

## **ANEXO 4-4**

### Estudio de Campos Electromagnéticos

## INDICE

1.	ESTUDIO DE CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS .....	1
1.1.	Antecedentes Generales .....	1
1.1.1.	Características del Proyecto .....	1
1.1.2.	Objetivos y Alcance del Estudio.....	9
1.1.3.	Normas de Referencia Aplicables en Chile Respecto de la Exposición Humana a Campos Electromagnéticos de 50 Hz .....	9
1.1.4.	Valores Límites Recomendados de Radio Interferencia provocada por Instalaciones de Alta Tensión .....	11
1.2.	Campos Electromagnéticos y Perturbaciones en Instalaciones de 220 kV .....	11
1.2.1.	Subestación GIS de 220 KV .....	11
1.3.	Campos Electromagnéticos y Perturbaciones en Instalaciones de 110 kV .....	21
1.3.1.	Estimación de la Magnitud del Campo Eléctrico en Subestación de 110 kV.....	21
1.3.2.	Estimación de la Magnitud del Campo Magnético en la Subestación .....	23
1.3.3.	Estimación de la Magnitud del Campo Eléctrico a 1 metro de Altura sobre el Suelo, provocado por las Configuraciones de Líneas de 110 kV .....	25
1.3.4.	Estimación de la Magnitud del Campo Magnético a 1 metro de Altura sobre el Suelo, provocado por las Configuraciones de Líneas de 100 kV .....	27
1.3.5.	Radio Interferencia en Subestaciones 110 kV .....	28
1.3.6.	Radio Interferencia en Líneas de 100 kV .....	30
1.4.	Conclusiones .....	31
1.5.	Referencias .....	34

## TABLAS

Tabla 1. Características Líneas Eléctricas Área Concentradora .....	1
Tabla 2. Características Líneas Eléctricas Área Relaves Convencionales .....	4
Tabla 3. Características Subestaciones Área Relaves Espesados .....	5
Tabla 4. Características Líneas Eléctricas Área Relaves Espesados.....	5
Tabla 5. Características Subestaciones Área Sistema de Impulsión.....	7
Tabla 6. Características Líneas Eléctricas Área Sistema de Impulsión .....	7
Tabla 7. Límites de Exposición Humana a Campos Electromagnéticos de 50 Hz.....	10
Tabla 8. Valores de Interferencias de Radio, recomendados por Asociación de Normas Canadienses y acogida como Regulación del Gobierno Federal .....	11
Tabla 9. Medidas de RI en varias Subestaciones GIS [4] .....	15
Tabla 10. Inducción Magnética en el Interior de Subestaciones (ET) [5].....	25

## FIGURAS

Figura 1. Siluetas de Estructuras de Suspensión y Anclaje LAT en 220 kV .....	2
Figura 2. Siluetas Estructuras de Suspensión y Anclaje LAT en 34,5 kV y en 23 kV .....	3
Figura 3. Siluetas Estructuras Suspensión y Anclaje LAT Salar – Común en 100 kV.....	6
Figura 4. Siluetas de Estructuras de Suspensión y Anclaje LAT Crucero - DRT .....	8
Figura 5. Medidas de Campo Magnético en una Subestación GIS de 220 kV [2].....	13
Figura 6. Esquema de Gas-Insulated Substation London-Talbot 230 kV [4] .....	14
Figura 7. Disposición de Líneas Equipotenciales .....	16
Figura 8. Magnitud de Campo a 1,0 m sobre el Suelo. L=50: Eje de la Línea .....	16
Figura 9. Disposición de Líneas Equipotenciales .....	17
Figura 10. Magnitud de Campo a 1,0 m sobre el Suelo. L=50: Eje de la Línea .....	17
Figura 11. Disposición de Líneas Equipotenciales. Referencia en Fase Central .....	18
Figura 12. Magnitud de Campo a 1,0 m sobre el Suelo. Referencia en Fase Central .....	19
Figura 13. Disposición de Líneas Equipotenciales. Referencia en Fases Superior e Inferior .....	19
Figura 14. Magnitud de Campo a 1,0 m sobre el Suelo. Referencia en Fases Superior e Inferior .....	20
Figura 15. Radio Interferencia Medida en Línea de 230 kV [7].....	20
Figura 16. Campo Eléctrico a 1 m del Suelo, en Patio de 110 kV, [5]. Sector de Acceso de Empalmes a Edificio .....	21

---

Figura 17. Campo Eléctrico a 1 m del Suelo, en Patio de 110 kV [5] .....	22
Figura 18. Distribución de Campo Eléctrico en Subestación de 110/20/10 kV [6] .....	23
Figura 19. Distribución de Campo Magnético [mA/m] en la Subestación Cluj - South de 110/20/10 kV [6].....	24
Figura 20. Campo Magnético Medido en S/E de 66/23 kV, 2 x 30 MVA desde Pared hacia Fuera. ( $1 \mu\text{T} = 10 \text{ miliGauss}$ ) [7].....	25
Figura 21. Disposición de Líneas Equipotenciales .....	26
Figura 22. Magnitud de Campo a 1,0 m sobre el Suelo .....	26
Figura 23. Disposición de Líneas de Campo.....	27
Figura 24. Magnitud de Campo a 1,0 m sobre el Suelo .....	28
Figura 25. