Estudio de Impacto Ambiental

Parque Eólico Viento Pacífico Verde

ANEXO 1.7: ESTUDIO DE CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS

Región del Maule
2026

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN 1
2. OBJETIVOS 3
2.1 OBJETIVO GENERAL 3
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 3
3. METODOLOGÍA 3
4. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO 4
4.1 AEROGENERADORES 4
4.2 RED DE MEDIA TENSIÓN 7
4.3 SUBESTACIÓN ELÉCTRICA ELEVADORA 9
5. CAMPO ELECTROMAGNÉTICO EN ALTA TENSIÓN 10
5.1 NORMAS DE REFERENCIA PARA CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS DE 50 HZ 11
5.2 NORMA DE REFERENCIA PARA RADIO INTERFERENCIA EN ALTA TENSIÓN. 12
6. CAMPO ELECTROMAGNÉTICO GENERADO POR AEROGENERADORES 13
7. CAMPO ELECTROMAGNÉTICO GENERADO POR LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN SUBTERRÁNEA 15
8. CAMPO ELECTROMAGNÉTICO GENERADO POR TRANSFORMADOR EN LA SUBESTACIÓN ELÉCTRICA ELEVADORA 18
9. CAMPO ELECTROMAGNÉTICO GENERADO POR CONDUCTORES DE LA SUBESTACIÓN ELÉCTRICA ELEVADORA 20
10. RADIO INTERFERENCIA GENERADA POR LA SUBESTACIÓN ELÉCTRICA ELEVADORA 24
11. CAMPO EN RECEPTORES 28
12. SÍNTESIS DE RESULTADOS 31
13. CONCLUSIONES 32
14. ÁREA DE INFLUENCIA 32
15. REFERENCIAS 34

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4-1. Coordenadas UTM aerogeneradores del Proyecto 6
Tabla 4-2. Características de la red de media tensión 33kV 9
Tabla 5-1. Límites internacionales según país para campo eléctrico e inducción magnética 12
Tabla 5-2. Límite de Interferencias de radio 12

Tabla 6-1. Inducción magnética en torno a transformador de 7 MW de aerogenerador 15
Tabla 7-1. Magnitud de inducción magnética a distancia de zanja 17
Tabla 9-1. Magnitudes de campo en borde subestación eléctrica elevadora 24
Tabla 11-1. Ubicación receptores cercanos al Proyecto 30
Tabla 11-2.Magnitudes de campo en receptores cercanos al Proyecto 30
Tabla 12-1. Valores resultantes de campo electromagnético 31
Tabla 12-2. Radio interferencia generada por subestación eléctrica elevadora 32

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Ubicación general del Proyecto Parque Eólico Vientos Pacífico Verde 2
Figura 4-1. Plano planta general, sector norte Estancia La Flora del Proyecto 5
Figura 4-2. Plano planta general, sector sur Pahuil del Proyecto 6
Figura 4-3. Plano de zanjas para cuatro circuitos al lado de vial y bajo vial 8
Figura 4-4. Plano planta subestación eléctrica elevadora de 220/33kV 10
Figura 6-1. Esquema general de aerogenerador 13
Figura 6-2. Medición de campo magnético ambiental generado por un aerogenerador 14
Figura 7-1. Malla de elementos finitos zanja para cuatro circuitos al lado de vial 16
Figura 7-2. Inducción magnética en torno a zanja para cuatro circuitos al lado de vial 16
Figura 7-3. Malla de elementos finitos zanja para cuatro circuitos bajo vial 17
Figura 7-4. Inducción magnética en torno a zanja para cuatro circuitos bajo vial 17
Figura 8-1. Direcciones de medida del campo en transformador de referencia 18
Figura 8-2. Campo eléctrico en torno a transformador de 220 MVA, 240 kV 19
Figura 8-3. Inducción magnética en torno a transformador de 220 MVA, 240 kV 19
Figura 9-1. Trayectorias para estudio de campos 20
Figura 9-2. Campo eléctrico a 1m sobre el suelo en trayectoria A1-A2 21
Figura 9-3. Inducción magnética a 1m sobre el suelo en trayectoria A1-A2 22
Figura 9-4. Malla de elementos finitos marco de línea 23
Figura 9-5. Campo eléctrico a 1m sobre el suelo en trayectoria B1-B2 23
Figura 9-6. Inducción magnética a 1m sobre el suelo en trayectoria B1-B2 24
Figura 10-1. Esquema de subestación eléctrica Pontchartrain y puntos de medida de radio interferencia 25
Figura 10-2. Radio interferencia medida en perímetro de subestación eléctrica Pontchartrain en 230 kV 26

Figura 10-3. Puntos de medida de radio interferencia en subestación eléctrica Snakefarm de 230 KV 27

Figura 10-4. Radio interferencia medida en perímetro de subestación eléctrica Snakefarm de 230 kV 28

Figura 11-1. Ubicación receptores e instalaciones del Proyecto 29

Figura 14-1. Área de influencia ambiental campos electromagnéticos del Proyecto 33

ÍNDICE DE APÉNDICES

Apéndice 1.7.1 Archivo Digitales.

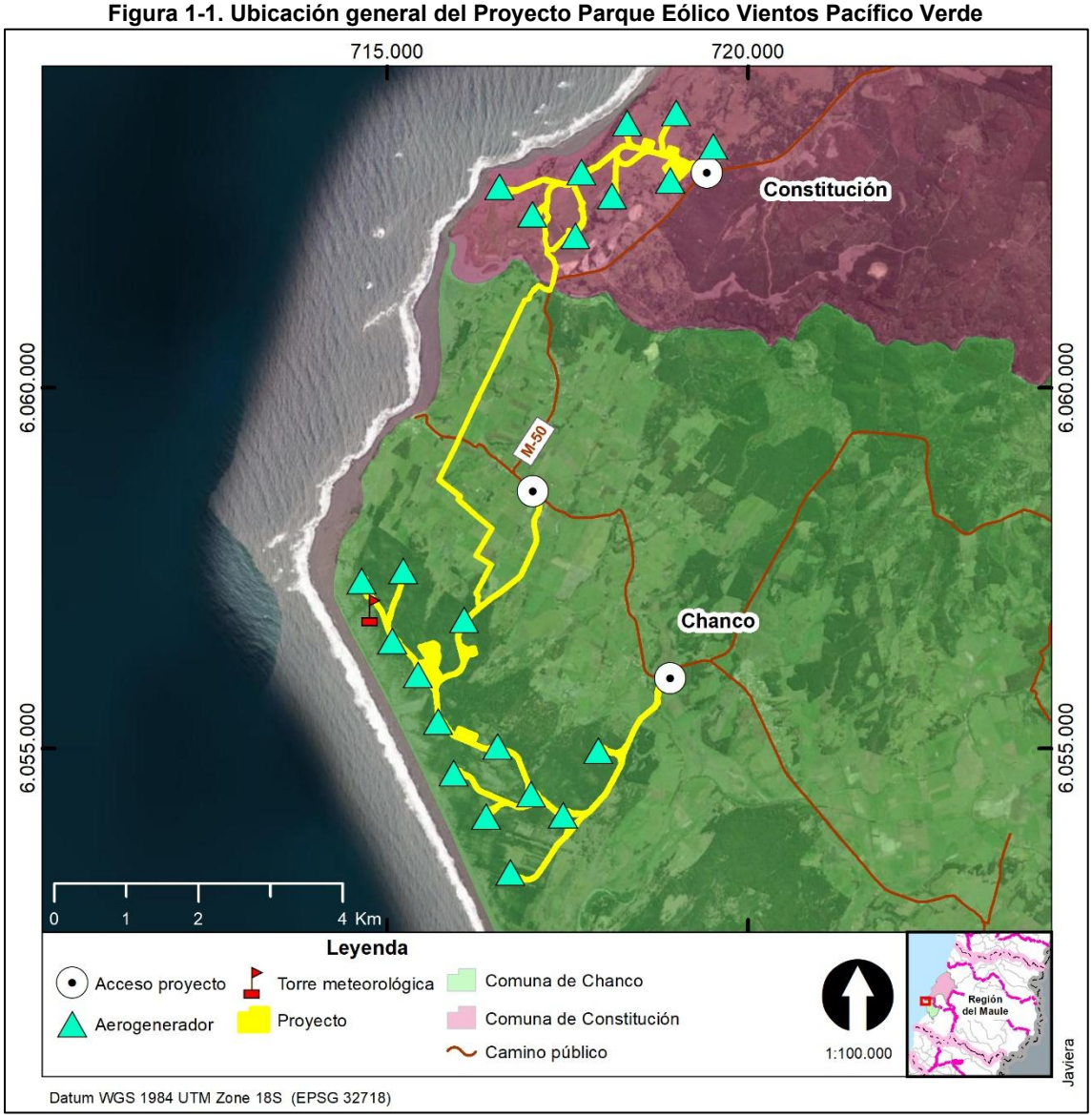
1. INTRODUCCIÓN

El Proyecto Parque Eólico Vientos Pacífico Verde (en adelante el Proyecto) consiste en el desarrollo, construcción y posterior operación de un parque de generación de energía eléctrica mediante el aprovechamiento del recurso eólico ubicado en terrenos privados del sector costero de la Región del Maule, específicamente en las comunas de Constitución y Chanco, Provincias de Talca y Cauquenes, respectivamente.

El Proyecto tiene como objetivo la generación de energía eléctrica a través de la energía eólica, mediante la instalación de 22 aerogeneradores de hasta 7 MW de potencia cada uno, proyectando una potencia total instalada de 154 MW.

El Parque se desarrolla en dos sectores separados geográficamente a 10 km aproximadamente. En el sector Norte, Estancia la Flora, se emplaza al norte del río Pinotalca y con acceso desde la Ruta M50 se ubican 9 aerogeneradores. En el sector sur, Pahuil, al sur de la localidad de Loanco se ubican los 13 aerogeneradores restantes, con acceso también desde la Ruta M50.

Figura 1-1. Ubicación general del Proyecto Parque Eólico Vientos Pacífico Verde



Fuente: Foco Ambiental 2026.

Como parte de la infraestructura eléctrica asociada, el parque eólico considerará la habilitación de una línea de media tensión soterrada de 33 kV que estará dispuesta en paralelo a los caminos internos cuya extensión será de aproximadamente 26,83 km de extensión. La línea de media tensión soterrada permitirá la conexión entre los aerogeneradores con el edificio de media tensión y la subestación eléctrica elevadora 33/220 kV.

Este Proyecto no contempla sistemas de transmisión, ni la inyección de energía al Sistema Eléctrico Nacional.

El estudio de campos electromagnéticos tiene como propósito determinar el campo eléctrico y campo magnético y radio de interferencia generados en la fase de operación del Proyecto, debido al funcionamiento de los aerogeneradores, sistema de media tensión y la subestación eléctrica elevadora 33/220 kV, para sí evaluar el cumplimiento normativo, nacional y de referencia

internacional y de seguridad para las personas, según el Criterio de evaluación en el SEIA: Evaluación de impactos por radiación electromagnética en proyectos de transmisión eléctrica (SEA; 2023).

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

El objetivo de este documento es efectuar el cálculo de los campos electromagnéticos de baja y alta frecuencia que pueden generarse durante la operación de las instalaciones del Proyecto Eólico Vientos Pacífico Verde, con el propósito de verificar el cumplimiento de la reglamentación chilena e internacional respecto de los criterios establecidos por el SEA referente a las condiciones de seguridad para las personas.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Los objetivos específicos son:

- Calcular campo eléctrico y campo magnético generado por los aerogeneradores.
- Calcular campo eléctrico y campo magnético generado por el sistema de media tensión y la subestación eléctrica elevadora 33/220 kV.
- Evaluar radio interferencia generada por la subestación eléctrica elevadora 33/220 kV.
- Evaluar campo eléctrico y campo magnético en receptores cercanos al Proyecto.
- Confrontar los valores estimados y calculados con los valores límites señalados por la respectiva normativa nacional y/o internacional y con el criterio de seguridad para las personas publicado por el SEA.
- Concluir respecto al cumplimiento normativo y de seguridad de los campos electromagnéticos generados por las instalaciones del Proyecto en su fase de operación.
- Determinar el área de influencia para la componente ambiental campos electromagnéticos.

3. METODOLOGÍA

Se presenta en primer lugar las características del Proyecto, pertinentes al estudio, con el propósito de efectuar una modelación para evaluar el campo eléctrico y el campo magnético en el entorno de los aerogeneradores, sistema de media tensión y la subestación eléctrica elevadora, utilizando el software computacional QuickField que aplica el método de elementos finitos [1]. El software utilitario QuickField, es un software de amplia aplicación en varias ramas de la ingeniería, como se pueden observar en la página https://quickfield.info/es/appl.htm; el método es fácilmente adaptable a problemas de campo electromagnético, como también en transmisión de calor, mecánica de fluidos, etc.

En alta tensión, frecuencia 50Hz, el campo eléctrico se resuelve por las mismas metodologías de solución del campo estático; para resolver campo eléctrico, en QuickField existe la opción Electrostatic; el análisis se efectúa en un instante específico en que una fase se encuentra en su valor máximo efectivo y por lo tanto las otras dos fases se encuentran en el 50% negativo de este valor. En QuickField se tiene la opción de resolver campo magnético variable en el tiempo, (opción AC Magnetics) de modo que las fases se entregan con módulo y ángulo. Las condiciones de borde

para el campo eléctrico son voltaje nulo en el contorno externo y en el plano de tierra y para el campo magnético, potencial magnético nulo en el contorno externo.

El Método de los elementos finitos es muy usado debido a su generalidad y a la facilidad de introducir dominios de cálculo complejos en dos o tres dimensiones. Cuando existe la imposibilidad práctica de encontrar la solución analítica de estos problemas, con frecuencia en la práctica ingenieril los métodos numéricos y, en particular, los elementos finitos, se convierten en la única alternativa práctica de cálculo. El Método de elementos finitos permite obtener una solución numérica en un medio continuo sobre el que está propuesto un problema que obedece a ecuaciones diferenciales, fraccionándolo en un número elevado de subdominios denominados “elementos finitos” mediante un “generador de malla” incluido en el software QuickField.

En el caso particular de líneas de transmisión, por su simetría, normalmente se puede limitar el análisis a un plano y se genera esta partición mediante triángulos, cuyo tamaño se adapta a las zonas donde se requiere mayor precisión con elementos de área menor. Normalmente se requiere mayor precisión a nivel del suelo, bajo los conductores, por lo tanto, en dicha zona se densifica los triángulos para discretización del dominio; este procedimiento permite obtener el campo eléctrico y el campo magnético de baja frecuencia generado en el entorno de los conductores, caracterizado mediante perfiles de campo en un plano transversal a los conductores y a un metro de altura sobre el nivel del suelo.

Para la evaluación de campos provocados por aerogeneradores, se incluye información obtenida de la literatura técnica respecto de magnitudes medidas en proyectos en operación, adaptándolos a las potencias de aerogeneradores del Proyecto [2].

Se entregan los valores límites recomendados por las normas de referencia aplicables en Chile respecto de la exposición humana a campos electromagnéticos de 50 Hz [3], [4] y de radio interferencia provocada por instalaciones de alta tensión [5]. Estos valores se confrontan con las respectivas estimaciones y evaluaciones obtenidas para las diversas instalaciones del Proyecto, con el objeto de establecer finalmente una conclusión referente al posible impacto ambiental de tales instalaciones, desde el punto de vista técnico de la emisión electromagnética de baja y alta frecuencia y seguridad para las personas.

En atención a lo expuesto en la Guía del SEA referente a radiación electromagnética [6], empleando el mismo procedimiento de elementos finitos, se evalúa campos en receptores cercanos al Proyecto para verificar condiciones de seguridad para las personas.

Se realiza una estimación del nivel perturbador a frecuencias de radio generado por la subestación debido al fenómeno corona, en base a información referencial [7].

4. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

Se presenta a continuación una breve descripción de las características técnicas de las principales fuentes de campos electromagnéticos incorporadas en el Proyecto en su fase de operación.

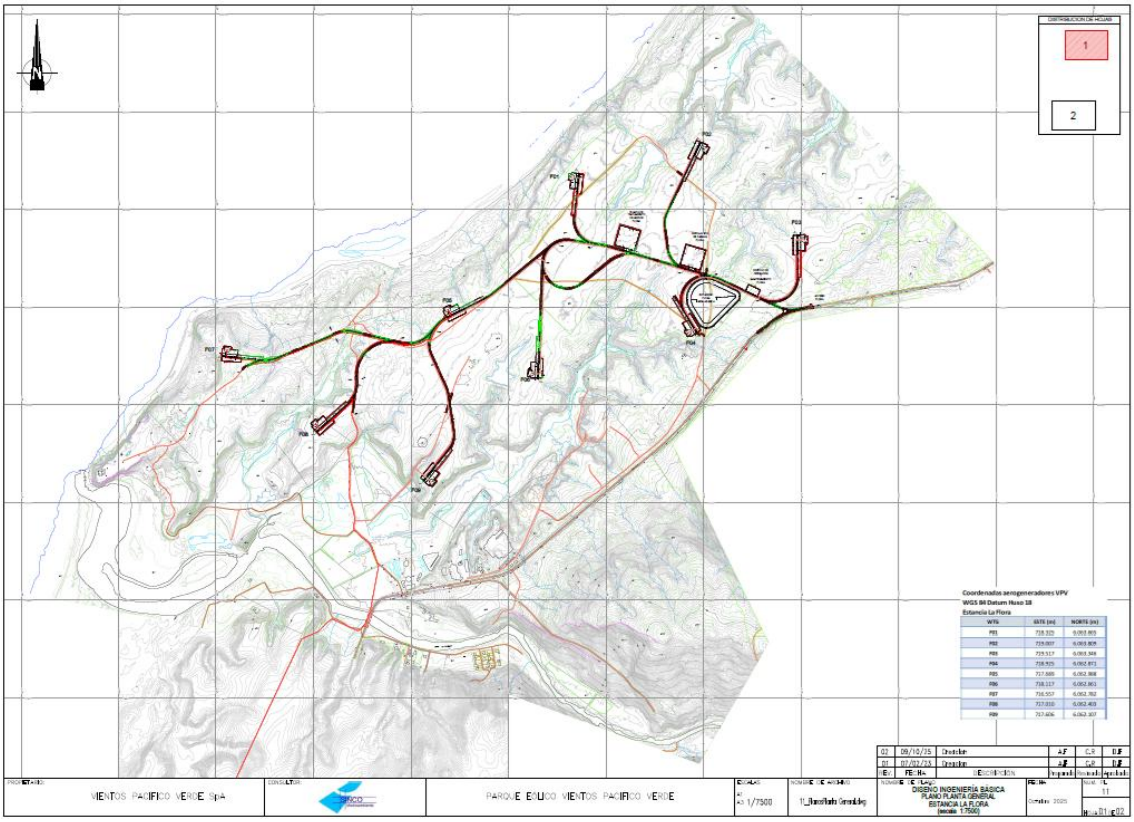
4.1 AEROGENERADORES

El Proyecto consiste en la instalación de 22 aerogeneradores de 7MW de potencia cada uno, conformando una potencia instalada total de 154 MW. El Proyecto se desarrolla en dos sectores separados geográficamente en 10 km aproximadamente; en el sector norte, Estancia La Flora, se

ubican 9 aerogeneradores, al norte del río Pinotalca y con acceso desde la Ruta M-50 y en el sector sur, Pahuil, se ubican los 13 aerogeneradores restantes, al sur de la localidad de Loanco, con acceso también desde la Ruta M-50.

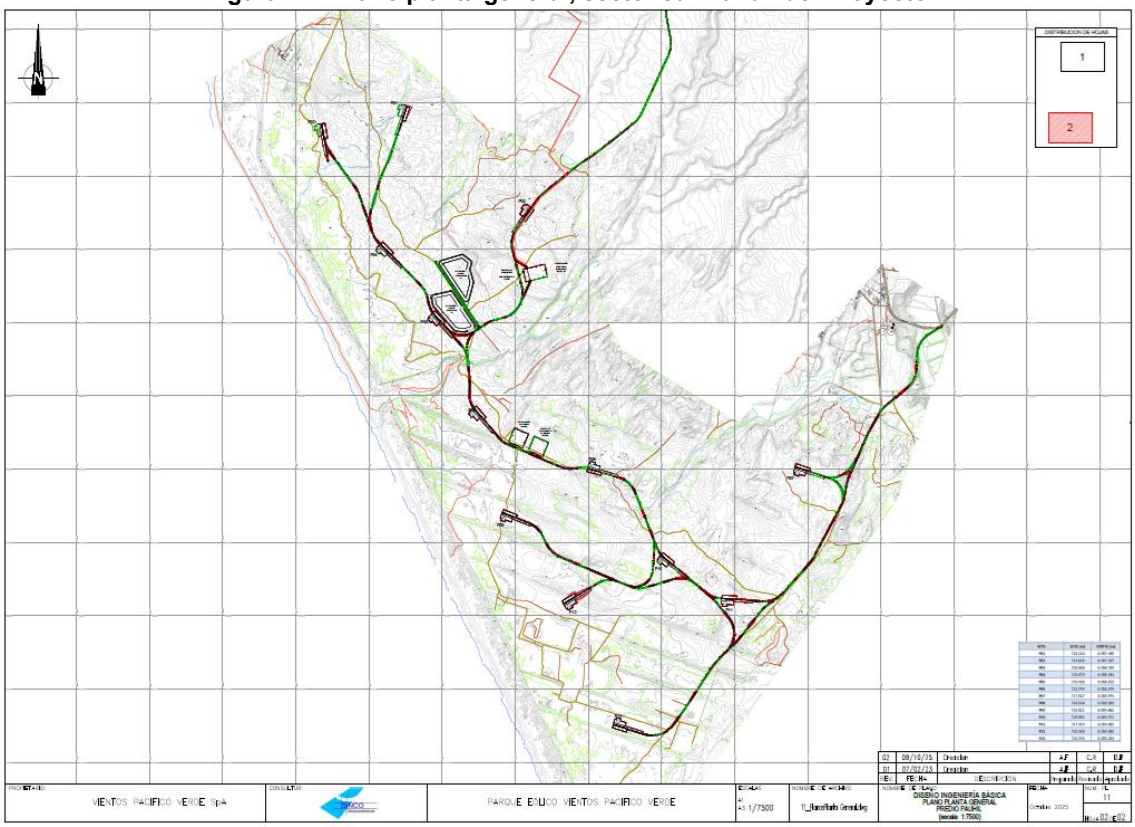
La Figura 4-1 y Figura 4-2, muestran el plano planta general del parque eólico para los sectores norte y sur, respectivamente. Mientras que la Tabla 4-1, presenta la ubicación en el sector norte y sur y coordenadas UTM de los aerogeneradores considerados en el Proyecto.

Figura 4-1. Plano planta general, sector norte Estancia La Flora del Proyecto



Fuente: Titular del Proyecto, 2025.

Figura 4-2. Plano planta general, sector sur Pahuil del Proyecto



Fuente: Titular del Proyecto, 2025.

Tabla 4-1. Coordenadas UTM aerogeneradores del Proyecto

Sector	Aerogenerador	Coordenas UTM Datum WGS84 Huso 18 Sur	
		Este (m)	Norte (m)
Norte – Estancia La Flora	F01	718.325	6.063.665
	F02	719.007	6.063.809
	F03	719.517	6.063.346
	F04	718.925	6.062.871
	F05	717.689	6.062.988
	F06	718.117	6.062.661
	F07	716.557	6.062.782
	F08	717.010	6.062.403
	F09	717.606	6.062.107
Sur - Pahuil	P01	715.218	6.057.465
	P02	714.645	6.057.327
	P03	716.068	6.056.784
	P04	715.070	6.056.491
	P05	715.426	6.056.023
	P06	715.704	6.055.375
	P07	717.927	6.054.974
	P08	716.526	6.055.033
	P09	715.921	6.054.662
	P10	716.992	6.054.371
	P11	717.434	6.054.081
	P12	719.369	6.054.063
	P13	716.704	6.053.284

Fuente: Titular del Proyecto, 2025.

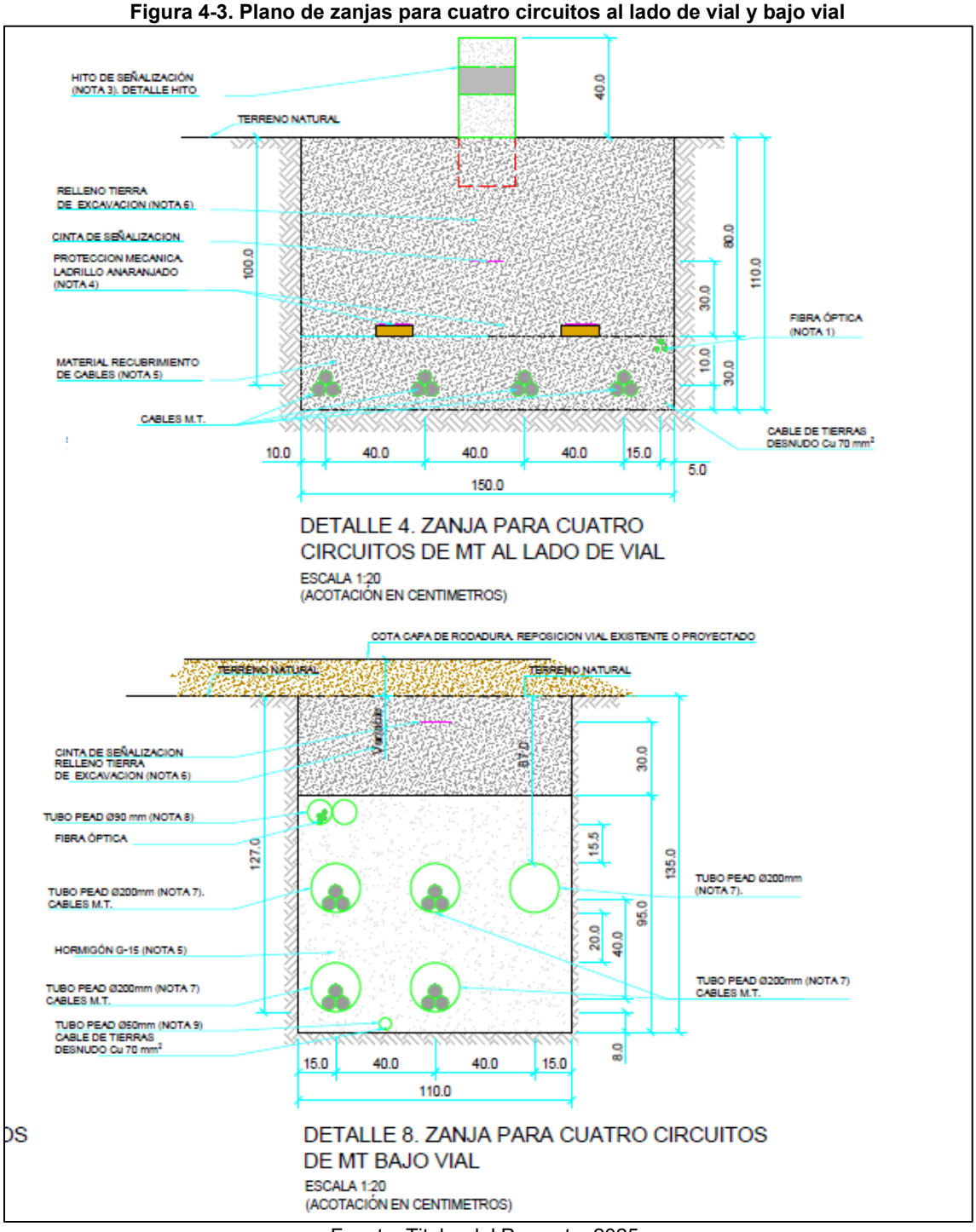
4.2 RED DE MEDIA TENSIÓN

El Proyecto considera la habilitación de una red colectora de la energía generada que se transporta mediante circuitos enterrados en zanja a una tensión de 33 kV, dispuesta en paralelo a los caminos internos y cuya extensión será de aproximadamente 26,83 km de extensión.

La línea de media tensión soterrada permitirá la conexión entre los aerogeneradores con la subestación eléctrica elevadora 33/220 kV ubicada al sur del sector Pahuil. Para ello, la red colectora debe cruzar el río Pinotalca, hacia el sur mediante una estructura aérea. En el tramo del puente la línea de media tensión no será soterrada, sino que los 3 circuitos de la línea se instalarán dentro de tubos de acero galvanizado, un tubo por circuito con un diámetro aproximado de 8 pulgadas e irán adosados a la estructura del puente mediante soportes metálicos anclados.

En todo el resto del tendido soterrado, los cables van instalados en zanjas de 1 a 4 circuitos en trayectorias paralelas a los caminos internos. Los conductos tubos por donde se instalarán los cables de media tensión serán tubos de doble pared con capa exterior corrugada fabricados en polietileno de alta densidad (pead) de diámetro 200mm. El cable de media tensión es XLPE Aluminio 18/30(36) kV. La Figura 4-3 muestra secciones tipo de zanjas para cuatro circuitos.

Figura 4-3. Plano de zanjas para cuatro circuitos al lado de vial y bajo vial



Fuente: Titular del Proyecto, 2025.

