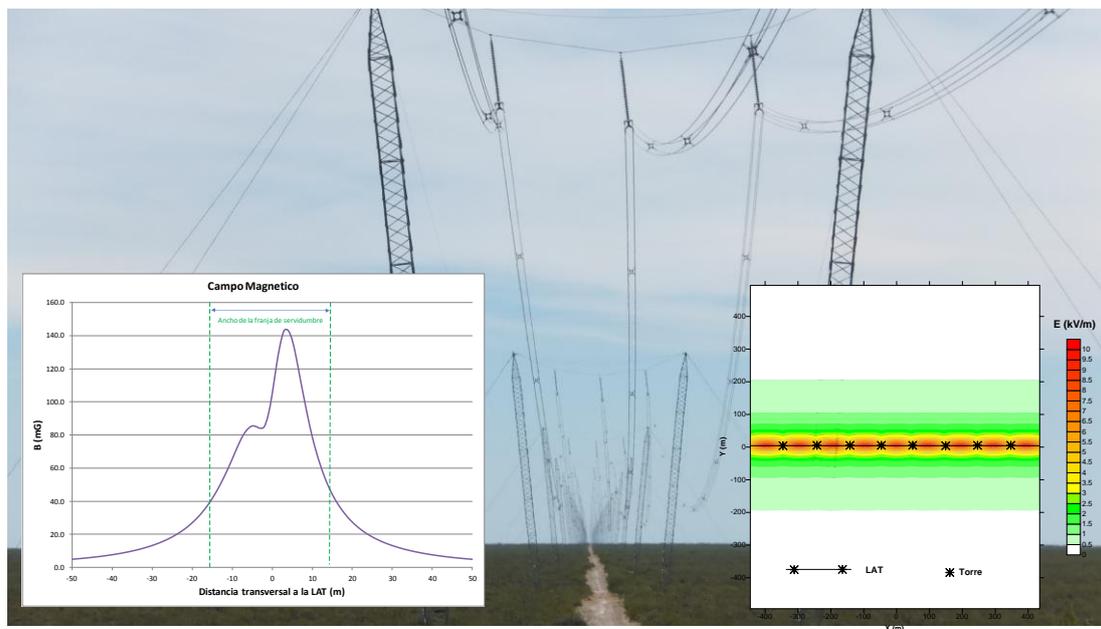


EIA Evacuación de Energía Parque Eólico Madryn Norte

Anexo: Modelo Matemático de Campos Electromagnéticos



INDICE

1	INTRODUCCIÓN	3
1.1	OBJETIVO	3
1.2	METODOLOGIA	3
1.3	GENERACIÓN DE CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS EN EL SISTEMA DE EVACUACIÓN DE ENERGÍA DE UN PARQUE EÓLICO.....	3
2	MONITOREO DE LINEA DE BASE.....	4
2.1	CARACTERIZACION DE CEM EN EL SITIO DEL PROYECTO	4
2.2	CEM DEBIDOS A LAT EXISTENTES	5
2.3	NIVELES GUIA	6
2.3.1	<i>Campo eléctrico</i>	7
2.3.2	<i>Campo de inducción magnética</i>	7
2.4	ANÁLISIS DE LAS MEDICIONES	8
3	MODELO MATEMATICO	8
3.1	FUNDAMENTOS TEÓRICOS	8
3.2	CEM PARA LINEAS DE ALTA TENSION	9
3.3	IMPLEMENTACIÓN PARA EL PRESENTE ESTUDIO	10
3.3.1	<i>Datos generales</i>	10
3.3.2	<i>Validación</i>	11
3.3.3	<i>Escenarios</i>	13
4	APLICACIÓN DEL MODELO	13
4.1	CAMPO ELECTRICO	13
4.2	CAMPO MAGNETICO	14
5	CONCLUSIONES	15
6	REFERENCIAS.....	15

1 INTRODUCCIÓN

1.1 OBJETIVO

El objetivo del estudio fue el siguiente:

- Predecir el impacto por campos electromagnéticos (CEM) que el sistema de evacuación de energía del Parque Eólico Madryn Norte (PEM N) producirá en el entorno del predio durante su etapa de operación.

1.2 METODOLOGIA

Para alcanzar el objetivo se realizaron las siguientes tareas:

- Monitoreo de campos electromagnéticos en la zona de interés, para evaluar la línea de base y fuentes presentes en la zona,
- Caracterización de fuentes futuras,
- Implementación y aplicación de un modelo matemático de distribución espaciotemporal de campos electromagnéticos,
- Evaluación de impactos a través de los resultados del modelo, tanto dentro como fuera del predio y en relación a la situación de base existente.

1.3 GENERACIÓN DE CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS EN EL SISTEMA DE EVACUACIÓN DE ENERGÍA DE UN PARQUE EÓLICO

El sistema de evacuación de energía del PEM N se ha definido como el conjunto formado por la estación transformadora interna (ET PEM B) y la conexión al SADI mediante una nueva línea de alta tensión (LAT) de 132 kV hasta la Estación Transformadora de 500kV Puerto Madryn de TRANSENER existente. La transformación interna es de 33 kV (red interna del PEM N) a 132 kV, para inyectar a la futura LAT. Los detalles del sistema se presentan en el cuerpo del EIA, por lo que son omitidos aquí.

En la ET PEM B se espera la aparición de CEM por la actividad intrínseca de esta instalación, con presencia de conductores, barras y transformadores, entre otros elementos energizados que producirán la aparición de CEM de extremadamente baja frecuencia (ELF, frecuencia industrial de 50 Hz).

La ET PEM B se emplaza completamente dentro del predio del PEM N, alejada de receptores críticos externos. La distancia mínima de la ET PEM B al eje de la Ruta Nacional 3 (RN3) es de casi 6 km. Para una ET de 132 kV se espera que los CEM generados decaigan a valores muy pequeños para distancias del orden de 300 m o más, razón por la cual el impacto es básicamente interno y deberá ser evaluado dentro del contexto del control de condiciones laborales en operación.

Por su parte, la conexión entre la nueva LAT y la ET existente se realizará dentro del predio de esta ET existente, que no sufrirá cambios estructurales de envergadura ni ampliación del predio.

Luego, el principal impacto esperable es debido a la aparición de CEM por la operación de la nueva LAT, efecto que se evalúa en este estudio.

2 MONITOREO DE LINEA DE BASE

2.1 CARACTERIZACION DE CEM EN EL SITIO DEL PROYECTO

Para evaluar la línea de base, se realizaron las mediciones de campo que se presentaron en el cuerpo principal del EIA.

Las mediciones se realizaron en diversos puntos localizados en el perímetro e interior del PEM N, en los potenciales receptores críticos y en puntos debajo de la LEAT existente (500 kV a Choele Choe). Los puntos de medición se identifican en la siguiente figura:

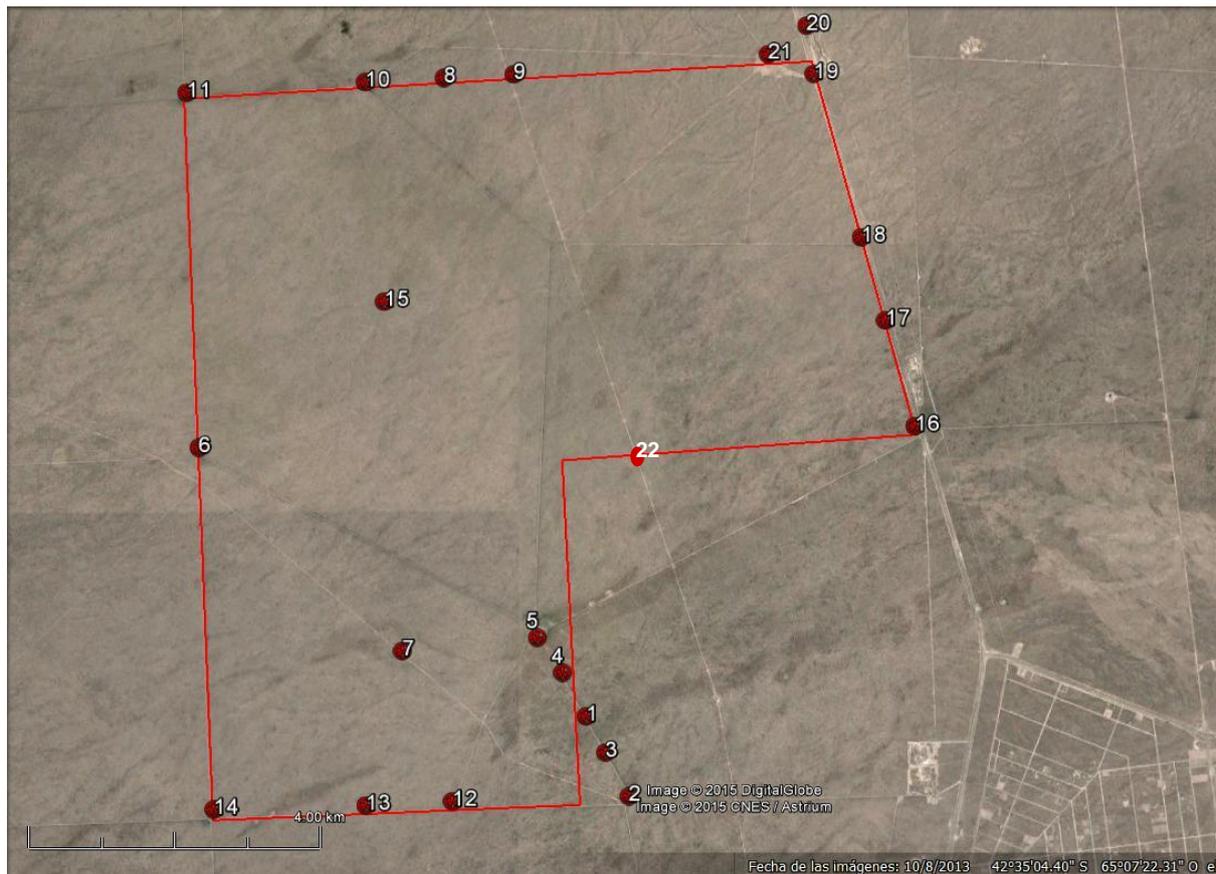


Figura 2.1.1 – Puntos de medición de campos.

Se realizaron mediciones de campo magnético. Las mediciones arrojaron los resultados que se presentan en la siguiente Tabla.

Tabla 2.1.1 Resultados del monitoreo de campos.

Punto	Descripción	Campo Magnético (mG)
1	Camino de tierra	< 1.5
2	Camino de tierra	< 1.5
3	Camino de tierra	< 1.5
4	Camino de tierra	< 1.5
5	Casco estancia	< 1.5
6	Perímetro PEM N	< 1.5
7	Torre meteorológica S	< 1.5
8	Perímetro PEM N	< 1.5
9	Perímetro PEM N	< 1.5
10	Perímetro PEM N	< 1.5
11	Perímetro PEM N	< 1.5
12	Perímetro PEM N	< 1.5
13	Perímetro PEM N	< 1.5
14	Perímetro PEM N	< 1.5
15	Torre meteorológica N	< 1.5
16	Perímetro PEM N	< 1.5
17	Perímetro PEM N	< 1.5
18	Perímetro PEM N	< 1.5
19	Perímetro PEM N	< 1.5
20	Cantera	< 1.5
21	Casco estancia vecina	< 1.5
22	Perímetro PEM N en cruce LEAT existente	16.3

2.2 CEM DEBIDOS A LAT EXISTENTES

Como se mencionó, se realizaron mediciones específicas en las proximidades de la LEAT existente. Se obtuvieron los resultados que se presentan a continuación.

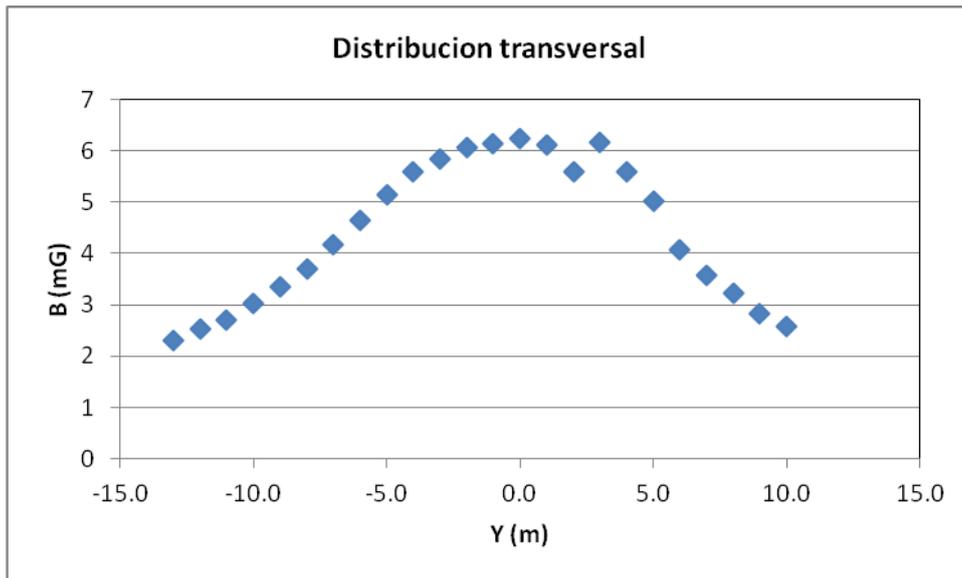


Figura 2.2.1 – Distribución transversal de campo magnético en LEAT existente.

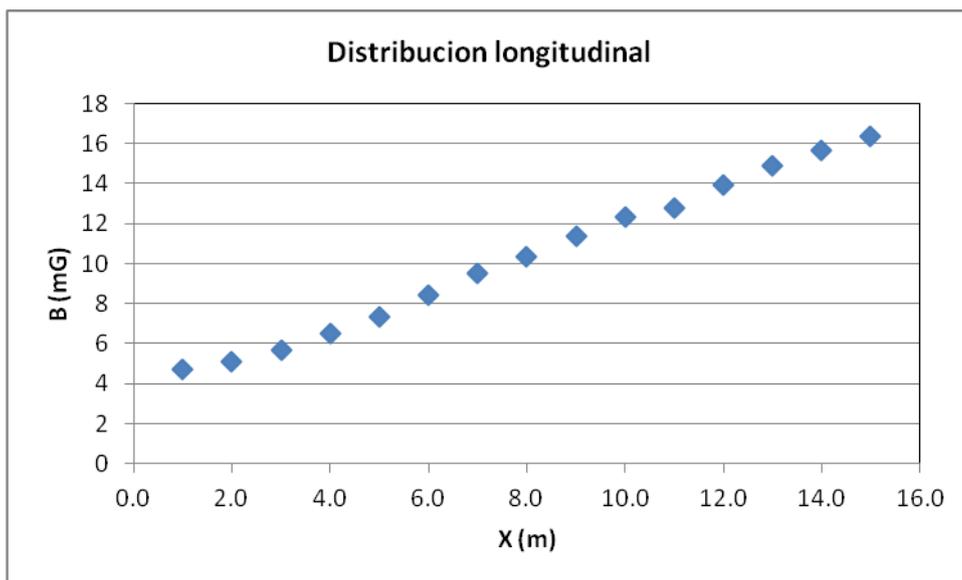


Figura 2.2.2 – Distribución longitudinal de campo magnético en LEAT existente (hasta el punto de máximo campo).

2.3 NIVELES GUIA

En Argentina, la Resolución ENRE 1724/98 establece los requerimientos sobre los campos eléctrico y magnético, ruido audible y radiointerferencia en sistemas de transporte y distribución de energía eléctrica.

2.3.1 Campo eléctrico

En el caso del campo eléctrico se requiere la caracterización en su valor no perturbado, es decir, el campo que existiría en ausencia de personas u objetos.

En base a los documentos elaborados conjuntamente por la Organización Mundial de la Salud (OMS), la Asociación Internacional de Protección contra la Radiación No Ionizante (IRPA) y el Programa Ambiental de Naciones Unidas, los cuales recopilan en diferentes países los valores típicos de la mayoría de las líneas que se encuentran en operación, se adoptó un valor límite superior de campo eléctrico no perturbado, para líneas en condiciones de tensión nominal y conductores a temperatura máxima anual, de **3 kV/m**. Este valor es requerido en el borde de la franja de servidumbre, fuera de ella y en el borde perimetral de las subestaciones, medido a 1 m del nivel del suelo.

Cuando no estuviera definida la franja de servidumbre, la normativa establece que el nivel de campo deberá ser igual o inferior a dicho valor en los puntos resultantes de la aplicación de las distancias mínimas establecidas en la Reglamentación de la Asociación Electrotécnica Argentina (AEA) sobre líneas eléctricas aéreas exteriores.

El nivel máximo de campo eléctrico, en cualquier posición, deberá ser tal que las corrientes de contacto para un caso testigo: niño sobre tierra húmeda y vehículo grande sobre asfalto seco, no deberán superar el límite de seguridad de **5 mA**.

2.3.2 Campo de inducción magnética

Para campos de inducción magnéticos, se adoptó un valor límite superior para líneas en condiciones de máxima carga definida por el límite térmico de los conductores, de **250 mG**. Esto se basó en la experiencia de otros países, algunos de los cuales han dictado normas interinas de campos de inducción magnética, y a los valores típicos de las líneas en operación. Se consideran los valores en el borde de la franja de servidumbre, fuera de ella y en el borde perimetral de las subestaciones, medido a 1 m del nivel del suelo.

De acuerdo a la Resolución 77/98 de la Secretaría de Energía, se adopta el siguiente valor límite superior de campo de inducción magnética para líneas en condiciones de máxima carga definida por el límite térmico de los conductores: **250 mG**, en el borde de la franja de servidumbre, fuera de ella y en el borde perimetral de las subestaciones, medido a 1 metro del nivel del suelo.

Por su parte, la Res. ENRE 236/96 establece como nivel de referencia de campo magnético en los límites de las instalaciones de transformación, un valor de 100 μ T (**1,000 mG**).

La regulación establece que el nivel máximo de campo de inducción magnética, en cualquier posición, deberá ser tal que las corrientes de contacto en régimen permanente, debido al contacto con objetos metálicos largos cercanos a las líneas, no deberán superar el límite de salvaguarda de **5 mA**.

2.4 ANÁLISIS DE LAS MEDICIONES

Se observa lo siguiente:

- Mayoritariamente los resultados arrojaron valores poco significativos, acordes a la distancia que separa las LAT y LEAT existentes con los receptores críticos y otros puntos ensayados,
- Los valores positivos se obtuvieron únicamente debajo de las líneas existentes, con distribuciones longitudinal y transversal típicas
- En todos los casos se verifica el cumplimiento de los niveles de referencia para campos, esto es, el impacto actualmente es poco significativo.

3 MODELO MATEMATICO

3.1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Las líneas de transmisión de energía eléctrica que corren de torre en torre (o postes) por el campo, radían parte de su potencia. Pero como las frecuencias son bajas (50-60 Hz), las pérdidas por radiación no son serias.

Como resultado, si bien la radiación no es muy significativa, los conductores de las LAT generan CEM en sus inmediaciones, cuyas amplitudes a nivel de receptores críticos pueden superar los límites impuestos por las regulaciones vigentes.

La física necesaria para determinar los CEM de las LAT es clásica y bien conocida en sus bases teóricas. El fenómeno bajo estudio está descrito en términos teóricos por las ecuaciones de Maxwell (Feynman, 1972):

$$\begin{aligned}\nabla \cdot E &= \frac{\rho}{\epsilon_0} \\ \nabla \times E &= -\frac{\partial B}{\partial t} \\ \nabla \cdot B &= 0 \\ c^2 \nabla \times B &= \frac{j}{\epsilon_0} + \frac{\partial E}{\partial t}\end{aligned}$$

donde:

E = campo eléctrico
 B = campo magnético
 ρ = densidad de carga
 j = densidad de corriente
 c = velocidad de la luz
 ϵ_0 = permitividad eléctrica

3.2 CEM PARA LINEAS DE ALTA TENSION

Los cálculos resultan engorrosos debido a la geometría real de las LAT y su interacción con objetos y superficies del terreno. Por ello, deben ser abordados mediante modelos matemáticos adecuados. Ciertas características ambientales (condiciones climáticas, tipos de terreno, etc.) pueden requerir un tratamiento especial, para lo cual se aplican resultados empíricos.

