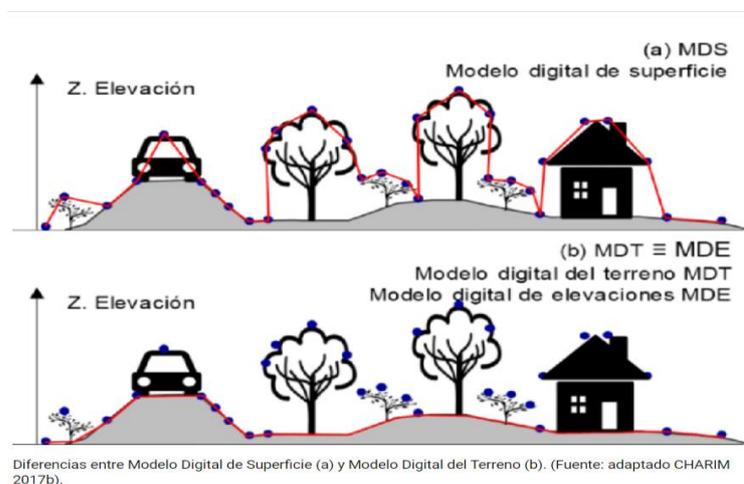


Figura 28 Definición de Modelos

Fuente:(ResearchGate | Find and Share Research, s. f.).

3.3 Análisis de la zona de levantamiento

Previamente al inicio de los trabajos topográficos, se realizó una revisión del área de levantamiento empleando información de fuentes como Google Earth y Bings Maps, información que permite tener una concepción clara del área a intervenir mediante el análisis de la información satelital actualizada.

Con el análisis la información se puede determinar la logística a emplear en el levantamiento LiDAR y definir la ubicación de los puntos de referencia a emplearse. Considerando las necesidades del proyecto, no se realizó los enlaces a la Red Geodésica Nacional del IGM, sin embargo, la información fue referenciada al Sistema WGS84 Datum 17S mediante la colocación de una estación de base.

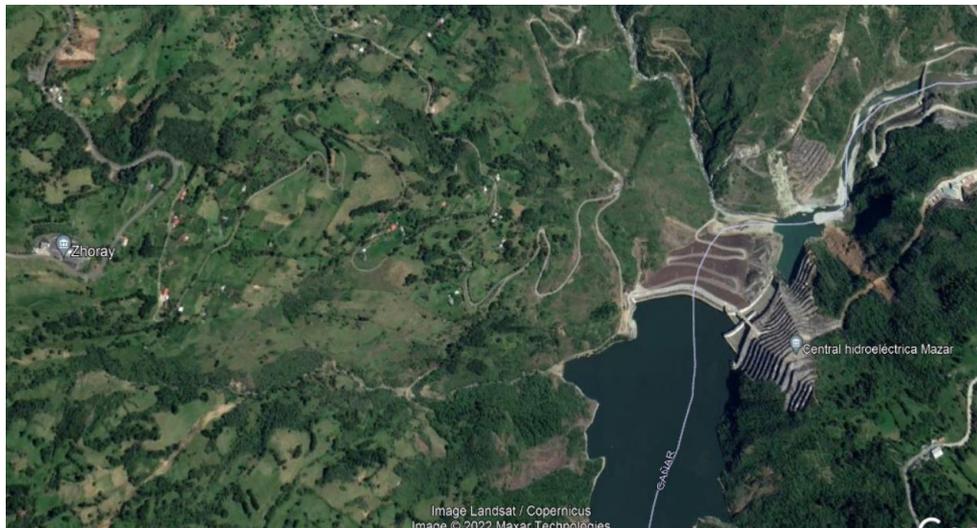


Figura 29 Zona de estudio

Fuente: (Google Earth, s. f.-a)

3.3.1 Ubicación de vértices de control.

Terminada la inspección terrestre se procedió a ubicar los vértices de control para generación de la ortofoto y captura de LiDAR.

Para la captura de información LiDAR, se emplearon 1 estación Base, 2 puntos de Control Terrestre (GCP) y 8 puntos de verificación para ajuste vertical cercanos y en la zona a ser levantada, cuyas coordenadas se encuentra detallados en la tabla 12.



Colocado de bandera bicolor, para registro de punto de control en tierra.



Registro de punto de control en tierra, utilizando un GPS Diferencial.

Fotografía 2 Puntos de control terrestre.

Fuente: Elaboración propia

Una vez identificado en campo el sitio, estos revisaron que preferentemente se cumplan las siguientes condiciones:

El terreno debe tener una estabilidad razonable para garantizar la permanencia de la marca que se implante. Deben evitarse los terrenos erosionables o sometidos a procesos de deslizamientos, inundaciones o subsidencias.

Evitar colocar en áreas cercanas al cableado eléctrico, (líneas de alta tensión), con la finalidad de evitar interferencias durante la etapa de georreferenciación. Para este caso en particular y considerando que el estudio es de una línea de Alta Tensión, se revisó que la altura de los conductores y distancia desde el eje del mismo permita la lectura con los equipos GNSS de doble frecuencia sin causar alteración en la medición.

Ubicar en zonas despejadas para obtener mejor recepción satelital, evitando colocar los mojones en zonas con vegetación alta, cerca de taludes de pendiente pronunciada, edificaciones, etc.

Tabla 12 Coordenadas de puntos de control (GCP)

COOR. UTM WGS84 17S			
ID	Este	Norte	Elevación
BASE	762833.141	9713224.632	2702.885
REF1	762771.247	9713151.289	2714.947
REF2	762780.015	9713004.692	2672.679
CHECKPOINT1	762794.961	9713040.197	2676.088
CHECKPOINT2	762792.022	9713041.034	2675.941
CHECKPOINT3	762795.387	9713051.827	2677.322
CHECKPOINT4	762803.259	9713068.327	2680.007
CHECKPOINT5	762810.950	9713099.850	2685.19
CHECKPOINT6	762816.116	9713137.050	2689.796
CHECKPOINT7	762832.057	9713174.683	2690.404
CHECKPOINT8	762849.343	9713211.582	2692.755

Fuente: Elaboración propia

3.4 Captura de información LiDAR y fotografía aérea

Para una correcta ejecución y captura de fotos aéreas se desarrollaron las siguientes actividades.

3.4.1 Planificación para captura de fotografías aéreas.

Como actividad previa al levantamiento de información con drones (UAV), se inició con la revisión de información existente tales como imágenes satelitales, y definida el área de estudio, considerando que se va a emplear un sistema LiDAR aerotransportado no tripulado, es relevante la calidad de la información que pueda facilitar una morfología lo más precisa posible. Es así que para este tipo de análisis se optó por emplear información recopilada por el programa SIGTIERRAS, la cual facilita Ortofotos y Modelos Digitales de Elevación a escala 1:5000.

Debido a que se trabajaría con líneas de transmisión, fue necesario realizar el reconocimiento de la zona de estudio mediante recorridos y sobrevuelos con drones para inspección visual y simulación del vuelo del dron que emplearía el LiDAR. El objetivo fue determinar el alcance de sobrevuelo y de este modo poder determinar los polígonos para cada vuelo de captura LiDAR y fotogramétrico, así como la ubicación de puntos de control terrestre (Ground Control Point GCP).

3.4.1.1 Captura de información LiDAR y fotogramétrica.

El sistema de cartografía LiDAR aerotransportado proporciona información 3D de la superficie de la tierra, que incluye modelos de terreno, de superficie, características de la vegetación y características artificiales del paisaje. El LiDAR es una tecnología de detección activa, es decir, genera sus propios pulsos de luz y detecta las reflexiones de los impulsos (muy similar al radar y sonar).

Dependiendo de morfología y elementos existentes sobre la superficie, así como de la aplicación que se dará a la información recopilada, la adquisición de datos y el tipo de sistema LiDAR empleado, se configura específicamente para captura elementos que conducen a la clasificación de los datos y, en última instancia, al mapeo de productos.

Uno de los elementos clave que ha hecho del LiDAR una "tecnología de elección" para la cartografía moderna y la integración con Sistemas de información Geográfico SIG es debido a que los datos se recogen de forma ágil en 3D y son georeferenciados, por otro lado, puede ser procesado para clasificar los elementos 3D dentro de la "nube de puntos" y representar las características sobre la superficie terrestre. Desde el punto de vista de asignación, LiDAR es una herramienta muy precisa donde la integridad del conjunto de datos es impresionantemente rica, en comparación con las tecnologías tradicionales de mapeo.

La metodología desarrollada garantiza la precisión de los datos entregados, está alineada con las especificaciones técnicas generales de levantamiento de información mediante sensor LiDAR aerotransportado del instituto Geográfico Militar IGM; de la misma forma, está alineado con las especificaciones técnicas generales para la realización de cartografía topográfica a cualquier escala, también del IGM.

Dicha metodología se desarrolló en siete (6) grandes etapas de trabajo:

- Alistamiento y diagnóstico inicial del proyecto.
- Marco de Referencia GNSS.
- Planificación de Vuelo LiDAR.
- Captura de información LiDAR y Fotogramétrico.
- Post - proceso datos LiDAR y Fotogramétrico.
- Construcción de productos y entregables.

3.4.1.2 Alistamiento y diagnóstico inicial del proyecto.

En la etapa de alistamiento y previo al inicio de actividades de campo se desarrolló una reunión con el interesado, en donde se analizaron las áreas a sobrevolar y demás requerimientos técnicos como documentos, formatos y archivos suministrados. Esto permitirá

la preparación de documentos y archivos para delimitar el alcance de los trabajos y planear las diferentes actividades que se ejecutarán en el estudio.

Con base en los polígonos límite y demás requerimientos se diseñaron los planes de vuelo que abarcará la cobertura total del área de estudio.

3.4.1.3 Marco de Referencia GNSS para levantamiento LiDAR.

Este proceso fue fundamentado en el sistema de referencia WGS84, las bases para captura de información LiDAR, fueron ajustados a la proyección UTM Zona 17 Sur.

3.4.1.4 Planificación de vuelo LiDAR y fotogramétrico.

En esta actividad se diseñaron los ejes de vuelo para la captura de datos LiDAR.

Dependiendo de la información a obtener y condiciones de campo, se colocó la estación base para el enlace de datos o captura en tiempo real con un sistema que garantice la precisión de los datos.

Para el diseño del plan de vuelo se tuvo en cuenta los siguientes aspectos:

Preparación de cartografía básica para el proyecto: MDT generado a partir de la información del SIGTIERRAS.

Planificación de vuelo con los recubrimientos mínimos requeridos. El proceso se realizó considerando el relieve del terreno para la proyección de ejes en elevación apropiada para la captura de información del proyecto, es decir se realizó un vuelo denominado AGL (Above Ground Level) en el cual la altura es constante sobre el terreno.

Comprobación de alturas y velocidades de vuelo operativas para garantizar la densidad de puntos láser por metro cuadrado, según lo requerido mínimo 200 ptos/m², aspecto que derivará en la correcta selección del sensor LiDAR a emplear, aspecto que influye en la determinación del modelo de sensor LiDAR a emplearse.

A partir de la información Satelital disponible actualizada, se estudió el aspecto relacionado con la cobertura vegetal presente en el área de estudio y también el requerimiento de información. Considerando que la información relevante a obtener en la ubicación de los conductores de la línea de interconexión Molino - Zhoray a 230 kV y también la ubicación de los conductores de una línea de abastecimiento a la subestación de 13.8 kV, y que el área presentaba escasa presencia de vegetación alta, esto debido a la existencia de la franja de servidumbre, la misma que es de 30 metros para la transmisión de 230kV (018-18-Proyecto-de-Regulacion-Franjas-de-Servidumbre-y-distancias-de-seguridad-entre-las-redes-electricas.pdf, s. f.).

El plan se preparó detalladamente para garantizar la cobertura del polígono de interés. Y los parámetros principales para la ejecución del vuelo fueron los siguientes:

Tabla 13 Parámetros principales – Plan de vuelo captura LiDAR

CONDICIONES DEL VUELO	VALOR
Altura de vuelo (AGL)	80 m
Velocidad de vuelo (GS)	5 m/s
Longitud de ejes de vuelo proyectado	variable Km
Número total de ejes proyectados	Variable
CONDICIONES – LiDAR	VALOR
Densidad LiDAR promedio	200/m ²
Campo de visión (FOV)	70.4°

Fuente: Elaboración propia

Debido a que en el área de estudio incluye también la presencia de otras líneas de transmisión, se optó por sobrevolar una mayor área de vuelo para obtener mayor información.

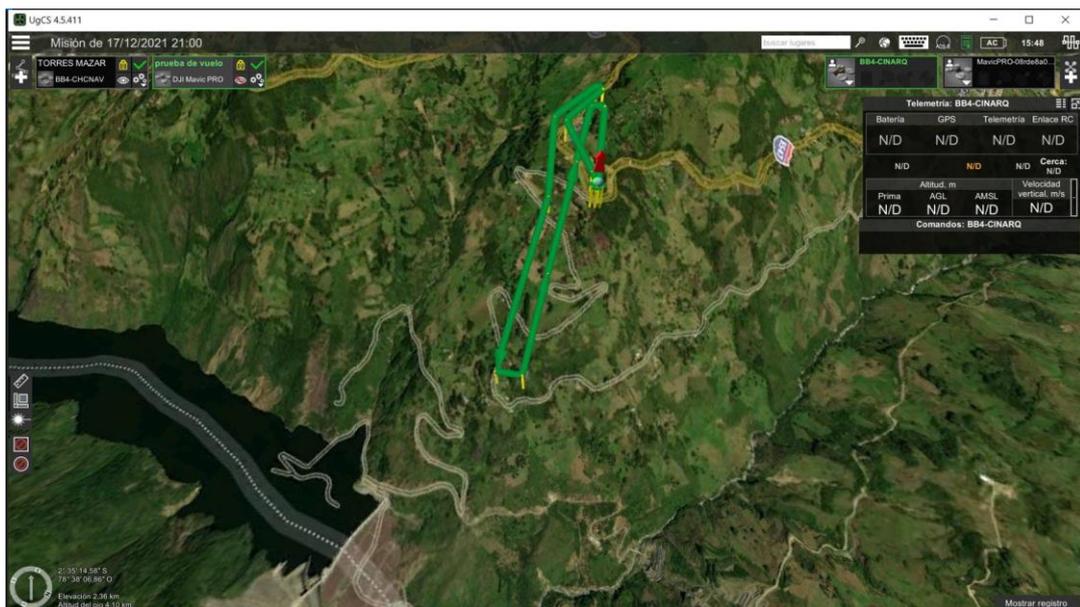


Figura 30 Esquema - Plan de vuelo.

Fuente: Captura tomada del software UgCS 4.5.411

3.4.2 Captura de información LiDAR.

Con el plan de vuelo revisado y ajustado se procede a realizar los vuelos y captura de información del polígono a levantar.

Tabla 14 Codificación y área levantada mediante sensor LiDAR

LEVANTAMIENTO FOTOGRAMÉTRICO Y LIDAR		
Código	Área (ha)	Observaciones.
Área total de Levantamiento	19	Área levantamiento LiDAR y Fotogramétrico
Área de estudio de Línea de Transmisión	9.2	Área levantamiento LiDAR y Fotogramétrico, clasificación de puntos e identificación de Líneas de Transmisión.

Fuente: Elaboración propia

3.4.2.1 Ejecución de vuelos y toma de datos.

Se procede a levantar los polígonos que corresponden a la zona del proyecto. La ejecución del vuelo LiDAR se cumplió todas las exigencias habituales de este tipo de actividad. Para ello se tiene en cuenta ciertas condiciones ambientales de visibilidad, techo nuboso, lluvia, vientos y fenómenos atmosféricos típicos de la zona a sobrevolar.

A continuación, un detalle de los pasos seguidos en un vuelo regular, que fueron considerados para la ejecución de vuelos.

El vuelo se controló desde una aplicación profesional denominada UgCS (para control de equipos UAV con aplicaciones LiDAR) la que dispone de configuraciones estándar fácilmente modificables, para adaptarlas a las condiciones que se hayan establecido para la misión.

De esta forma, se automatiza la configuración de los distintos sensores y se controla el estado de todos ellos mediante íconos de pantalla que nos indican su estado. Cuando todos los íconos indican un funcionamiento correcto, se ejecutó el despegue de la aeronave, y durante el vuelo se realizó el control de los diferentes parámetros de vuelo.

3.4.2.2 Toma de datos GNSS.

Las observaciones GNSS aerotransportadas se llevaron a cabo mediante el modo relativo cinemático, conocida como resolución de ambigüedad ultrarrápida (OTF: on-the-fly). En este procedimiento la ambigüedad del ciclo se determina con un receptor estacionario denominado receptor base, el cual está localizado en un punto con coordenadas conocidas en tierra y con

otro receptor móvil, en este caso ubicado estratégicamente en la UAV junto con los demás componentes del sistema LiDAR.

Para garantizar la precisión de la información, la distancia de la estación base respecto a la móvil no debe superar una longitud de 3 km y la frecuencia de toma de datos de ambos receptores debe ser como mínimo 1 segundo. Todos los cálculos se llevaron a cabo en post – proceso.

3.4.2.3 Toma de datos IMU.

Los datos de la Unidad de Movimiento Inercial (IMU) se obtuvieron a través de la unidad estampadora de tiempos (UET), la cual añade el tiempo UTC (segundos de la semana), proveniente del receptor GNSS, en archivos con extensión (*.imu) en formato binario.

Con los métodos de cálculo actuales no es necesario llevar a cabo ningún método de alineación. El ángulo heading se determina en post - proceso con la ayuda de las observaciones GNSS.

3.4.2.4 Post - proceso de datos LiDAR.

Esta actividad consiste en la integración, cálculo y procesamiento de datos GNSS, IMU, LiDAR, ajustes, filtrados y generación de productos, MDS, MDT, Curvados, etc. A continuación, se describen las etapas del post - proceso realizado.

A. GNSS + IMU (cálculo Inercial)

El objeto del proceso GNSS+IMU es conocer la posición (X, Y en la proyección de trabajo y H (alturas elipsoidales, orto-métricas o geométricas según requerimientos), así como la orientación (pitch, roll y heading) del sensor LiDAR en cualquier momento. De esta forma se calculan posteriormente las coordenadas de cada punto láser.

Primero se realiza el cálculo GNSS de la estación base en tierra, una vez obtenida una buena solución, se lleva a cabo el cálculo inercial entre la estación base en tierra y el receptor móvil.

En ambos casos el cálculo se puede hacer en dos direcciones, hacia adelante y hacia atrás en el tiempo y/o combinarlas cuando ambas son de buena calidad. La resolución de ambigüedades se lleva a cabo mediante el método ARTK (Advanced RTK), que produce menor separación entre la solución hacia adelante y la solución hacia atrás. Finalmente, se obtiene información gráfica y estadística de la calidad de los cálculos.

En la etapa de post - proceso se maximiza la precisión de la solución, previamente almacenada en los equipos de posicionamiento (GNSS) y unidades de medición inercial (IMU), empleando los datos de avance y retroceso en el tiempo y la combinación de los

resultados, si es necesario. La posición, la velocidad y la solución de actitud pueden ser suavizadas y los datos pueden ser generados en el sistema de coordenadas requerido. Este proceso también ofrece la capacidad de evaluar la fiabilidad de la solución y su precisión.

En la figura 31 se presenta una captura de pantalla del software que determina la ubicación del sensor respecto a la base, así como su trayectoria.

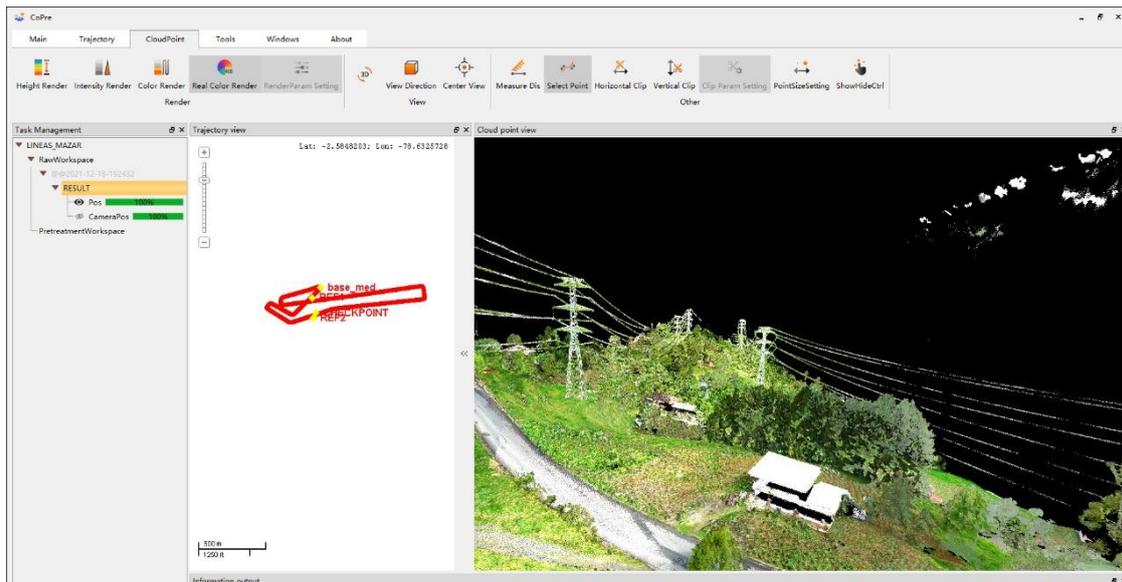


Figura 31 Software para determinar la ubicación del UAV

Fuente: Captura tomada del software Copre

B. Puntos láser

Para obtener la posición final de los puntos láser se utilizan aplicativos específicos propios del sensor. Los archivos de entrada son: archivo *.post con las lecturas de vuelo ejecutado, con la orientación externa del centro de coordenadas del escáner láser y archivo LSR (LANsurveyor Report), producido por el propio escáner durante la toma de datos. Cada registro contiene el tiempo GPS (UTC), distancia, ángulo y amplitud. El cálculo final se lleva a cabo mediante una interpolación con el fichero obtenido del cálculo inercial de GNSS+IMU.

A continuación, se calcula la posición de cada punto láser, interpolando la posición del centro de coordenadas del láser, según el tiempo de adquisición de cada punto, y transformando después las coordenadas, según el sistema láser, a coordenadas de la proyección en el sistema establecido para el trabajo. Como resultado se obtienen archivos en formato *.LAS por cada vuelo.

Según el requerimiento del proyecto, se puede emplear un nuevo software en el cual podemos unir en un solo archivo *.LAS de conjunto los individuales que necesitemos para el trabajo final.

LAS (Lidar archive standar) es un formato de archivo público que permite el intercambio de ficheros que contienen información de una nube de puntos tridimensional. El formato LAS es un archivo binario que mantiene toda la información procedente del sistema LiDAR y conserva la misma, según la propia naturaleza de los datos y del sistema de captura.

Con el fin de obtener la adecuada nube de puntos láser, se ejecuta el software específico y propio del sistema LiDAR y elaborado por el fabricante del equipo que calcula la posición de cada punto láser interpolando la posición del centro de coordenadas del láser, según el tiempo de adquisición de cada punto, y transformando las coordenadas, según el sistema láser, a coordenadas de la proyección en el sistema establecido para el proyecto. En la figura 32 se presenta una captura de pantalla del software Global Mapper para gestión de puntos láser.

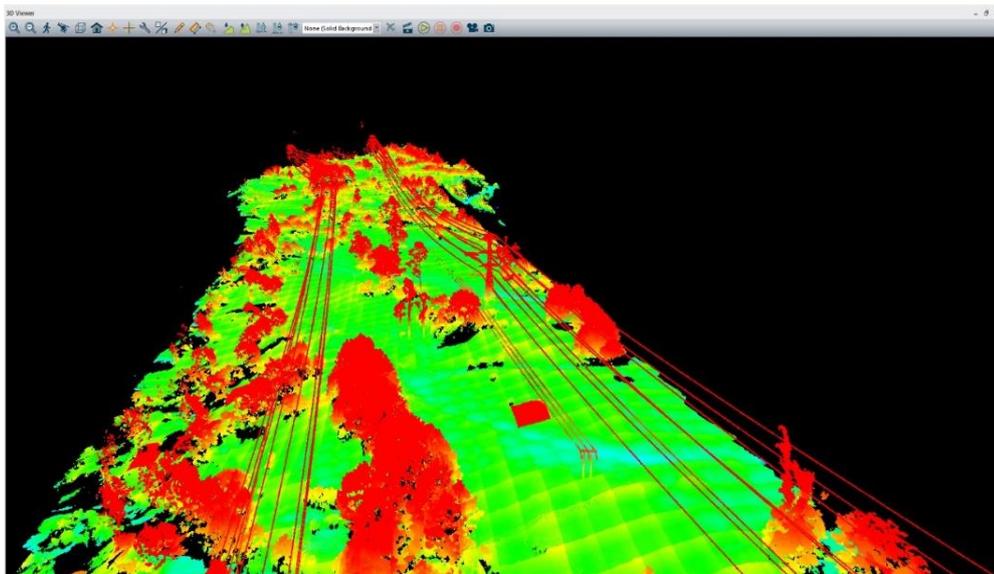


Figura 32 Software de obtención de puntos láser.

Fuente: Captura tomada del software Global Mapper

C. Modelo Digital de Superficie Preliminar (MDS)

Una vez obtenidas las nubes de puntos en formato de archivo *.LAS para cada eje de vuelo capturado en la proyección cartográfica definida para el estudio, se integraron las diferentes pasadas en un único archivo LAS, garantizando la cobertura total del polígono límite de levantamiento.

D. Clasificación y edición para definición de Modelos

En correspondencia con el software empleado, se realiza primeramente una definición de las líneas de vuelo empleadas, aspecto que permite el posterior postproceso de la nube de puntos con fines de alineamiento entre las diferentes pasadas efectuadas durante el vuelo.

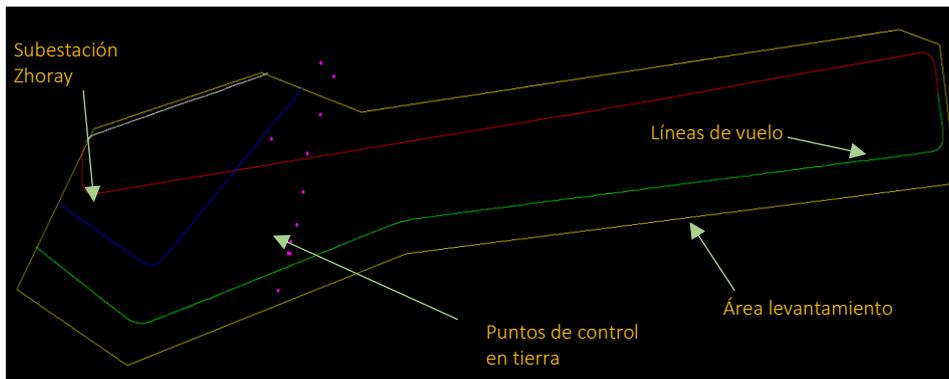


Figura 33 Área de levantamiento (amarillo), líneas de vuelo y puntos de control

Fuente: Captura tomada del software AutoCAD

E. Clasificación y edición para definición de Modelos

La clasificación y edición detallada de los puntos láser para la obtención del modelo digital de terreno se realiza a partir del modelo digital de superficie. Este proceso se llevó a cabo mediante software específico de diferentes desarrolladores. El objeto del proceso fue la obtención de un MDT final depurado y preciso, así como de un MDS debidamente clasificado en función de los elementos encontrados en el mismo.

Para generar correctamente un modelo digital de terreno (MDT) hay que discriminar correctamente los puntos que pertenecen al suelo del resto de puntos láser.

Para el tratamiento de grandes conjuntos de datos a ser discriminados se utilizan polígonos que definen bloques, los que permiten el tratamiento por áreas sin olvidar las zonas adyacentes, es decir, cada bloque se procesa teniendo en cuenta los ubicados alrededor.

El resultado final es un archivo *.LAS con los puntos clasificados en múltiples categorías, con énfasis en los puntos pertenecientes al suelo o terreno natural.

Según la aplicación, los algoritmos automáticos que efectúa la clasificación de la nube de puntos no tienen una certeza del 100%, por lo que, según corresponda hay que refinar el resultado mediante clasificación manual. La tarea es básicamente una reclasificación manual de puntos erróneamente asignados.

Para ello se utilizan los perfiles y representación en 3D del modelo. Solo se debe centrar la clasificación manual en los siguientes aspectos:

Puntos de terreno (LAS Ground).

Puntos pertenecientes a obras u objetos según corresponda.

Las herramientas de clasificación y edición han sido creadas por diferentes desarrolladores y están diseñadas para el manejo eficiente de nubes de puntos densos, facilitando la creación de modelos digitales de superficie y de terreno (MDS, MDT) de cualquier tamaño, además, proporcionando un flujo de trabajo estable y continuo desde la calibración, coincidencia, interpolación, filtrado, clasificación, suavizado, gestión y visualización, hasta la creación de productos y entregables finales.

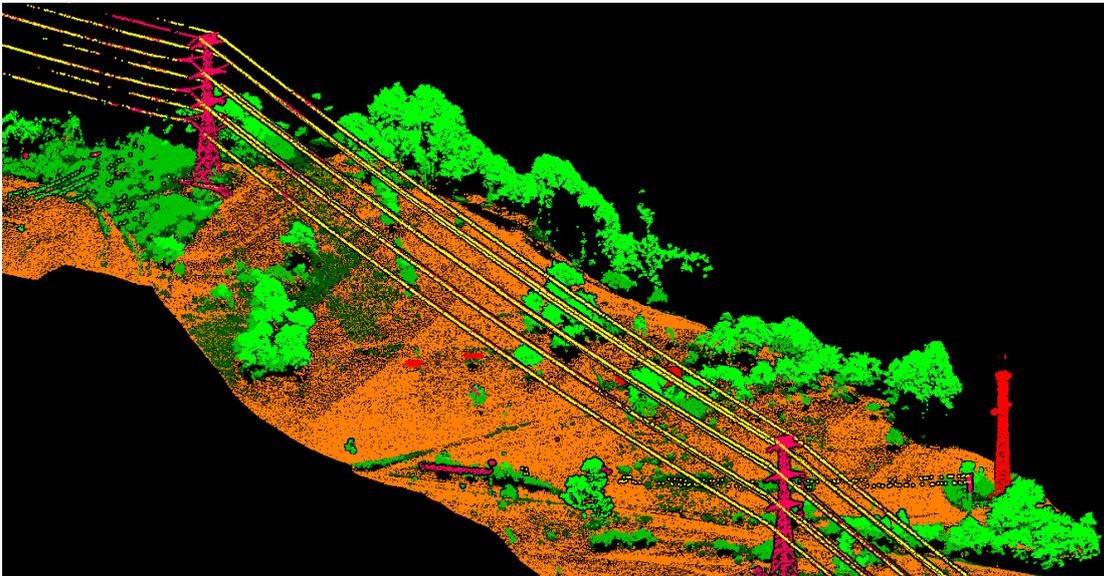


Figura 34 Clasificación de la nube de puntos láser.