La Tabla 4-2 presenta las características generales de la red de media tensión de 33kV.

Tabla 4-2. Características de la red de media tensión 33kV

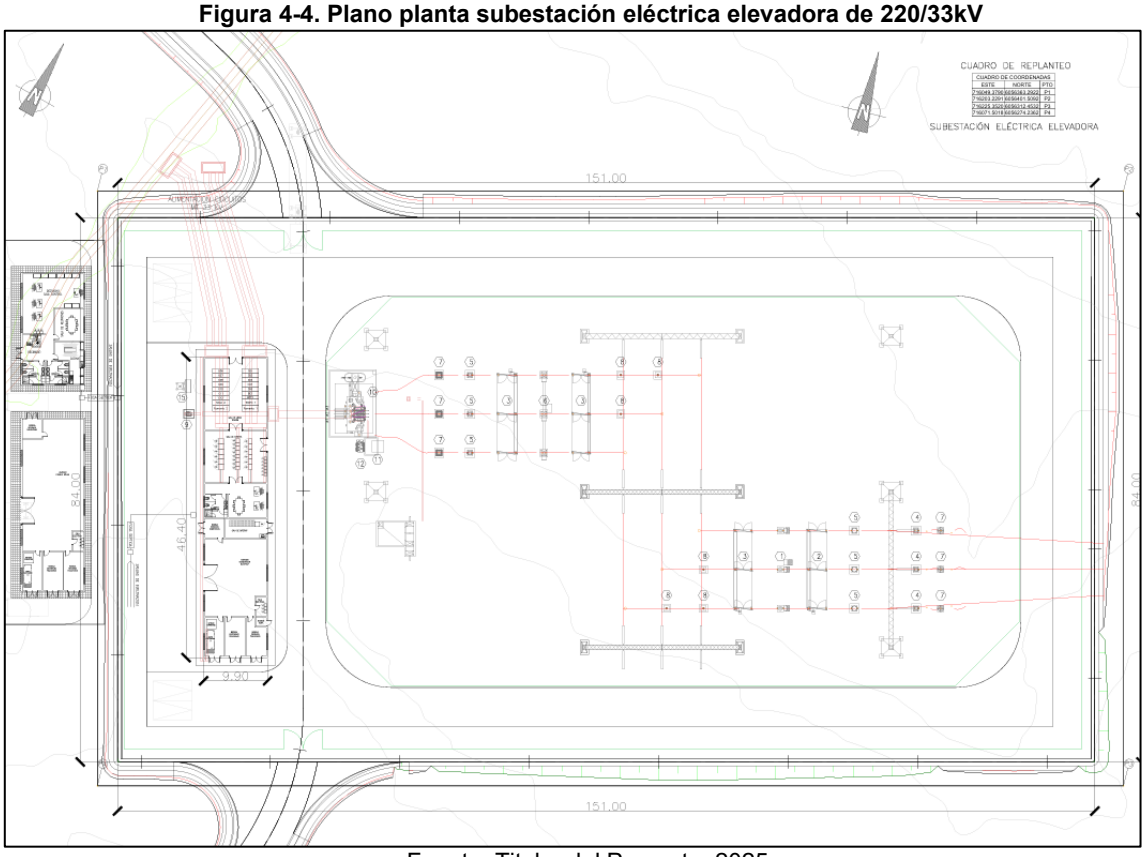
	DESDE	HASTA	N° WTG	P (kW)	Ls (m)	V (kV)	Cos φ	Sen φ	In(A)	Cable Seleccionado
C1	FO2	FO3	1	7000	1715	33	0.95	0.31	129	XLPE AL 300mm2
	FO3	FO4	2	14000	1195	33	0.95	0.31	258	XLPE AL 300mm2
	FO4	SET	3	21000	10285	33	0.95	0.31	387	XLPE AL 630mm2
C2	FO1	FO6	1	7000	1335	33	0.95	0.31	129	XLPE AL 300mm2
	FO6	FO9	2	14000	2210	33	0.95	0.31	258	XLPE AL 300mm2
	FO9	SET	3	21000	7560	33	0.95	0.31	387	XLPE AL 630mm2
C3	FO7	FO5	1	7000	1375	33	0.95	0.31	129	XLPE AL 300mm2
	FO5	FO8	2	14000	1140	33	0.95	0.31	258	XLPE AL 300mm2
	FO8	SET	3	21000	7910	33	0.95	0.31	387	XLPE AL 630mm2
C5 0										
	P03	SET	1	7000	560	33	0.95	0.31	129	XLPE AL 95mm2
C6	P01	P04	1	7000	1090	33	0.95	0.31	129	XLPE AL 95mm2
	P02	P04	1	7000	1015	33	0.95	0.31	129	XLPE AL 95mm2
	P04	SET	3	21000	1785	33	0.95	0.31	387	XLPE AL 630mm2
C7	P08	P06	1	7000	1035	33	0.95	0.31	129	XLPE AL 95mm2
	P06	P05	2	14000	850	33	0.95	0.31	258	XLPE AL 300mm2
	P05	SET	3	21000	1190	33	0.95	0.31	387	XLPE AL 630mm2
C8	P09	P12	1	7000	1300	33	0.95	0.31	129	XLPE AL 95mm2
	P12	P10	2	14000	1170	33	0.95	0.31	258	XLPE AL 300mm2
	P10	SET	3	21000	3125	33	0.95	0.31	387	XLPE AL 630mm2
C9	P07	P11	1	7000	1680	33	0.95	0.31	129	XLPE AL 95mm2
	P13	P11	1	7000	1860	33	0.95	0.31	129	XLPE AL 95mm2
	P11	SET	3	21000	3635	33	0.95	0.31	387	XLPE AL 630mm2

Fuente: Titular del Proyecto, 2025.

4.3 SUBESTACIÓN ELÉCTRICA ELEVADORA

La Figura 4-4 presenta una planta de la subestación eléctrica elevadora del Proyecto, destacándose como fuentes de campos electromagnéticos el transformador de poder, las barras conductoras y el marco de línea de salida de la línea de 220kV.

Figura 4-4. Plano planta subestación eléctrica elevadora de 220/33kV



Fuente: Titular del Proyecto, 2025.

Dada la potencia del parque eólico, se considera para el transformador una potencia nominal de 200MVA.

5. CAMPO ELECTROMAGNÉTICO EN ALTA TENSIÓN

En el caso en estudio, la red de media tensión de 33 kV es subterránea, de modo que el conductor es un cable monofásico con aislación sólida y una pantalla metálica que impide la emisión de campo eléctrico al exterior del cable. Las unidades de campo eléctrico son Volt por metro [V/m] o Kilovolt por metro [kV/m] en alta tensión. Sólo se manifiesta en el exterior del cable el campo magnético.

El campo magnético se debe a la corriente que circula por los conductores y no depende del nivel de voltaje de la línea, pero sí del consumo. La magnitud representativa del campo magnético es la “Inducción Magnética” o “Densidad de flujo Magnético” B, que tiene como unidad de medida práctica el mili Gauss (1 mG = 10-3 Gauss) o el micro Tesla (1μT = 10-6 Tesla) y se relacionan por: 1 μT = 10 mG.

Para investigar los efectos de los campos electromagnéticos, se caracteriza al campo eléctrico y el campo magnético cerca de una instalación de alta tensión por el concepto “Campo a nivel del suelo”, que corresponde al campo eléctrico o magnético medido o calculado a 1 metro de altura sobre el suelo, en ausencia de otros objetos.

5.1 NORMAS DE REFERENCIA PARA CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS DE 50 HZ

En nuestro país no existe reglamentación específica relativa a los valores límites permitidos de exposición de las personas a los campos electromagnéticos de frecuencia industrial en instalaciones de potencia en general. No obstante, la regulación ambiental que rige el tema de emisiones señala que, de no existir una regulación nacional, debe aplicarse como norma de referencia aquella que se encuentre vigente en estados específicos. El Decreto Nº40 del Ministerio del Medio Ambiente, "Aprueba Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental", que entró en vigencia el 24-12-2013, indica en su Artículo 11:

- *"Las normas de calidad ambiental y de emisión que se utilizarán como referencia para los efectos de evaluar si se genera o presenta el riesgo indicado en la letra a) y los efectos adversos señalados en la letra b), ambas del artículo 11 de la Ley, serán aquellas vigentes en los siguientes Estados: República Federal de Alemania, República Argentina, Australia, República Federativa del Brasil, Canadá, Reino de España, Estados Unidos Mexicanos, Estados Unidos de América, Nueva Zelandia, Reino de los Países Bajos, República Italiana, Japón, Reino de Suecia y Confederación Suiza. Para la utilización de las normas de referencia, se priorizará aquel Estado que posea similitud en sus componentes ambientales, con la situación nacional y/o local, lo que será justificado razonablemente por el proponente.*

La recomendación de uso más frecuente para público general y exposición permanente es la publicada por la ICNIRP [3], organismo no gubernamental reconocido por la Organización Mundial de la Salud como referente en el tema, que establece 5.000 [V/m] para el campo eléctrico y 200 [micro Tesla] para la inducción magnética, valores que han sido acogidos por la normativa de diversos países incluidos en la nómina anterior. La ICNIRP es un organismo experto de consulta en temas de radiaciones no ionizantes reconocida por la Organización Mundial de la Salud, OMS, la Organización Internacional del Trabajo (International Labour Organization - ILO) y la Unión Europea. Cabe indicar que en la publicación del año 1998 del mismo organismo, se indicó un límite de 100 [micro Tesla] para el campo magnético, que fue modificado a 200 [micro Tesla] en la publicación del 2010.

El año 2021, se publicó en Chile el Pliego Técnico Normativo RPTD N°07 [4], dictado por Resolución Exenta Nº 33.277, de fecha 10/09/2020, de la Superintendencia de Electricidad y Combustibles, que en su Artículo 4.7 establece:

- *"Los límites máximos permisibles para la seguridad de las personas, en cuanto a la emisión de campo electromagnético para el diseño de líneas aéreas de corriente alterna de 50 Hz de frecuencia, y que será evaluado en el exterior de la franja de seguridad, a 1 metro sobre el nivel del suelo, en condiciones normales de operación de la línea, con los conductores en reposo, serán los que determinen las normas respectivas. En ausencia de regulación técnica nacional, se debe cumplir con lo siguiente:*
  - 5 kV/m para campo eléctrico (valor RMS)
  - *100 µT para campo magnético (valor RMS)."*

En junio de 2023, el Servicio de Evaluación Ambiental (SEA) publicó el documento "CRITERIO DE EVALUACIÓN EN EL SEIA: Evaluación de impactos por radiación electromagnética en proyectos de transmisión eléctrica", [6] en el cual sugiere considerar los valores recomendados por la ICNIRP u otra normativa elaborada en función de estos mismos estándares y entrega una Tabla que se reproduce a continuación, con la siguiente información:

Tabla 5-1. Límites internacionales según país para campo eléctrico e inducción magnética

País	Nombre	Campo eléctrico (KV/m)	Densidad de flujo magnético (μT)
Consejo de Unión Europea	Directive 2004/40/EC	5	100
Argentina	Resolución Sec. Energía 77/1998	3	25
España	Real Decreto 1066/2001	5	100
Italia	Decreto Presidencial del Consejo de ministros, 23 de abril de 2002	5	100
Reino Unido	National Radiological Protection Board UK 2004	5	100
Suiza	Ordenanza 814.710, febrero 2000	5	100

Referencia: Tabla N°2 del Reglamento del SEIA.

El documento del SEA además requiere evaluar el efecto sinérgico de los proyectos, aclarando que, para la evaluación de la radiación electromagnética emitida por un conjunto de proyectos de transmisión eléctrica o subestaciones, se entenderá el concepto de "impacto acumulativo" por sobre el de "efecto sinérgico".

5.2 NORMA DE REFERENCIA PARA RADIO INTERFERENCIA EN ALTA TENSIÓN.

En Chile no existe una normativa específica que establezca límite a las interferencias electromagnéticas generadas por líneas de transmisión. A nivel internacional existen normativas que establecen límites para fuentes de carácter general, pero la única específica para líneas de transmisión es la Norma Canadiense "*Limits and measurement methods of electromagnetic noise from AC power systems, 0.15-30 MHz*" [5] publicada en 1984, pero re-confirmada el 2009. Esta norma específica los métodos de medición y valores límites de radio interferencia para líneas y estaciones eléctricas de corriente alterna, definiendo 0,5MHz la frecuencia a la cual se establece los valores límites. Establece como recomendación los siguientes valores límites de radio interferencia para líneas de transmisión y subestaciones, según su nivel de tensión.

Tabla 5-2. Límite de Interferencias de radio

Voltaje nominal entre fases (KV)	Nivel de Radio Interferencia (dB/ 1μV/m)
Menos de 70	43
70 – 200	49
200 – 300	53
400 – 600	60
Sobre 600	63

Fuente: Canadian Standards Association, 1984.

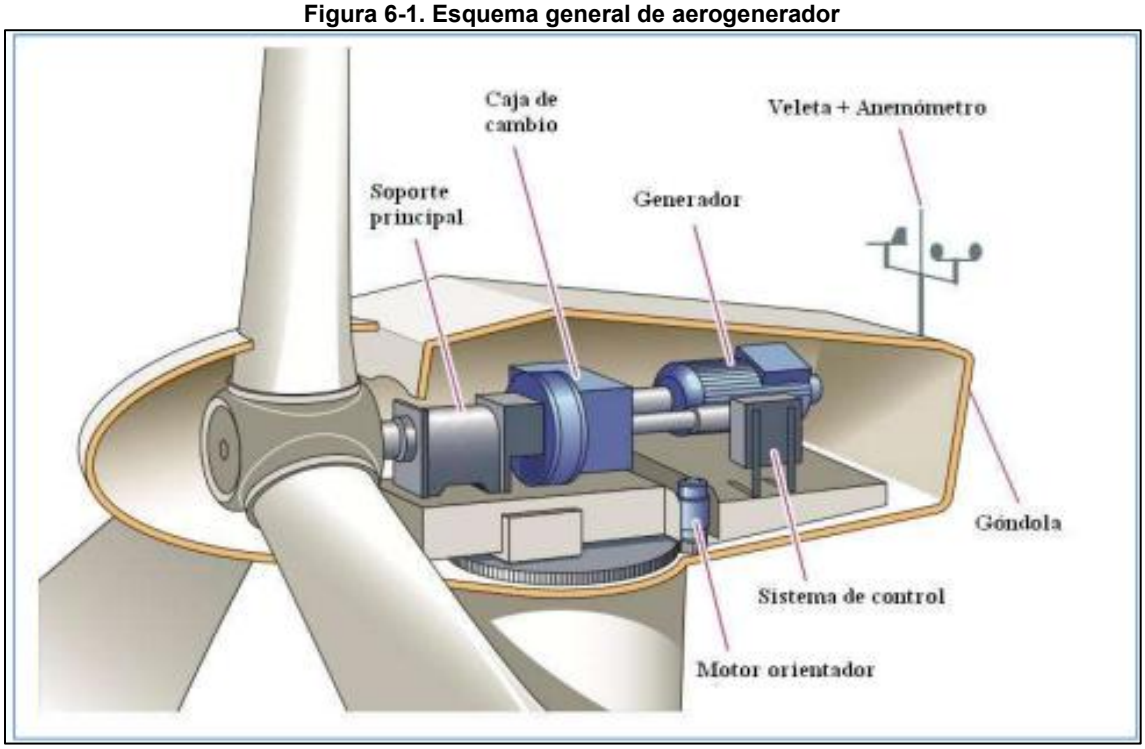
Para líneas de transmisión, los valores indicados son a 15 m de la fase externa y a 0,5 MHz. Para subestaciones, los valores son medidos a 15 m del cerco del recinto de la subestación. La Norma se aplica en condiciones meteorológicas favorables, (buen tiempo). Durante períodos de lluvia, nieve o niebla, puede producirse ruido que supere los límites establecidos.

6. CAMPO ELECTROMAGNÉTICO GENERADO POR AEROGENERADORES

En la Figura 6-1 se muestra un esquema de los principales equipos eléctricos que componen un aerogenerador, ubicados en la góndola.

La góndola contiene los componentes claves del aerogenerador: caja multiplicadora, sistema de frenado, sistemas de orientación, ejes de alta y baja velocidad, generador de corriente, controladores electrónicos, veleta y anemómetro. El equipo eléctrico que actúa como fuente electromagnética principal es el generador.

Figura 6-1. Esquema general de aerogenerador

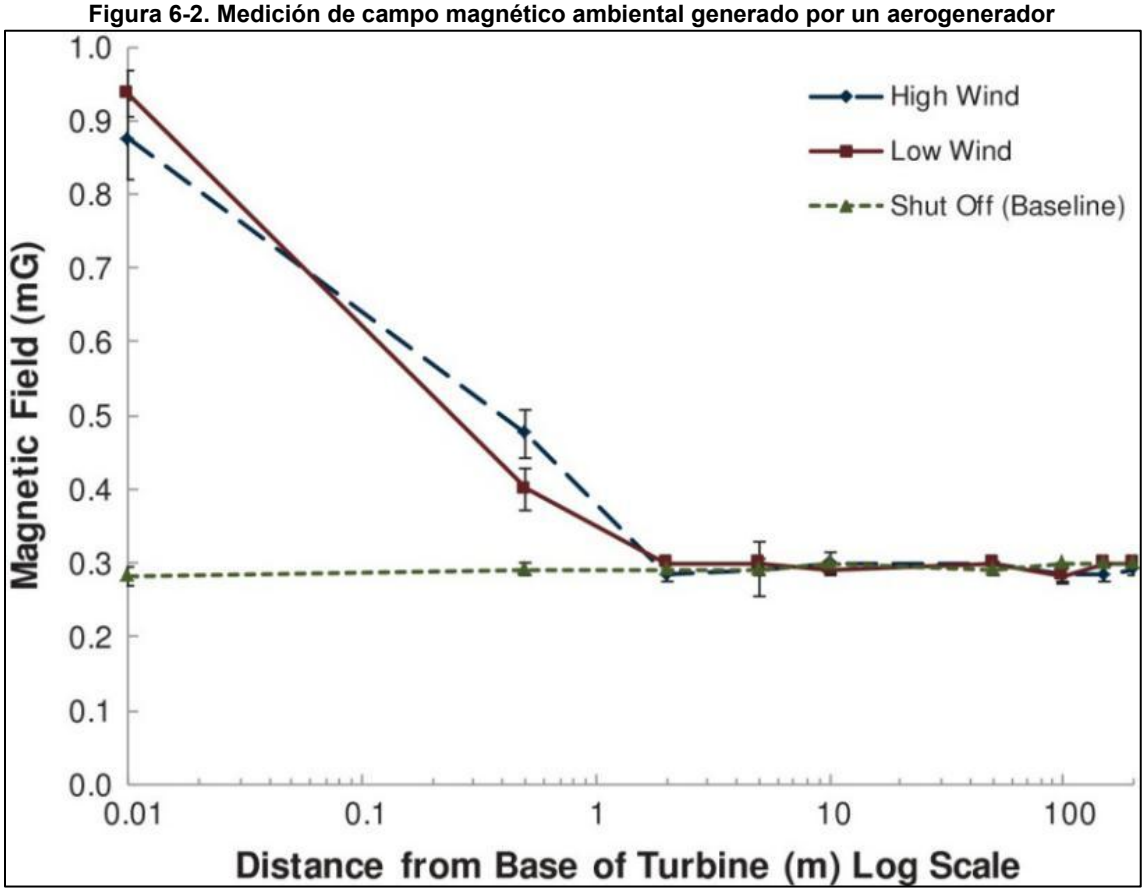


Fuente: http://energiadoblecero.com/wp-content/uploads/2010/03/turbina_eolica.jpg.

En la góndola del aerogenerador, los conductores se encuentran recubiertos con aislación sólida y una pantalla metálica externa; por lo tanto, el campo eléctrico queda confinado al interior del cable, con una manifestación externa nulo.

El campo magnético, sin embargo, se manifiesta externamente al equipo. Para estimar el campo magnético fuera de los aerogeneradores, se recoge información de la referencia [2], única publicación que entrega mediciones de campo magnético en torno a aerogeneradores. Los resultados se muestran en el gráfico de la Figura 6-2.

Figura 6-2. Medición de campo magnético ambiental generado por un aerogenerador



Fuente: Referencia [2].

Este estudio se realizó para caracterizar la inducción magnética en las cercanías de un parque eólico activo en Ontario. Las mediciones se tomaron a 1m de altura sobre el suelo, a distancias que oscilaban entre 0 y 500 m desde las turbinas, en las proximidades de 15 turbinas eólicas Vestas de 1,8 MW, y se recogieron en tres condiciones de funcionamiento (viento fuerte, viento bajo, y apagada).

Extrapolando linealmente en potencia, para un generador de 7 MW, se tendrá a nivel del suelo una inducción magnética del orden de 3,7 [mili Gauss] equivalente a 0,4 [micro Tesla] en la base del aerogenerador y 1,17 [mili Gauss] equivalente a 0,12 [micro Tesla] a 10m. Por lo tanto, el aerogenerador, al ubicarse sobre 100m de altura, considerando que los datos corresponden a aerogeneradores de generaciones anteriores, muy probablemente de menor altura que los actuales, en forma conservadora se puede indicar que no representa a nivel del suelo una fuente relevante de campo eléctrico ni de campo magnético de baja frecuencia.

Para el transformador de igual potencia ubicado a nivel de piso, se ocupa una relación entregada en la bibliografía técnica para estimar el campo magnético en su entorno: en base a una serie de experiencias y resultados obtenidos en una amplia gama de potencias, en la referencia [8] se sugiere una relación simple para estimar el valor efectivo de la inducción magnética en la vecindad de un transformador:

$$Brms(r) = kTr\ P_N/r^3 \quad [micro\ Tesla]$$

Donde:

P_N : Potencia Nominal del equipo [kVA]

r : Distancia desde el centro del equipo [m]

kTr : Coeficiente de Campo [ms/A], [Tm^3/VA]

Un valor establecido de kTr en la misma referencia es: 0,04 Tm^3/kVA.

Ocupando esta relación, si el transformador se ubica a nivel de piso, se obtiene la siguiente tabla de valores:

Tabla 6-1. Inducción magnética en torno a transformador de 7 MW de aerogenerador

Distancia [m]	Inducción magnética [micro Tesla]
3	10,37
6	1,296
9	0,384
12	0,162

Fuente: Elaboración propia, 2026.

Para el transformador ubicado a nivel de piso se obtiene un campo magnético significativo inmediatamente cerca del transformador, pero que se reduce fuertemente y a 10m es inferior a 0,3 [micro Tesla].

7. CAMPO ELECTROMAGNÉTICO GENERADO POR LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN SUBTERRÁNEA

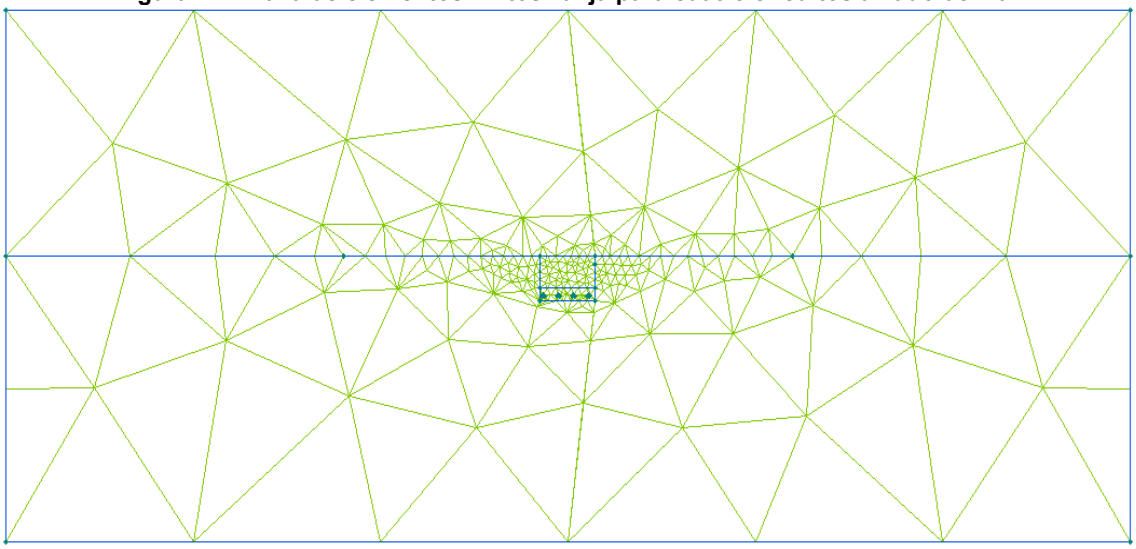
La línea de distribución subterránea utiliza un conductor con aislación sólida y una pantalla metálica que encierra el conjunto, eliminando la emisión de campo eléctrico al exterior del cable; solamente se manifiesta hacia el exterior el campo magnético generado por la corriente por los conductores.

Para efectuar le estimación de la inducción magnética, se analiza a continuación la situación más exigente, que corresponde a la configuración de zanjas con 4 circuitos de 33kV, como muestra la Figura 4. Los datos de corriente ingresados por circuito, según una configuración triangular, numerados de izquierda a derecha, son:

- Fase 1: 387 Amperes por conductor; ángulo 0°.
- Fase 2: 387 Amperes por conductor; ángulo -120°.
- Fase 3: 387 Amperes por conductor; ángulo 120°.

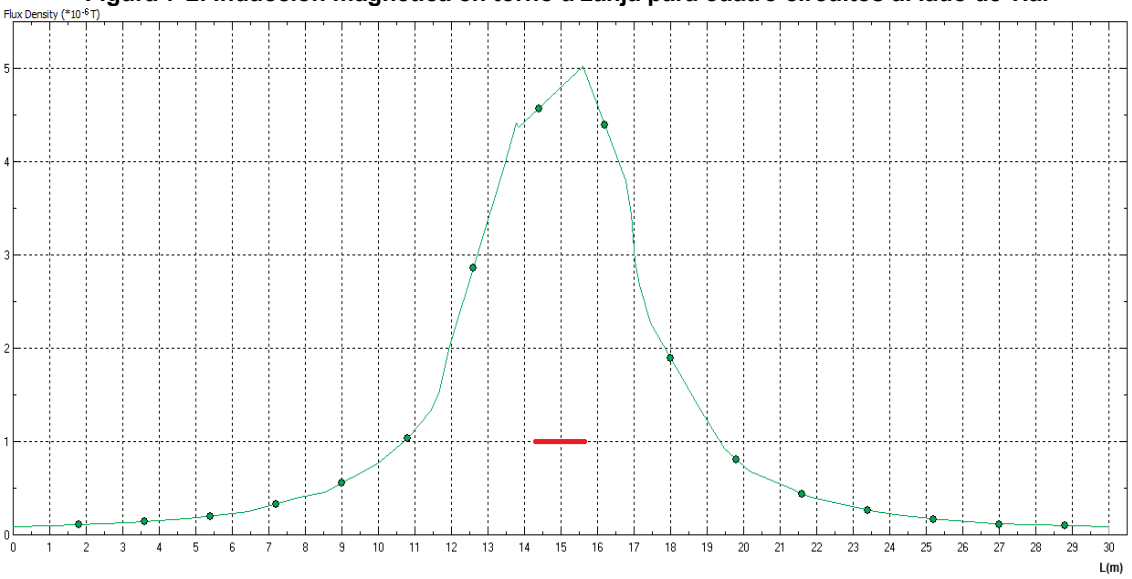
Se presenta a continuación la malla de elementos finitos y los gráficos resultantes de inducción magnética para la zanja de cuatro circuitos al lado de vial y para la zanja de cuatro circuitos bajo vial; la línea transversal en las figuras indica la superficie del suelo, la línea roja en los gráficos señala la ubicación de la zanja.

Figura 7-1. Malla de elementos finitos zanja para cuatro circuitos al lado de vial



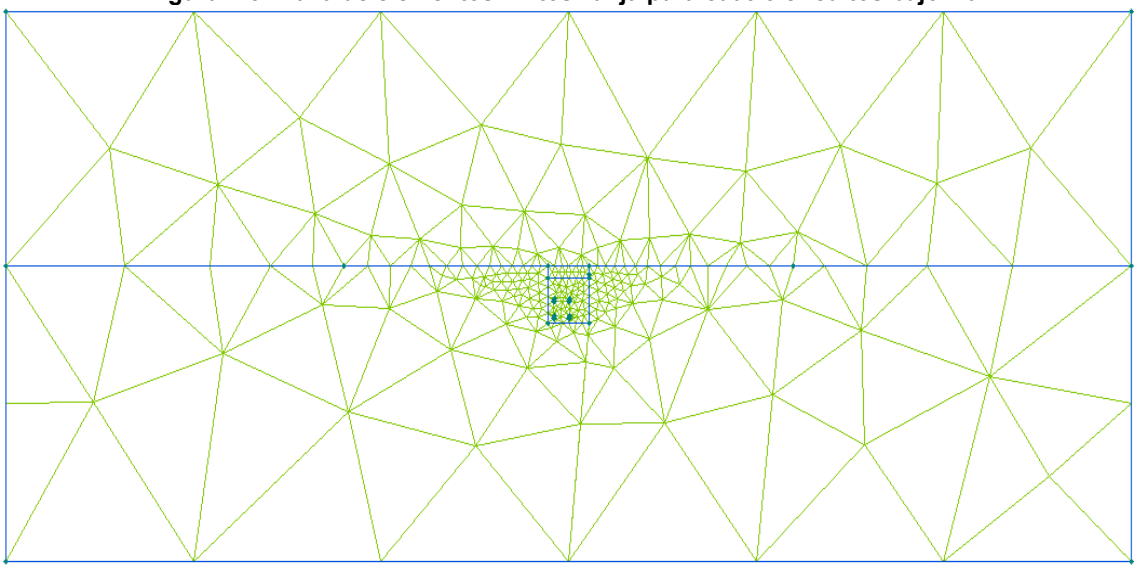
Fuente: Elaboración propia, 2026.

Figura 7-2. Inducción magnética en torno a zanja para cuatro circuitos al lado de vial



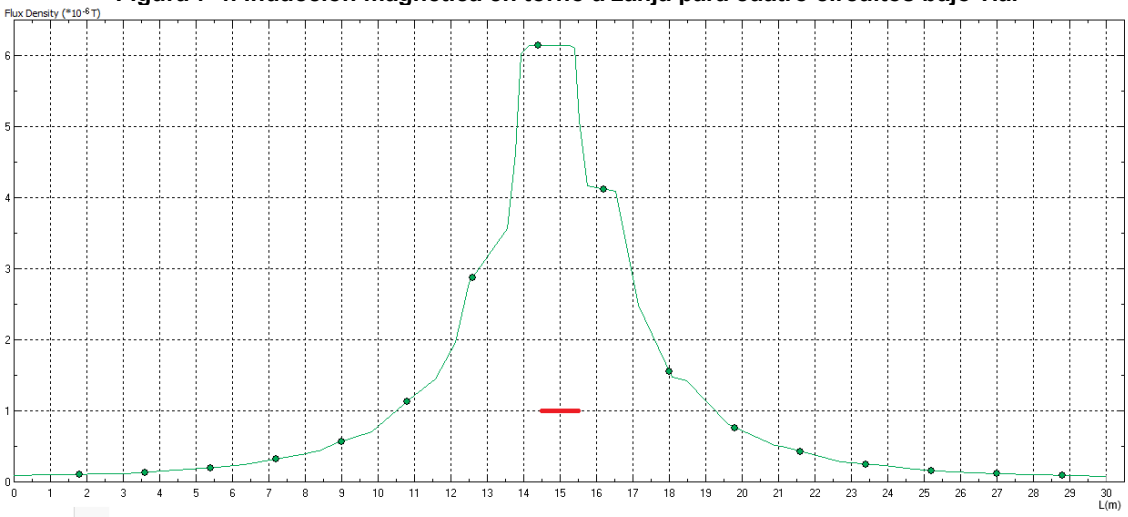
Fuente: Elaboración propia, 2026.

Figura 7-3. Malla de elementos finitos zanja para cuatro circuitos bajo vial



Fuente: Elaboración propia, 2026.

Figura 7-4. Inducción magnética en torno a zanja para cuatro circuitos bajo vial



Fuente: Elaboración propia, 2026.

El resultado para la inducción magnética sobre la zanja y a cierta distancia, en ambos tipos de configuraciones, se entrega en la Tabla 7-1.

Tabla 7-1. Magnitud de inducción magnética a distancia de zanja

Distancia [m]	Zanja para cuatro circuitos al lado de vial [micro Tesla]	Zanja para cuatro circuitos bajo vial [micro Tesla]
0	5,02	6,14
3	2,10	1,85
5	0,76	0,78
7	0,41	0,41
10	0,20	0,19

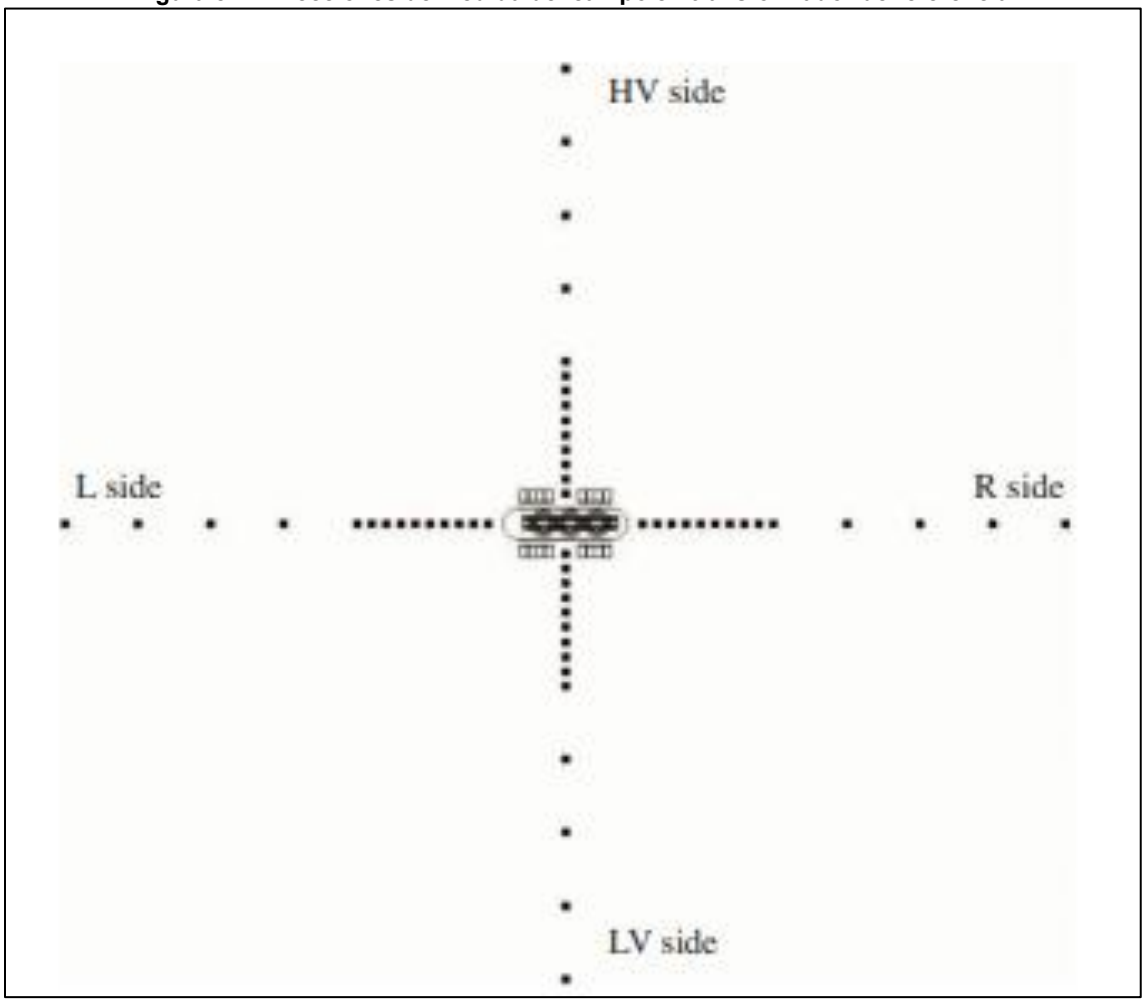
Fuente: Elaboración propia, 2026.

8. CAMPO ELECTROMAGNÉTICO GENERADO POR TRANSFORMADOR EN LA SUBESTACIÓN ELÉCTRICA ELEVADORA

El transformador es un equipo importante como fuente de generación de campo electromagnético en una subestación. Se ha considerado en este caso un transformador de 220/33kV, 200MVA.

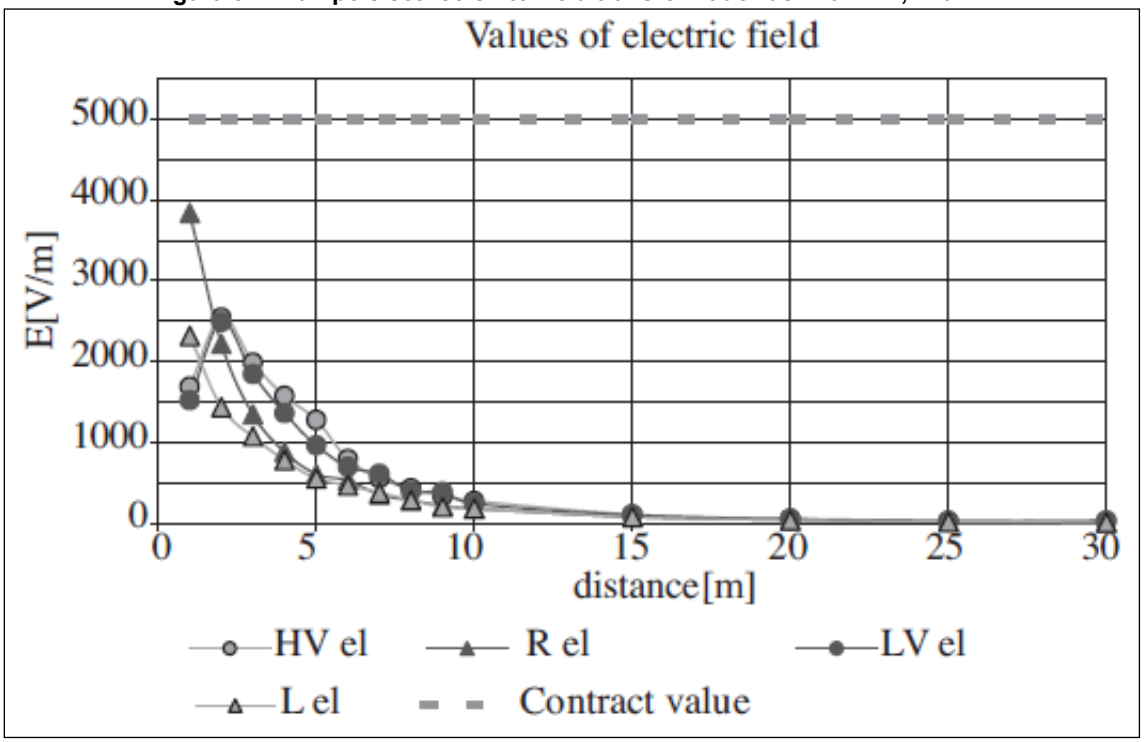
Para estimar el campo electromagnético generado por este equipo, se recurre a información bibliográfica. Se reproduce a continuación tres imágenes de la referencia [9], que corresponden a direcciones de medida y valores medidos de campo eléctrico e inducción magnética en la vecindad de un transformador de 220 MVA, 240 kV. La primera imagen muestra las cuatro direcciones en que se efectuó las mediciones y las siguientes incluyen el gráfico con valores medidos de campo eléctrico e inducción magnética.

Figura 8-1. Direcciones de medida del campo en transformador de referencia



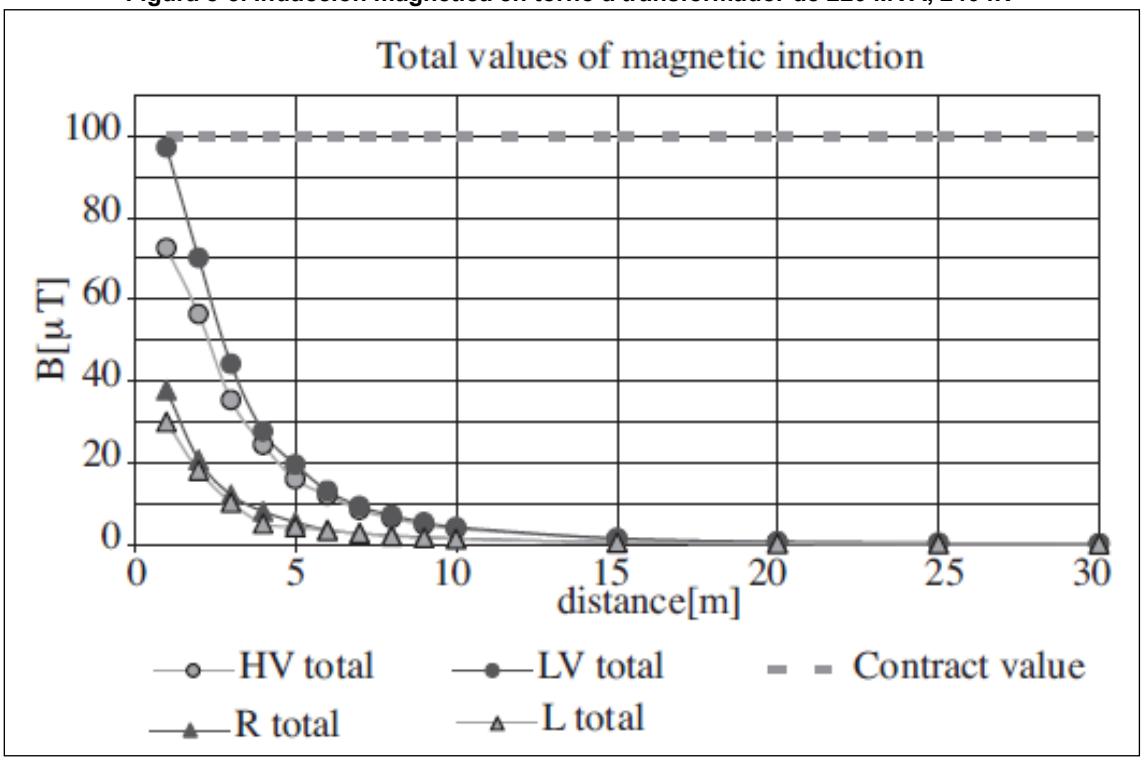
Fuente: Referencia [9].

Figura 8-2. Campo eléctrico en torno a transformador de 220 MVA, 240 kV



Fuente: Referencia [9].

Figura 8-3. Inducción magnética en torno a transformador de 220 MVA, 240 kV



Fuente: Referencia [9].

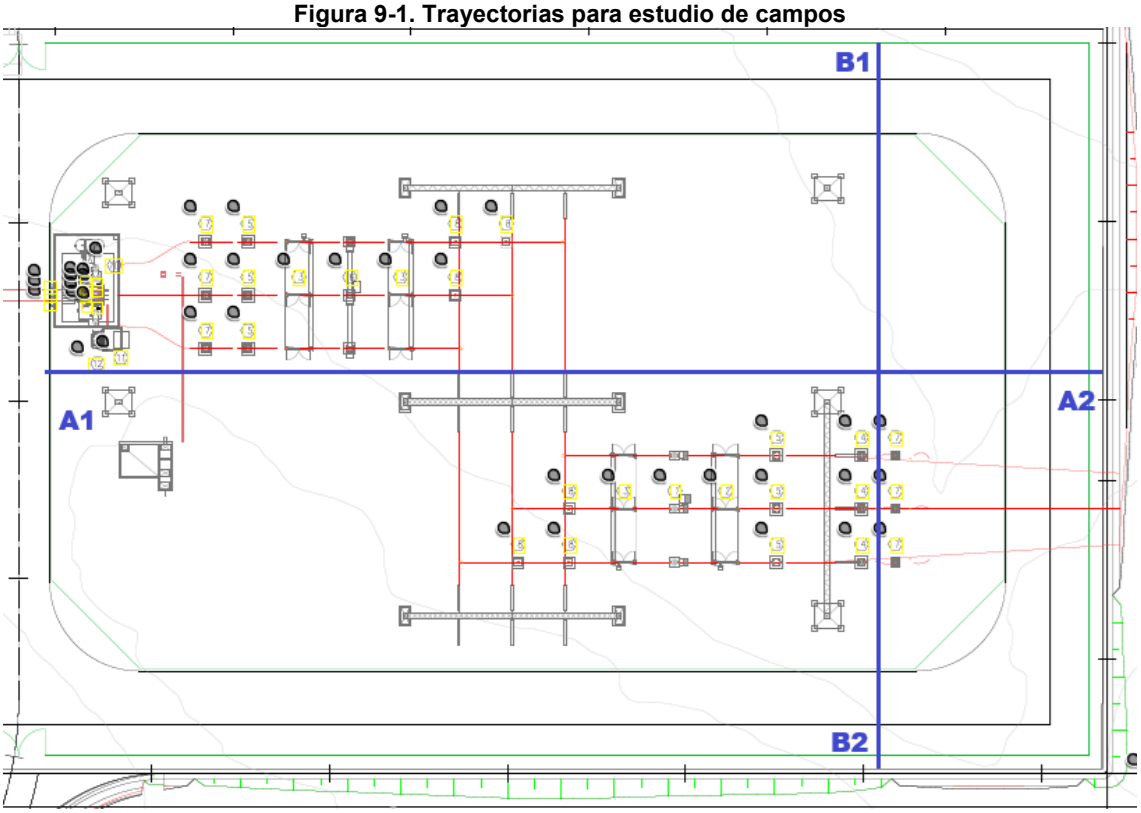
De los gráficos se observa que, a pesar de encontrar altos valores de campo eléctrico en la proximidad inmediata a la pared del transformador, sus magnitudes decaen rápidamente con la distancia; del gráfico de campo eléctrico, se observa que a 10 m del equipo, el campo eléctrico es inferior a 400 [V/m] y a 15 m del equipo, distancia aproximada desde el transformador al borde de la subestación, el efecto es inferior a 100 [V/m]. Este resultado es totalmente aplicable al transformador del Proyecto, pues representa un valor conservador, ya que su voltaje de operación es 9% inferior al voltaje del transformador de la referencia.

Con respecto al campo magnético, la información no es directamente aplicable, porque la potencia del transformador del Proyecto es 10% menor que la potencia del transformador de la referencia, sin embargo, una aproximación conservadora se obtiene directamente del gráfico, con 5 [micro Tesla] a 10m del equipo y 3 [micro Tesla] a 15m del equipo.

9. CAMPO ELECTROMAGNÉTICO GENERADO POR CONDUCTORES DE LA SUBESTACIÓN ELÉCTRICA ELEVADORA

Ocupando la metodología de elementos finitos y el software QuickField, se modelan los conductores de barras y el marco de línea de la subestación. El resultado del estudio se presenta en la forma de perfiles de campo evaluados a una altura de 1,0 m sobre el suelo, a través de la trayectoria A1-A2 para considerar las barras, con 4,0m de separación entre fases y a través de la trayectoria B1-B2 para considerar el marco de línea, con 4,0m de separación entre fases, ambas mostradas en la Figura 9-1.

Figura 9-1. Trayectorias para estudio de campos



Fuente: Elaboración propia, 2026.

Los parámetros de entrada para evaluar campo eléctrico en los conductores de barra de 220kV son, numerados de izquierda a derecha:

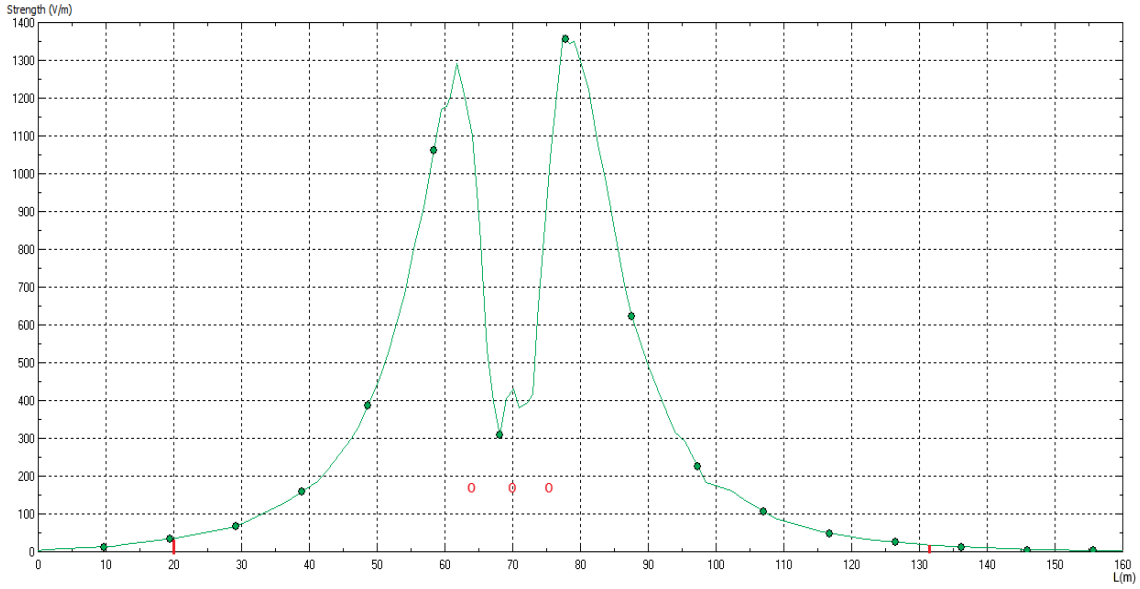
- Fase 1: 220.000/√3 = 127.017 Volts.
- Fase 2: -63.509 Volts.
- Fase 3: -63.509 Volts.

Para el análisis del campo magnético se consideró la potencia máxima del transformador 200 MVA, lo que define una corriente por fase de 524,9 Amperes. Los parámetros de entrada para evaluar inducción magnética son, por lo tanto, numerados de izquierda a derecha:

- Fase 1: 524,9 Amperes por conductor; ángulo 0°.
- Fase 2: 524,9 Amperes por conductor; ángulo -120°.
- Fase 3: 524,9 Amperes por conductor; ángulo 120°.

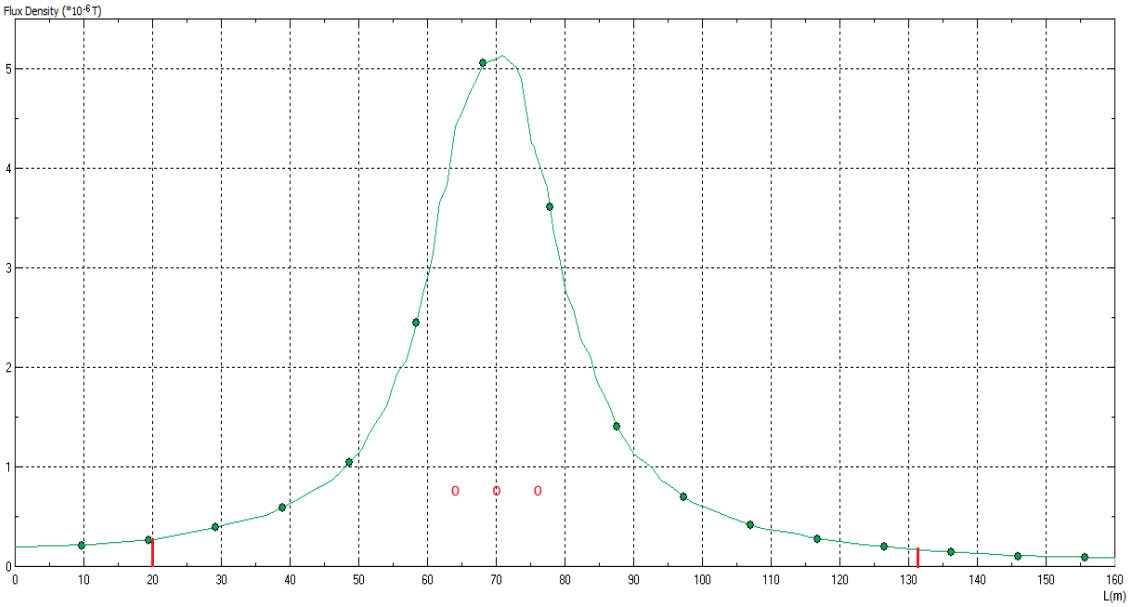
A continuación, se entregan los respectivos gráficos de campos.

Figura 9-2. Campo eléctrico a 1m sobre el suelo en trayectoria A1-A2



Fuente: Elaboración propia, 2026.

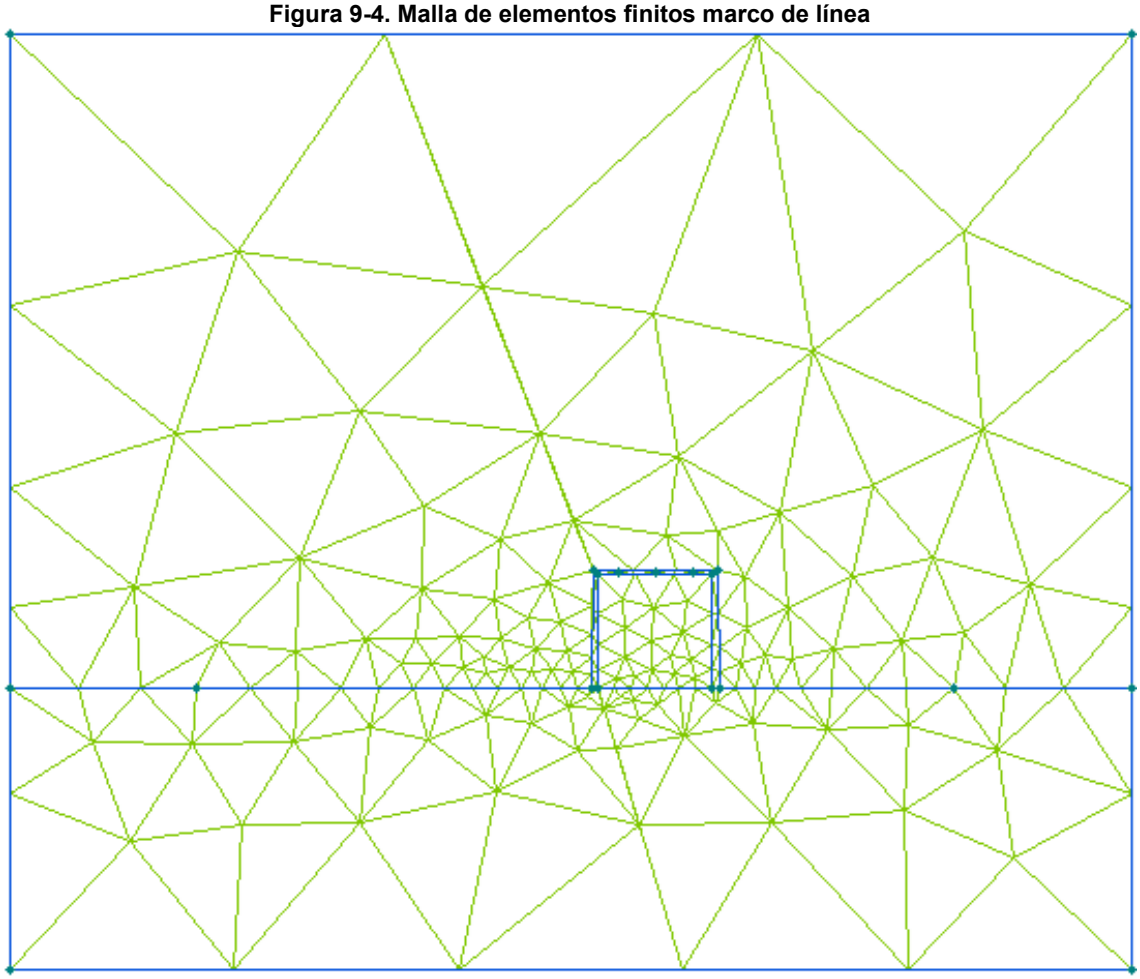
Figura 9-3. Inducción magnética a 1m sobre el suelo en trayectoria A1-A2



Fuente: Elaboración propia, 2026.

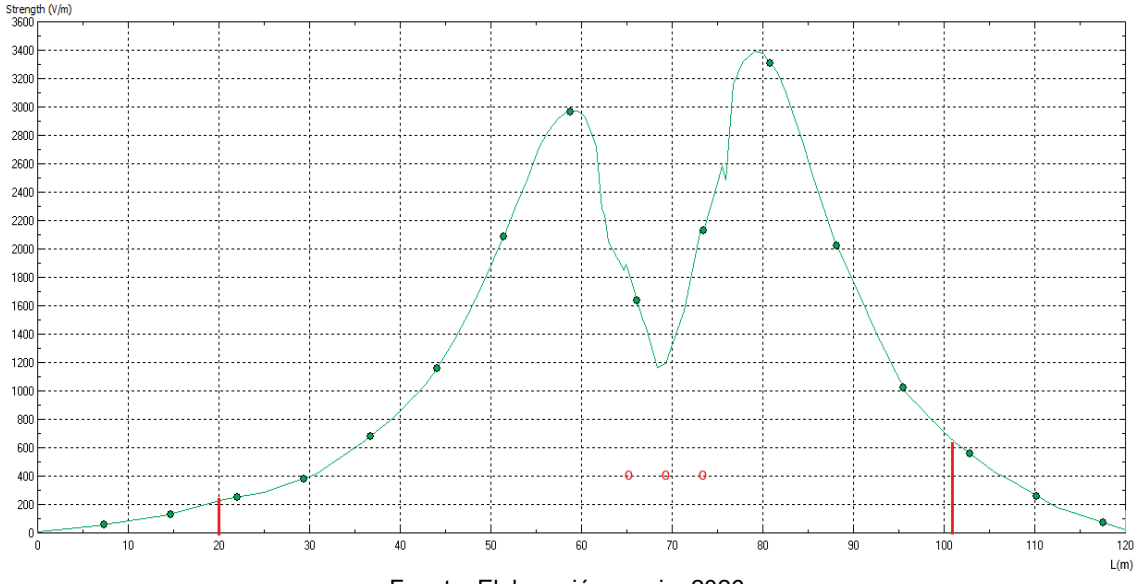
Para el marco de línea se presentan a continuación la figura de la malla de elementos finitos y los gráficos de campo eléctrico e inducción magnética.

Figura 9-4. Malla de elementos finitos marco de línea



Fuente: Elaboración propia, 2026.

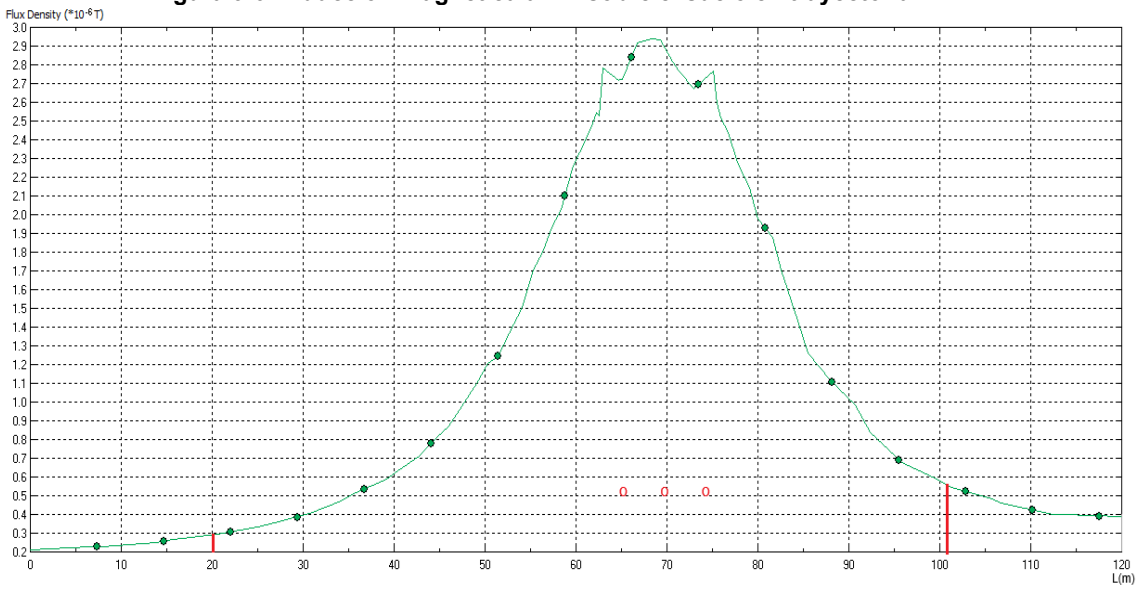
Figura 9-5. Campo eléctrico a 1m sobre el suelo en trayectoria B1-B2



Fuente: Elaboración propia, 2026.

FOCO AMBIENTAL
Consultoría Medioambiental

Figura 9-6. Inducción magnética a 1m sobre el suelo en trayectoria B1-B2



Fuente: Elaboración propia, 2026.

Las magnitudes de campo resultantes en el borde de la subestación eléctrica elevadora son las siguientes:

Tabla 9-1. Magnitudes de campo en borde subestación eléctrica elevadora

Fuente	Campo eléctrico [V/m]	Inducción magnética [micro Tesla]
Barras (Trayectoria A1 – A2)	33	0,270
Marco de línea (Trayectoria B1-B2)	657	0,556

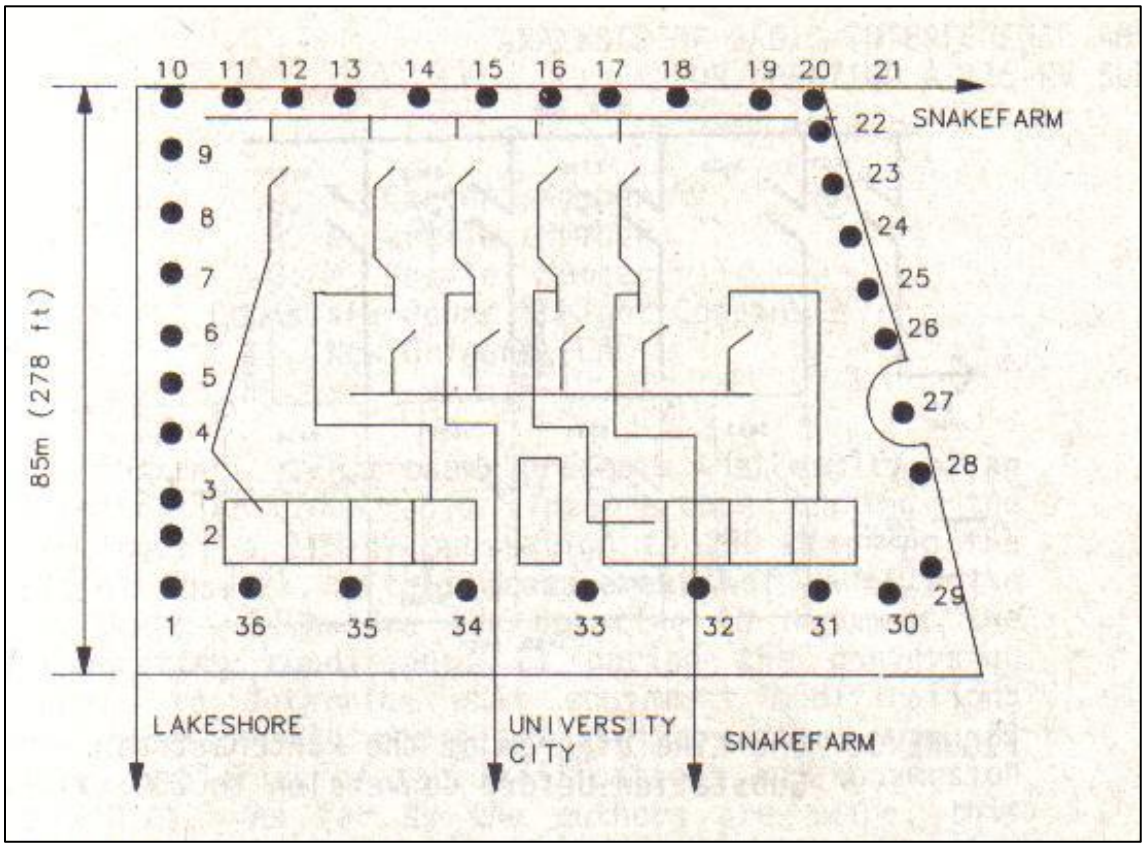
Fuente: Elaboración propia, 2026.

10. RADIO INTERFERENCIA GENERADA POR LA SUBESTACIÓN ELÉCTRICA ELEVADORA

En la referencia [7] se informa de medidas efectuadas en una subestación que modificó su voltaje de operación de 115 kV a 230 kV, y también en una subestación regularmente operando en 230 kV.

La Figura siguiente indica el esquema de la subestación Pontchartrain, que modificó su nivel de tensión, y los puntos de medida de radio interferencia.

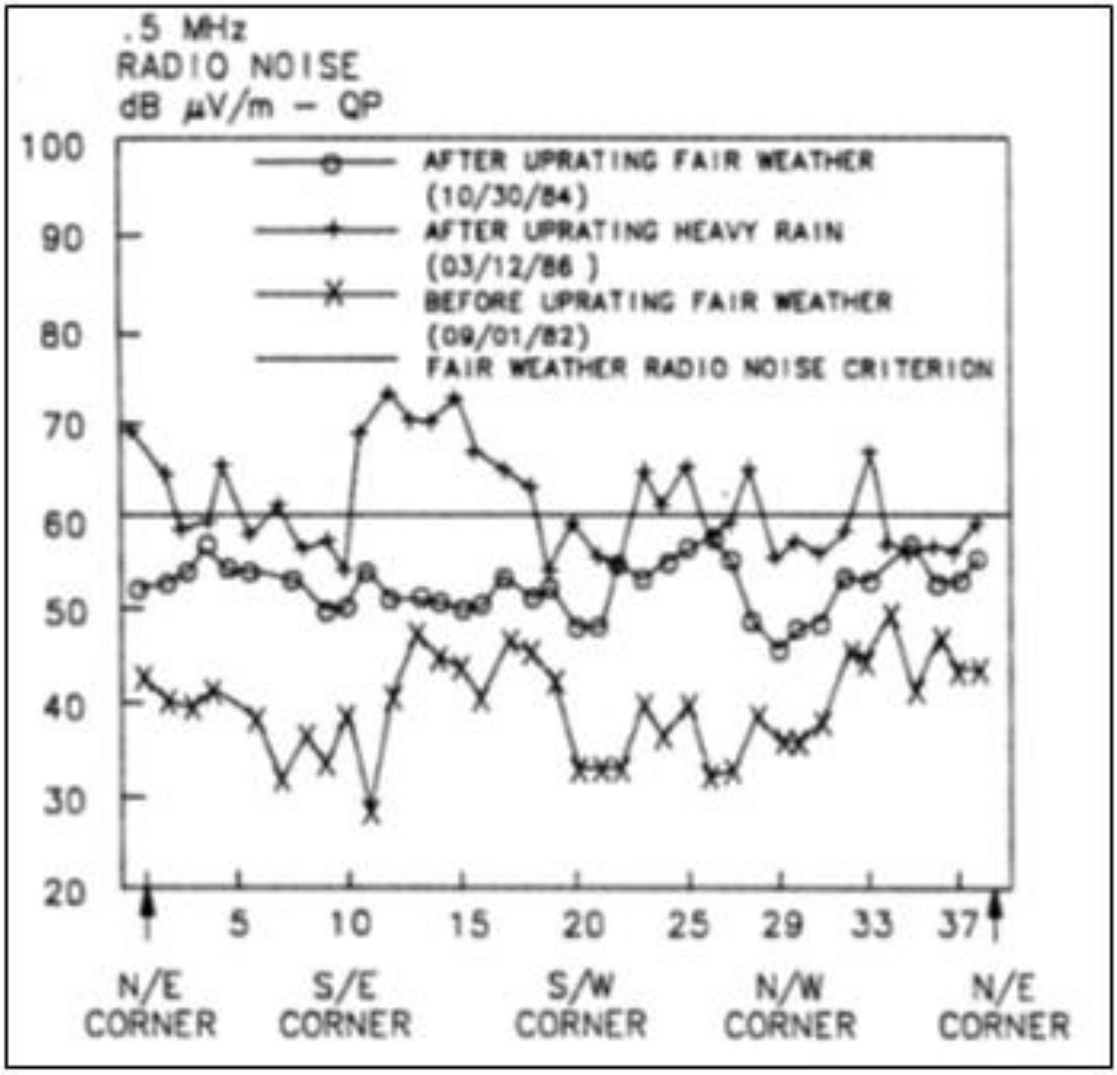
Figura 10-1. Esquema de subestación eléctrica Pontchartrain y puntos de medida de radio interferencia



Fuente: Referencia [7].

Los valores de radio interferencia medidos luego de modificar el voltaje de operación a 230 kV, en los puntos indicados, se muestran en la figura siguiente.

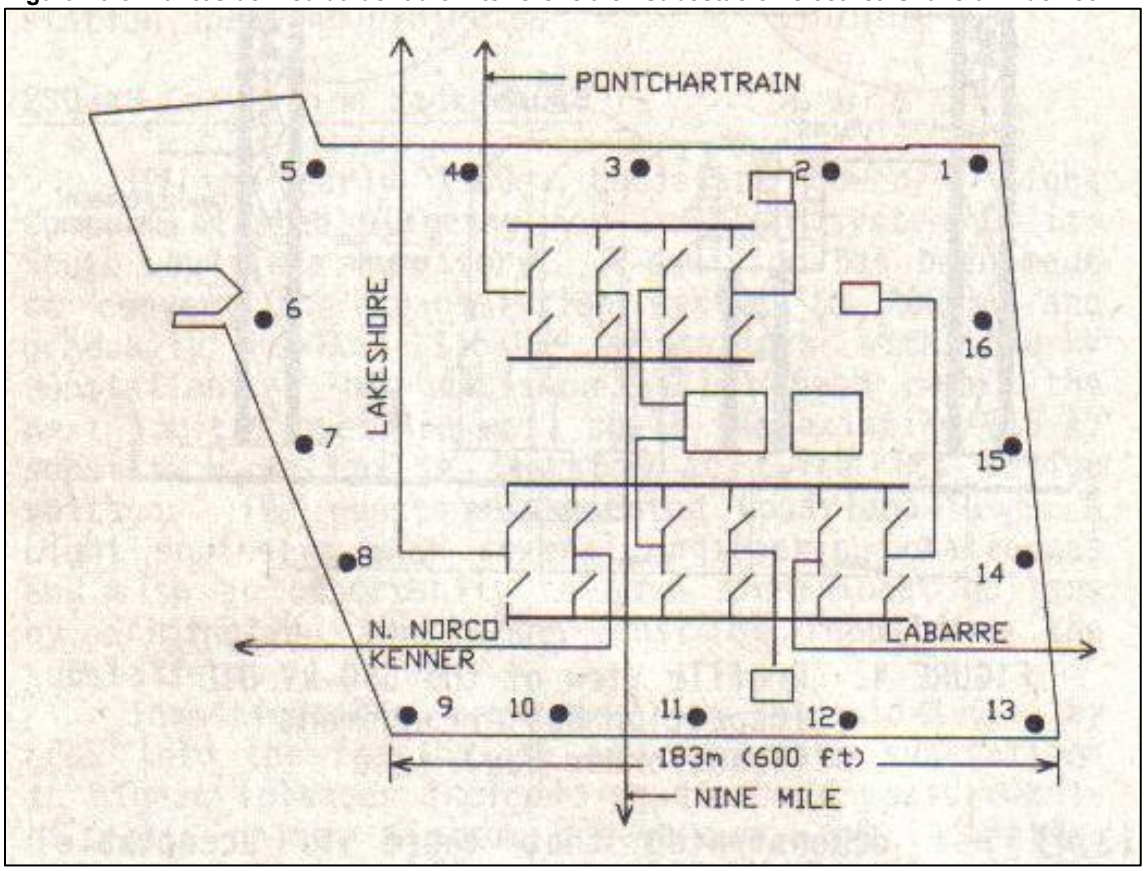
Figura 10-2. Radio interferencia medida en perímetro de subestación eléctrica Pontchartrain en 230 kV



Fuente: Referencia [7].

En la misma referencia se incluye los valores obtenidos en otra subestación, Snakefarm, que opera regularmente en 230 kV. La Figura 10-3 indica el esquema de la subestación eléctrica elevadora y los puntos de medida de radio interferencia.