La particularización de las ecuaciones de Maxwell para el caso bajo estudio implica el uso de las siguientes hipótesis simplificadoras:

1. Siendo que la frecuencia de los campos (50 Hz) pertenece al rango de Extremadamente Baja Frecuencia (ELF), se trata de un régimen “cuasi” estacionario, por lo que es factible realizar el análisis en forma independiente de los campos eléctrico y magnético,
2. El terreno es plano,
3. La tierra se considera un conductor perfecto, permitiendo la aplicación del método de las imágenes,
4. Los objetos metálicos presentes en la zona de medición están “puestos a tierra”,
5. Los conductores se consideran en reposo.

Al presente se cuenta con un modelo primario 3D que permite evaluar los CEM sobre los receptores críticos que se localizan a lo largo y ancho del recorrido de una traza de alta tensión (Tarela, 2004).

La figura siguiente muestra el campo eléctrico para un hipotético tramo rectilíneo de LAT de 3 conductores. El terreno es plano y la potencia de la línea tal que se supera el umbral de 3 kV/m. La altura de examinación es de 1 m sobre el terreno. El campo obtenido guarda la simetría de la LAT, como debe ser, observándose un patrón cíclico entre torres consecutivas. La intensidad es mayor en el centro de la franja, y disminuye rápidamente hacia ambos laterales. La intensidad máxima, como era de esperar, se alcanza en el punto medio entre torres, donde la distancia entre los cables conductores y el receptor crítico sobre el terreno es mínima (flecha máxima).

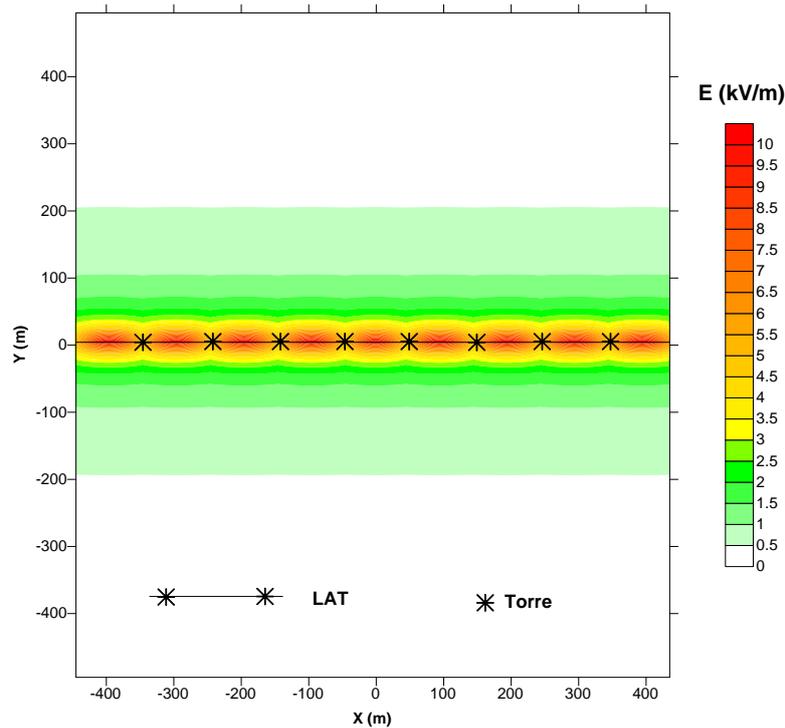


Figura 3.2.1 – Distribución de campo eléctrico (E) de una LAT regular hipotética, en un plano a 1 m del piso.

Para este trabajo, se consideró suficiente trabajar con la versión simplificada del modelo que se basa en el resultado previo, donde el campo máximo se obtiene en el plano central perpendicular a la LAT (condición de flecha máxima de los conductores). Para ello se realizan las siguientes hipótesis adicionales:

6. Los conductores se asumen rectos y paralelos entre sí. Esta simplificación, reduce el cálculo a dos dimensiones, donde las componentes del campo resultante se distribuyen sobre el plano transversal a la dirección de los conductores.
7. No se incluyen los cables de guardia en los cálculos, por considerarse su efecto despreciable.

Estas hipótesis conducen a un resultado que tiende a sobreestimar el valor de campo, por lo cual se trabaja del lado de la seguridad en relación a los objetivos de esta evaluación.

3.3 IMPLEMENTACIÓN PARA EL PRESENTE ESTUDIO

3.3.1 Datos generales

Los datos de la LAT fueron provistos por el desarrollador.

Será una línea simple terna 132 kV de tensión nominal. La capacidad máxima estará determinada por el límite térmico de los conductores y será de 729 A.

La LAT estará realizada con postes de hormigón y disposición triangular. La geometría se presenta en la figura siguiente:

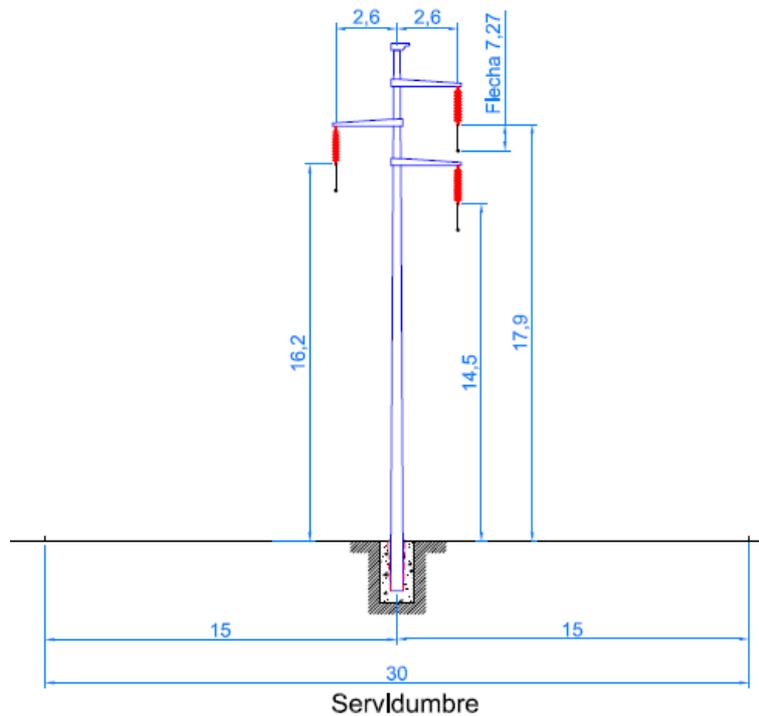


Figura 3.3.1 – Geometría de la LAT.

Los ángulos de fases utilizados en la LAT fueron $2\pi/3$, 0 y $-2\pi/3$ para los conductores a-b-c respectivamente.

La ubicación de la LAT surge de los planos existentes del proyecto, y puede ser obtenida con precisión a partir de las imágenes satelitales disponibles.

A partir de los relevamientos de campo realizados, se determinó que no existirán obstáculos de significación en el predio ni en los alrededores.

3.3.2 Validación

A los efectos de validar el modelo matemático, se compararon sus predicciones con mediciones de campo de LAT existentes y similares a las del presente proyecto (CCyA 2014a,b). En este caso se optó por la medición de campo magnético.

Las figuras siguientes presentan la comparación entre las mediciones de campo magnético a 1 metro de altura sobre el piso y recorriendo el plano transversal de campo máximo, con las salidas del modelo matemático para 2 LAT. Se observa un excelente acuerdo en la distribución espacial del campo. Se observa también que el modelo sobreestima el pico de campo, situación esperable en función de las hipótesis bajo las cuales se realizó esta

simulación. De esta manera, se da por validado el modelo matemático, siendo suficientemente preciso a los efectos de la presente evaluación de impacto ambiental.

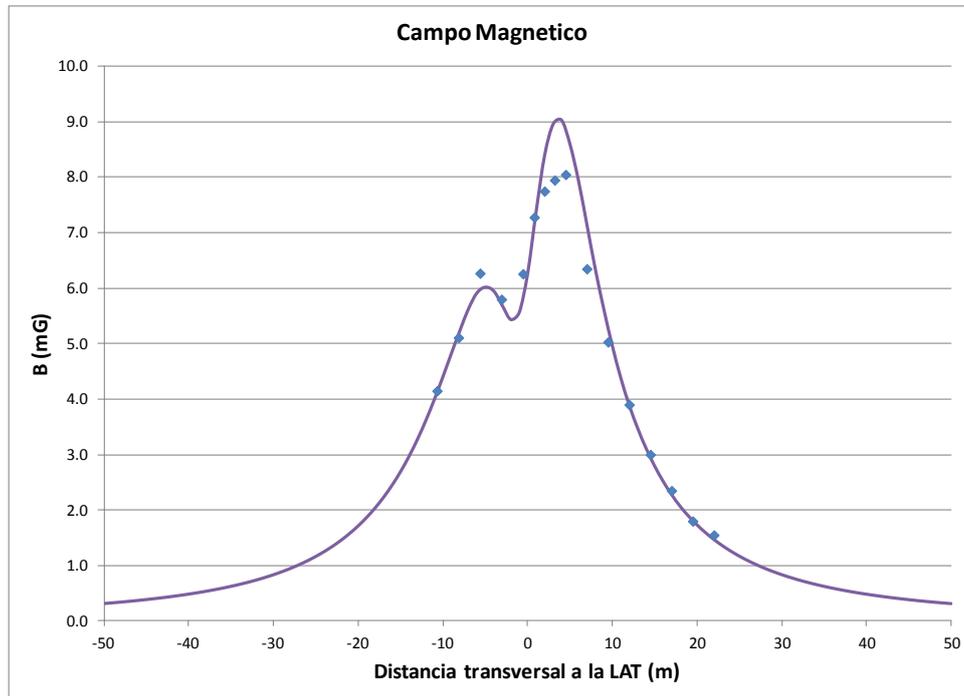


Figura 3.3.2 – Comparación entre la salida del modelo matemático (línea continua) y las mediciones de campo magnético (puntos). CCyA 2014 a.

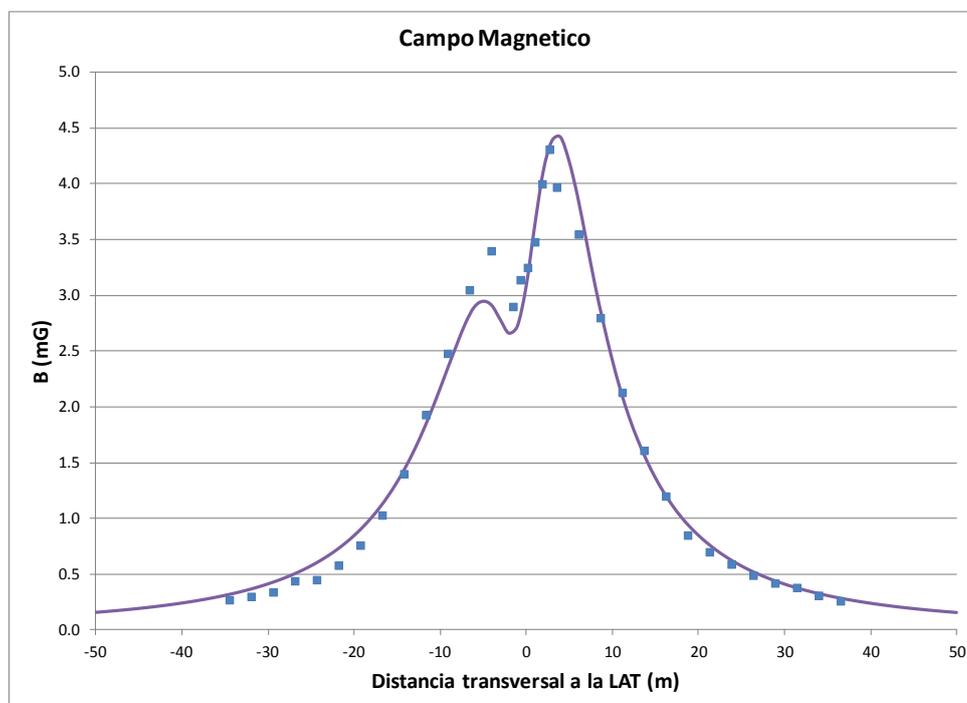


Figura 3.3.3 – Comparación entre la salida del modelo matemático (línea continua) y las mediciones de campo magnético (puntos). CCyA 2014 b.

3.3.3 Escenarios

Para evaluar el impacto por CEM, se calculan los campos en la situación futura:

- Escenario futuro: corresponde a la máxima corriente futura correspondiente a la inyección en la LAT de 150 MW en 132 kV (esto es, 729 A, de acuerdo a la información aportada por el desarrollador).

4 APLICACIÓN DEL MODELO

4.1 CAMPO ELECTRICO

La figura que sigue muestra la distribución lateral del campo eléctrico, dentro y fuera de la franja de servidumbre.

Se observan valores por debajo del nivel de referencia de 3 kV/m fuera de la franja de servidumbre.

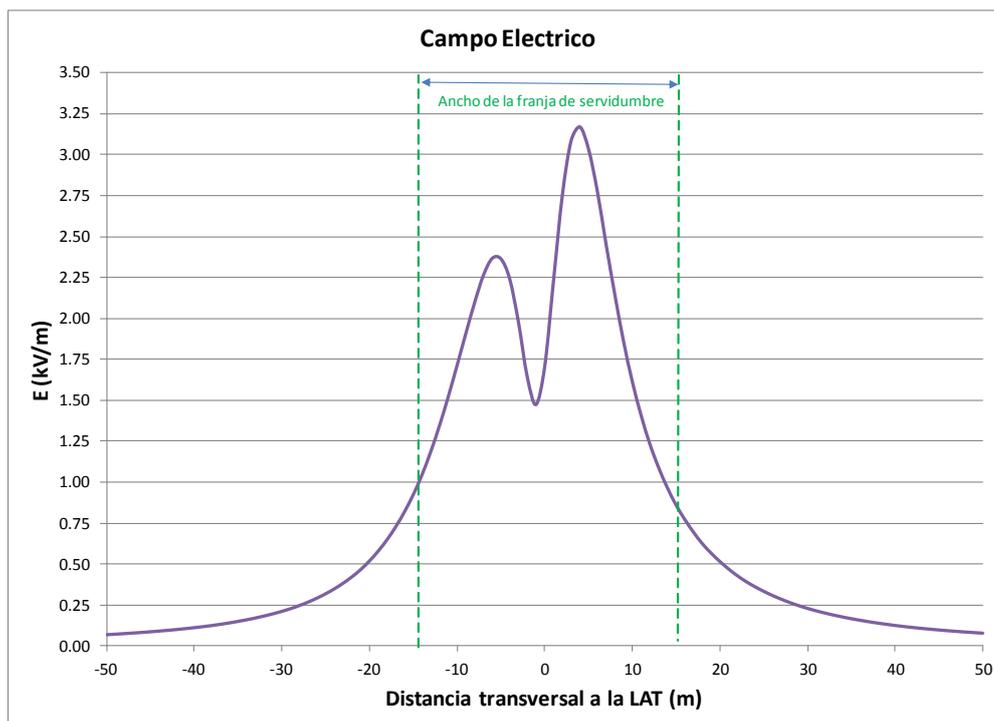


Figura 4.1.1 – Salida del modelo matemático para campo eléctrico.

La tabla presenta los valores específicos para el máximo de campo (dentro de la franja de servidumbre) y los valores en los bordes de la franja de servidumbre, observándose que se excede levemente el nivel de referencia de 3 kV/m dentro de la franja, pero ya sobre la misma los valores caen a un tercio de este valor.

El cumplimiento es válido para todos los receptores críticos fuera de la franja de servidumbre, donde el modelo predice valores por debajo de 0.93 kV/m (< 31% del nivel guía).

Resultados del modelo en puntos especiales. Campo Eléctrico.

Punto	E (kV/m)	% nivel guía	Resultado
Máximo	3.17	105.7%	EXCEDE
Franja servidumbre I	0.93	30.9%	CUMPLE
Franja servidumbre D	0.86	28.6%	CUMPLE

4.2 CAMPO MAGNETICO

La figura que sigue muestra la distribución lateral del campo magnético, dentro y fuera de la franja de servidumbre.

Se observan valores bien por debajo del nivel de referencia de 250 mG.

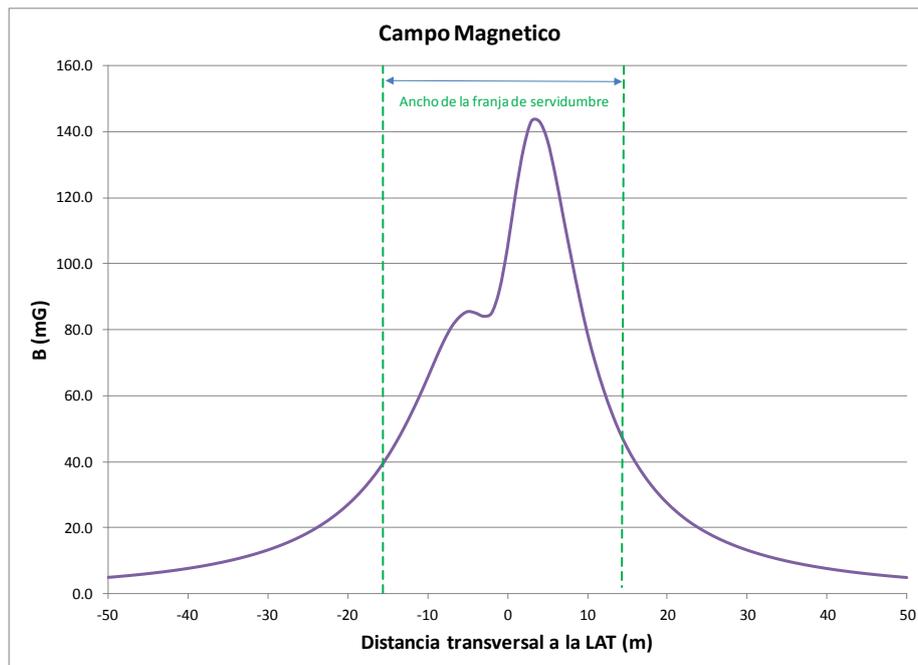


Figura 4.2.1 –Salida del modelo matemático para campo magnético.

La tabla presenta los valores específicos para el máximo de campo (dentro de la franja de servidumbre) y los valores en los bordes de la franja de servidumbre, observándose que se cumple holgadamente con el nivel guía.

Esto sigue siendo válido para todos los receptores críticos fuera de la franja de servidumbre, donde el modelo predice valores por debajo de 45 mG (< 18% del nivel guía).

Resultados del modelo en puntos especiales. Campo Magnético.

Punto	B(mG)	% nivel guía	Resultado
Máximo	143.2	57.3%	CUMPLE
Franja servidumbre I	41.7	16.7%	CUMPLE
Franja servidumbre D	44.3	17.7%	CUMPLE

5 CONCLUSIONES

El análisis mediante modelado matemático muestra que el mayor incremento del nivel de CEM se producirá dentro de la franja de servidumbre, siendo superior al máximo de referencia para campo eléctrico e inferior para campo magnético (límites establecidos por la Resolución SE 77/98).

A su vez, fuera de la franja de servidumbre los campos electromagnéticos generados por el incremento de corriente en la LAT existente debido a la operación del PEM N serán relativamente bajos, y estarán por debajo de los niveles máximos recomendados.

No se espera que los campos electromagnéticos generen excedencias sobre los potenciales receptores críticos evaluados en las inmediaciones.

El modelo utilizado, si bien ha sido aplicado en una situación de hipótesis simplificadoras acordes al objetivo del estudio, ha sido exitosamente validado con datos de campo de LAT existentes, dando robustez a las conclusiones obtenidas.

Se menciona finalmente, que de la experiencia práctica, las LAT no suelen operar a su corriente máxima y por lo tanto, los valores esperados en la etapa de evacuación de energía eléctrica del PEM N han de ser menores a los que muestran los resultados del presente informe.

6 REFERENCIAS

CCyA Ingeniería, *EIA Evacuación de Energía Parque Eólico Villalonga (2014 a)*.

CCyA Ingeniería, *EIA Evacuación de Energía Parque Eólico Patagones (2014 b)*.

Feynman. R.P., *Lectures on Physics. Vol. II Electromagnetism and Matter*, Fondo Educativo Interamericano (1972)

OMS, Fact Sheet N° 263, October 2001.

Tarela et. Al., *Diseño de trazas de líneas de alta tensión bajo el concepto de impacto aceptable para la salud de la población*, Congreso CACIER, Prov. de Santa Fé (2005).

Normas de Referencia:

- Resolución SE 77/1998
- Resolución ENRE 1724/1998