Fuente: Captura tomada del software Global Mapper

3.4.3 Resultados del levantamiento LiDAR.

Una vez que los datos LiDAR y el marco de referencia GNSS fueron debidamente procesados, ajustados y verificados, se continuara con la ejecución de algoritmos para la determinación de los conductores de las líneas de transmisión y distribución.

Una vez disponible la información, la misma se trabajó en el software Global Mapper para la obtención del MDT y polilíneas que representan las catenarias obtenidas a partir de algoritmos de identificación de los puntos LiDAR.

3.4.3.1 Criterio de seccionamiento para obtención de perfiles transversales.

Conocedores de las normativas en base a las regulaciones claras y vigentes respecto a franjas de servidumbre que rigen a nivel país y también de carácter internacional. Las mismas que estipulan una distancia de 30 metros de franja para líneas de 230kV y 6 metros de franja para líneas de 13.8kV.

En base a esta consideración y fundamentados en los resultados obtenidos en el levantamiento topográfico en el cual se ha podido constatar la vulneración a esta distancia se propone: hacer secciones transversales, de veinte metros de distancia entre sí, al largo de todo el trayecto en el cual las líneas de transmisión y distribución van en sentido paralelo con dirección hacia la subestación Zhoray, dando un total de 42 perfiles, arrancando desde el perfil P0 que parte de la subestación Zhoray hasta el perfil P42 que esta al final del trayecto, donde las líneas de transmisión y distribución se separan. De esta forma el análisis de incidencia electromagnética entre las líneas, estará cubierto en todos sus escenarios, ya sean los más lejanos, como los más cercanos entre las líneas de transmisión y distribución.

Los resultados obtenidos de las secciones transversales se exportan en formato .dxf al software AutoCAD Civil 3D, en el cual se realiza el laminado correspondiente que forma parte del Anexo D.

3.4.3.2 Productos MDS, MDT.

3.4.3.2.1 Modelo Digital del Terreno (MDT).

Contiene archivos en formato DEM (.dem) y TIFF (.tif) y la nube de puntos clasificada, recortados según el polígono límite de proyecto. El modelo digital de terreno corresponde a una nube de puntos o una superficie triangulada luego de haber filtrado el MDS, dejando solo los puntos pertenecientes al suelo.

Este modelo digital de terreno (MDT) es el producto altimétrico del proyecto, con el cual se podrá generar curvas de nivel, secciones transversales, perfiles, etc. Desde cualquier programa orientado al diseño.

3.4.3.2.2 Ortofoto y planimetría.

Se emplea la ortofoto con un tamaño de pixel de 6 cm y es elemento adicional para verificar la precisión de la información procesada, pues previo a la ejecución del vuelo LiDAR se realizó el posicionamiento de referencias para control.

La figura 35, indica la ortofoto georreferenciada, así como el producto de la digitalización de las diferentes líneas de transmisión obtenidas a partir de la aplicación de algoritmos para reconocimiento de los puntos LiDAR y a su vez la identificación de las diferentes catenarias.

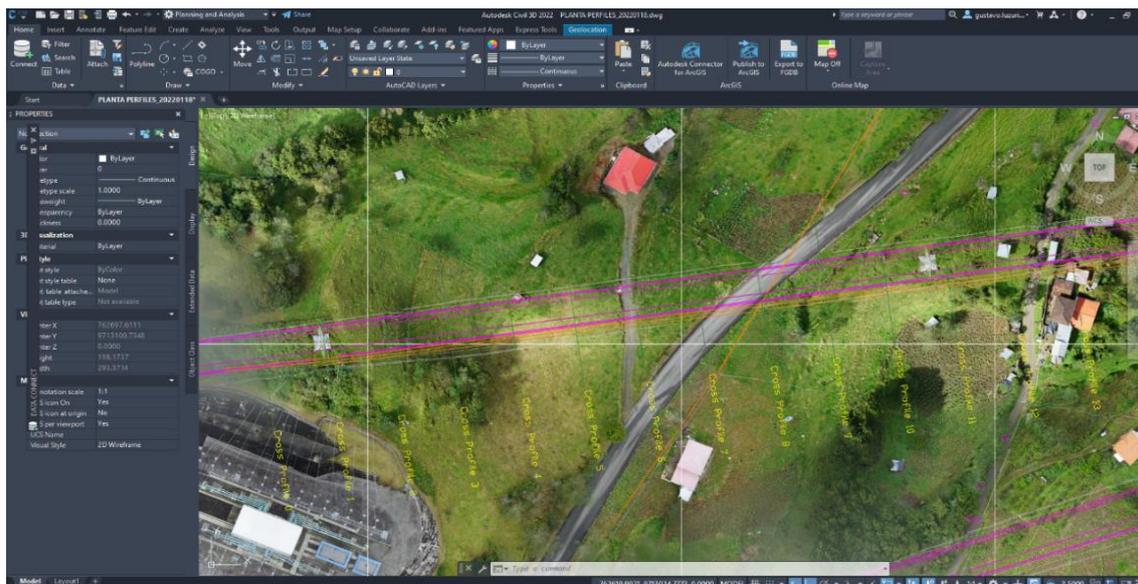


Figura 35 Ortofoto y planimetría.

Fuente: Captura tomada del software AutoCAD

Es importante destacar que toda la información generada en el proceso de inventario y análisis de una línea eléctrica se encuentra plenamente referenciado, aspecto relevante para cualquier actividad vinculada con la operación de mantenimiento de este tipo de infraestructuras importantes.

3.5 Registro de perfiles obtenidos del levantamiento topográfico con tecnología LiDAR

En base a toda la información procesada del levantamiento topográfico y sus grandes virtudes en la obtención precisa de la ubicación de las líneas de transmisión y distribución. Procedemos a realizar la tabla 15, en la cual reflejaremos el número de perfil, su ubicación topográfica y la distancia entre las líneas de transmisión hacia las líneas del sistema de distribución.

Obtenidas las distancias entre las líneas de transmisión y distribución se podrá identificar de manera sencilla, los tramos en los cuales las líneas se encuentran más cercanas entre sí, lo cual es parte del estudio, no sin embargo habrá que sujetarse a la regulación 018-18 Proyecto de Regulación Franjas de Servidumbre y distancias de seguridad entre las redes eléctricas.

Tabla 15 Resultados obtenidos del levantamiento topográfico con tecnología LiDAR

Perfiles obtenidos en el levantamiento topográfico.					
N° Perfil	Ubicación Topográfica	Distancia (m)	N° Perfil	Ubicación Topográfica	Distancia (m)
P0	From Pos:762563.268, 9713120.0 To Pos:762570.097,9713070.526	13,1422 m	P22	From Pos: 762999.342, 9713180.1 To Pos: 763006.172, 9713130.654	4,7153 m
P1	From Pos: 762583.089, 9713122.7 To Pos: 762589.919, 9713073.259	12,8568 m	P23	From Pos: 763019.163, 9713182.9 To Pos: 763025.993, 9713133.388	5,1251 m
P2	From Pos: 762602.911, 9713125.5 To Pos: 762609.740, 9713075.992	9,0541 m	P24	From Pos: 763038.985, 9713185.6 To Pos: 763045.815, 9713136.121	5.5629 m
P3	From Pos: 762622.732, 9713128.2 To Pos: 762629.562, 9713078.725	9,7355 m	P25	From Pos: 763058.807, 9713188.3 To Pos: 763065.636, 9713138.854	6.0296 m
P4	From Pos: 762642.554, 9713130.9 To Pos: 762649.383, 9713081.458	10.2162 m	P26	From Pos: 763078.628, 9713191.1 To Pos: 763085.458, 9713141.587	6.5241 m
P5	From Pos: 762662.375, 9713133.7 To Pos: 762669.205, 9713084.191	10.4897 m	P27	From Pos: 763098.450, 9713193.8 To Pos: 763105.279, 9713144.320	7.0467 m
P6	From Pos: 762682.197, 9713136.4 To Pos: 762689.027, 9713086.924	10.5607 m	P28	From Pos: 763118.271, 9713196.5 To Pos: 763125.101, 9713147.053	7.5977 m
P7	From Pos: 762702.018, 9713139.1 To Pos: 762708.848, 9713089.658	10.4280 m	P29	From Pos: 763138.093, 9713199.3 To Pos: 763144.923, 9713149.786	8.1184 m
P8	From Pos: 762721.840, 9713141.9 To Pos: 762728.670, 9713092.391	10.0920 m	P30	From Pos: 763157.915, 9713202.0 To Pos: 763164.744, 9713152.519	8.7825 m
P9	From Pos: 762741.661, 9713144.6 To Pos: 762748.491, 9713095.124	10.8537 m	P31	From Pos: 763177.736, 9713204.7 To Pos: 763184.566, 9713155.253	9.4161 m
P10	From Pos: 762761.483, 9713147.3 To Pos: 762768.313, 9713097.857	11.0574 m	P32	From Pos: 763197.558, 9713207.5 To Pos: 763204.387, 9713157.986	10.0808 m
P11	From Pos: 762781.305, 9713150.1 To Pos: 762788.134, 9713100.590	10.8003 m	P33	From Pos: 763217.379, 9713210.2 To Pos: 763224.209, 9713160.719	10.7786 m
P12	From Pos: 762801.126, 9713152.8 To Pos: 762807.956, 9713103.323	10.3409 m	P34	From Pos: 763237.201, 9713212.9 To Pos: 763244.031, 9713163.452	11.6721 m
P13	From Pos: 762820.948, 9713155.5 To Pos: 762827.777, 9713106.056	9.8427 m	P35	From Pos: 763257.023, 9713215.7 To Pos: 763263.852, 9713166.185	11.8200 m
P14	From Pos: 762840.769, 9713158.3 To Pos: 762847.599, 9713108.789	9.3104 m	P36	From Pos: 763276.844, 9713218.4 To Pos: 763283.674, 9713168.918	10.4875 m
P15	From Pos: 762860.591, 9713161.0 To Pos: 762867.420, 9713111.523	8.7438 m	P37	From Pos: 763296.666, 9713221.1 To Pos: 763303.496, 9713171.651	9.3187 m
P16	From Pos: 762880.412, 9713163.7 To Pos: 762887.242, 9713114.256	8,1415 m	P38	From Pos: 763316.488, 9713223.9 To Pos: 763323.317, 9713174.384	8.3472 m
P17	From Pos: 762900.234, 9713166.5 To Pos: 762907.064, 9713116.989	7,5022 m	P39	From Pos: 763336.309, 9713226.6 To Pos: 763343.139, 9713177.118	7.6492 m
P18	From Pos: 762920.056, 9713169.2 To Pos: 762926.885, 9713119.722	6.8320 m	P40	From Pos: 763356.131, 9713229.3 To Pos: 763362.960, 9713179.851	7.2640 m
P19	From Pos: 762939.877, 9713171.9 To Pos: 762946.707, 9713122.455	6.1281 m	P41	From Pos: 763375.952, 9713232.1 To Pos: 763382.782, 9713182.584	10.4843 m
P20	From Pos: 762959.699, 9713174.7 To Pos: 762966.528, 9713125.188	5.3864 m	P42	From Pos: 763395.774, 9713234.8 To Pos: 763402.604, 9713185.317	19.3992 m
P21	From Pos: 762979.520, 9713177.4 To Pos: 762986.350, 9713127.921	4.6090 m			

Fuente: Elaboración propia

3.6 Cálculo de distancia mínima de seguridad para líneas de transmisión de 230 kV

Para esta etapa haremos uso de toda la literatura encontrada como producto de la investigación. En especial nos basaremos en la Resolución Nro. ARCONEL -018/18 que trata sobre las distancias de seguridad en las franjas de servidumbre y los diferentes escenarios existentes. Otro documento que ha sido de gran respaldo para este análisis es el Registro oficial N° 41(suplemento), el cual describe de forma clara, las distancias de seguridad y los límites de radiaciones no ionizantes vigentes en líneas de transmisión.

Como dato importante debemos mencionar que, cuando en una misma estructura se instalen circuitos de diferente nivel de voltaje, el ancho de servidumbre mínimo debe ser el que le corresponde al circuito de mayor voltaje (018-18-Proyecto-de-Regulacion-Franjas-de-Servidumbre-y-distancias-de-seguridad-entre-las-redes-electricas.pdf, s. f.).

Sujetos a las regulaciones mencionadas, calcularemos las distancias de seguridad entre conductores de diferentes niveles de voltaje, de esta forma una vez obtenida la distancia, procederemos a contrastarla con los perfiles del levantamiento topográfico. De esta manera lograremos identificar los perfiles en los cuales se está vulnerando esta distancia de seguridad y sus rangos de inducción electromagnética presentes en las líneas de menor voltaje.

Tabla 16 Distancia vertical de seguridad

Distancias (m)	Conductores		Partes rígidas energizadas no protegidas (Barras)	
	0 a 750 V	750 V – 22 kV	0 a 750 V	750 V – 22 kV
Vertical arriba o debajo de techos o proyecciones no accesibles a personas.	3,2	3,8	3,0	3,6
Vertical arriba o debajo de techos, cornisas y balcones, fácilmente accesibles a personas.	3,5	4,1	3,4	4,0

Fuente: (018-18-Proyecto-de-Regulacion-Franjas-de-Servidumbre-y-distancias-de-seguridad-entre-las-redes-electricas.pdf, s. f.)

Para efectos de cálculo usaremos los datos de la tabla 17, estos son referentes a las líneas de 230 kV. De acuerdo a la norma dice que, para líneas mayores a 22 kV, se deberá sumar 0,01 m por cada kV adicional a la distancia seleccionada en la tabla 16 y también se realizará un reajuste del 3% por cada 300 metros de altura sobre el nivel del mar, partiendo de los 1000 msnm, la distancia vertical será la resultante de la siguiente la formula en consideración (018-

18-Proyecto-de-Regulacion-Franjas-de-Servidumbre-y-distancias-de-seguridad-entre-las-redes-electricas.pdf, s. f.).

$$D_v = D_0 + (0,01 * (V_n - 22)) * (1 + 0,01 * f_c) \quad (25)$$

Ecuación 25 Formula de la distancia vertical de seguridad

Tabla 17 Datos técnicos líneas 230 Kv

Simbología	Descripción	Valor
D_v	Distancia vertical	= ?
D_0	Distancia vertical de seguridad indicada en la Tabla 13	3,8 a 22 kV
V_n	Voltaje fase-fase nominal del conductor	230 kV
f_c	Factor de corrección a partir de los 1000 m sobre el nivel del mar	= ?

Fuente: Elaboración propia

Calculo D_0

Datos

Diferencia de voltaje con referencia a los 22 kV, como lo indica la norma = 208 kV

$$208 \text{ kV} * 0,01 \text{ m} = 2,08 \text{ m}$$

$$D_0 = \text{valor tabla} + \text{incremento}$$

$$D_0 = 3,8\text{m} + 2,08 \text{ m} = 5,88 \text{ m}$$

Calculo f_c

Altura de las líneas de transmisión en la subestación Zhoray = 2600 msnm

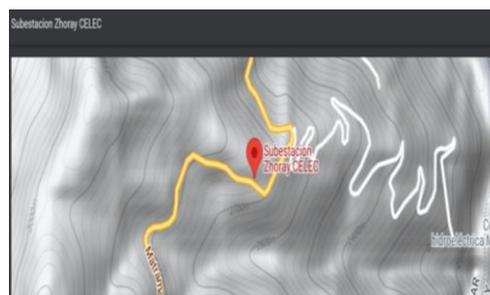


Figura 36 Ubicación geográfica líneas de transmisión 230 kV

Fuente: (Google Earth, s. f.-b)

Tabla 18 Factor de corrección

Factor de corrección (fc)	msnm
Fc = 0	>1000
Fc = 3	1000 hasta 1300
Fc = 6	1300 hasta 1600
Fc = 9	1600 hasta 1900
Fc = 12	1900 hasta 2200
Fc = 15	2200 hasta 2500
Fc = 18	2500 hasta 2800

Fuente: Elaboración propia

$$f_c = 18$$

Reemplazamos los valores obtenidos en la fórmula de la ecuación 42 y tendremos:

$$D_v = 5,88 + (0,01 * (230 - 22)) \times (1 + 0,01 \times 18)$$

$$D_v = 8,3344 \text{ m}$$

3.7 Distancias excepcionales para franjas de servidumbre

En este rango de clasificación encontramos la distancia de seguridad para la línea de media tensión de 13,8 kV, la misma que también es parte del estudio y que de acuerdo a la Resolución Nro. ARCONEL -018/18, especifica una franja de servidumbre de 6 m de ancho, como indica en la siguiente tabla (018-18-Proyecto-de-Regulacion-Franjas-de-Servidumbre-y-distancias-de-seguridad-entre-las-redes-electricas.pdf, s. f.).

Tabla 19 Franjas de servidumbre para distancias excepcionales

Voltaje (kV)	Ancho de la franja
34,5 < V ≤ 46	16 m
13,8 < V ≤ 34,5	12 m
13,8	6 m

Fuente: (018-18-Proyecto-de-Regulacion-Franjas-de-Servidumbre-y-distancias-de-seguridad-entre-las-redes-electricas.pdf, s. f.)

3.8 Identificación de perfiles más cercanos entre líneas de transmisión y distribución

De acuerdo al cálculo de la distancia de seguridad obtenido en el punto 3.6, haremos un filtrado de aquellos perfiles en los cuales la distancia de seguridad no sea respetada. Esto con el afán de identificar todas aquellas zonas en las cuales la distancia de seguridad entre las líneas de transmisión y distribución no estén de acuerdo a lo que especifica la Resolución Nro. ARCONEL -018/18 que hasta la fecha se encuentra vigente.

La tabla 20 identifica los perfiles que se encuentran dentro de la distancia de seguridad entre líneas de transmisión y distribución.

Tabla 20 Perfiles que se encuentran dentro de la distancia de seguridad calculada.

Perfiles dentro de la distancia de seguridad					
N° Perfil	Ubicación georreferenciada	Distancia (m)	N° perfil	Ubicación georreferenciada	Distancia (m)
P16	From Pos: 762880.412, 9713163.7 To Pos: 762887.242, 9713114.256	8,14 m	P24	From Pos: 763038.985, 9713185.6 To Pos: 763045.815, 9713136.121	5.56 m
P17	From Pos: 762900.234, 9713166.5 To Pos: 762907.064, 9713116.989	7,50 m	P25	From Pos: 763058.807, 9713188.3 To Pos: 763065.636, 9713138.854	6.02 m
P18	From Pos: 762920.056, 9713169.2 To Pos: 762926.885, 9713119.722	6.83 m	P26	From Pos: 763078.628, 9713191.1 To Pos: 763085.458, 9713141.587	6.52 m
P19	From Pos: 762939.877, 9713171.9 To Pos: 762946.707, 9713122.455	6.12 m	P27	From Pos: 763098.450, 9713193.8 To Pos: 763105.279, 9713144.320	7.04 m
P20	From Pos: 762959.699, 9713174.7 To Pos: 762966.528, 9713125.188	5.38 m	P28	From Pos: 763118.271, 9713196.5 To Pos: 763125.101, 9713147.053	7.59 m
P21	From Pos: 762979.520, 9713177.4 To Pos: 762986.350, 9713127.921	4.60 m	P29	From Pos: 763138.093, 9713199.3 To Pos: 763144.923, 9713149.786	8.11 m
P22	From Pos: 762999.342, 9713180.1 To Pos: 763006.172, 9713130.654	4,71 m	P39	From Pos: 763336.309, 9713226.6 To Pos: 763343.139, 9713177.118	7.64 m
P23	From Pos: 763019.163, 9713182.9 To Pos: 763025.993, 9713133.388	5,12 m	P40	From Pos: 763356.131, 9713229.3 To Pos: 763362.960, 9713179.851	7.26 m

Fuente: Elaboración propia

3.9 Simulación de campos eléctricos y magnéticos en el software FEMM

Posterior al proceso de obtención de láminas en formato CAD, del levantamiento de las líneas de transmisión (230 kV) y de media tensión que alimentan los circuitos auxiliares de la subestación Zhoray (13.8 kV) con sus respectivas distancias entre sí, procedemos a elaborar las simulaciones de los campos electromagnéticos incidentes entre las líneas antes mencionadas.

Pero antes debemos mencionar las siguientes consideraciones referentes al software (manual42.pdf, s. f.):

La simulación no es variable en el tiempo

El programa realiza su análisis en las coordenadas cartesianas (x,y)

Los conductores tienen longitud infinita
La superficie terrestre es un buen conductor

3.9.1 Selección de perfiles a simular.

Esta tarea se pudo realizar gracias a los excelentes resultados que se lograron obtener en el proceso de levantamiento topográfico con tecnología LiDAR, puesto que, al contar con un levantamiento topográfico de todo el tramo, en el cual las dos líneas tanto de transmisión como media tensión, comparten franja de servidumbre en sentido paralelo hacia la subestación Zhoray por un trayecto aproximado de 0.8 km, desde el perfil 0 hasta el perfil 42.

Comprobando de forma efectiva la distancia existente entre las dos líneas (230kV-13.8kV) en todo el tramo de estudio. Razón por la cual se presentará la simulación en tres escenarios diferentes:

3.9.1.1 Primer escenario.

3.9.1.1.1 Distancia más lejana entre líneas de transmisión y distribución.

Perfil P42, la distancia existente entre la línea de transmisión y la de distribución es de 19,39 m.

3.9.1.2 Segundo escenario.

3.9.1.2 .1 Distancia media entre líneas de transmisión y distribución.

Perfil P1, la distancia existente entre la línea de transmisión y la de distribución es de 12,85 m.

3.9.1.3 Tercer escenario.

3.9.1.3.1 Distancia más cercana entre líneas de transmisión y distribución.

Perfil P21, la distancia existente entre la línea de transmisión y la de distribución es de 4,60 m.

3.10 Validación simulación

Por temas de validación de las simulaciones realizadas y al no contar con los equipos necesarios para realizar mediciones en campo, se procede a realizar las simulaciones, buscando cubrir la mayor parte de las variables existentes de la localidad en estudio. Reflejaremos dos tipos de simulación, una en la cual el voltaje es despreciable en las líneas de distribución, buscando de esta forma ajustarnos a un modelo de inducción de campos electromagnéticos hacia un buen conductor y la segunda simulación será con el voltaje real que transporta la línea de distribución, para finalmente contrastar estos valores, de forma que el modelado se vaya ajustando al análisis de incidencia de campos electromagnéticos entre las líneas de transmisión y distribución.

3.10.1 Simulación de campo eléctrico.

3.10.1.1 Perfil 42 – más lejano.

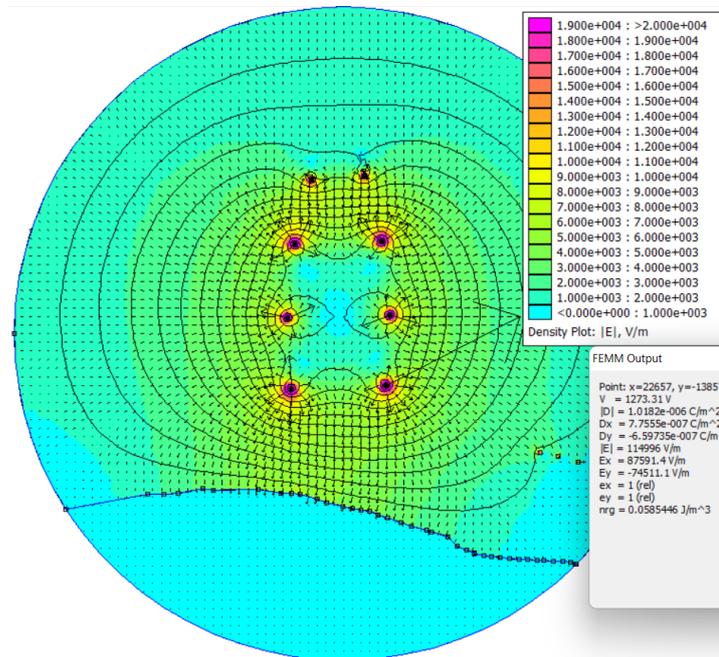


Figura 37 Perfil P42, Visualización de resultados eléctricos, distancia entre líneas: 19,3992m. Con voltaje de 0,1V en líneas de Distribución.

Fuente: Elaboración propia en el software FEMM

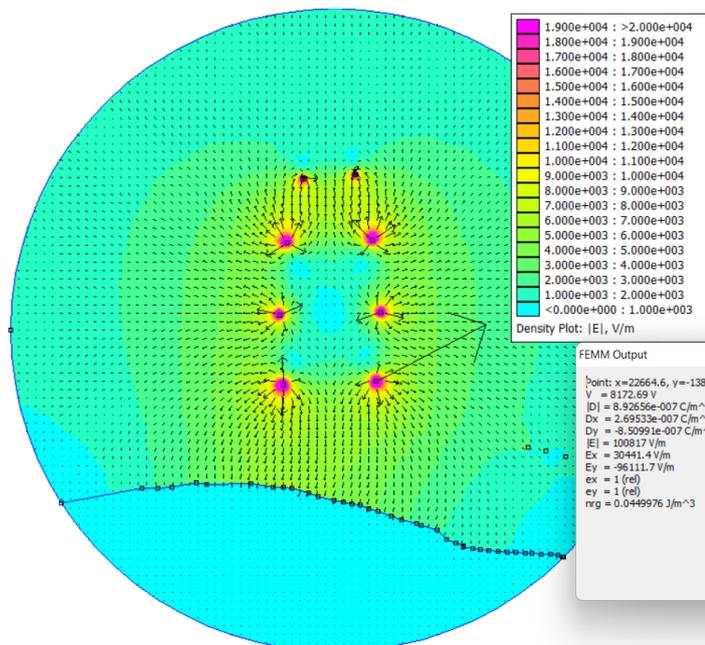


Figura 38 Perfil P42, Visualización de resultados eléctricos, distancia entre líneas: 19,3992m. con voltaje de 7,967 kV en líneas de Distribución.

Fuente: Elaboración propia en el software FEMM

3.10.1.2 Perfil 1 – distancia media.

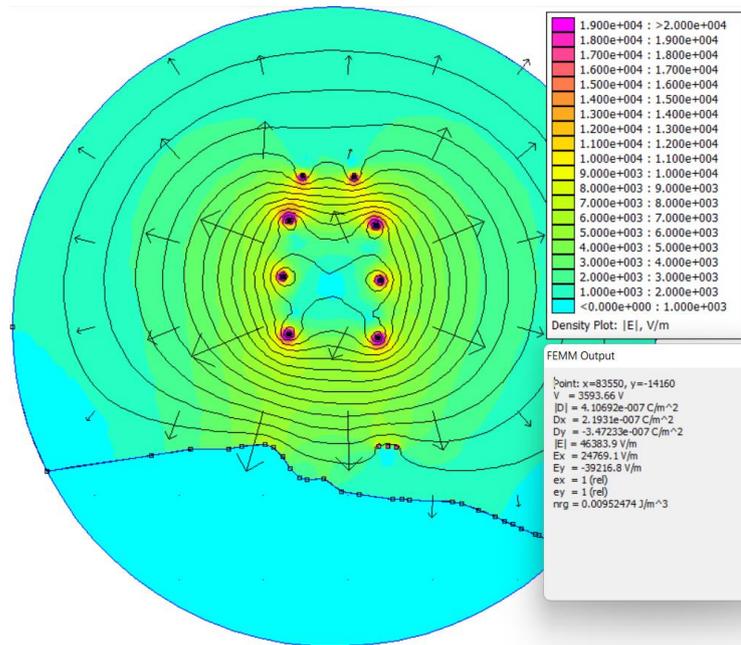


Figura 39 Perfil P1, Visualización de resultados eléctricos, distancia entre líneas: 12,8568 m. con voltaje de 0,1V en líneas de Distribución

Fuente: Elaboración propia en el software FEMM

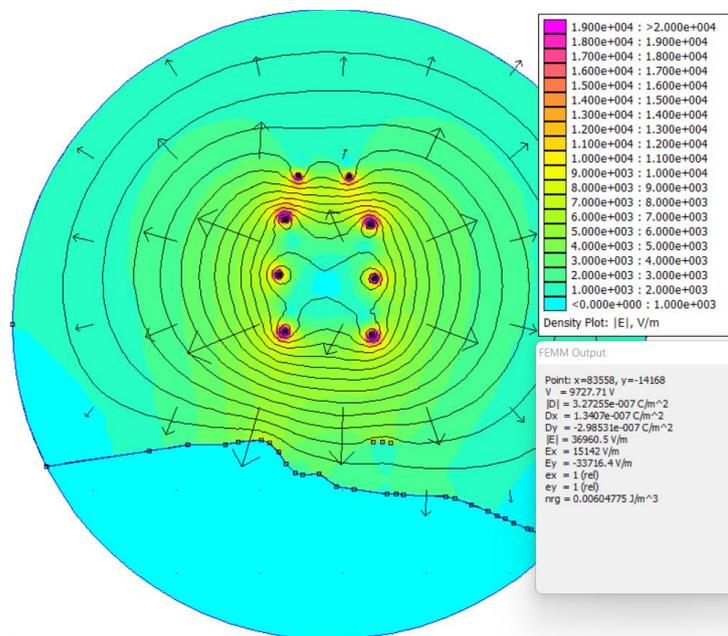


Figura 40 Perfil P1, Visualización de resultados eléctricos, distancia entre líneas: 12,8568 m. Con voltaje de 7,967 kV en líneas de Distribución

Fuente: Elaboración propia en el software FEMM

3.10.1.3 Perfil 21 – más cercano.

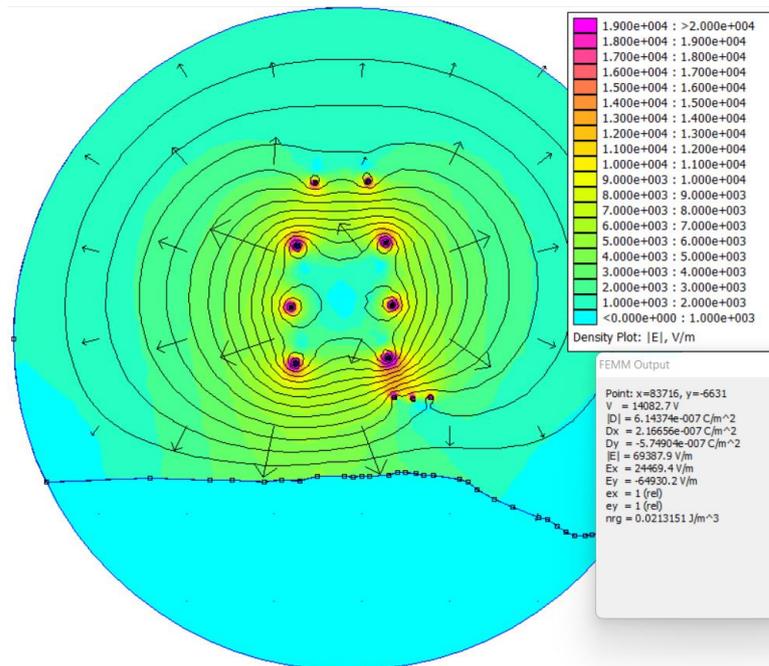


Figura 41 Perfil P21, Visualización de resultados eléctricos, distancia entre líneas: 4,6090 m. Con voltaje de 0,1V en líneas de Distribución

Fuente: Elaboración propia en el software FEMM

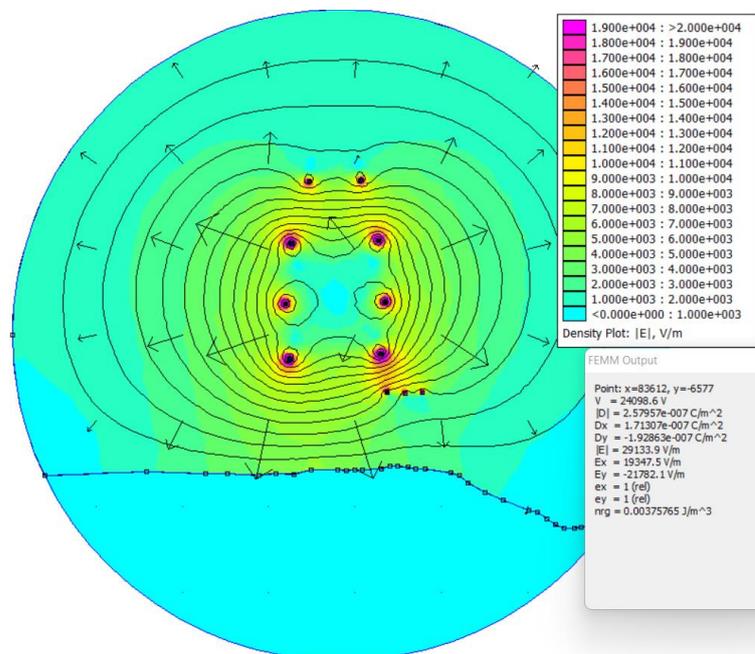


Figura 42 Perfil P21, Visualización de resultados eléctricos, distancia entre líneas: 4,6090 m. Con voltaje de 7,967 kV en líneas de Distribución

Fuente: Elaboración propia en el software FEMM

3.10.1.4 Perfil 38 – distancia calculada.

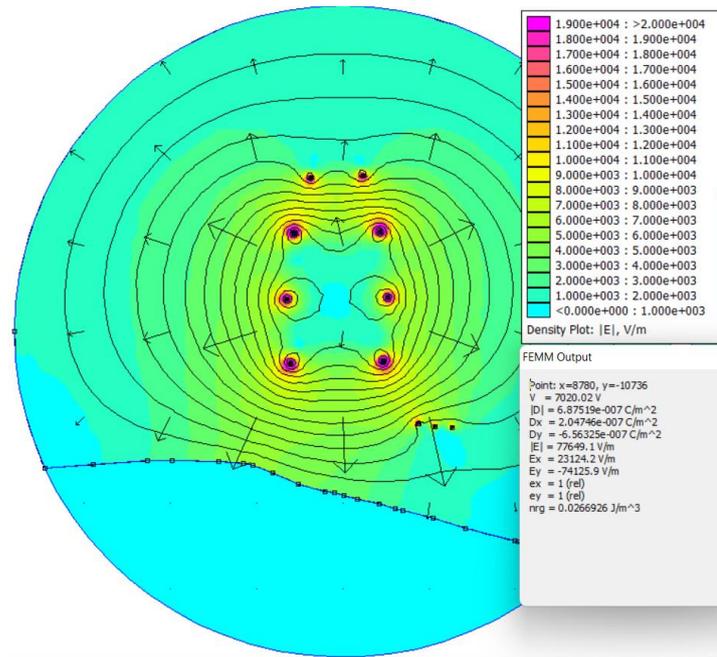


Figura 43 Perfil P38, Visualización de resultados eléctricos, distancia entre líneas: 8,3472 m. Con voltaje de 0,1V en líneas de Distribución

Fuente: Elaboración propia en el software FEMM

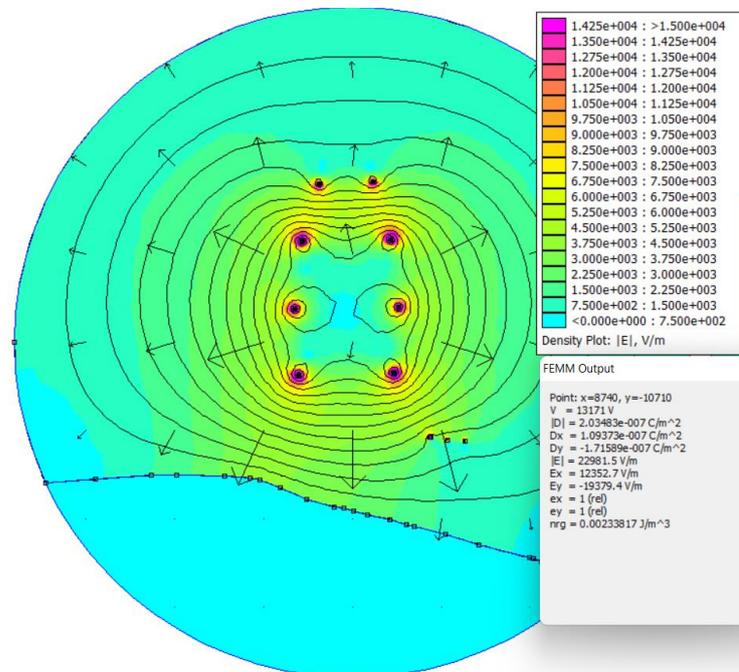


Figura 44 Perfil P38, Visualización de resultados eléctricos, distancia entre líneas: 8,34 m. Con voltaje de 7,967 kV en líneas de Distribución

Fuente: Elaboración propia en el software FEMM

3.10.2 Simulación de campo magnético.

Previo a la simulación del campo magnético se debe calcular el valor de la densidad de corriente en los conductores, tanto para las líneas de transmisión, como para las de distribución. Y para ello partiremos de la ecuación del flujo de potencia:

$$S = \sqrt{3}V_b I \quad (26)$$

Ecuación 26 Flujo de potencia

Despejando la corriente:

$$I = \frac{S}{\sqrt{3}V_b}$$

Donde:

S : Flujo de potencia

V_b : Voltaje de barra

I : corriente del conductor

Partiendo de la ecuación 26, se calcula la corriente existente en ese instante en las líneas de transmisión o distribución. Los valores utilizados para los siguientes cálculos fueron tomados de los registros históricos proporcionados por Transelectric EP.

Cálculo de corriente del circuito de transmisión (230kV)

$$I = \frac{178.7 \text{ MVA}}{\sqrt{3} * 230 \text{ kV}} \quad I = 448,577 \text{ A}$$

Como siguiente paso, se calcula el área del conductor con la ecuación 27, para lo cual necesitamos conocer el diámetro del conductor y a su vez el radio del mismo, pero en metros cuadrados, por necesidad de aplicación de fórmula.

$$\text{Área} = \pi * r^2 \quad (27)$$

Ecuación 27 Área de conductor

Según la tabla 5. El conductor Bluejay MCM 1113 tiene un diámetro exterior de 32,8422 mm, esto en metros cuadrados nos da un equivalente de 0,0328422 m de diámetro, cuyo radio que es la mitad sería 0,0164211 m, aplicado a la ecuación 27 será:

$$\begin{aligned} \text{Área} &= \pi * 0,0164211^2 \\ \text{Área} &= 8,4713 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Posteriormente aplicamos la ecuación 28, que se utiliza para calcular la densidad de corriente, valor requerido para las simulaciones de campo magnético.

$$J = \frac{I_{conductor}}{\text{área del conductor}} \quad (28)$$

Donde:

J: Densidad de corriente

$$J = \frac{448,577 \text{ A}}{8,4713 \times 10^{-4} \text{ m}^2}$$

$$J = 529525,575 \text{ A/m}^2$$

Este resultado expresado en mega amperios sobre metros cuadrados será:

$$J = 0,5295255746 \text{ MA/m}^2$$

El valor calculado de la densidad de corriente se coloca en la pestaña de propiedades de los materiales, como se muestra en la figura 45.

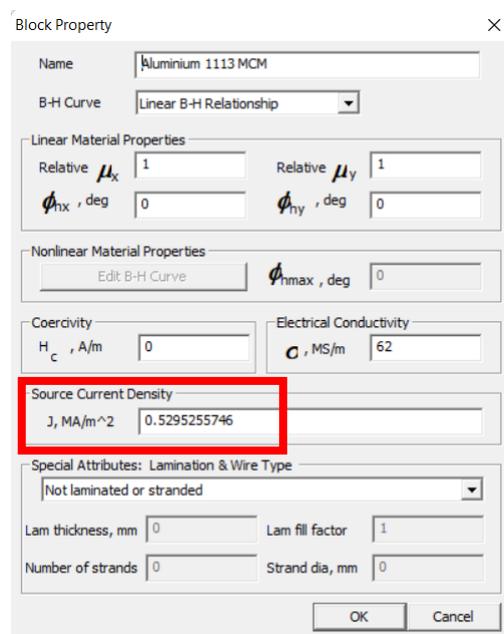


Figura 45 Densidad de corriente en líneas de 230 kV.

Fuente: Elaboración propia en el software FEMM

Para las líneas de distribución se repetirá el proceso de cálculo, siguiendo la misma secuencia de pasos, de esta forma obtendremos la densidad de corriente para los dos circuitos de 230 kV y de 13,8 kV, como se refleja en la tabla 21.

Tabla 21 Densidad de corriente de los conductores de transmisión y distribución.

Sistema	Conductor	Calibre MCM	Diámetro	Densidad de corriente
230 kV	Bluejay Finch	1113 000	32,8422 mm	0,5295255746 MA/m ²
13.8 kV	Sparrow	66 360	8.0264 mm	1.102777457 MA/m ²

Fuente: Elaboración propia

3.10.2.1 Perfil 42 – más lejano.

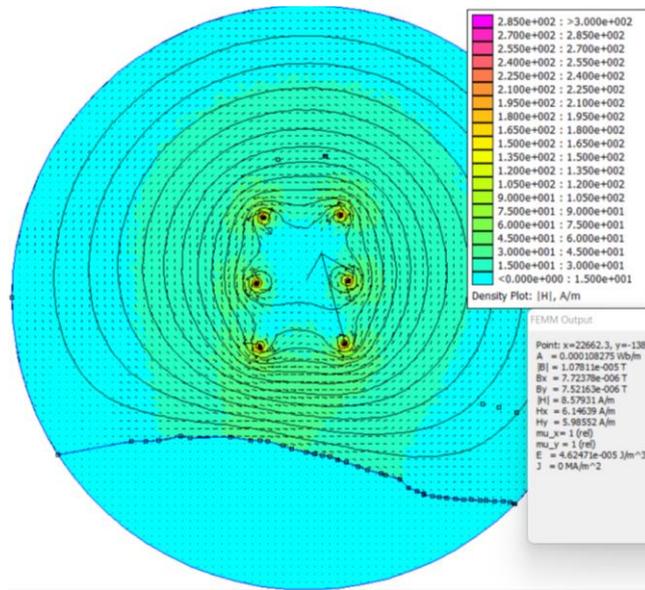


Figura 46 Perfil P42, Visualización de resultados eléctricos, distancia entre líneas: 19,3992m con densidad de corriente de 0,001 MA/m² en líneas de Distribución.

Fuente: Elaboración propia en el software FEMM

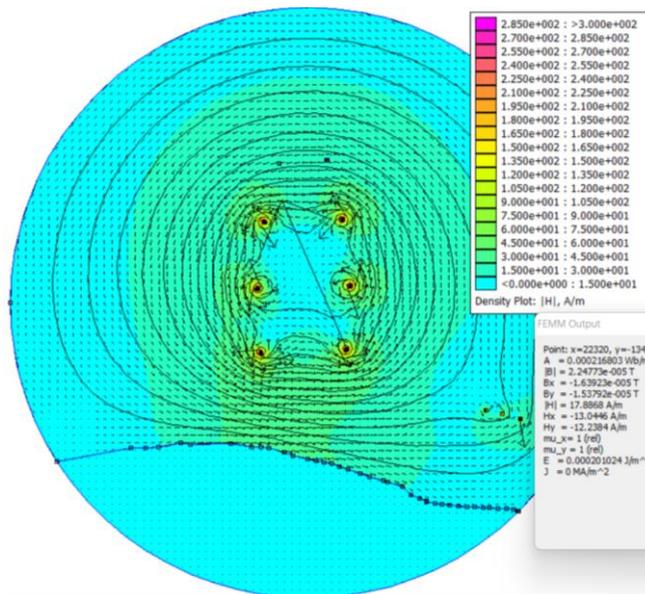


Figura 47 Perfil P42, Visualización de resultados eléctricos, distancia entre líneas: 19,3992 m, con densidad de corriente de 1,102777457 MA/m² en líneas de Distribución.

Fuente: Elaboración propia en el software FEMM

3.10.2.2 Perfil 1 - distancia media.

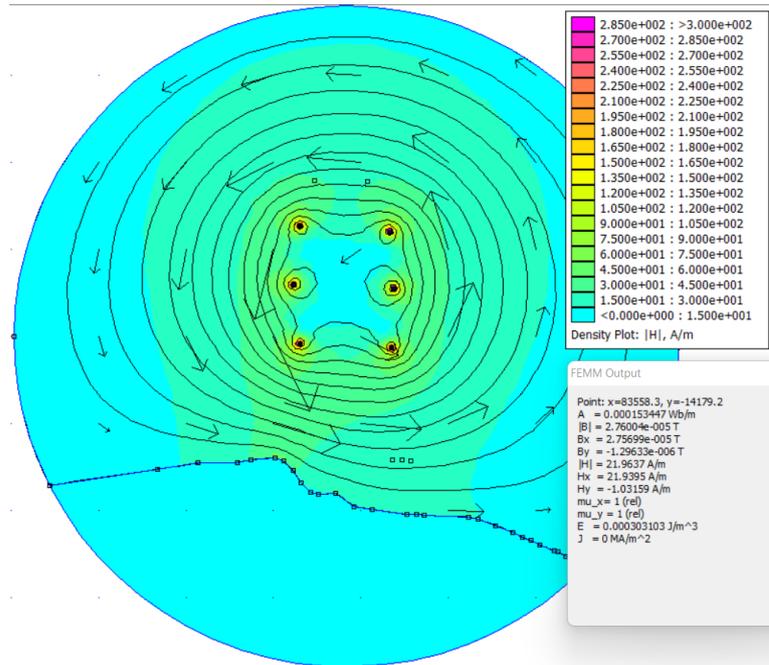


Figura 48 Perfil P1, Visualización de resultados eléctricos, distancia entre líneas: 12,8568 m, con densidad de corriente de 0,001 MA/m² en líneas de Distribución.

Fuente: Elaboración propia en el software FEMM

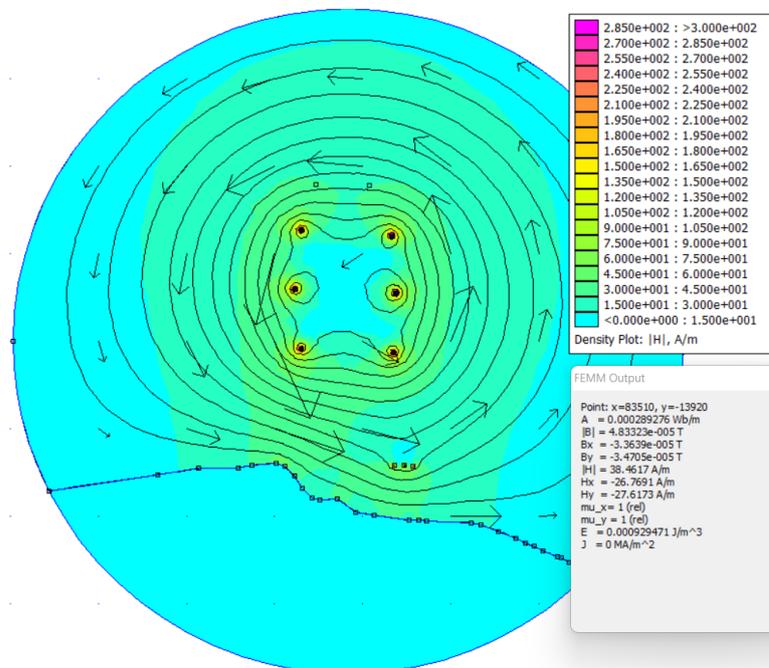


Figura 49 Perfil P1, Visualización de resultados eléctricos, distancia entre líneas: 12,8568 con densidad de corriente de 1,102777457 MA/m² en líneas de Distribución.

Fuente: Elaboración propia en el software FEMM

3.10.2.3 Perfil 21 – más cercano.

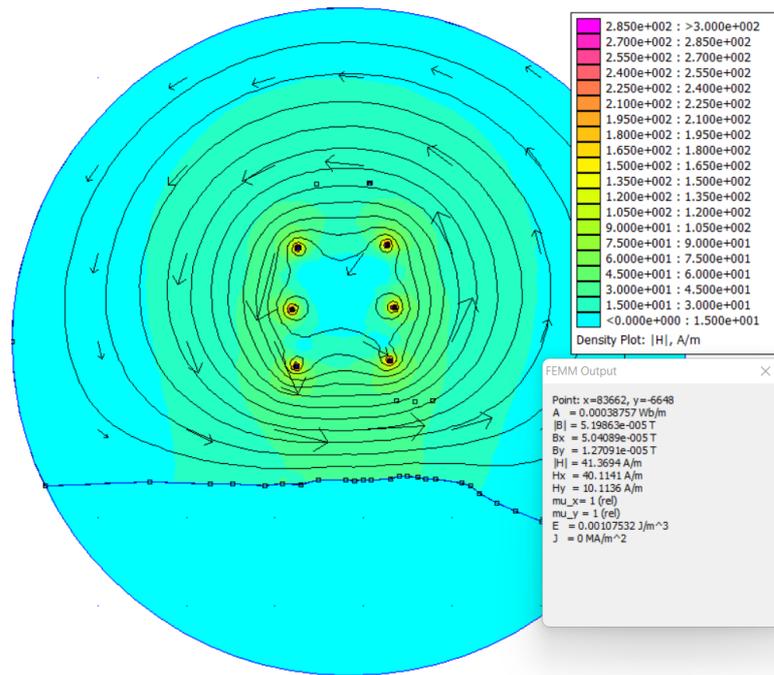


Figura 50 Perfil P21, Visualización de resultados eléctricos, distancia entre líneas: 4,6090 m con densidad de corriente de 0,001 MA/m² en líneas de Distribución.

Fuente: Elaboración propia en el software FEMM

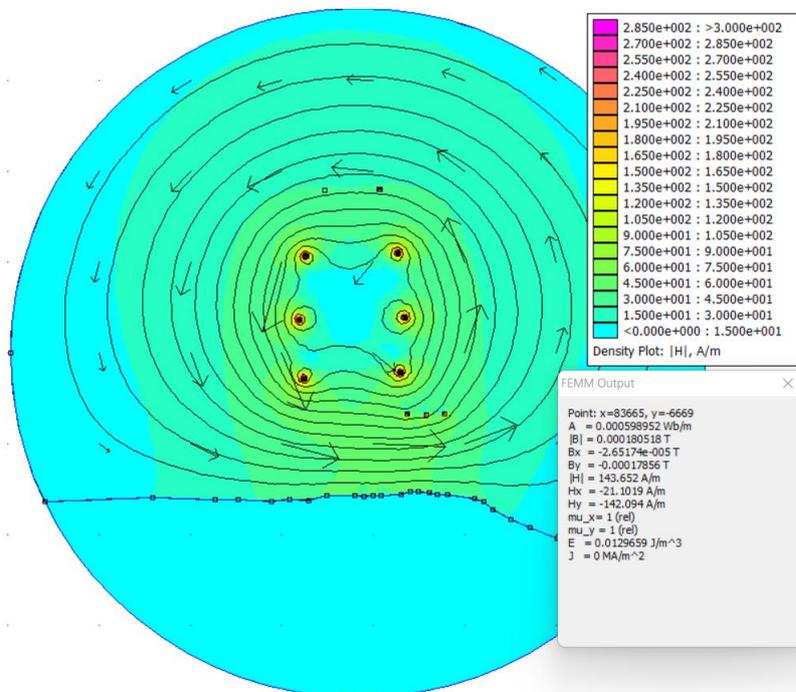


Figura 51 Perfil P1, Visualización de resultados eléctricos, distancia entre líneas: 4,6090 m con densidad de corriente de 1,102777457 MA/m² en líneas de Distribución.

Fuente: Elaboración propia en el software FEMM

3.10.2.4 Perfil 38 – distancia calculada.

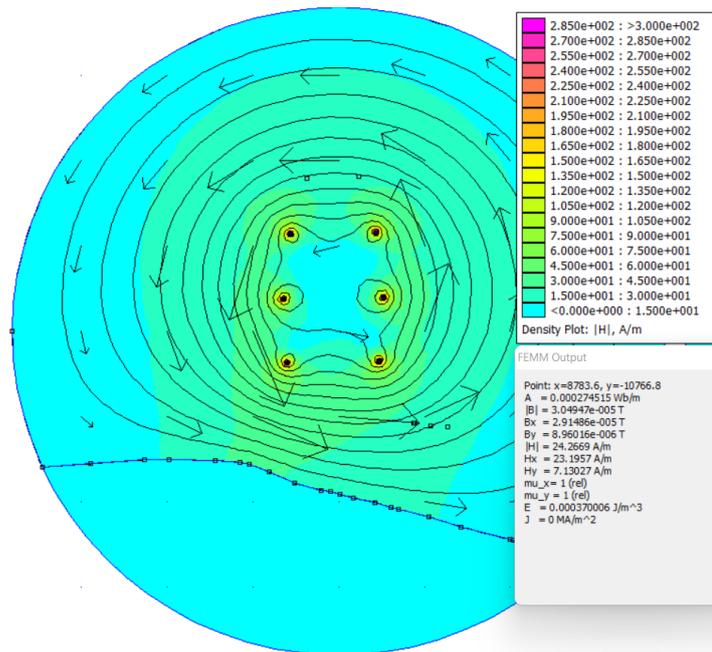


Figura 52 Perfil P38, Visualización de resultados eléctricos, distancia entre líneas: 8,34 m con densidad de corriente de 0,001 MA/m² en líneas de Distribución.

Fuente: Elaboración propia en el software FEMM

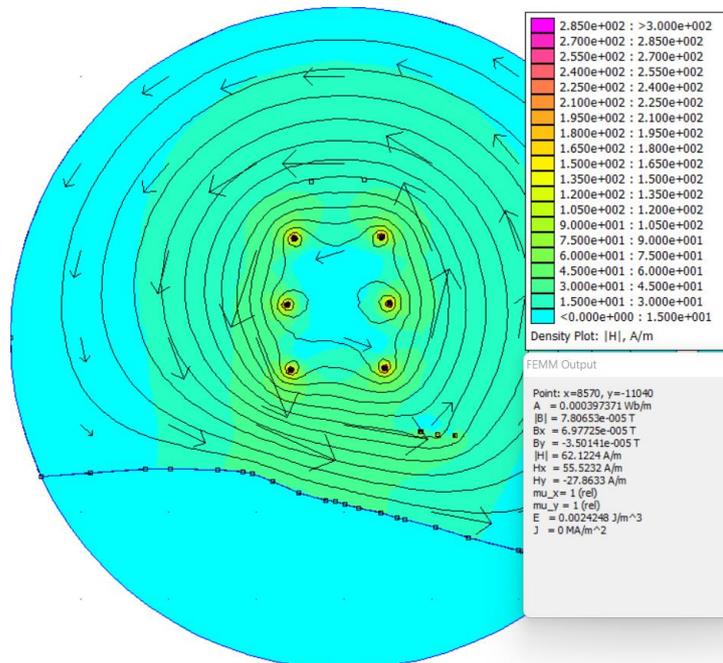


Figura 53 Perfil 38, Visualización de resultados eléctricos, distancia entre líneas: 8,34 m con densidad de corriente de 1,102777457 MA/m² en líneas de Distribución.

Fuente: Elaboración propia en el software FEMM

3.11 Contraste de resultados

3.11.1 Resultados obtenidos en la simulación de campo eléctrico.

Las simulaciones fueron realizadas de acuerdo a la selección previamente establecida en el punto 3.9.1. En el cual se planteó tres escenarios para analizar la incidencia de los campos electromagnéticos. Adicional a estos tres escenarios se adjuntó uno escenario más que está cercano a la distancia de seguridad calculada en el punto 3.5. La tabla 22 refleja los valores obtenidos en la simulación de campo eléctrico, también es importante mencionar que la tabla cuenta con los valores de voltaje en las líneas de distribución, cuando ellas están con y sin voltaje de alimentación propio del circuito de distribución. Se realizó este tipo de comparación buscando contrastar los resultados de las simulaciones en cuanto al comportamiento de los campos electromagnéticos, en los diferentes escenarios.

Tabla 22 Resultados obtenidos en la simulación de campo eléctrico.

Perfil	Distancia entre líneas	Valores de voltaje en línea de distribución con alimentación	Valores de voltaje en línea de distribución sin alimentación	Valores de campo eléctrico
P42	19,39 m		1273,31 V	11499,6 V/m
P42	19,39 m	8172,69 V		10081,7 V/m
P1	12,85 m		3593,36 V	46383,9 V/m
P1	12,85 m	9727,71 V		15697,3 V/m
P21	4,60 m		14082,7 V	69387,9 V/m
P21	4,60 m	24098,6 V		34073,2 V/m
P38	8,34 m		7020,20 V	57649,1 V/m
P38	8,34 m	13171 V		30614,4 V/m

Fuente: Elaboración propia

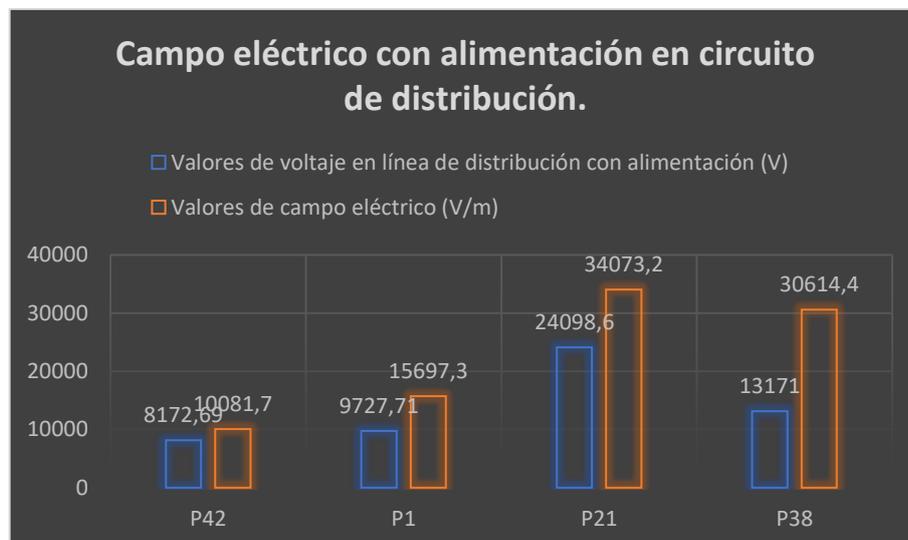


Figura 54 Campo eléctrico con alimentación en circuito de distribución.

Fuente: Elaboración propia

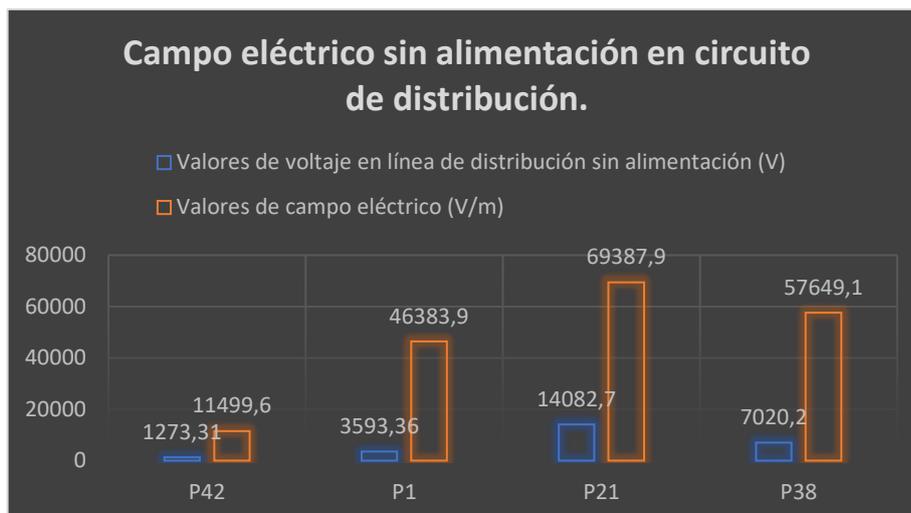


Figura 55 Campo eléctrico sin alimentación en circuito de distribución.

Fuente: Elaboración propia

En la figura 56, encontramos una gráfica de barras elaborada en Excel, en la cual se visualiza de forma íntegra todos los valores de campo eléctrico obtenidos en las simulaciones desde el perfil 0 hasta el 42.

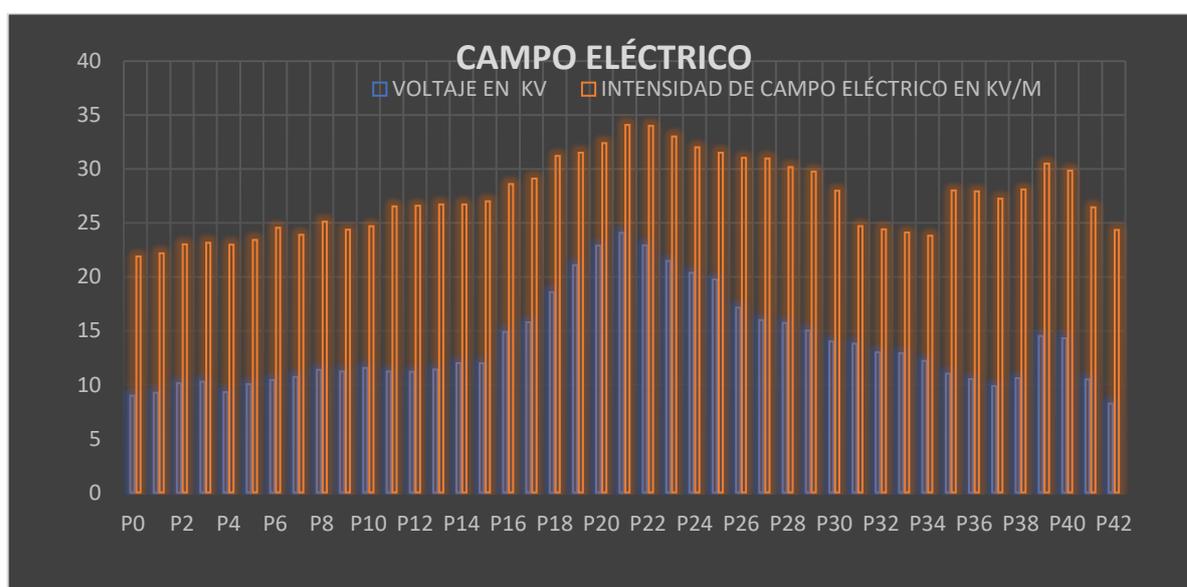


Figura 56 Valores de simulación de campo eléctrico en todos los perfiles.

Fuente: Elaboración propia

De la misma forma en la tabla 23, visualizaremos los resultados obtenidos en la simulación de campo magnético, bajo el mismo criterio que en la de campos eléctricos, se registrara los valores obtenidos en las líneas de distribución, pero a diferencia de las de campo eléctrico, estas simulaciones serán con presencia de corriente en las líneas de distribución y sin presencia de la misma.

Tabla 23 Resultados obtenidos en la simulación de campo magnético.

Perfil	Distancia entre líneas	Intensidad de campo magnético con corriente en distribución H (A/m)	Intensidad de campo magnético sin corriente en distribución H (A/m)	Densidad de flujo magnético con corriente en distribución B (Microteslas μT)	Densidad de flujo magnético sin corriente distribución B (Microteslas μT)
P42	19,39 m		8,57931 A/m		10,7811 μT
P42	19,39 m	17,8868 A/m		22,4773 μT	
P1	12,85 m		21,9637 A/m		27,6004 μT
P1	12,85 m	38,4617 A/m		48,3323 μT	
P21	4,60 m		41,3694 A/m		51,9863 μT
P21	4,60 m	143,652 A/m		185,118 μT	
P38	8,34 m		24,2669 A/m		30,4947 μT
P38	8,34 m	62,1224 A/m		78,0653	

Fuente: Elaboración propia

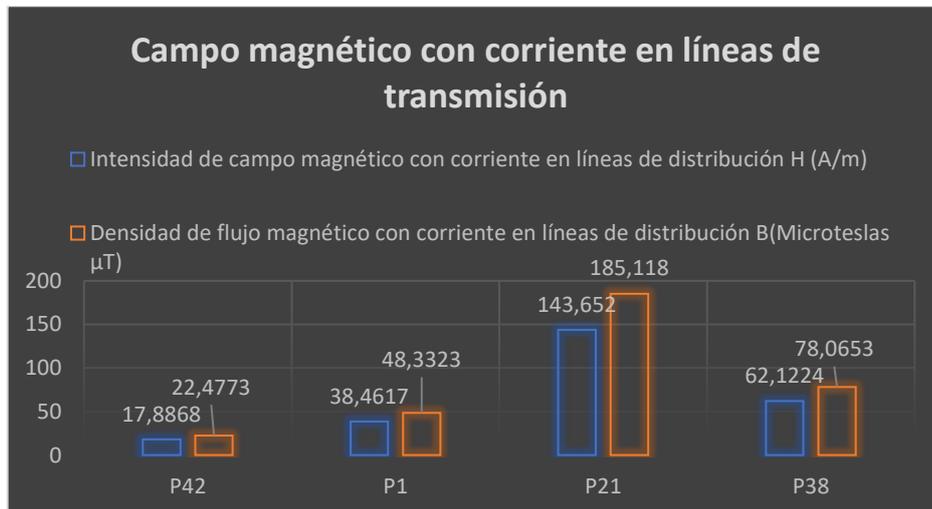


Figura 57 Campo magnético con corriente en líneas de distribución.

Fuente: Elaboración propia

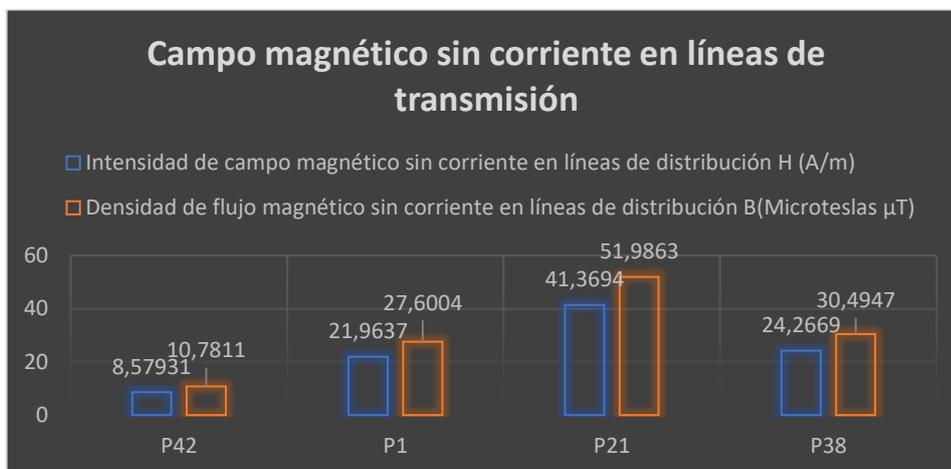


Figura 58 Campo magnético sin corriente en líneas de distribución.

Fuente: Elaboración propia

La figura 58, muestra los valores de campo magnético y densidad de flujo magnético, encontrados en las simulaciones realizadas en los perfiles, que se encuentran dentro de la distancia de seguridad calculada en el punto 3.5, para la elaboración de esta grafica se utilizaron los valores de la tabla 24.

Tabla 24 Valores de campo magnético, en perfiles que se encuentran dentro de la distancia de seguridad

Valores obtenidos en la simulación de campo magnético			
N° perfil	Distancia entre líneas (m)	Campo magnético H (A/m)	Densidad de Flujo magnético B(uT)
P16	8,1415 m	63.6849	80.0288
P17	7,5022 m	92.0536	115.678
P18	6.8320 m	101.00101	126.921
P19	6.1281 m	107.355	134.907
P20	5.3864 m	119.208	149.801
P21	4.6090 m	143.038	179.747
P22	4,7153 m	131.258	164.944
P23	5,1251 m	121.474	152.649
P24	5.5629 m	105.596	132.696
P25	6.0296 m	93.7048	117.753
P26	6.5241 m	86.3017	108.45
P27	7.0467 m	81.2526	102.105
P28	7.5977 m	77.0693	96.8481
P29	8.1184 m	72.7087	91.3684
P39	7.6492 m	80.897	101.658
P40	7.2640 m	85.7379	107.741

Fuente: Elaboración propia

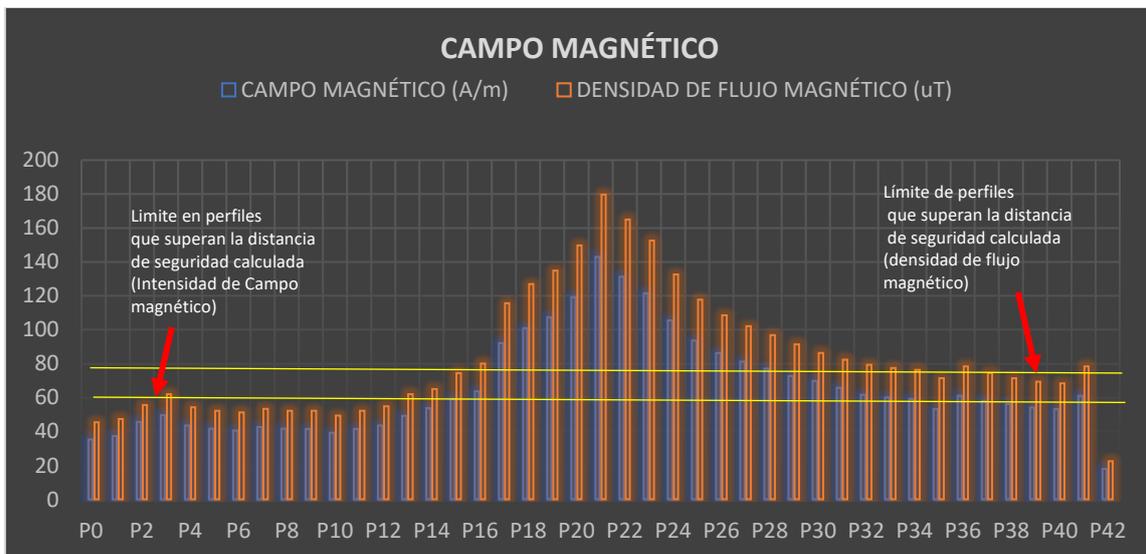


Figura 59 Valores de simulación de campo magnético en todos los refiles.

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO 4

4. PROPUESTAS DE SOLUCIÓN

4.1 Propuesta uno

Luego de haber revisado y analizado las regulaciones concernientes a franjas de servidumbre en las líneas de transmisión y distribución. Y posterior a obtener los resultados del levantamiento topográfico con tecnología LiDAR en el cual se corrobora con precisión la cercanía entre las líneas de transmisión y distribución.

Se comprueba que las líneas de distribución están dentro de la franja de servidumbre en todo el trayecto que van juntas. Y en este sentido encontramos distancias de entre 13,14 metros y 4,60 metros entre los conductores más cercanos del circuito de 230kV y 13,8 kV como lo muestra la tabla 15. Razón por la cual apoyados en la regulación 018/18 Proyecto de regulación franjas de servidumbre y distancias de seguridad entre las redes eléctricas, planteamos como una alternativa coherente a las normativas, el reubicar todo el circuito de distribución, respetando la franja de servidumbre de las líneas de transmisión de 230kV, la misma que es de 30 metros entre sus extremos o una distancia de separación entre la línea de transmisión y la de distribución no menor a 15m.

4.1.1 Reubicación de la línea de distribución de 13.8 kV.

La propuesta de reubicación de la línea de distribución de 13.8 kV, está respaldada, en los resultados obtenidos en la simulación de campos electromagnéticos, resultados que se reflejan en la tabla 25, al igual que en la figura 60. Puesto que, al cumplir con la regulación de distancias de seguridad en franjas de servidumbre. También reflejamos valores de incidencia electromagnética inferiores al 5.33% en el circuito de distribución. Porcentaje que no deja de ser favorable en términos de confiabilidad del funcionamiento del circuito de distribución, conociendo que el mismo alimenta el primario del transformador de circuitos auxiliares de la subestación Zhoray.

Tabla 25 Valores obtenidos en simulación respetando franja de servidumbre.

Perfil	Distancia entre líneas (230kv - 13,8kv)	Voltaje constante en líneas de distribución (V).	Voltaje aproximado en el conductor de distribución, que está más cercano a la línea de transmisión (V).	Campo eléctrico (V/m)	Porcentaje de voltaje inducido desde las líneas de transmisión hacia la línea de distribución.
P/propuesto	15 m	7.967 V	8.391,5 V	2063.37 V/m	5.33%

Fuente: Elaboración propia

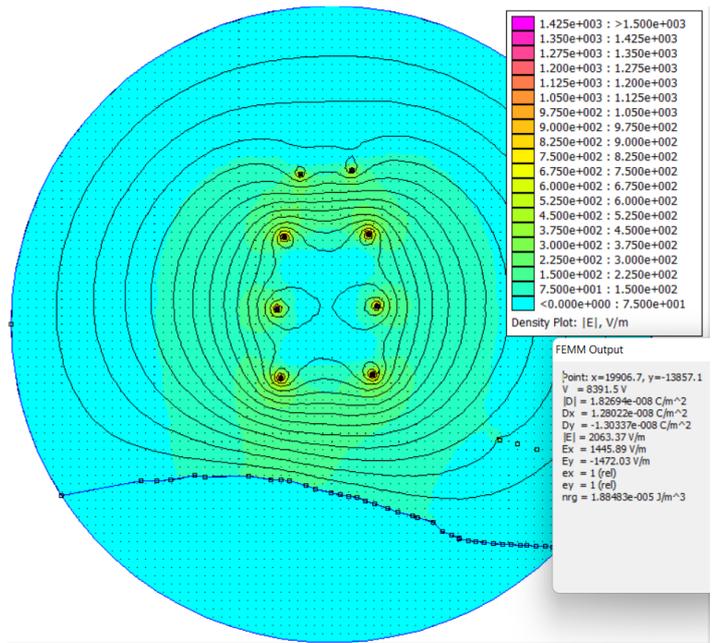


Figura 60 Perfil propuesto a 15 metros de distancia entre líneas de 230kV y 13.8 kV

Fuente: Elaboración propia

Como parte complementaria a esta propuesta y en base al análisis de la geografía encontrada en el lugar de estudio, sin dejar de lado vegetación y viviendas existentes, se plantea en las figuras 61 y 62, la nueva trayectoria que tendría la línea de distribución, cumpliendo de esta forma con la regulación 018/18 franjas de seguridad y distancias de seguridad entre líneas de eléctricas.

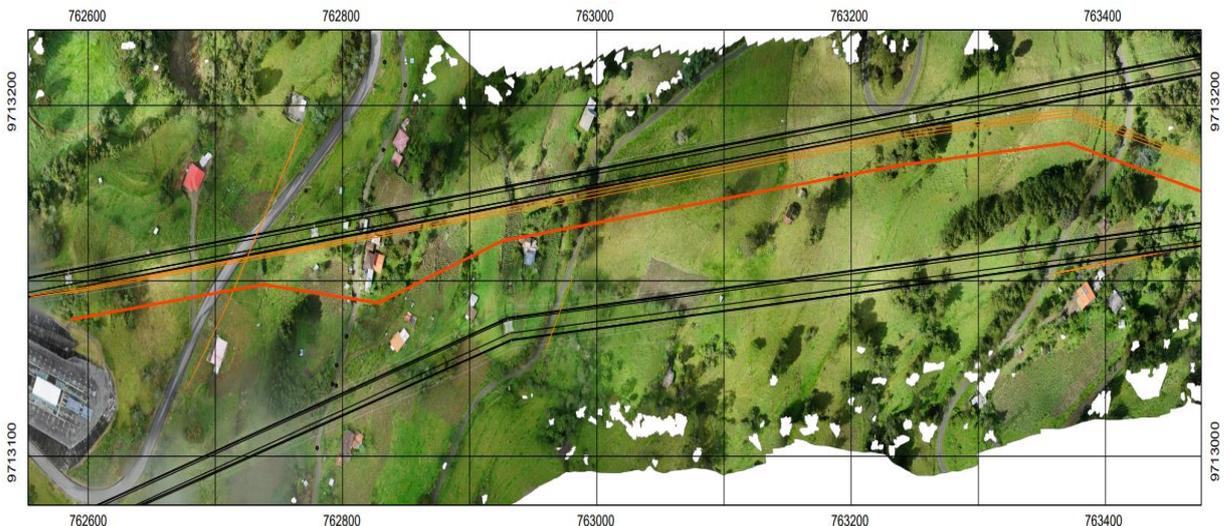


Figura 61 Ubicación propuesta para línea de distribución.

Fuente: Elaboración propia en el software Global Mapper

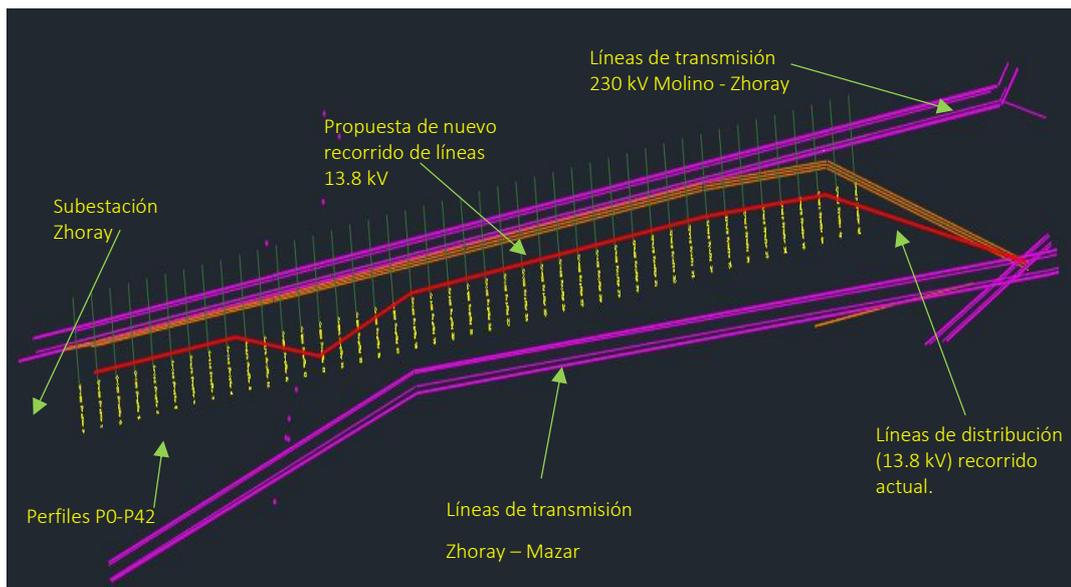


Figura 62 Ubicación propuesta para línea de distribución en formato CAD.

Fuente: Elaboración propia en el software AutoCAD

4.1.2 Análisis de problemática existente.

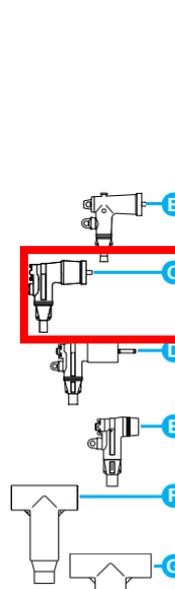
Una de las consecuencias principales, motivo del estudio realizado y respaldado en las ordenes de mantenimiento correctivo número: OT 40716, OT 45974, OT 49168, OT 52208 y OT 53641, en las cuales por reiteradas ocasiones se comprueba la perforación de un conector tipo bota en la fase A, que es alimentada por la línea Mazar 13.8 kV. Cuyo resultado a las órdenes de trabajo es: la presencia de una descarga eléctrica, que deterioro el aislamiento del terminal tipo bota, fotografía 3. Otro diagnostico plantea la existencia de incidencia electromagnética entre las líneas de 230 kV (Molino – Zhoray) y las líneas 13.8 kV (Mazar - Zhoray), por motivo de cercanía entre líneas.



Fotografía 3 Terminal tipo bota deteriorado.

Fuente: Cortesía de Transelectric EP

En base al segundo diagnóstico, en el cual, se cree la existencia de incidencia electromagnética entre las líneas de transmisión y distribución. Usaremos los datos técnicos del equipo conector tipo bota en las figuras 63 y 64. Para contrastarlos con los resultados obtenidos en las simulaciones de los escenarios más cercano figura 42 (P21) entre las líneas (230kV - 13.8kV) y el perfil propuesto figura 60 (P/propuesto), como una primera solución a esta problemática existente.



Bushing Interface	Voltage Class	Interface Description	Standard No Figure No.
A 200 AMP DEEPWELL EQUIPMENT BUSHING	15kV, 25kV and 35kV	200 AMP Bushing Well Interface 8.3kV, 15.2kV, 21.1kV	A IEEE 386-1995 Fig. 3
B 200 AMP LOADBREAK INSERT	15kV	200 AMP Loadbreak 8.3kV and 8.3kV/14.4kV	B IEEE 386-1995 Fig. 5
C 200 AMP LOADBREAK INSERT	25kV	200 AMP Loadbreak 15.2kV and 15.2kV/26.3kV	C IEEE 386-1995 Fig. 7, Note 3
D 200 AMP LOADBREAK INSERT	35kV	200 AMP Loadbreak Interface No. 2 21.1kV and 21.1kV/36.6kV	D IEEE 386-1995 Fig. 7, Note 3
E 200 AMP DEADBREAK INSERT	15kV and 25kV	200 AMP Deadbreak 8.3kV and 15.2kV	E IEEE 386-1985 Fig. 4
F 600 SERIES EQUIPMENT BUSHING	15kV and 25kV	600 AMP Deadbreak Interface No.1 8.3kV and 15.2kV	F IEEE 386-1995 Fig.11, Note 1
G 600 SERIES EQUIPMENT BUSHING	35kV	600 AMP Deadbreak Interface No.1 21.1kV	G IEEE 386-1995 Fig.13, Note 2

Figura 63 Datos técnicos terminal tipo bota («CODO APARTARRAYOS OCC 25KV 200A ELASTIMOLD - 273ESA18 273ESA18», s. f.).

Fuente: Tomado del catálogo Elastimold

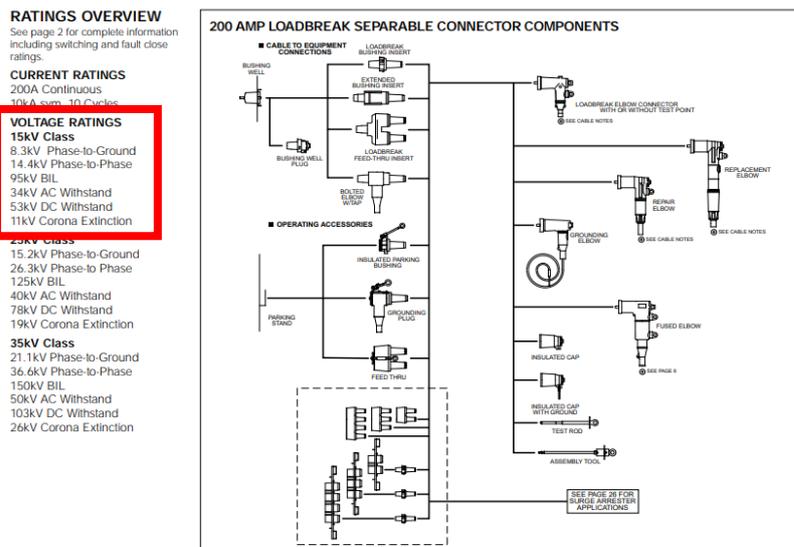
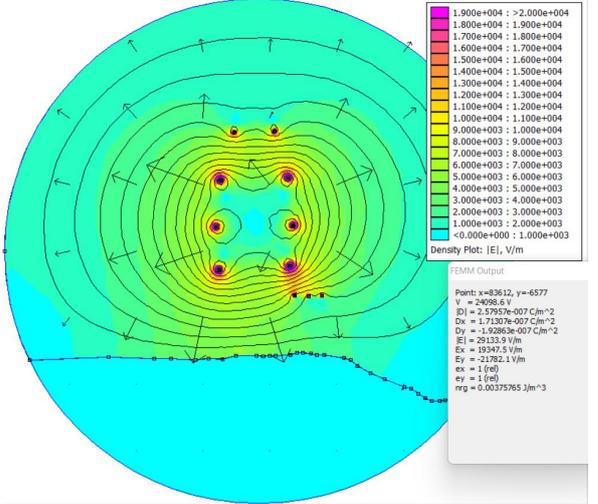
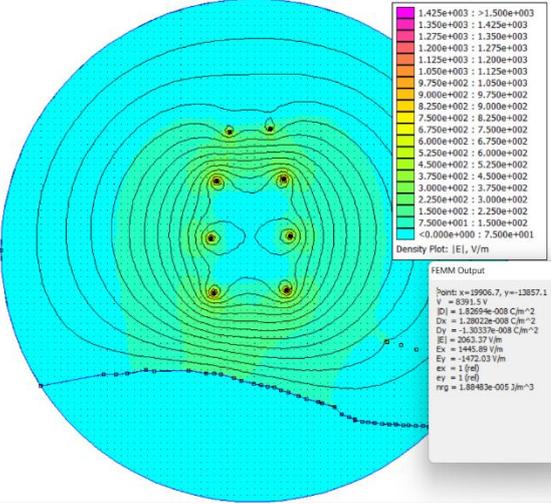


Figura 64 Componentes del conector y clasificación de voltajes («CODO APARTARRAYOS OCC 25KV 200A ELASTIMOLD - 273ESA18 273ESA18», s. f.).

Fuente: Tomado del catálogo Elastimold

Tabla 26 Perfil 21 y Perfil propuesto, contraste de imágenes y valores.

Perfil P21, Escenario más cercano entre líneas de 230kV y 13.8kV.	Perfil propuesto, Escenario líneas de 13.8kV, fuera de la franja de servidumbre de las líneas de 230kV.
	
Voltaje en el conductor: 7.967 V Voltaje simulado: 24.098,6 V Campo eléctrico: 29.133,9 V/m	Voltaje en el conductor: 7.967 V Voltaje simulado: 8.391,5 V Campo eléctrico: 2.063,37 V/m

Fuente: Elaboración propia

La tabla 27, en su última columna refleja de forma clara, de acuerdo al perfil en análisis, su respectivo porcentaje de utilización, comparado con el rango de tolerancia del conector tipo bota. Sea este en conexión fase – tierra o fase – fase.

Tabla 27 Resultados porcentuales entre los perfiles P21 y P/propuesto, con relación a la tolerancia del conector tipo bota.

Perfil y distancia entre líneas (230kV-13.8kV).	Tipo de conector.	Rangos de voltaje.	Porcentaje de tolerancia máxima utilizada del conector tipo bota.
P21 - 4.60 mts.	Tipo bota 25kV Class	15.2 kV fase – tierra 26.3 kV fase - fase	158 % 91,63%
P/Propuesto – 15 mts.	Tipo bota 25kV Class	15.2 kV fase – tierra 26.3 kV fase - fase	55,21% 31,91%

Fuente: Elaboración propia

4.1.3 Análisis perfil P21.

De acuerdo a los valores porcentuales que refleja la tabla 27, en la conexión fase – tierra, la capacidad de tolerancia máxima del conector tipo bota es superada en gran magnitud reflejando un porcentaje superior del 158%, lo cual significa que la vida útil del conector es ampliamente disminuida. Mientras que en la conexión fase – fase la incidencia de campo eléctrico llega hasta el 91,63% del máximo de tolerancia. Es importante resaltar que los valores obtenidos en las simulaciones son de análisis estacionario, lo que significa que el estudio estará limitado a valores fijos en los conductores de las líneas de transmisión como en las de distribución, sin embargo se debe considerar, que en la situación real, existen algunos factores como: variaciones de voltaje y cambios climáticos, que modifican estos valores, siendo estos parte de la propia naturaleza de la transmisión de energía eléctrica y que también se los debería presente.

4.1.4 Análisis Perfil P/Propuesto.

Con referencia al perfil propuesto que cumple con las especificaciones de regulación vigente (018/18), podemos constatar una realidad distinta, ya que al ver sus porcentajes de incidencia de campo eléctrico no supera el 56%, en cualquiera de sus dos tipos de conexiones (fase - tierra y fase - fase), y que a su vez incrementa el nivel de confiabilidad de la línea de distribución, lo que convierta a esta propuesta en las más opcionada.

4.2 Propuesta dos

Para la propuesta dos, de solución a la incidencia de campos electromagnéticos entre las líneas de transmisión y distribución. Se hace uso de la información obtenida en la tabla 20, pero en esta ocasión no se considerarán los datos de georreferencia como muestra la tabla 28, en la cual se encuentra 16 perfiles que están dentro de la distancia de seguridad calculada y que también es parte de la teoría planteada en la regulación 018/18 Proyecto de regulación franjas de servidumbre y distancias de seguridad entre las redes eléctricas. Ya que al contar con una distancia de seguridad calculada como filtro de referencia del total de los perfiles obtenidos (P0-P42), y sabiendo que al igual que en la primera propuesta, se cuenta con el aval de la regulación vigente (018/18), se propone la reubicación de todos los perfiles que están dentro de los 8,33 metros de distancia de seguridad calculada en el punto 3.6, entre el conductor de la línea de transmisión y la de distribución.

Tabla 28 Perfiles que están dentro de la distancia de seguridad calculada (resumida)

Perfiles dentro de la distancia de seguridad calculada.	
N° perfil	Distancia entre líneas
P16	8,14 m
P17	7,50 m
P18	6,83 m
P19	6,12 m
P20	5,38 m
P21	4,60 m
P22	4,71 m
P23	5,12 m
P24	5,56 m
P25	6,02 m
P26	6,52 m
P27	7,04 m
P28	7,59 m
P29	8,11 m
P39	7,64 m
P40	7,26 m

Fuente: Elaboración propia

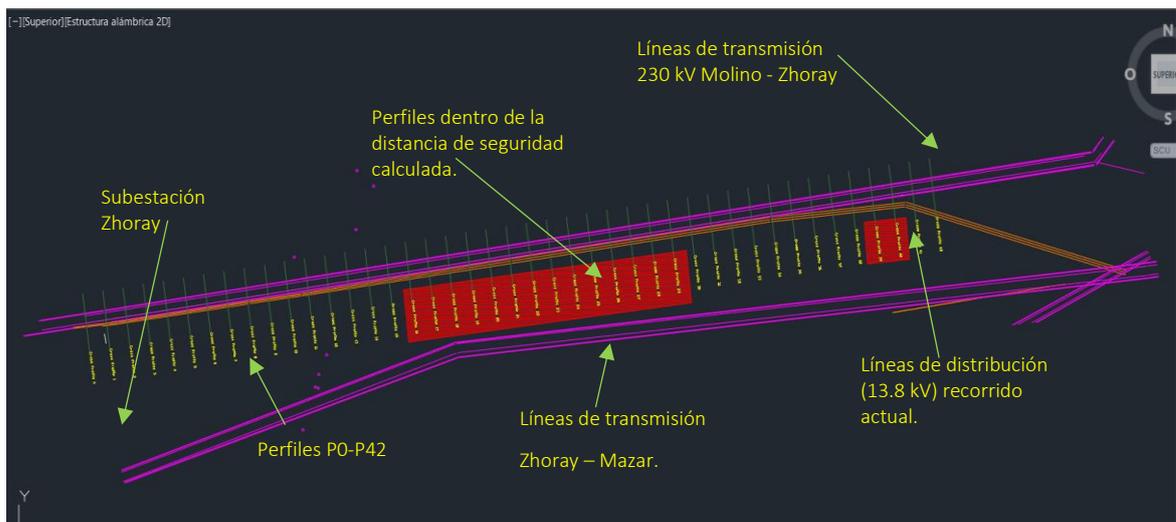


Figura 65 Perfiles que están dentro de la distancia de seguridad calculada.

Fuente: Elaboración propia en el software AutoCAD

La tabla 29, muestra los valores obtenidos en las simulaciones de los tres escenarios planteados en el punto 3.7.1, adicional a estos escenarios, se presenta un cuarto escenario que cumple con la distancia de seguridad calculada de acuerdo con la regulación 018/18, y que es tomada como una propuesta alternativa, de solución a este estudio de incidencia de campos electromagnéticos entre las dos líneas conocidas (230kV – 13.8kV). En la columna final encontramos de forma porcentual el valor de incidencia de campo eléctrico en los diferentes perfiles y notamos que en el perfil P38 a una distancia de 8,34 m, existe una incidencia aproximada del 65,32%. Y recordando que el voltaje nominal de la línea de distribución es de 7.967 V, mientras que en la simulación obtenemos un voltaje de 13.171 V.

Tabla 29 Resultados porcentuales de incidencia de campo eléctrico.

Perfil	Distancia entre líneas (230kV - 13,8kV)	Voltaje constante en líneas de distribución (V).	Voltaje aproximado en el conductor de distribución, que está más cercano a la línea de transmisión (V).	Porcentaje de voltaje inducido desde las líneas de transmisión hacia la línea de distribución.
P42	19,39 m	7.967 V	8.172,69 V	2,58%
P1	12,85 m	7.967 V	9.727,71 V	22,10%
P21	4,60 m	7.967 V	24.098,6 V	202,48 %
P38	8,34 m	7.967 V	13.171 V	65,32%

Fuente: Elaboración propia

La figura 66, muestra en base a un diagrama de barras los niveles de incidencia de campo eléctrico en los diferentes escenarios propuestos para el análisis.

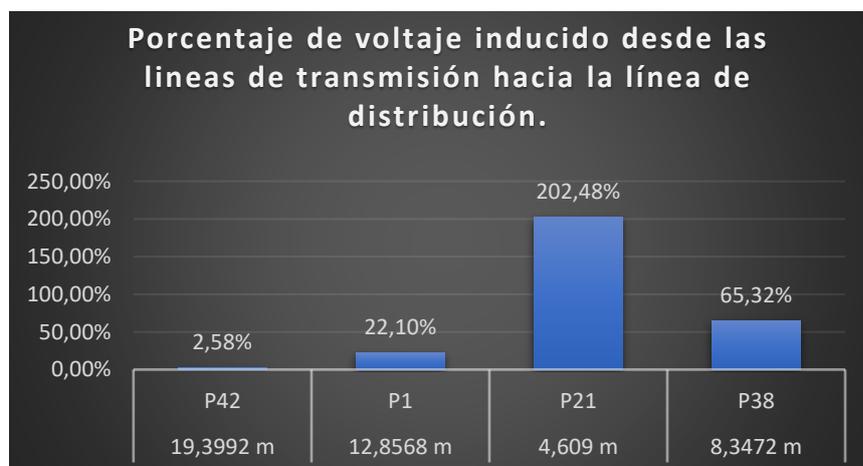
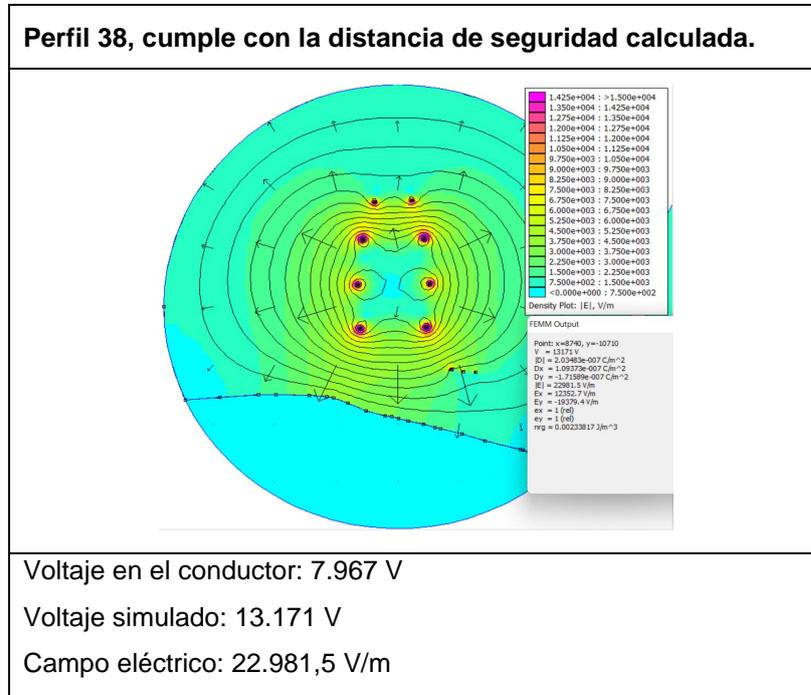


Figura 66 Niveles porcentuales de incidencia de campo eléctrico en los perfiles P42, P1, P21 y P38.

Fuente: Elaboración propia

La tabla 30, muestra de forma clara los valores obtenidos en la simulación del perfil P38, que se encuentra a una distancia de 8,34 metros de distancia entre las líneas de transmisión y distribución.

Tabla 30 Valores en simulación del perfil 38, cumple con la distancia calculada.



Fuente: Elaboración propia

Repitiendo el proceso de la primera propuesta, contrastaremos en la tabla 31, los valores aproximados porcentuales de tolerancia máxima utilizada del conector tipo bota, en el escenario planteado a 8,34 mts, de distancia entre líneas, teniendo presente que el voltaje de línea en el conductor de circuito de distribución es de 7.967 Voltios por ser un circuito trifásico. Obtenemos un voltaje aproximado simulado en el mismo conductor de 13.171 V con un campo eléctrico de 22.981,5 V/m. En este sentido obtenemos el valor porcentual en los dos rangos de voltaje, que soporta el conector tipo bota que alimenta la fase A, del primario del transformador alimentador de circuitos auxiliares de la subestación Zhoray.

Tabla 31 Resultados porcentuales del perfil P38, con relación a la tolerancia del conector tipo bota

Perfil y distancia entre líneas (230kV-13.8kV).	Tipo de conector.	Rangos de voltaje.	Porcentaje de tolerancia máxima utilizada del conector tipo bota.
P38 - 8.34 mts.	Tipo bota 25kV Class	15.2 kV fase – tierra	86,65 %
		26.3 kV fase - fase	50,08 %

Fuente: Elaboración propia

4.2.1 Análisis perfil P38.

El análisis de este perfil se fundamenta en la tabla 31, que muestra los porcentajes de utilización máxima del conector tipo bota, de acuerdo a los valores obtenidos en la simulación de campo eléctrico, en el perfil 38. En el rango de voltaje fase – tierra está sobre el 86,65%, un rango alto, si se tiene presente las variaciones en las líneas de transmisión y distribución. Mientras que el rango de voltaje fase – fase, esta sobre el 50,08% del máximo de tolerancia del conector tipo bota.

La figura 67, muestra en un diagrama de barras de los perfiles que están dentro de la distancia de seguridad calculada, en base a sus valores de simulación.

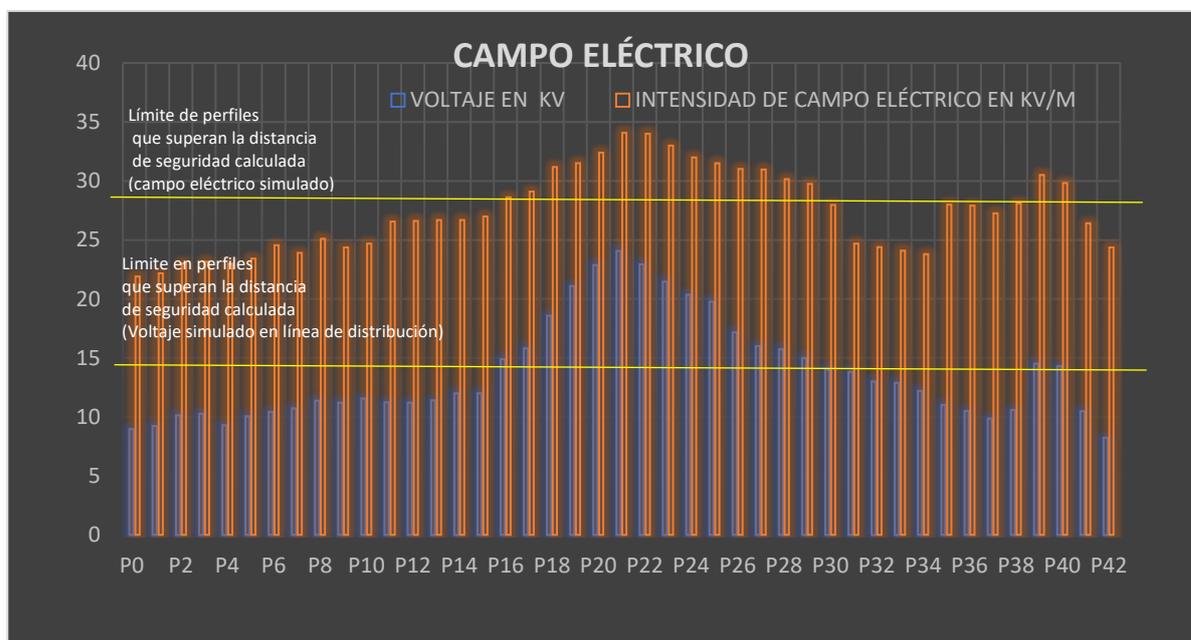


Figura 67 Perfiles que sobrepasan los límites de la distancia de seguridad calculada.

Fuente: Elaboración propia

Sustentados en la figura 67 y respaldados por los resultados de la simulación de campos electromagnéticos en el perfil P38, se propone que al realizar la reubicación de los 16 perfiles que están dentro de la distancia de seguridad calculada, se lograría estar dentro del rango de tolerancia del conector tipo bota y a su vez dentro de la regulación vigente, que avala esta distancia calculada con relación a conductores energizados.

CAPÍTULO 5

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

La confiabilidad del servicio continuo de transporte de energía eléctrica, ya sea de transmisión, media tensión y baja tensión, está relacionado a las normativas nacionales e internacionales referentes a las distancias de seguridad estipuladas. Y haciendo uso de estas normativas, se calculó una distancia de seguridad vertical en conductores energizados de 8,33 metros, con relación a las líneas de 230kV. Y en el caso de las líneas de distribución, se debe respetar una distancia de 6 metros de franja de servidumbre.

Posterior al cálculo para la obtención de la distancia de seguridad vertical en conductores energizados, se obtiene en un rango de precisión de ± 5 cm, la ubicación en las tres coordenadas (x, y, z), de los conductores en las líneas de transmisión y distribución. Se debe mencionar que esta georreferenciación de los conductores eléctricos, ha sido posible gracias a las bondades que presentan las nuevas metodologías, aplicadas a nivel mundial para el levantamiento topográfico de redes de transmisión eléctrica y en específico el uso de naves aéreas no tripuladas (dron), al igual que el uso del sensor LiDAR, el mismo que muestra una amplia gama de aplicaciones en temas de georreferenciación.

Obtenidos las dos variables mencionadas (distancia de seguridad y ubicación de conductores de 230kV – 13,8 kV), se realizó en escala natural la simulación de campos electromagnéticos en el software FEMM, de todos los perfiles transversales del trayecto en el que van juntas las líneas transmisión y distribución. Corroborando de esta forma, el comportamiento de los campos eléctricos y magnéticos entre las dos líneas, cuyos resultados se visualizan en las figuras 56 y 59, respectivamente. Paso seguido a la obtención de las simulaciones, se identificó los perfiles en los cuales, se infringía la distancia de seguridad calculada y donde se pudo constatar la incidencia progresiva de los campos electromagnéticos de acuerdo a la cercanía entre las líneas de transmisión y distribución. Llegando hasta el punto más crítico, con una distancia de 4,60 metros entre ellas, lo que arrojó como resultado en la simulación un voltaje aproximado en la línea de distribución de 24.098,6 V, con un campo eléctrico de 29.133,9 V/m.

Sujetos al entorno de estudio, se comprueba que en base a los resultados obtenidos en los procesos de: levantamiento topográfico, cálculo y simulación, que existe una incidencia de campos electromagnéticos, con mayor impacto está sobre las líneas de distribución y que son provenientes de las líneas de transmisión. Aquella sobre tensión provocada por el campo electromagnético mencionado es de tipo permanente, por su ubicación geográfica, es decir, por su cercanía entre las líneas. Sin embargo, se conoce que el comportamiento de una línea

de transmisión varía en sus valores de transporte de energía eléctrica, producto de las descompensaciones en el sistema nacional interconectado o también por agentes de tipo climatológico que influyen directamente sobre la transmisión de energía eléctrica.

Finalmente, y en consecuencia con la selección de perfiles topográficos que están infringiendo la distancia de seguridad calculada para conductores energizados, tabla 28. Y siendo estos en número 16, encontramos una distancia de 320 metros lineales, en los cuales las líneas de distribución están infringiendo la distancia de seguridad calculada y sugerida por la regulación ARCONEL 018/18, referente a las líneas de transmisión. Reflejando un aproximado del 40 % en el cual la línea de distribución está dentro del perímetro de la distancia de seguridad calculada. Ahora considerando la distancia de seguridad de una línea de transmisión de 230 kV, con respecto a su franja de servidumbre, la línea de distribución en su totalidad desde el perfil P0 - P42 está dentro de la distancia mínima establecida de 15 metros, se considera un incumplimiento en este sentido.

5.2 Recomendaciones

Se recomienda en base a la primera propuesta de solución planteada en el punto 3.12.1. Considerar los dos siguientes aspectos importantes.

Primero

Respetar las franjas de servidumbre, establecidas en la regulación ARCONEL 018/18, en el cual plantea una franja de servidumbre de 30 metros para líneas de transmisión de 230kV, 15 metros a cada lado de la línea de transmisión. Es importante también mencionar que, por la cercanía entre las líneas, cualquier tipo de trabajo de mantenimiento o maniobra en las líneas de distribución es un gran riesgo para el personal que lo ejecute, esto sin contar con alto índice de radiación electromagnética al cual estaría expuesto.

Segundo

En base a las simulaciones realizadas a nivel franja de servidumbre, a los 15 metros, podemos constatar que los rangos de incidencia de campos electromagnéticos son inferiores a los demás escenarios, como lo muestra la tabla 26, entre el perfil más cercano (P21), y el perfil propuesto, en el cual encontramos valores de voltaje simulados de: 8.391,5 V y un campo eléctrico de: 2.063,37 V/m. Lo que representa un 5.33% de incidencia de campo eléctrico, sobre la línea de distribución, tabla 25.

Es importante también mencionar que en base al análisis de la problemática existente. Esta propuesta está enfocada en precautelar la integridad de los componentes de la línea de distribución, ya sean aisladores, conectores tipo bota, al igual que el circuito primario del

transformador de circuitos auxiliares, al cual llega esta línea. El considerar hacer uso de este análisis en pro de la confiabilidad del sistema de distribución y del fiel cumplimiento de la regulación vigente.

La siguiente recomendación esta direccionada a la segunda propuesta de solución, planteada en el punto 3.12.2, la misma que también está recomendada por la regulación ARCONEL 018/18, pero en base a la distancia de seguridad vertical calculada para conductores energizados. Utilizando como referencia para el cálculo de dicha distancia, las líneas de transmisión de 230kV. Posterior a conocer esta distancia, la misma que es de 8,33 metros, podemos constatar que los valores obtenidos en la simulación de campos electromagnéticos en el perfil 38, el mismo que cumple con esta distancia de seguridad, se obtiene los siguientes valores: 13.171V y un campo eléctrico de 22.981,5 V/m, como lo detalla la tabla 22. Obteniendo un nivel de incidencia de campo eléctrico, desde las líneas de transmisión hacia las de distribución del 65,32%, tabla 29.

Sabiendo que esta propuesta esta direccionada para que las líneas de distribución trabajen al límite de distancia de seguridad calculada con referencia a las de transmisión, se debe tener presente que, al optar por esta propuesta, en nivel de confiabilidad de las líneas de distribución estará condicionado a las variaciones que puedan presentar las líneas de transmisión. Teniendo presente los valores obtenidos en la simulación de este escenario (P38) y de acuerdo al contraste de valores mostrado en la tabla 31, podemos darnos cuenta que el sistema de distribución estaría trabajando al 86,65 % de su capacidad de tolerancia, referente al nivel de aislamiento del conector tipo bota, el mismo que ha sido repuesto en un par de ocasiones como se explica en el punto 3.12.1.2. Si bien es cierto esta propuesta estaría dentro de los parámetros de tolerancia del conector tipo bota, lo cual sería una solución a la problemática existente, se estaría poniendo en riesgo a corto o mediano plazo, el resto de componentes que forman parte de la línea de distribución.

6. Referencias

- 01.-Parte-1-Informe-Anual-2018.pdf*. (s. f.). Recuperado 31 de enero de 2022, de <http://www.cenace.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2019/06/01.-Parte-1-Informe-Anual-2018.pdf>
- 5.-PLAN-DE-EXPANSION-DE-LA-TRANSMISION.pdf*. (s. f.). Recuperado 31 de enero de 2022, de <https://www.recursoyenergia.gob.ec/wp-content/uploads/2020/01/5.-PLAN-DE-EXPANSION-DE-LA-TRANSMISION.pdf>
- 018-18-Proyecto-de-Regulacion-Franjas-de-Servidumbre-y-distancias-de-seguridad-entre-las-redes-electricas.pdf*. (s. f.). Recuperado 1 de febrero de 2022, de <https://www.regulacionelectrica.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2018/07/018-18-Proyecto-de-Regulacion-Franjas-de-Servidumbre-en-lineas-del-servicio-de-energia-electrica-y-distancias-de-seguridad-entre-las-redes-electricas-y-edificaciones.pdf>
- AA 450_DS_EN.pdf*. (s. f.). Recuperado 16 de febrero de 2022, de https://www.chcnav.com/uploads/AA%20450_DS_EN.pdf
- BB4_DS_EN.pdf*. (s. f.). Recuperado 16 de febrero de 2022, de https://www.chcnav.com/uploads/BB4_DS_EN.pdf
- Cabezas Rubio, K. D., & Jiménez Corrales, P. D. (2019). *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*. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/20614>

CODO APARTARRAYOS OCC 25KV 200A ELASTIMOLD - 273ESA18 273ESA18.

(s. f.). *Productos Elastimold*. Recuperado 13 de junio de 2022, de

<https://elastimoldmexico.com/producto/codo-apartarrayos-occ-25kv-200a-elastimold-273esa18-273esa18/>

Company, G. E., & UHV, G. E. C. P. (1982). *Transmission Line Reference Book, 345 KV and Above*. Electric Power Research Institute.

DNTI. (s. f.). *Suplemento al Registro Oficial No. 41*. Recuperado 15 de febrero de 2022,

de <https://www.registroficial.gob.ec/index.php/registro-oficial-web/publicaciones/suplementos/item/5199-suplemento-al-registro-oficial-no-41>

El campo eléctrico (artículo). (s. f.). Khan Academy. Recuperado 4 de febrero de 2022,

de <https://es.khanacademy.org/science/electrical-engineering/ee-electrostatics/ee-electric-force-and-electric-field/a/ee-electric-field>

Espa, A. (s. f.). *Electromagnetismo (Schaum)—Joseph A. Edminister—1ed*. Recuperado 16 de febrero de 2022, de

https://www.academia.edu/16477732/Electromagnetismo_Schaum_Joseph_A_Edminister_1ed

Espinoza, J. (s. f.). *Física para ciencias e ingeniería con Física Moderna. Volumen 2*.

Recuperado 15 de febrero de 2022, de

https://www.academia.edu/20092090/Fisica_para_ciencias_e_ingenieria_con_Fisica_Moderna_Volumen_2

Generación. (s. f.-a). Recuperado 31 de enero de 2022, de

<https://www.celec.gob.ec/index.php/115-informacion-general/1770-generacion>

Generación. (s. f.-b). Recuperado 31 de enero de 2022, de

<https://www.celec.gob.ec/index.php/115-informacion-general/1770-generacion>

Georreferenciación.pdf. (s. f.). Recuperado 10 de febrero de 2022, de

https://www.fceia.unr.edu.ar/gps/cursos/Georreferenciacion_2019.pdf

Hayt, W. H. (s. f.). *TEORIA ELECTROMAGNETICA William H. Hayt*. Recuperado 15

de febrero de 2022, de

https://www.academia.edu/31552455/TEORIA_ELECTROMAGNETICA_William_H_Hayt

I90 pro_DS_EN.pdf. (s. f.). Recuperado 16 de febrero de 2022, de

https://www.chcnave.com/uploads/i90%20pro_DS_EN.pdf

LIDAR. (2022). En *Wikipedia, la enciclopedia libre*.

<https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=LIDAR&oldid=141586536>

Manual42.pdf. (s. f.). Recuperado 16 de febrero de 2022, de

<https://www.femm.info/Archives/doc/manual42.pdf>

Peñafiel et al. - FUNDAMENTOS DEL SISTEMA GPS Y APLICACIONES EN LA

T.pdf. (s. f.). Recuperado 12 de febrero de 2022, de

<http://www.rutasnavarra.com/GPS/Teoria/GPSavanzado.pdf>

Sánchez, C. (2017). *VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS: DESCRIPCIONES*

GENERALES Y APLICACIONES. 1, 2017.

Transmisión. (s. f.-a). Recuperado 31 de enero de 2022, de

<https://www.celec.gob.ec/index.php/115-informacion-general/1768-transmision>

Transmisión. (s. f.-b). Recuperado 31 de enero de 2022, de

<https://www.celec.gob.ec/index.php/115-informacion-general/1768-transmision>

Zafaruddin, M. (s. f.). *Of the Requirements for the Degree*. 143.

7. Anexos

Anexo A

SPECIFICATIONS

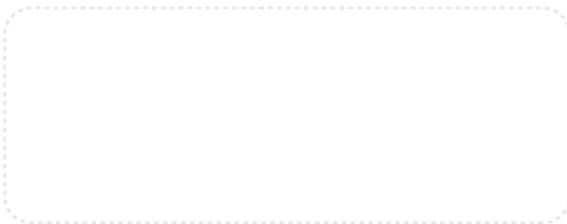
GNSS Performance ⁽¹⁾		Communication	
Channels	336 channels	Network modem	Integrated 4G modem LTE (FDD): B1, B2, B3, B4, B5, B7, B8, B20 DC-HSPA+/HSPA+/HSPA/UMTS: B1, B2, B5, B8 EDGE/GPRS/GSM 850/900/1800/1900MHz
GPS	L1C, L1C/A, L2E, L2C, L5	Wi-Fi	802.11 b/g/n, access point mode
GLONASS	L1C/A, L2 C/A, L3 CDMA	Bluetooth®	v4.1
Galileo	E1, E5a, E5b, E5AltBOC, E6	Ports	1 x 7-pin LEMO port (external power, RS-232) 1 x USB Type-C port (data download, firmware update) 1 x UHF antenna port (TNC female)
BeiDou	B1, B2, B3	UHF radio	Standard Internal Rx/Tx: 410 - 470 MHz Transmit Power: 0.5 W to 2 W Protocol: CHC, Transparent, TT450, SATEL3AS Link rate: 9600 bps to 19200 bps Range: 5 km under optimal conditions
SBAS	L1C/A, L5	Data formats	RTCM 2.x, RTCM 3.x, CMR, CMR+, SCMRX input and output HCN, HRC, RINEX 2.11, 3.02 NMEA 0183 output NTRIP Client, NTRIP Caster
QZSS	L1 C/A, L1 SAIF, L2C, L5, LEX	Data storage	32 GB internal memory
IRNSS	L5	Electrical	
L-BAND	RTX®	Power consumption	5 W (depending on user settings)
GNSS Accuracies ⁽²⁾		Li-ion battery capacity	2 x 3400 mAh, 7.4 V
Real time kinematics (RTK)	Horizontal: 8 mm + 1 ppm RMS Vertical: 15 mm + 1 ppm RMS Initialization time: < 10 s Initialization reliability: > 99.9%	Operating time on internal battery ⁽⁴⁾	UHF receive/transmit (0.5 W): 5 h to 8 h Cellular receive only: up to 9 h Static: up to 10 h
Post-processing kinematics (PPK)	Horizontal: 2.5 mm + 1 ppm RMS Vertical: 5 mm + 1 ppm RMS	External power input	9 V DC to 28 V DC
Post-processing static	Horizontal: 2.5 mm + 0.5 ppm RMS Vertical: 5 mm + 0.5 ppm RMS	 <p>*All specifications are subject to change without notice. (1) Compliant, but subject to availability of BDS ICD and Galileo commercial service definition. GLONASS L3, BDS B3 and Galileo E6 will be provided through future firmware upgrade. (2) Accuracy and reliability are determined under open sky, free of multipaths, optimal GNSS geometry and atmospheric condition. Performances assume minimum of 5 satellites, follow up of recommended general GPS practices. (3) Typical observed values. (4) Battery life is subject to operating temperature.</p>	
Code differential	Horizontal: 0.25 m RMS		
Autonomous	Horizontal: 1 m RMS Vertical: 1.5 m RMS	Hardware	
Positioning rate	Up to 50 Hz	Size (L x W x H)	159 mm x 150 mm x 110 mm (6.3 in x 5.9 in x 4.3 in)
Time to first fix ⁽³⁾	Cold start: < 45 s Hot start: < 10 s Signal re-acquisition: < 1 s	Weight	1.26 kg (2.77 lb)
RTK tilt -compensated	Additional horizontal pole-tilt uncertainty typically less than 10 mm + 0.7 mm/° tilt	Environment	Operating: -40 °C to +65 °C (-40 °F to +149 °F) Storage: -40 °C to +85 °C (-40 °F to +185 °F)
Hardware		Humidity	100%
Ingress protection	IP67 waterproof and dustproof, protected from temporary immersion to depth of 1 m	Shock	Survive a 2-meter pole drop
Tilt sensor	Calibration-free IMU for pole-tilt compensation. Immune to magnetic disturbances. EBubble leveling	Front panel	4 status LED 1.46" OLED Display
Certifications			
FCC Part 15 (class B Device), FCC Part 22, 24, 90; CE Mark; NGS Antenna Calibration; MIL STD 810G, Method 514.7			

Figura 68 GPS Diferencial Datos técnicos.

Fuente: (i90 pro_DS_EN.pdf, s. f.)

Anexo B

SPECIFICATIONS

General system performance		Remote controller	
Type	Quadcopter with 4 propellers	Operating frequency	2.400 GHz to 2.483 GHz
Structure	Carbon fiber, quickly release design	Max. transmission distance	Specialized UAV frequency, anti-disturb feature, radius 7 km
Assembly time	Start ≤ 2 min / finish ≤ 2 min	Video output port	HDMI, SDI, USB
Empty weight	10.9 kg	Operating temperature	-10 °C to +40 °C
Max. payload	7.1 kg	Battery	6000 mAh LiPo 2S
Max. takeoff weight	28.0 kg (with battery)	Electrical	
Dimensions of instrument	110.0 × 110.0 × 44.0 cm 43.3" × 43.3" × 17.32"	Standard battery	4x Li-Polymer batteries, 2200 mAh
Transport container	Water, dust and quakeproof	Voltage	22.2 V
Dimensions of unit in container	94.0 × 64.0 × 50.0 cm 37.0" × 25.2" × 19.7"	Energy	501.6 Wh
Flight Control System	Dual DJI A3	Connectors	XT60 XT-60 XT 60 female
Remote control SW	DJI GS PRO	Supported payload	
Operating temperature	-10 °C to +40 °C	RGB camera	CHC AS-C420 (calibrated Sony A7 RII) 7952 x 5304, 42.4 MP, 5 fps
Control system	Dual-frequency GNSS navigation, dual redundancy sensor design, fully-automatic work mode		CHC AS-C240 (calibrated Sony A6000) 6000 x 4000, 24.3 MP, 11 fps
Hovering accuracy	1 cm + 1 ppm Hz 2 cm + 1 ppm V		Other sensors, but request factory customisation and calibration
Auto-flight mode	Pre-design air route, flight height change		CHC AlphaUniXXX series
Flight performance			Riegl miniVUX and VUX-1 based scanners
Max. flight altitude MAMSL	5000 m		CHC ASXXXseries
Flight time ⁽¹⁾	55 mins with 1 kg payload 40 mins with 5 kg payload	LIDAR	3rd party LiDARS ≤7 kg weight
Max. speed	14 m/sec		
Max. ascent speed	5 m/sec		
Max. descent speed	3 m/sec		
Max. wind resistance	13.9 m/sec (level 6)		
Takeoff type	Automated takeoff and landing		

*All specifications are subject to change without notice.
(1) Flight time depends on operation mode, weather conditions, altitude and payload.

Figura 69 Dron datos técnicos

Fuente: (BB4_DS_EN.pdf, s. f.)

Anexo C

SPECIFICATIONS

General system performance	
Absolute accuracy	<10 cm Hz <5 cm V
Accuracy conditions	Without control points, @50 m flight altitude AGL
Mounting	Skyport for DJI M300 External power source with the dedicated port for other UAV/s (CHCNAV Alphaport interface)
Weight of instrument ⁽¹⁾	0.95 kg
Dimensions of instrument	12.8 × 12.8 × 6.75 cm 5.04" × 5.04" × 2.65"
Communications	1× port for GNSS antenna Skyport interface 1× USB Type-C, copy speed up to 160 Mb/s
Data storage	256 GB
Point density on UAV setup 5 m/s (18 km/h) speed	570 pts/sqm @ 50 m AGL 280 pts/sqm @ 100 m AGL
Covered area	2 km ² area by 30 mins UAV flight
Operation	One-touch acquisition or remote control via DJI M300 Smart controller enterprise
Transport box	1× protected soft bag with custom precut foam

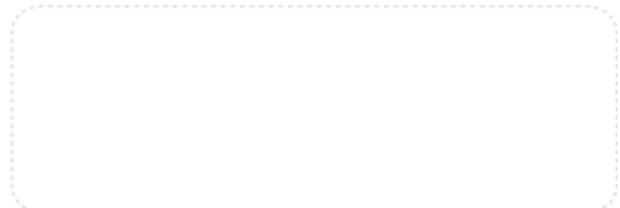
Laser scanner	
Laser class	1 (in accordance with IEC 60825-1:2014)
Max.range, reflectivity > 80% ⁽²⁾	450 m
Max.range, reflectivity > 10% ⁽²⁾	190 m
Max. returns supported	Up to 3
Accuracy ⁽³⁾	20 mm @ 20 m 30 mm @100 m
Precision ⁽⁴⁾	15 mm
Field of view	70.4° (Horizontal) × 4.5° (Vertical)
Scan rate	240 000 pts/sec (first or strongest return) 480 000 pts/sec (dual return) 720 000 pts/sec (triple return)

Positioning and orientation system	
GNSS system	Dual-frequency GNSS GPS, GLONASS, BeiDou, Galileo, sampling frequency 5 Hz
IMU update rate	500 Hz
Position accuracy NO GNSS outage	0.010 m RMS horizontal, 0.020 m RMS vertical, 0.01 degrees RMS pitch/roll, 0.04 degrees RMS heading

Imaging system	
Camera type	Built-in calibrated Camera
Resolution	6252 × 4168
Effective pixels	26 MP, 30 fps
Min. trigger interval	0.6 sec

Environmental	
Operating temperature	-20°C ~ +50°C
Storage temperature	-20°C ~ +65°C
IP rating	IP64
Humidity (operating)	80%, non-condensing
Electrial	
Input voltage	DC 12 ~ 14 V
Power consumption	32 W, min. 2A
Power source	Depending on UAV battery, or by Skyport from DJI M300

* Specifications are subject to change without notice.
(1) Weight calculated with integrated camera. (2) Typical values for average conditions. (3) Accuracy is the degree of conformity of a measured quantity to its actual (true) value. (4) Precision is the degree to which further measurements show the same results. Improved by CHCNAV COPre SW.



© 2021 Shanghai Huace Navigation Technology Ltd. All rights reserved. The CHC and CHC logo are trademarks of Shanghai Huace Navigation Technology Limited. All other trademarks are the property of their respective owners. Revision November 2021.

WWW.CHCNAV.COM | SALES@CHCNAV.COM

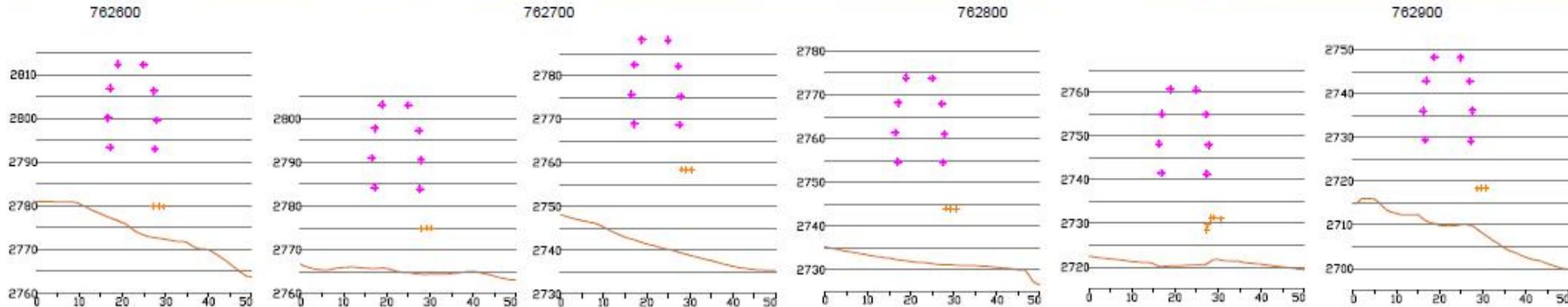
Figura 70 Sensor LiDAR datos técnicos

Fuente: (AA 450_DS_EN.pdf, s. f.).

Anexo D

Figura 71 Laminas 01,02,03,04 con ortofoto y Perfiles transversales

Fuente: Elaboración propia en el software AutoCAD Civil 3D



From Posi: 762563.268, 9713120.0 To Posi: 762570.097, 9713070.526 P0
 From Posi: 762602.911, 9713125.5 To Posi: 762609.740, 9713075.992 P2
 From Posi: 762642.554, 9713130.9 To Posi: 762649.383, 9713081.458 P4
 From Posi: 762682.197, 9713136.4 To Posi: 762689.027, 9713086.924 P6
 From Posi: 762721.840, 9713141.9 To Posi: 762728.670, 9713092.391 P8
 From Posi: 762761.483, 9713147.3 To Posi: 762768.313, 9713097.857 P10

From Posi: 762583.089, 9713122.7 To Posi: 762589.919, 9713073.259 P1
 From Posi: 762622.738, 9713128.2 To Posi: 762629.562, 9713078.725 P3
 From Posi: 762662.375, 9713133.7 To Posi: 762669.205, 9713084.191 P5
 From Posi: 762702.018, 9713139.1 To Posi: 762708.848, 9713089.658 P7
 From Posi: 762741.661, 9713144.6 To Posi: 762748.491, 9713095.124 P9

NOTAS GENERALES	OBSERVACIONES	EJEMPLOS DE REFERENCIA		REVISIONES			INGENIERIA / REGISTRO USUARIO	FIRMA	PLANO	DESCRIPCION
		N°	DESCRIPCION	N°	NATURALEZA DE LA REVISION	FECHA				
L= Sistema de coordenadas UTM83 17S ◆ Línea de Transmisión de 230 kV + Línea de Distribución a 13.8 kV										LEVANTAMIENTO DE LÍNEA DE TRANSMISIÓN 230 kV Y MEDIA TENSION 13.8 kV USANDO METODOLOGIA LIDAR
							INGENIERO / REGISTRO USUARIO CHIBO CALDA		ESCALA : 1:2000	
							REVISOR : REVISOR : APROBADO :		SERIO : TITULO : FECHA :	
										N° : FECHA : 03 de 04

762700

762800

762900

763000

9713100

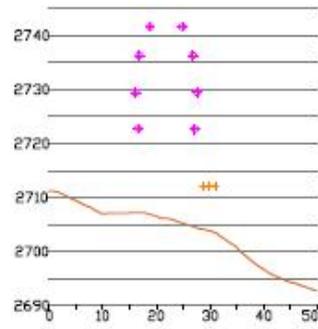


762700

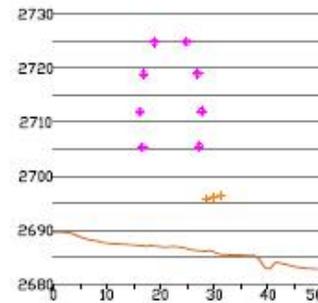
762800

762900

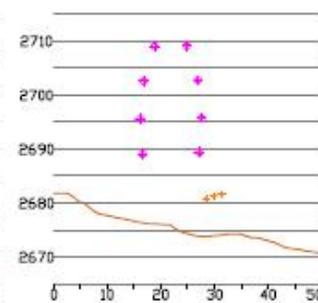
763000



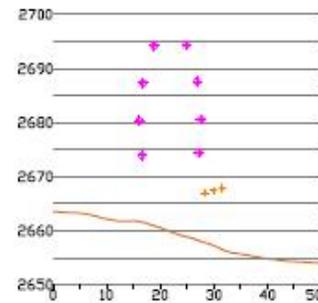
From Pos: 762781.305, 9713150.1
To Pos: 762788.134, 9713100.590
P11



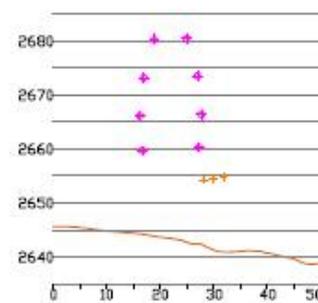
From Pos: 762820.948, 9713155.5
To Pos: 762827.777, 9713106.056
P13



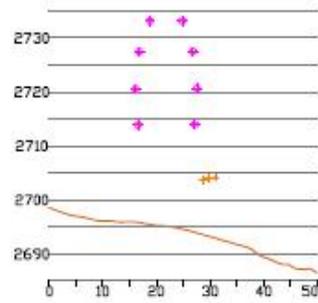
From Pos: 762860.591, 9713161.0
To Pos: 762867.420, 9713111.523
P15



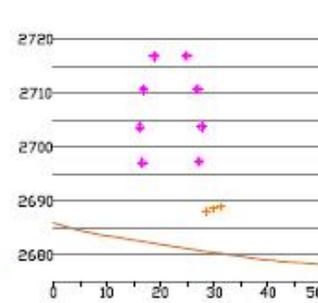
From Pos: 762900.234, 9713166.5
To Pos: 762907.064, 9713116.989
P17



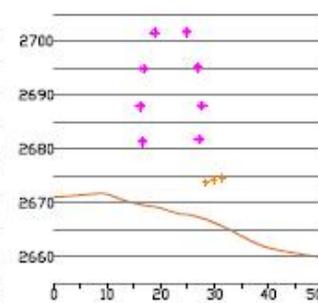
From Pos: 762939.877, 9713171.9
To Pos: 762946.707, 9713122.455
P19



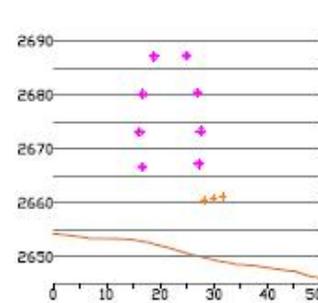
From Pos: 762801.126, 9713152.8
To Pos: 762807.956, 9713103.323
P12



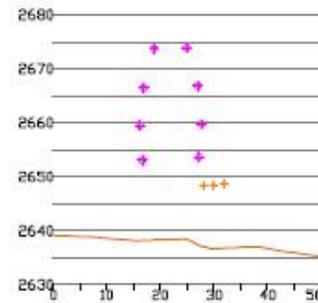
From Pos: 762840.769, 9713158.3
To Pos: 762847.599, 9713108.789
P14



From Pos: 762880.412, 9713163.7
To Pos: 762887.242, 9713114.256
P16



From Pos: 762920.056, 9713169.2
To Pos: 762926.885, 9713119.722
P18



From Pos: 762959.699, 9713174.7
To Pos: 762966.528, 9713125.188
P20

NOTAS GENERALES		OBSERVACIONES		PUNTO DE REFERENCIA		REVISIONES			INGENIERIA / REGISTRO EJECUTIVO		PLANO		DESCRIPCION		
				DESCRIPCION		NATURALEZA DE LA REVISION		FECHA		RESPONSABLE		ESCALA		REVISION	
1.- Distancia de coordenadas WGS84 - UTM		<ul style="list-style-type: none"> Linea de Transmision del 220 kV Linea de Distribucion a 13.8 kV 								INGENIERIA / REGISTRO EJECUTIVO CINARCA LTDA		ESCALA : 3:1000		DESCRIPCION : LEVANTAMIENTO DE LINEA DE TRANSMISION 220 kV Y MEDIA TENSION 13.8 kV USANDO METODOLOGIA LIDAR	
												PLANO : 42		REVISION : 01 de 04	

762900

763000

763100

763200



9713100

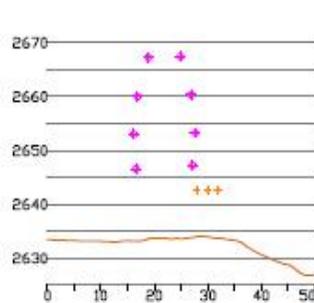
9713200

762900

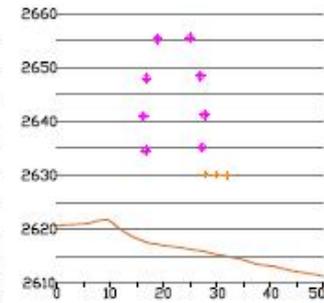
763000

763100

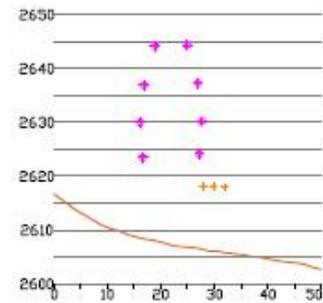
763200



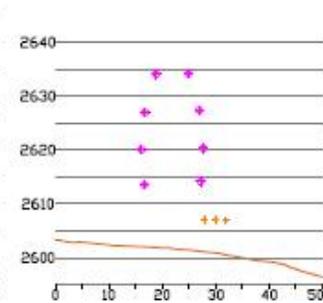
From Posi: 762979.520, 9713177.4
 To Posi: 762986.350, 9713127.921
 P21



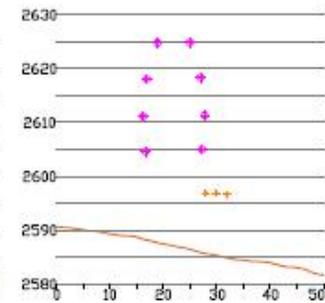
From Posi: 763019.163, 9713182.9
 To Posi: 763025.993, 9713133.388
 P23



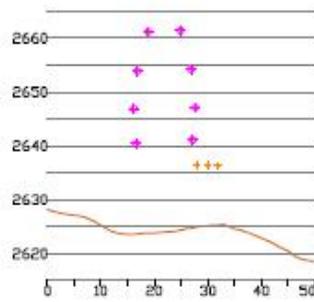
From Posi: 763058.807, 9713188.3
 To Posi: 763065.636, 9713138.854
 P25



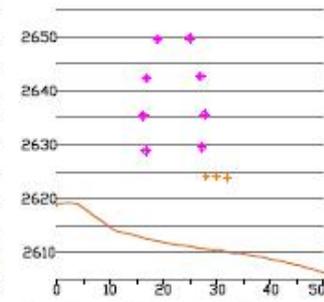
From Posi: 763098.450, 9713193.8
 To Posi: 763105.279, 9713144.320
 P27



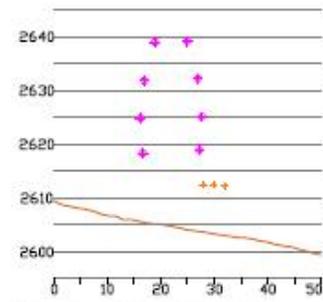
From Posi: 763138.093, 9713199.3
 To Posi: 763144.923, 9713149.786
 P29



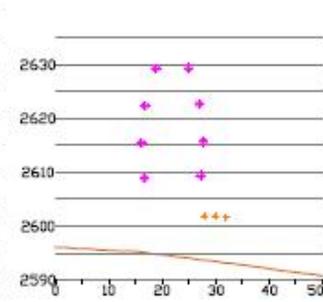
From Posi: 762999.342, 9713180.1
 To Posi: 763006.172, 9713130.654
 P22



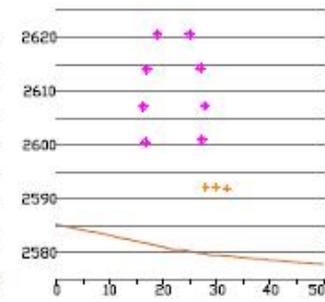
From Posi: 763038.985, 9713185.6
 To Posi: 763045.815, 9713136.121
 P24



From Posi: 763078.628, 9713191.1
 To Posi: 763085.458, 9713141.587
 P26



From Posi: 763118.271, 9713196.5
 To Posi: 763125.101, 9713147.053
 P28



From Posi: 763157.915, 9713202.0
 To Posi: 763164.744, 9713152.519
 P30

NOTAS GENERALES	OBSERVACIONES	EJEMPLOS DE REFERENCIA		REVISIONES			INGENIERIA / REGISTRO DESEAD		FIRMA	PLANO	DESCRIPCION
		#	DESCRIPCION	#	NATURALEZA DE LA REVISION	FECHA	RESPONSABLE	SENO			
1- Sistema de coordenadas de WGS84 UTM	Línea de Transmisión de 230 kV Línea de Distribución de 13.8 kV									ESCALA: 1:5000	LEVANTAMIENTO DE LÍNEA DE TRANSMISIÓN 230 KV Y MEDIA TENSIÓN 13.8 KV USANDO METODOLOGIA LIDAR
										ESCALA: 4:1	
										FECHA	NOVA: 23 de 24

9713200



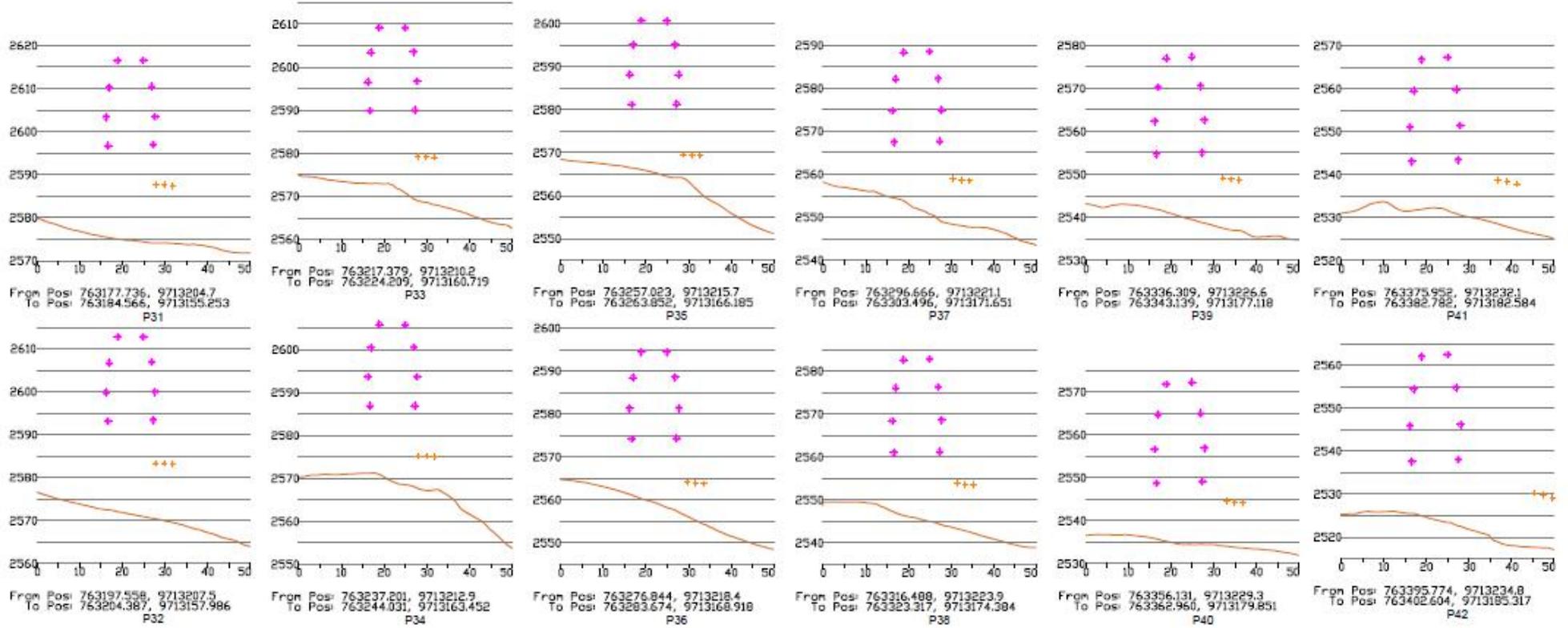
9713200

763100

763200

763300

763400



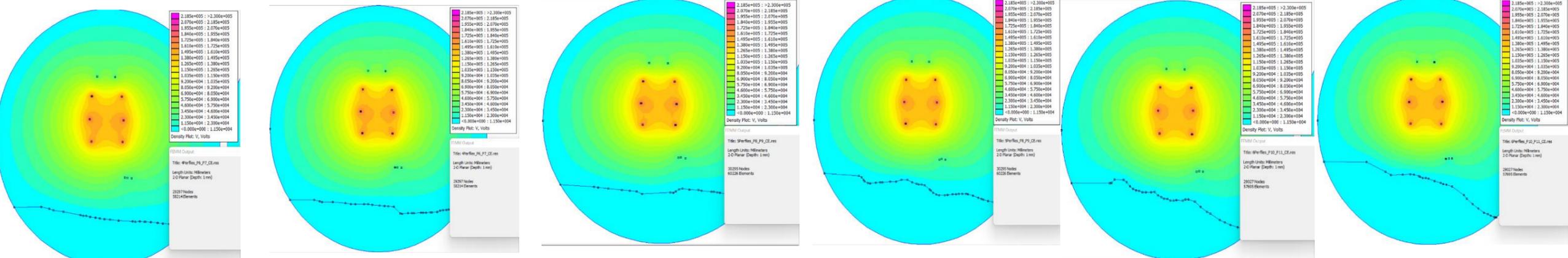
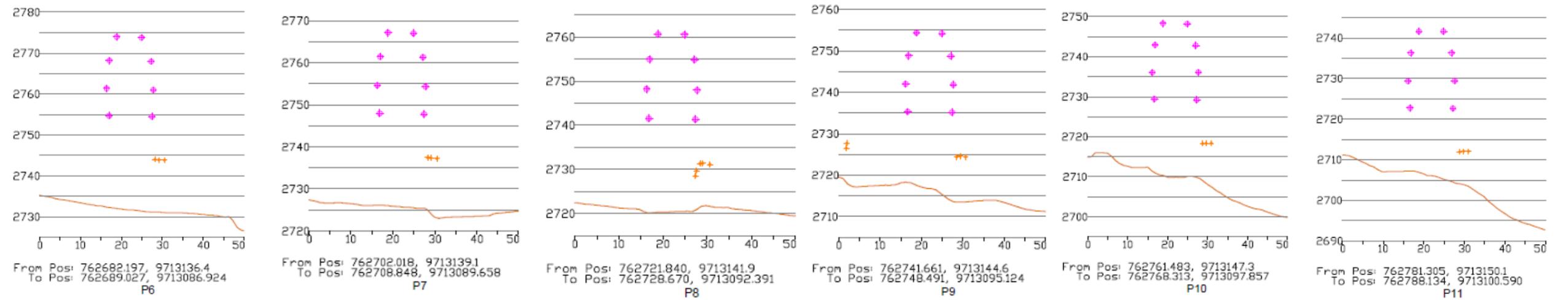
NOTAS GENERALES	OBSERVACIONES	EJEMPLOS DE REFERENCIA		REVISIÖNES			INGENIERA / REGISTRO EJECUTIVO		FIRMA	PLANO	DESCRIPCION	
		Nº	DESCRIPCION	Nº	NATURALEZA DE LA REVISIÖN	FECHA	RESPONSABLE	SECCION				REGISTRO EJECUTIVO
1- Estación de coordenadas WGS84 - UTM 2- Línea de Transmisión de 230 KV 3- Línea de Distribución de 13.8KV											UNIFORMAMIENTO DE LÍNEA DE TRANSMISIÖN 230 KV Y MEDIA TENSIÖN 13.8 KV USANDO METODOLOGIA LIDAR	

FECHA: 04 de 04 REV: 1

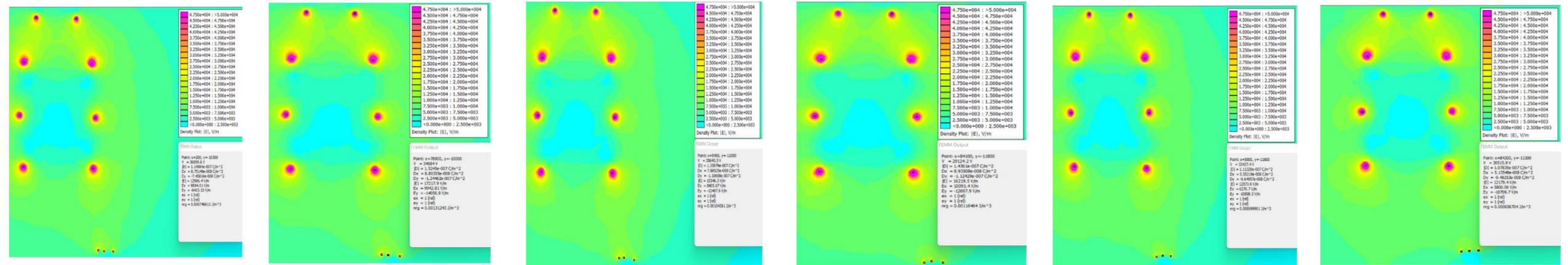
Anexo E

Figura 72 Simulaciones de campo eléctrico y magnético en todos los perfiles obtenidos en el levantamiento topográfico

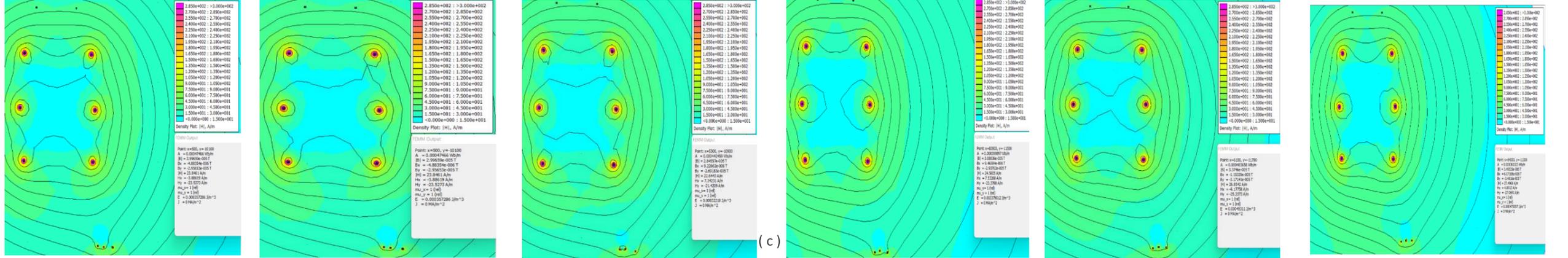
Fuente: Elaboración propia como resumen de todas las simulaciones de campo eléctrico y magnético. En base a los resultados obtenidos en el software FEMM.



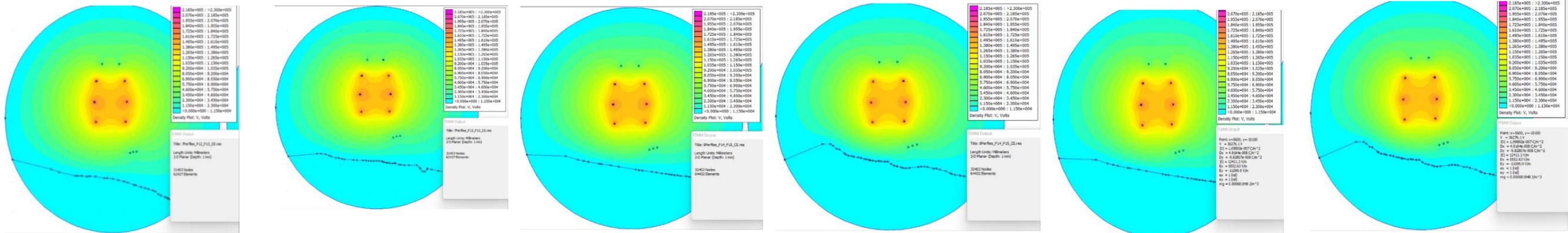
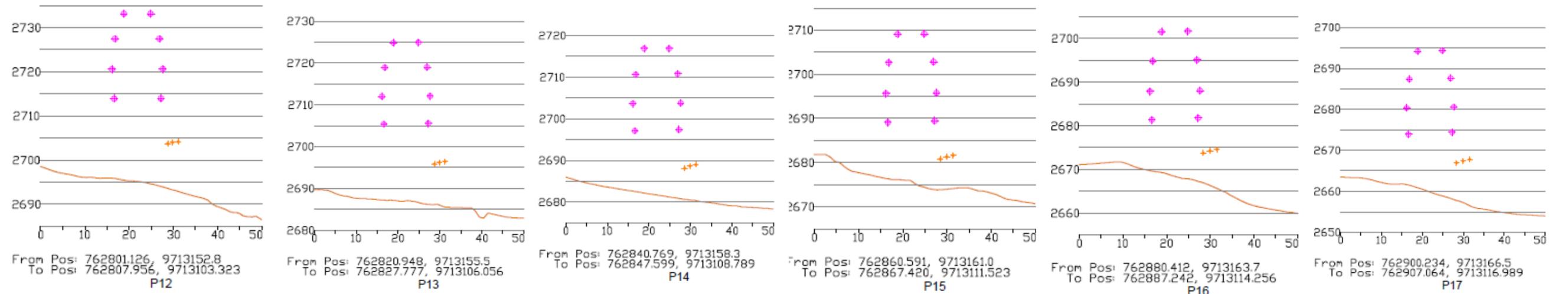
Campo eléctrico



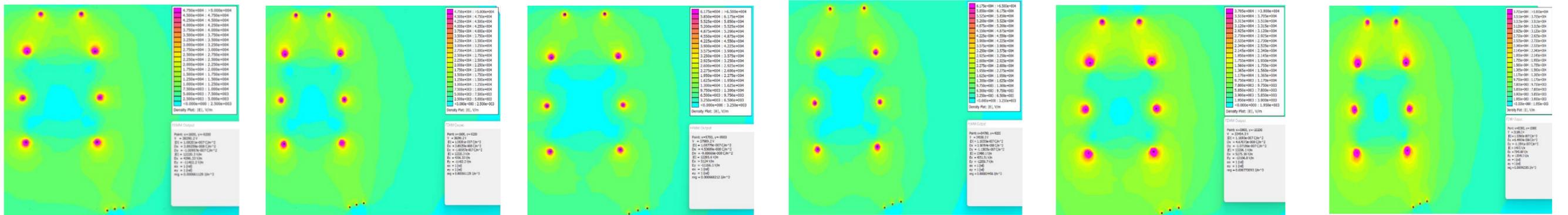
Campo magnético



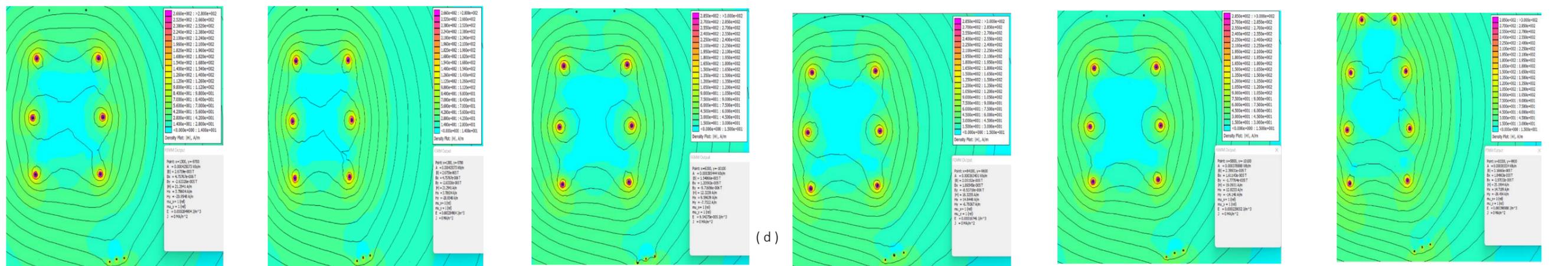
(c)