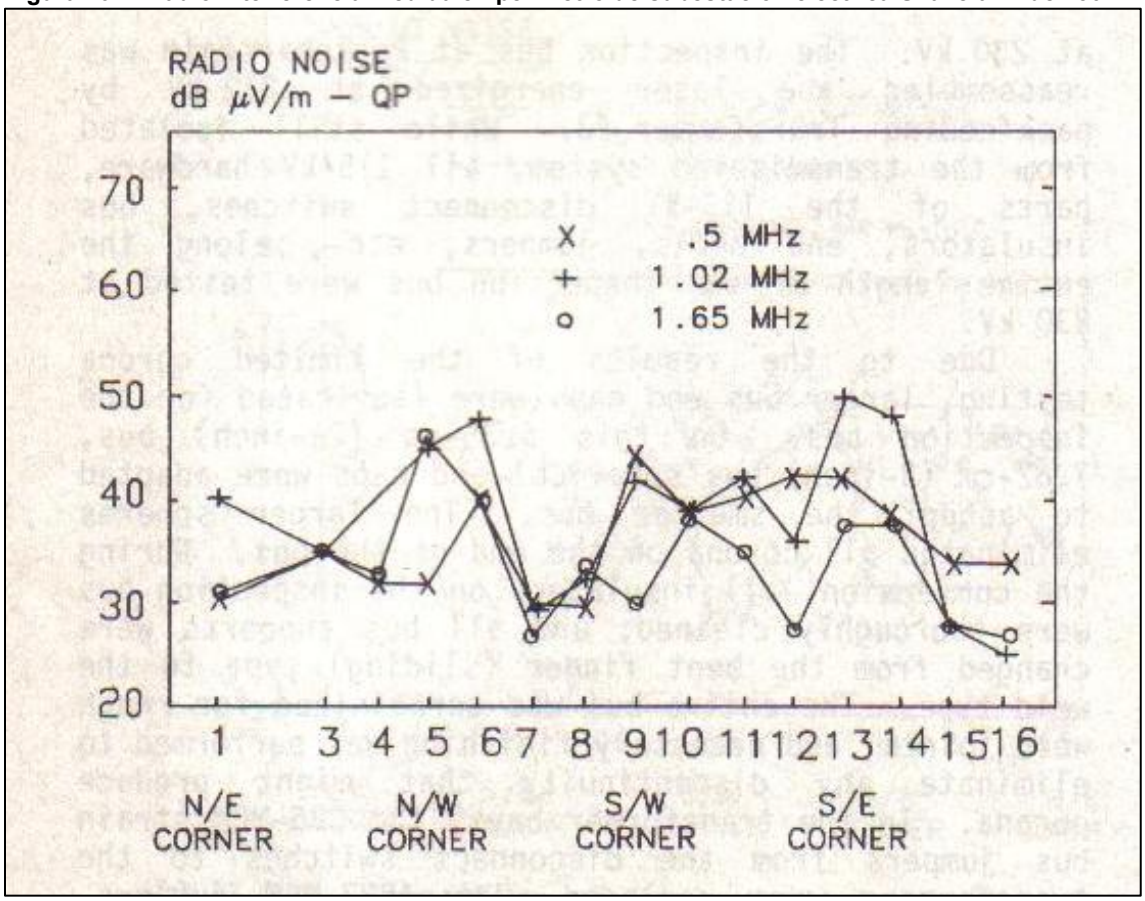
Figura 10-3. Puntos de medida de radio interferencia en subestación eléctrica Snakefarm de 230 KV



Fuente: Referencia [7].

La medida de radio interferencia a distintas frecuencias, entregó los valores mostrados en la Figura 10-4.

Figura 10-4. Radio interferencia medida en perímetro de subestación eléctrica Snakefarm de 230 kV



Fuente: Referencia [7].

Considerando la frecuencia de 0,5 MHz, de la información anterior, se observa que en 230 kV, el nivel máximo de radio interferencia en el perímetro interior de la subestación eléctrica elevadora es aproximadamente 58 [dB/1uV/m] en la subestación modificada y 50 [dB/1uV/m] en la subestación operando regularmente en 230kV.

Como muestran las Figura 10-3 y Figura 10-4, los valores se midieron al interior de las subestaciones y para efectos de comparación con la normativa, se deben trasladar a valores medidos a 15 m desde el borde de la subestación. Empleando la ley de decaimiento del campo perturbador con la distancia, para trasladar dichos valores a una distancia 15 m hacia el exterior de la subestación, se rebaja 16,86 dB, quedando en 41,14 [dB/1uV/m]; se asigna 41,14 [dB/1uV/m] como valor representativo para la subestación eléctrica elevadora del Proyecto.

11. CAMPO EN RECEPTORES

Se ha identificado 23 Receptores los que pueden visualizarse en la Figura 11-1, conjuntamente a las instalaciones del Proyecto.

Figura 11-1. Ubicación receptores e instalaciones del Proyecto



Fuente: Foco Ambiental, 2026.

En la Tabla 11-1 se presenta la ubicación de cada Receptor y su descripción.

Tabla 11-1. Ubicación receptores cercanos al Proyecto

Receptor	Coordenadas UTM Datum WGS84 Huso 18 Sur		Descripción
	Este (m)	Norte (m)	
R001	718.901	6.062.755	Vivienda
R002	717.939	6.061.917	Minera Faro Carranza
R007	717.835	6.061.799	Minera Foro Carranza
R031	717.566	6.061.438	Casa habitación
R047	717.024	6.061.520	Vivienda
R048	717.352	6.061.293	Vivienda
R089	716.238	6.060.655	Vivienda
R090	716.812	6.060.348	Vivienda
R369	715.720	6.059.271	Vivienda
R370	716.015	6.059.231	Vivienda
R387	714.417	6.057.820	Vivienda
R390	716.520	6.057.693	Vivienda
R399	716.898	6.057.969	Vivienda
R499	716.887	6.058.506	Vivienda
R504	717.142	6.058.389	Vivienda
R584	718.153	6.055.530	Vivienda
R585	718.422	6.055.358	Vivienda
R586	718.582	6.053.700	Vivienda
R645	719.450	6.056.258	Vivienda
R650	719.637	6.056.048	Vivienda
H1	716743	6.056.334	Vivienda
H2	716.051	6.060.101	Vivienda
H3	716.439	6.059.850	Vivienda

Fuente: Elaboración propia, 2026.

La Tabla 11-2 entrega las magnitudes de campo en los receptores indicados. La estimación se realiza por extrapolación de los respectivos valores generados por cada fuente, considerando que para equipos concentrados, el campo varía con el cuadrado del inverso de la distancia (CEM (x) ~1/x2) y para líneas, con el inverso de la distancia (CEM(x)~1/x).

Tabla 11-2.Magnitudes de campo en receptores cercanos al Proyecto

Receptor	Distancia a fuente [m]	Fuente	Campo eléctrico [V/m]	Inducción magnética [micro Tesla]
R001	119	F04	0	0,017
R002	381	F09	0	0,005
R007	385	F09	0	0,005
R031	272	Línea MT	0	0,010
R047	144	Línea MT	0	0,020
R048	112	Línea MT	0	0,026
R089	360	Línea MT	0	0,008
R090	285	Línea MT	0	0,010
R369	233	Línea MT	0	0,012
R370	48	Línea MT	0	0,060
R387	541	P02	0	0,003
R390	165	Línea MT	0	0,017
R399	447	Línea MT	0	0,006
R499	645	Línea MT	0	0,004
R504	813	Línea MT	0	0,003
R584	556	P07	0	0,003
R585	498	Línea MT	0	0,006
R586	876	Línea MT	0	0,003
R645	1.840	Línea MT	0	0,001
R650	1.825	Línea MT	0	0,001

Receptor	Distancia a fuente [m]	Fuente	Campo eléctrico [V/m]	Inducción magnética [micro Tesla]
H1	610	SE	34,4	0,030
H2	295	Línea MT	0	0,010
H3	161	Línea MT	0	0,018

Fuente: Elaboración propia, 2026.

De acuerdo con estimación de CEM en receptores, se ha verificado además que las magnitudes de campo en la ubicación corresponden a valores seguros para las personas, conforme al criterio del SEA.

Es importante indicar que el receptor R001, corresponde a una edificación identificada en la línea base ambiental, asociada a la función de casa de cuidador del predio Estancia La Flora, en el sector norte del Proyecto.

En consideración a lo anterior, y como parte de una gestión preventiva definida en la etapa de diseño del Proyecto, se ha establecido que dicha edificación no contará con uso habitacional durante la fase de construcción, operación y cierre del Proyecto. En consecuencia, el receptor R001 no será considerado como receptor sensible para efectos de la evaluación del impacto campos electromagnéticos, no resultando aplicable su exposición en el análisis de cumplimiento ambiental asociado a este componente.

Esta medida preventiva permite asegurar que el Proyecto no genere efectos adversos significativos por exposición a campos electromagnéticos sobre receptores sensibles, en coherencia con los criterios técnicos utilizados y con los lineamientos del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental.

12. SÍNTESIS DE RESULTADOS

De la información bibliográfica recopilada y de las modelaciones efectuadas para estimar la magnitud de los campos electromagnéticos generados por la operación de las diversas instalaciones del Proyecto, se obtienen los resultados presentados en la Tabla 12-1 para campos electromagnéticos y Tabla 12-2 para radio de interferencia. Se incluyen en cada tabla los valores límites establecidos por las respectivas normativas y la ubicación de los valores indicados.

Tabla 12-1. Valores resultantes de campo electromagnético

Instalación	Campo eléctrico [V/m]	Inducción magnética [micro Tesla]	Ubicación
AEROGENERADOR			
Equipos góndola Equipos góndola	0 0	0,4 0,12	Base nivel suelo A 10m
Transformador aerogenerador	0	0,384	A 9 m
RED DE MEDIA TENSIÓN 33kV ZANJA 4 CIRCUITOS			
Al lado vial Al lado vial	0 0	5,02 2,10	Sobre zanja A 3m
Bajo vial Bajo vial	0 0	6,14 1,85	Sobre zanja A 3m
SUBESTACIÓN ELÉCTRICA ELEVADORA			
Transformador 200MVA	100	3,0	Borde S/E
Barras 220kV	33	0,270	Borde S/E
Marco de línea 220kV	657	0,556	Borde S/E
Límite RPTD N°07	**5.000**	**100**	
Límite ICNIRP 2010	**5.000**	**200**	
Criterio SEA	**5.000**	**100**	

Instalación	Campo eléctrico [V/m]	Inducción magnética [micro Tesla]	Ubicación
Cumple	**SI**	**SI**	

Fuente: Elaboración propia, 2026.

La magnitud de radio interferencia generada por la subestación eléctrica elevadora a la distancia de norma, esto es, a 15 m del cerco del recinto y el límite correspondiente son:

Tabla 12-2. Radio interferencia generada por subestación eléctrica elevadora

Instalación	Radio interferencia [dB/uV/m]	Ubicación
Subestación Elevadora	41,14	A 15 m del borde
Límite norma canadiense	53	A 15 m del borde
Cumple	**SI**	

Fuente: Elaboración propia, 2026.

13. CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados presentados, tanto los valores de campo eléctrico, campo magnético, como de radio interferencia a las distancias de norma, resultan inferiores a los respectivos valores límites, por lo tanto, las instalaciones del Proyecto satisfacen la normativa vigente respecto de campos electromagnéticos de baja y alta frecuencia, generados durante su operación; en particular corresponden a valores seguros para las personas, conforme al criterio de evaluación de radiación electromagnética establecido por el SEA.

Se ha verificado además que las magnitudes de campo en la ubicación de receptores corresponden a valores seguros para las personas, conforme al criterio del SEA.

14. ÁREA DE INFLUENCIA

De acuerdo con los resultados el área de influencia para la componente ambiental campo electromagnético puede especificarse para las distintas instalaciones como sigue:

- Subestación eléctrica elevadora: 15 metros desde el borde de la subestación en todo su perímetro, distancia fundamentalmente determinada por la especificación de distancias para definición de límites de radio interferencia, por la respectiva norma.
- Línea de transmisión subterránea: una extensión de 3 m desde el borde de la zanja, hacia ambos lados, a lo largo de todo su trazado.

De acuerdo con lo anterior el área de influencia corresponde a 182.432,6 m^2 (18,2 ha).

Figura 14-1. Área de influencia ambiental campos electromagnéticos del Proyecto



Fuente: Foco Ambiental, 2026.

15. REFERENCIAS

[1] Students' QuickField (TM) Finite Element Analysis System. Copyright (C) Tera Analysis Company,. www.quickfield.com

[2] Lindsay C McCallum, Melissa L Whitfield Aslund, Loren D Knopper, Glenn M Ferguson, and Christopher A Ollson

Measuring electromagnetic fields (EMF) around wind turbines in Canada: is there a human health concern?

Environ Health 2014 Feb 15;13(1):9. doi: 10.1186/1476-069X-13-9

[3] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection

ICNIRP Publication – 2010

ICNIRP Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 hz – 100 kHz)

Published in: Health Physics 99(6):818-836; 2010

[4] Superintendencia de Electricidad y Combustibles

PLIEGO TÉCNICO NORMATIVO RPTDN°07, dictado por Resolución Exenta Nº 33.277, de fecha 10/09/2020.

[5] Canadian Standards Association, Standard CAN3 C108.3.1-M84

"Limits and Measurement Methods of Electromagnetic Noise from AC Power Systems 0.15 to 30 MHz" Octubre 1984, Reaffirmed 2009.

[6] Servicio de Evaluación Ambiental

CRITERIO DE EVALUACIÓN EN EL SEA: Evaluación de impactos por radiación electromagnética en proyectos de transmisión eléctrica

Primera Edición, Santiago, junio 2023

[7] Carter R. T. ; Grille A. W. ; Bazile G. M. ; Perkins M. D. ; Mauser S. F.

"Analysis of radio interference and substation modifications for uprating a 115-KV substation to 230 KV"

IEEE Transactions on Power Delivery 1987, vol. 2, nº2, pp. 544-550 (5 ref.)

[8] Gerhard Bräunlich, Reinhold Bräunlich.

Worst Case Evaluation of Magnetic Field in the vicinity of Electric Power Substations

ETH Zürich, Switzerland; FKH Fachkommission für Hochspannungsfragen.

Proceedings, 20th Int. Zurich Symposium on EMC, Zurich 2009

[9] Leonardo Strac, Franjo Kelemen, Damir Zarko. Josipa Mokrovica

Modeling and calculation of electromagnetic field in the surroundings of a large power transformer, 10090 Zagreb-CROATIA.

Turk J Elec Eng & Comp Sci, Vol.17, No.3, 2009.

APÉNDICE 1.7.1
ARCHIVO DIGITALES