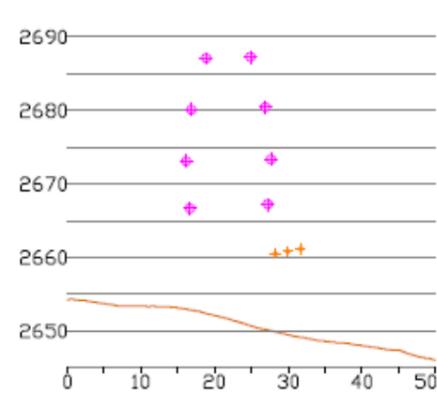
Campo eléctrico



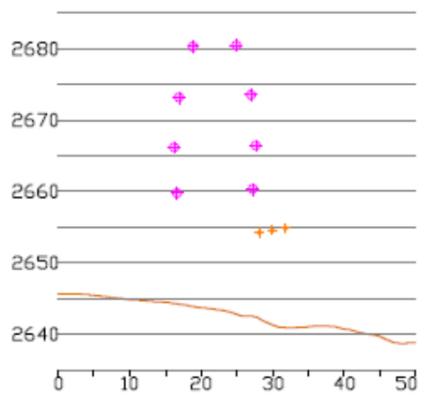
Campo magnético



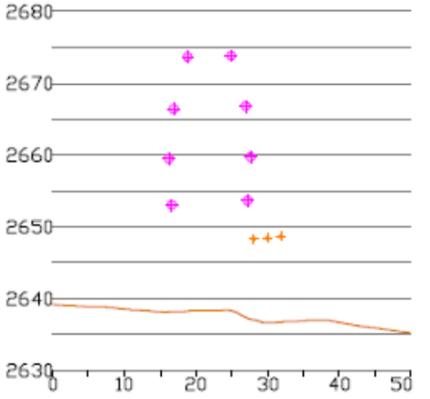
(d)



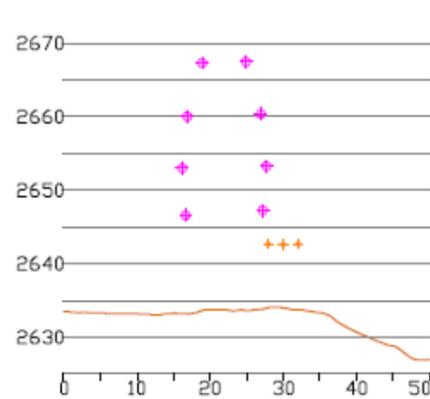
From Pos: 762920.056, 9713169.2
To Pos: 762926.885, 9713119.722
P18



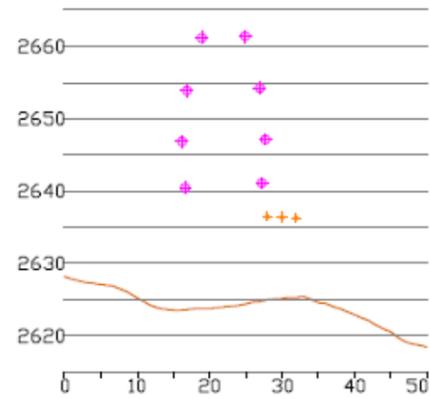
From Pos: 762939.877, 9713171.9
To Pos: 762946.707, 971322.455
P19



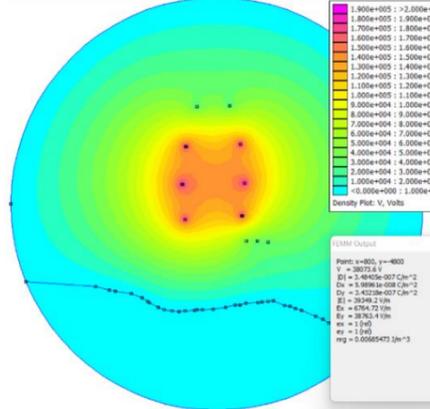
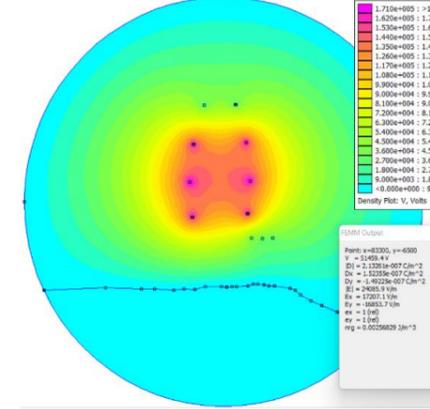
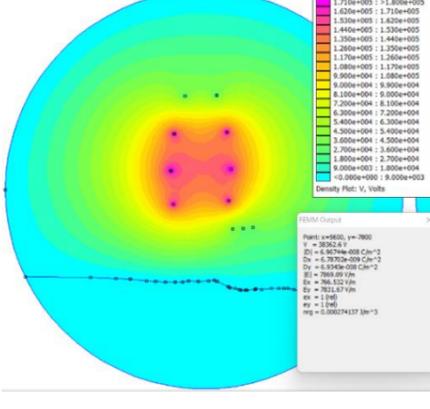
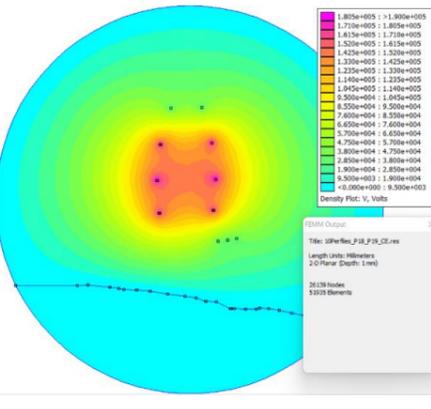
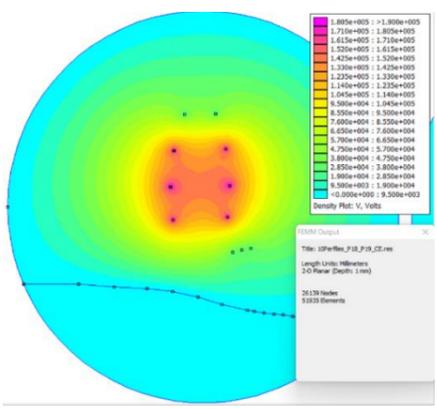
From Pos: 762959.699, 9713174.7
To Pos: 762966.528, 9713125.188
P20



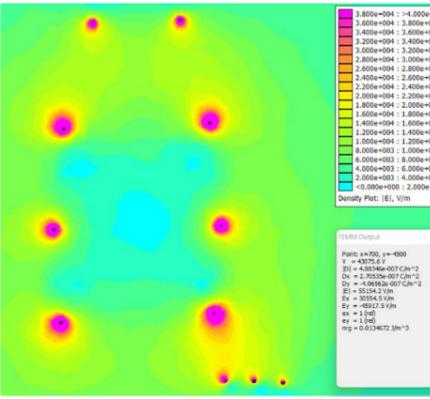
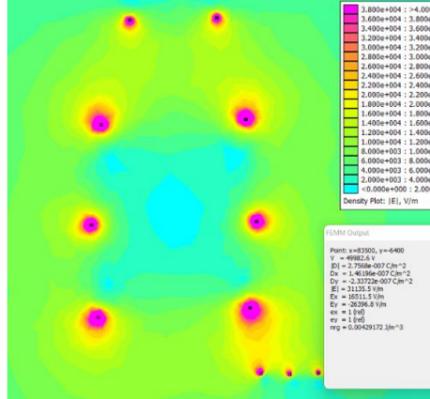
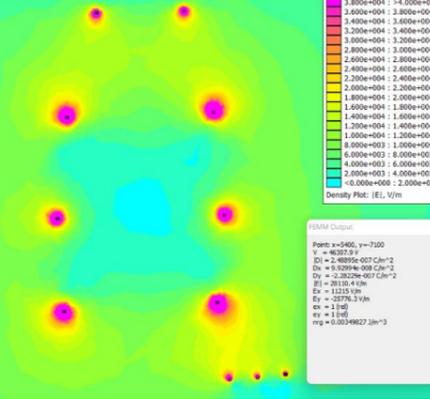
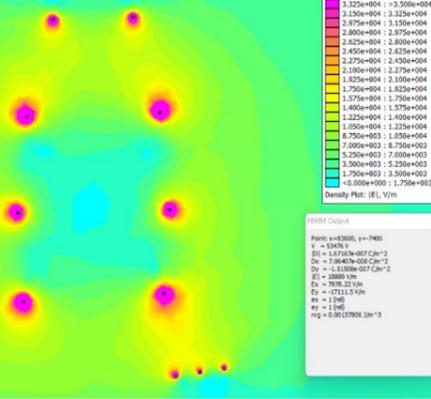
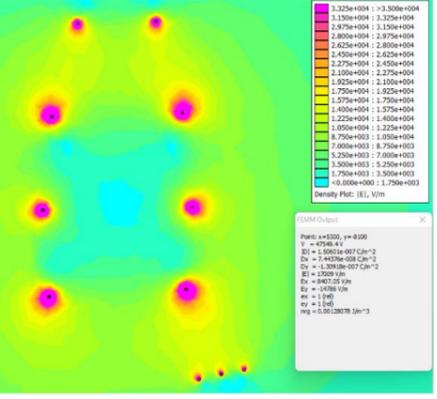
From Pos: 762979.520, 9713177.4
To Pos: 762986.350, 9713127.921
P21



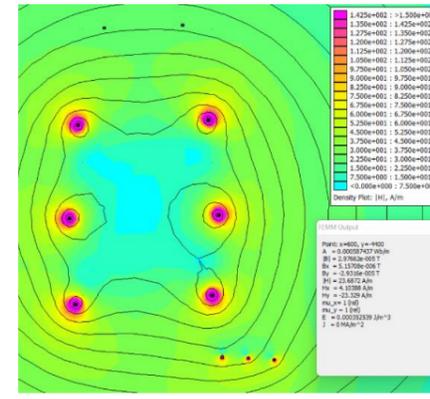
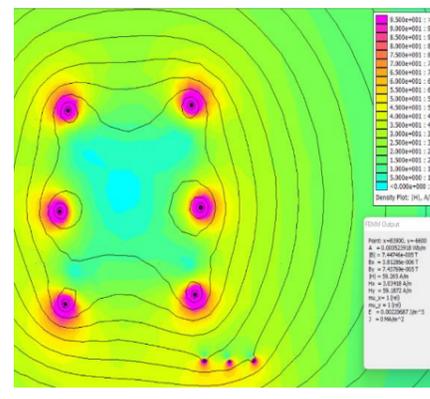
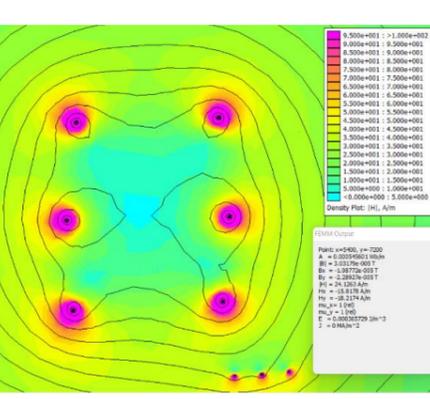
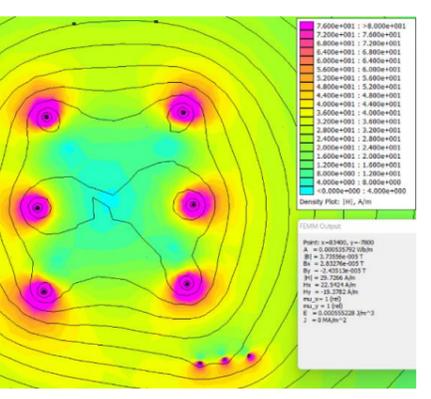
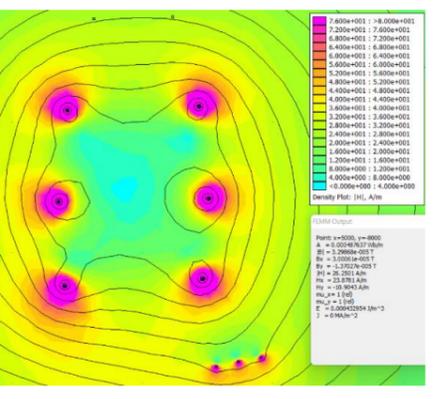
From Pos: 762999.342, 9713180.1
To Pos: 763006.172, 9713130.654
P22

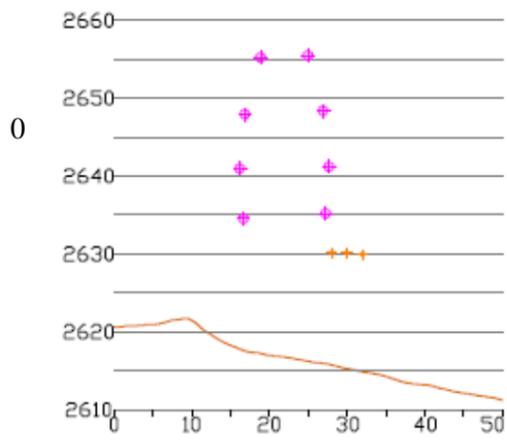


Campo eléctrico

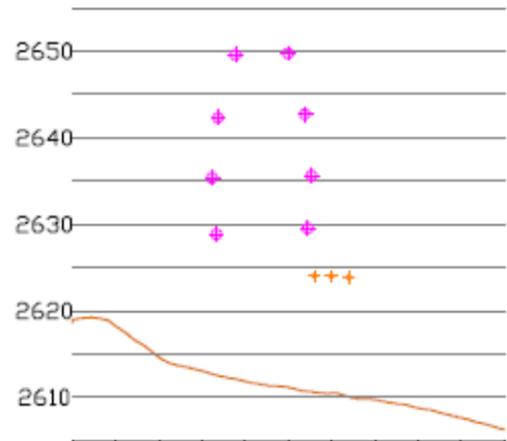


Campo magnético

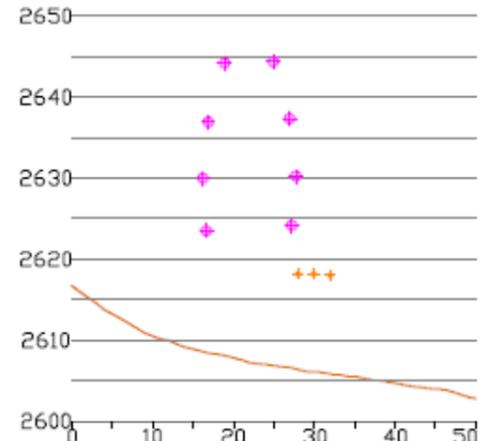




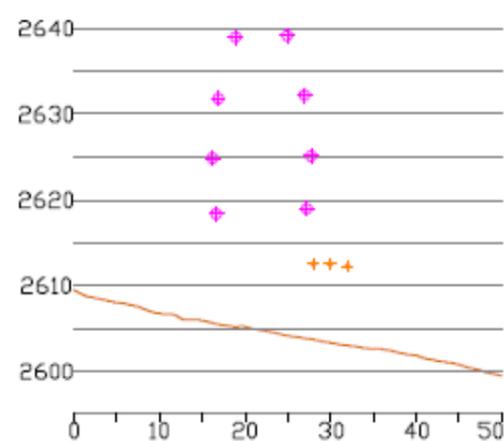
From Pos: 763019.163, 9713182.9
To Pos: 763025.993, 9713133.388
P23



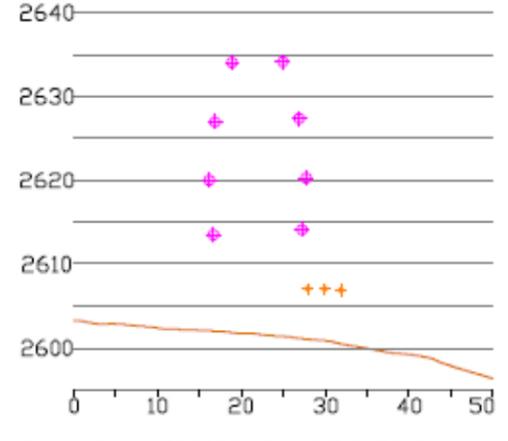
From Pos: 763038.985, 9713185.6
To Pos: 763045.815, 9713136.121
P24



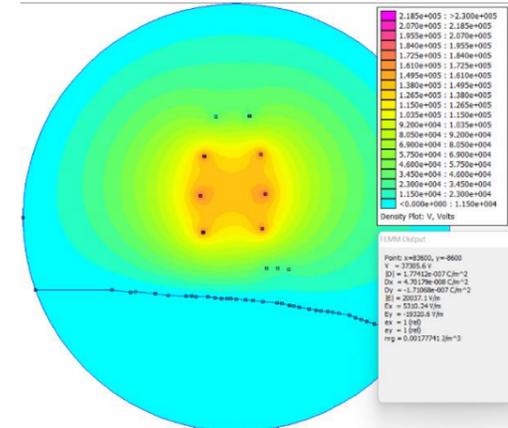
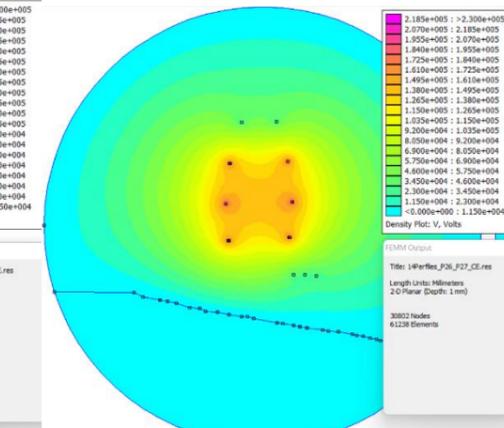
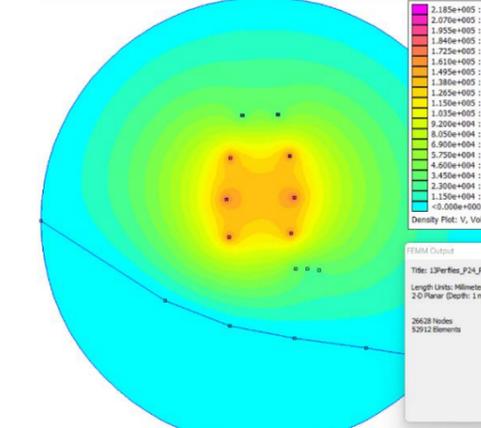
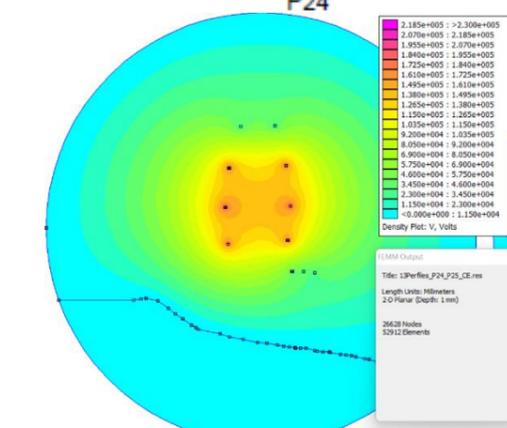
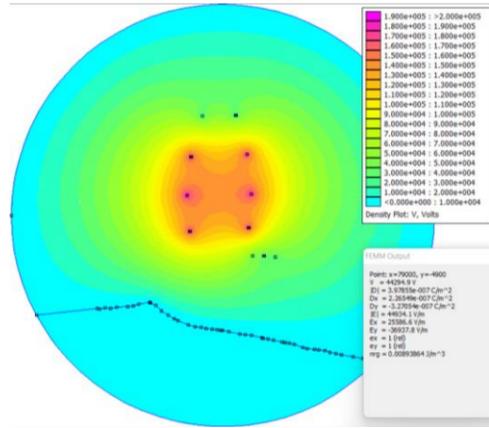
From Pos: 763058.807, 9713188.3
To Pos: 763065.636, 9713138.854
P25



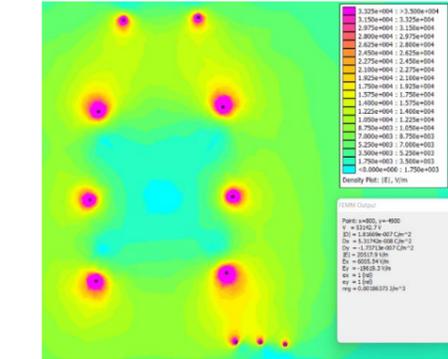
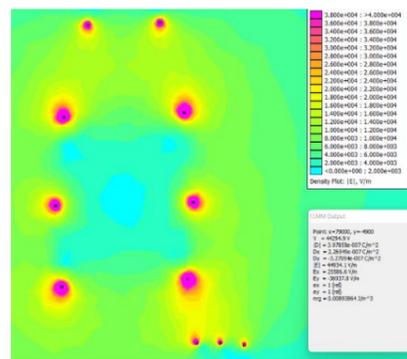
From Pos: 763078.628, 9713191.1
To Pos: 763085.458, 9713141.587
P26

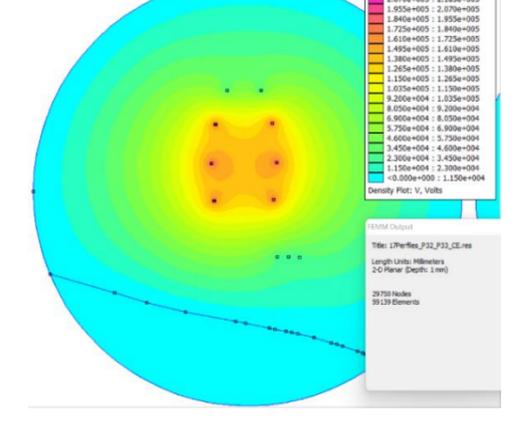
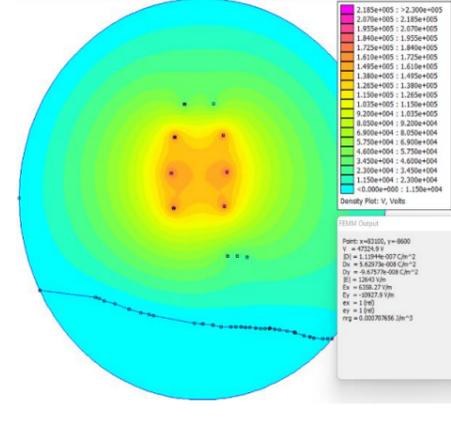
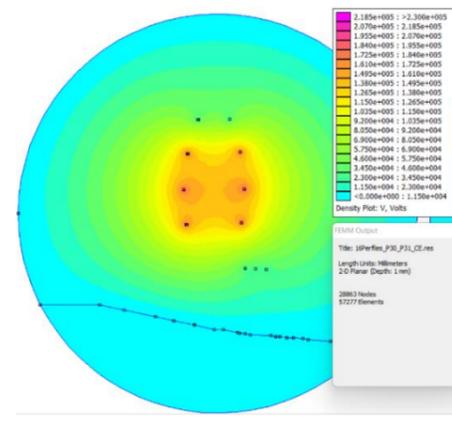
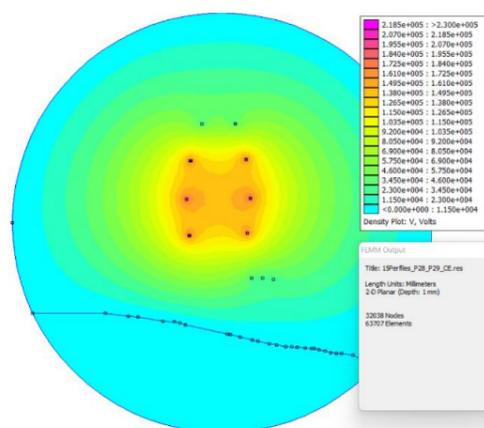
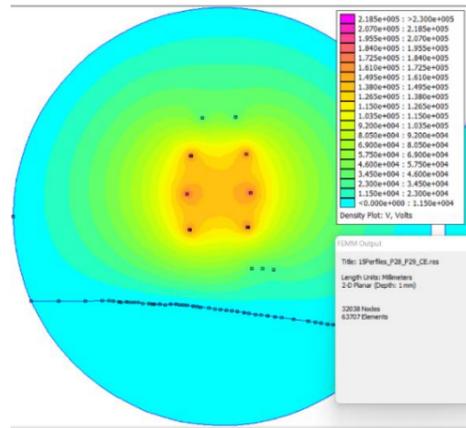
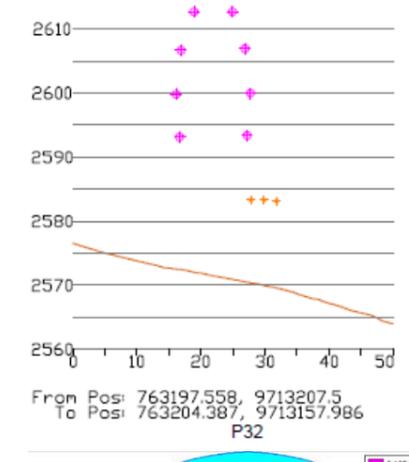
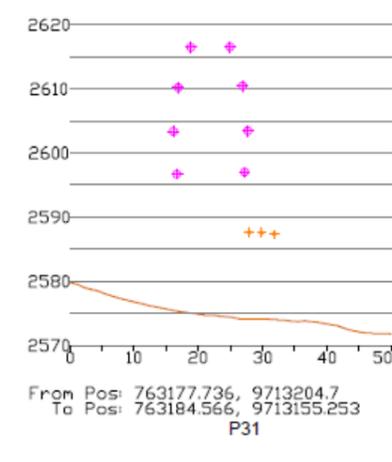
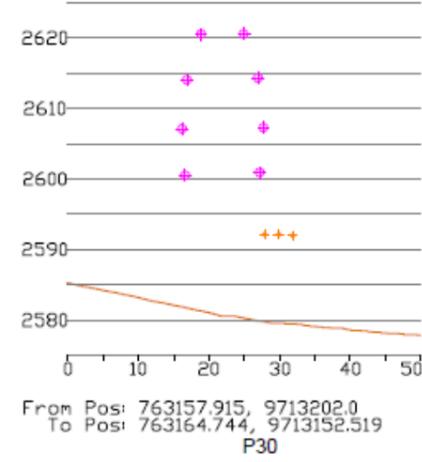
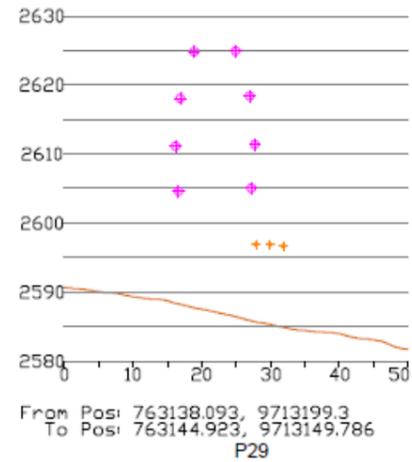
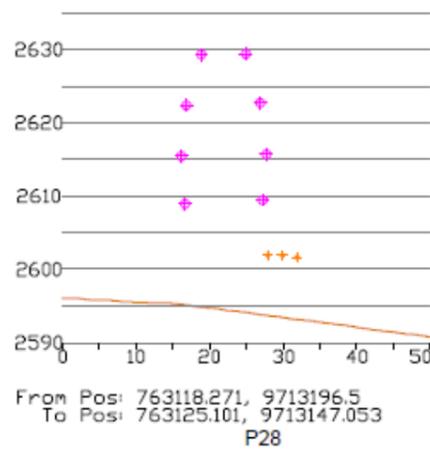


From Pos: 763098.450, 9713193.8
To Pos: 763105.279, 9713144.320
P27

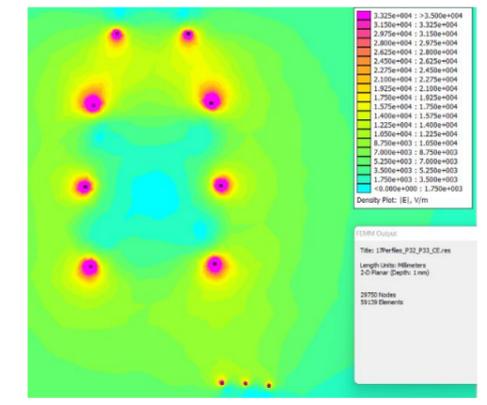
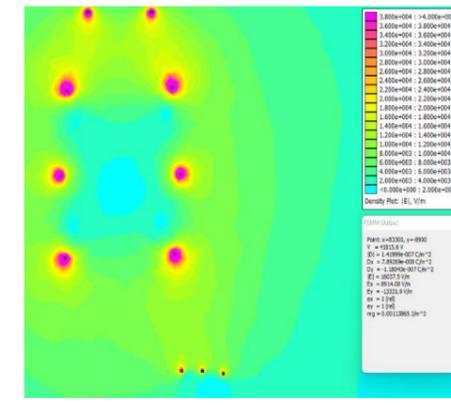
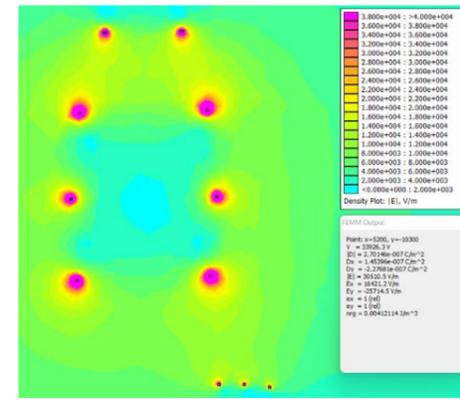
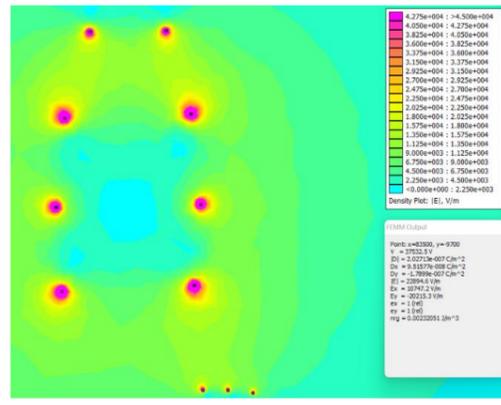
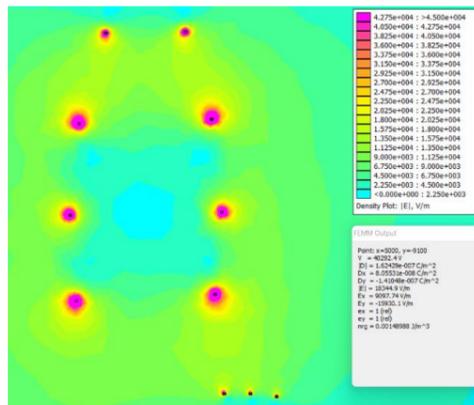


Campo eléctrico

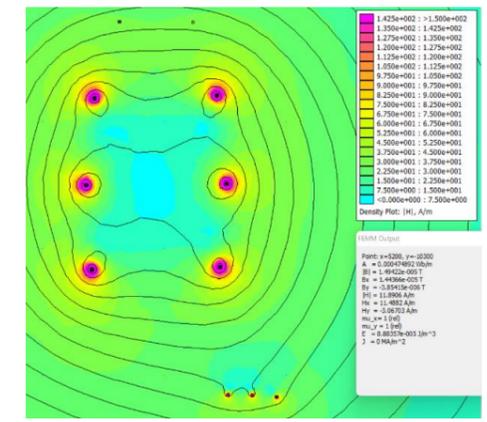
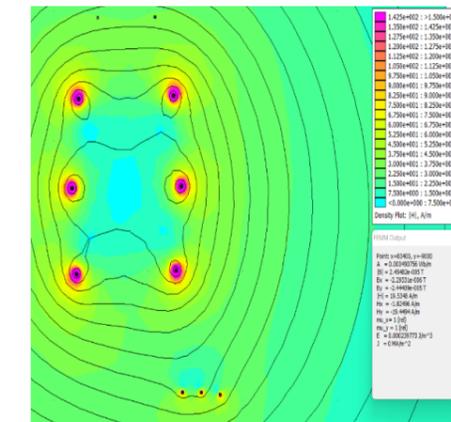
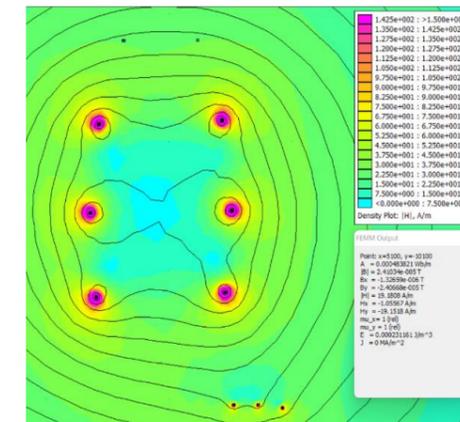
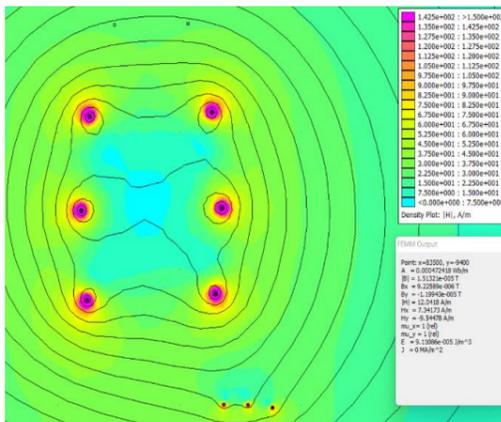
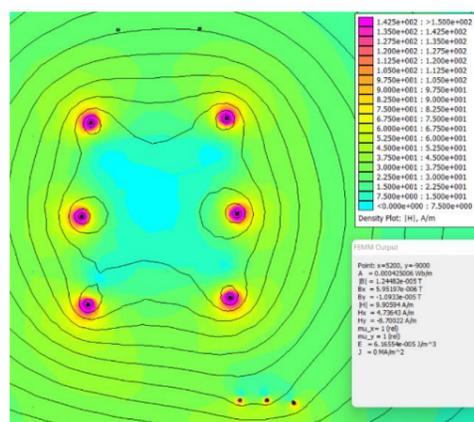


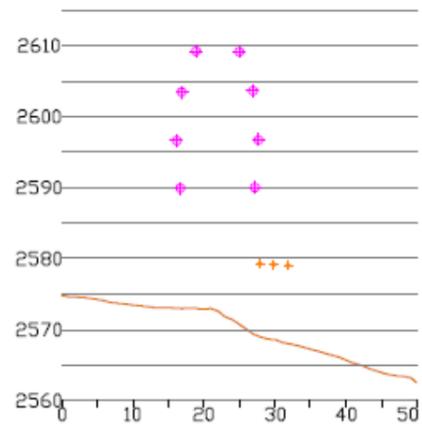


Campo eléctrico

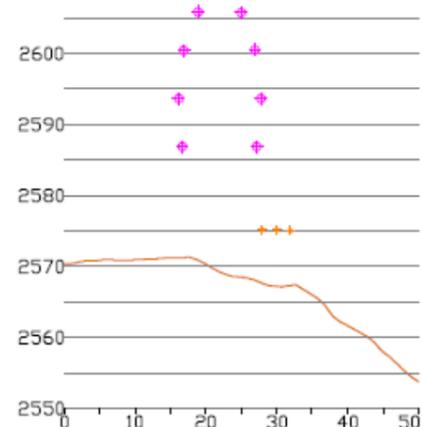
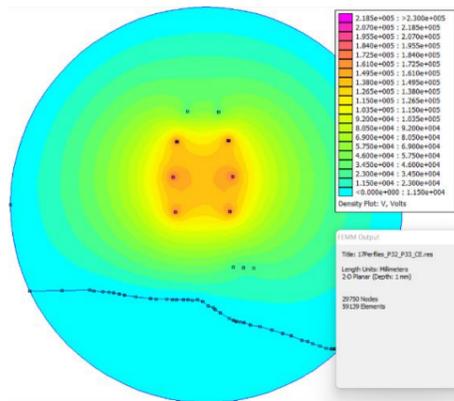


Campo magnético

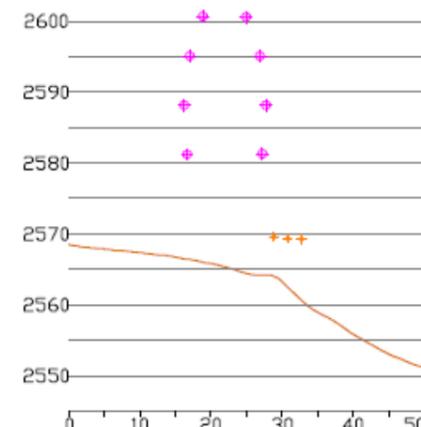
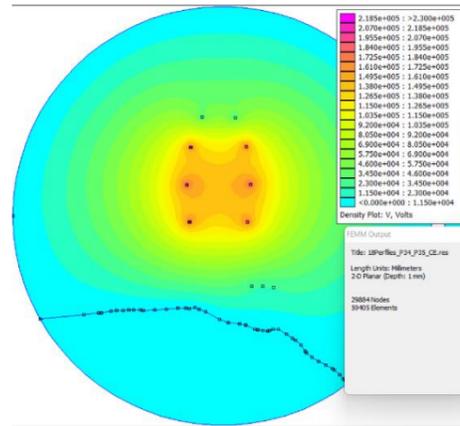




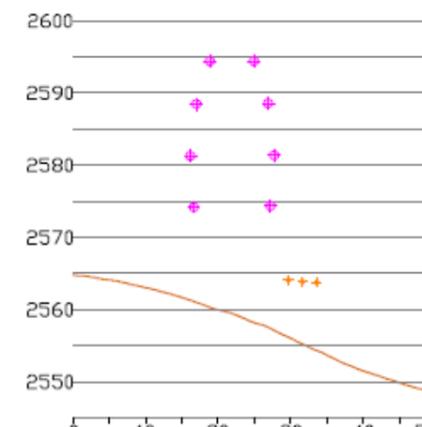
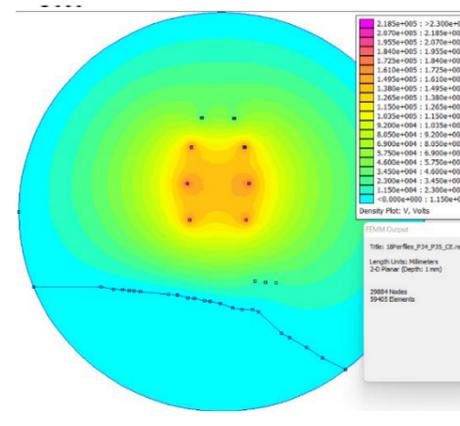
From Pos: 763217.379, 9713210.2
To Pos: 763224.209, 9713160.719
P33



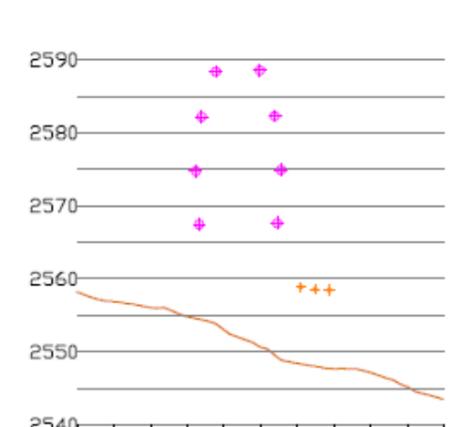
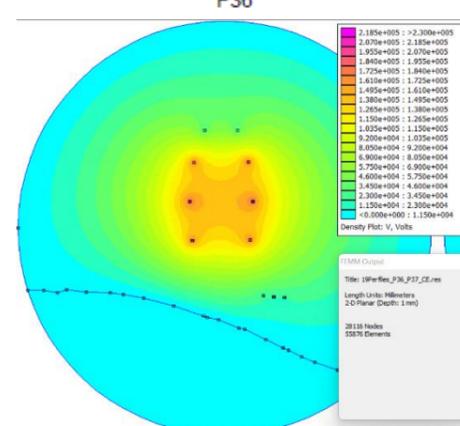
From Pos: 763237.201, 9713212.9
To Pos: 763244.031, 9713163.452
P34



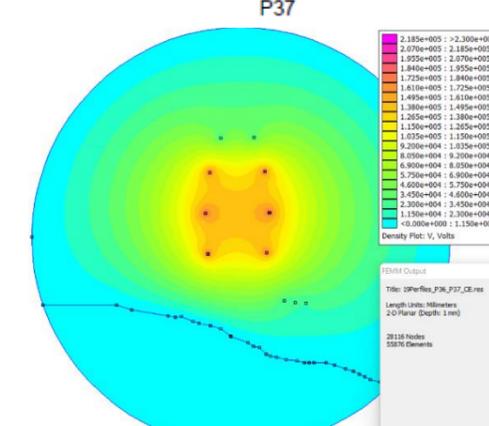
From Pos: 763257.023, 9713215.7
To Pos: 763263.852, 9713166.185
P35



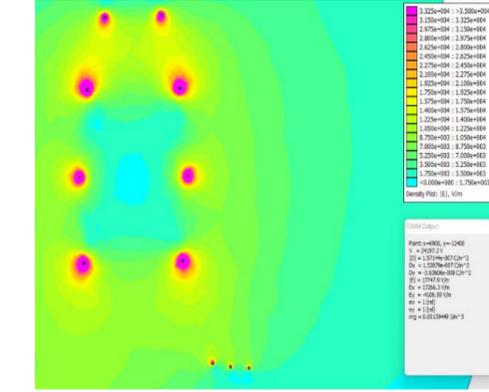
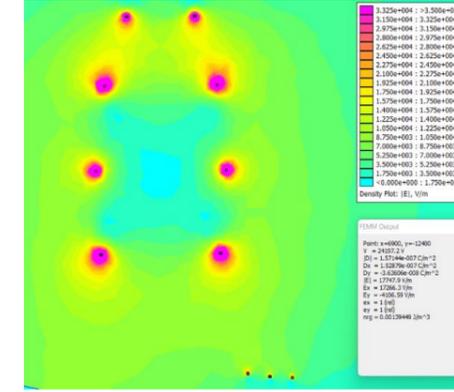
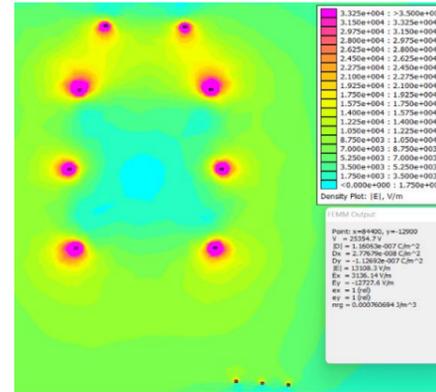
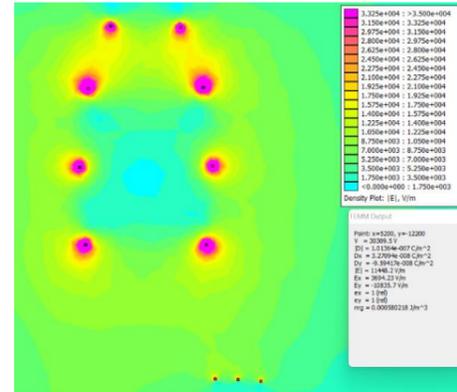
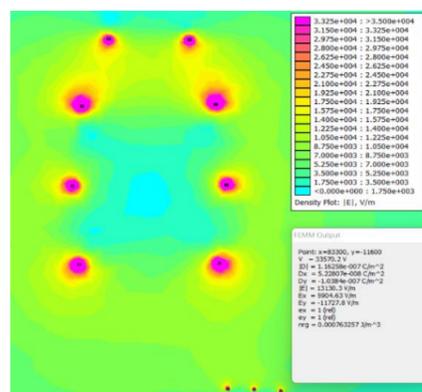
From Pos: 763276.844, 9713218.4
To Pos: 763283.674, 9713168.918
P36



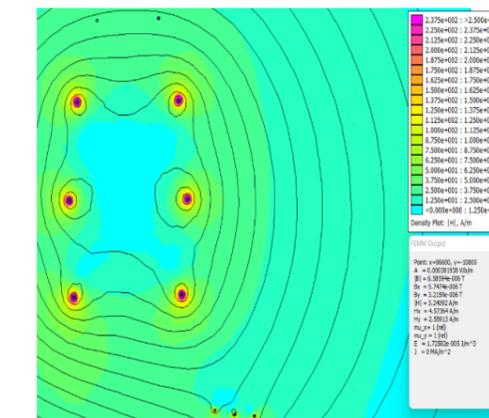
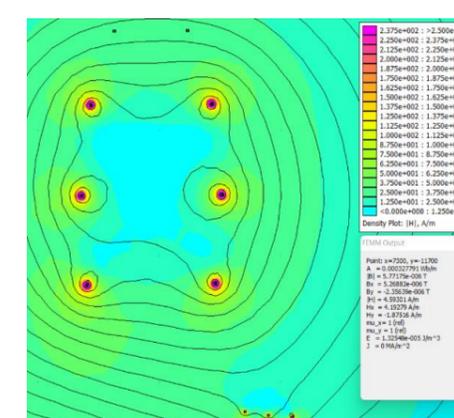
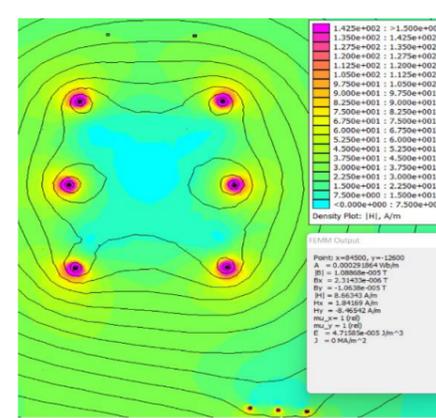
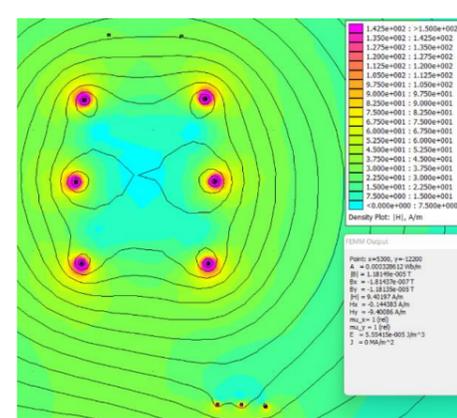
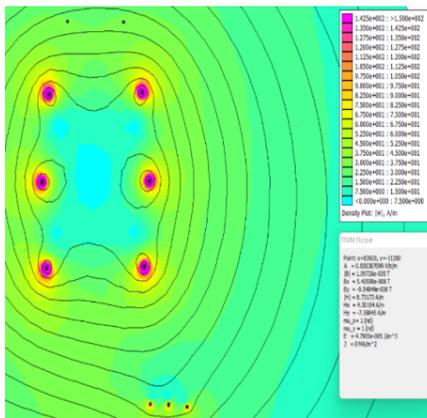
From Pos: 763296.666, 9713221.1
To Pos: 763303.496, 9713171.651
P37

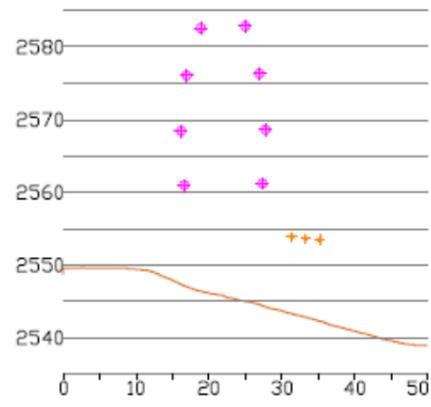


Campo eléctrico

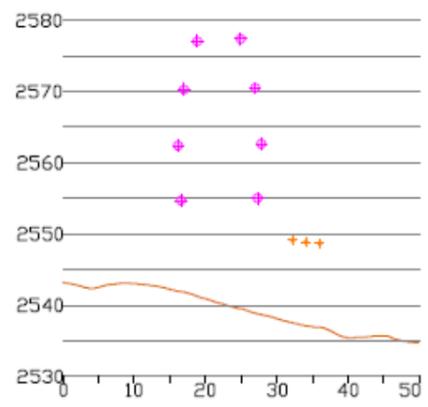
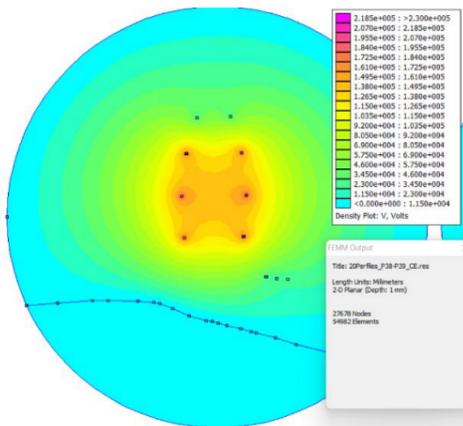


Campo magnético

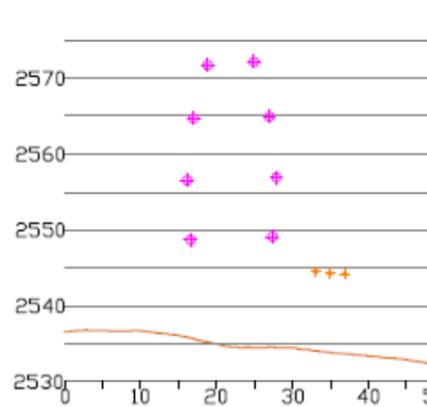
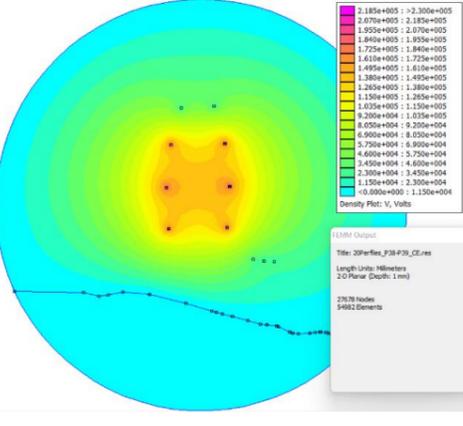




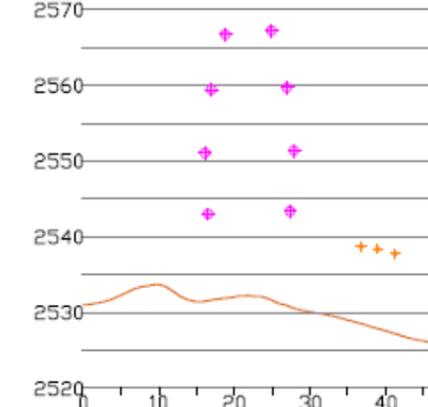
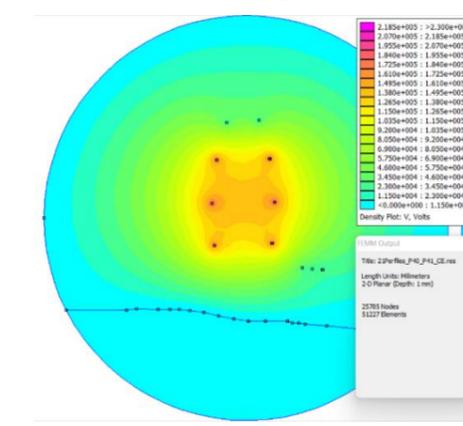
From Pos: 7633316.488, 9713223.9
To Pos: 763323.317, 9713174.384
P38



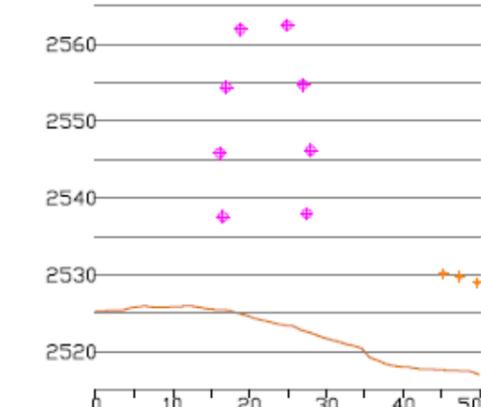
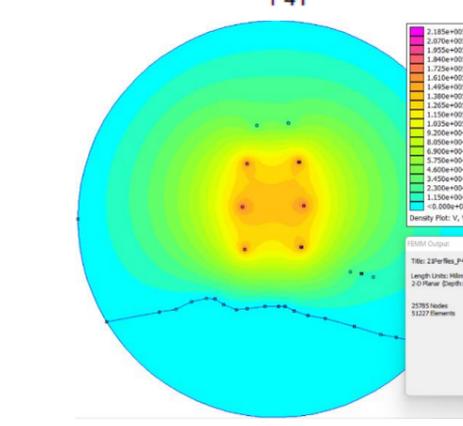
From Pos: 7633336.309, 9713226.6
To Pos: 763343.139, 9713177.118
P39



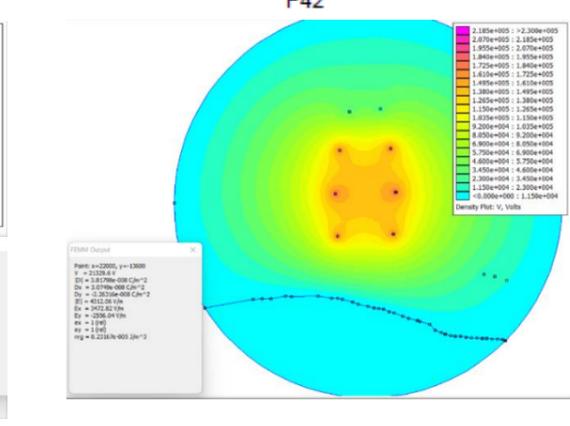
From Pos: 7633356.131, 9713229.3
To Pos: 763362.960, 9713179.851
P40



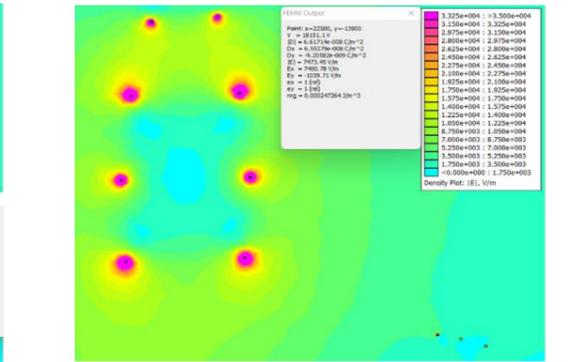
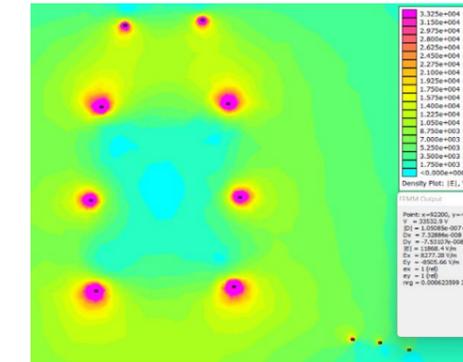
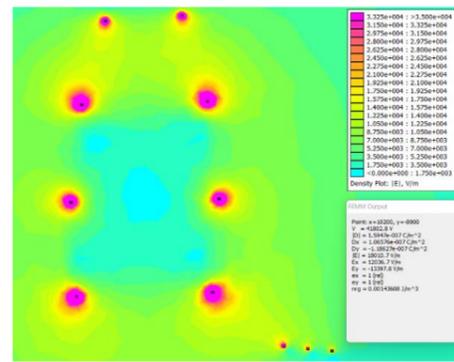
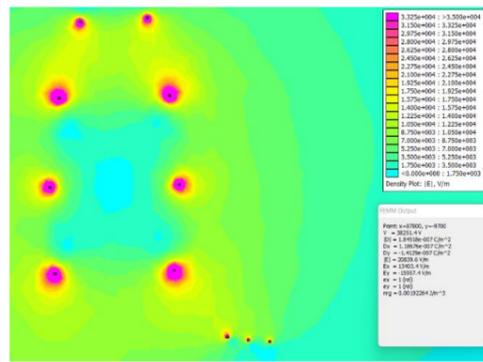
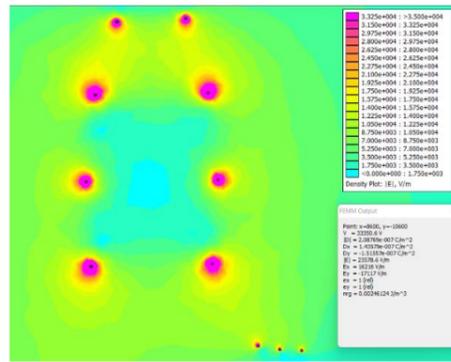
From Pos: 7633375.952, 9713232.1
To Pos: 763382.782, 9713182.584
P41



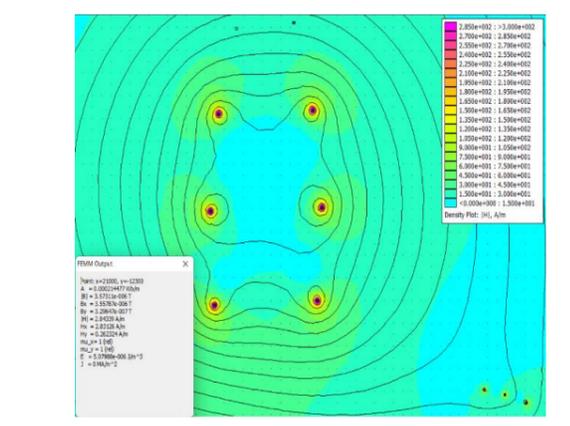
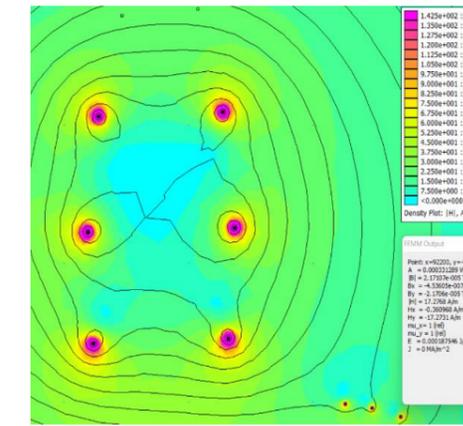
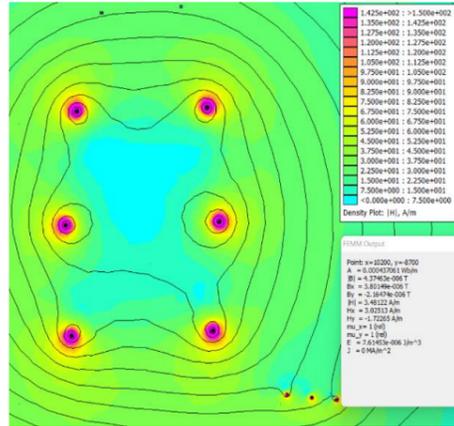
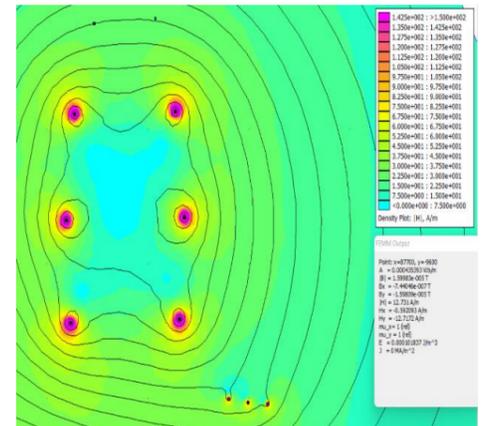
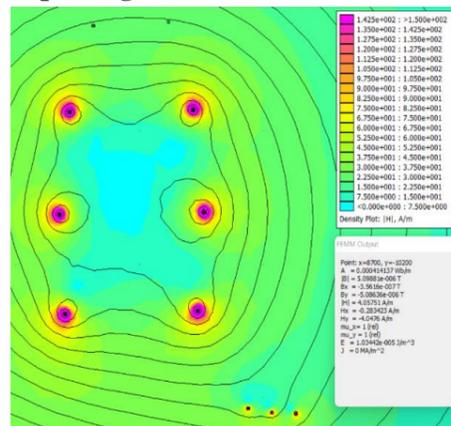
From Pos: 7633395.774, 9713234.8
To Pos: 763402.604, 9713185.317
P42



Campo eléctrico




Campo magnético



AUTORIZACION DE PUBLICACION EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Yo, Wilson Remigio Reyes Rivera portador de la cédula de ciudadanía N.º 0301554655. En calidad de autor/a y titular de los derechos patrimoniales del trabajo de titulación “Análisis de incidencia inductiva por campos electromagnéticos, desde las líneas de 230 kV hacia las de 13.8 kV que llega al primario del transformador alimentador de circuitos auxiliares de la subestación Zhoray” de conformidad a lo establecido en el artículo 114 Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación, reconozco a favor de la Universidad Católica de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos, Así mismo; autorizo a la Universidad para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el Repositorio Institucional de conformidad a lo dispuesto en el artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 20 de julio de 2022

F: 

Wilson Remigio Reyes Rivera

0301554655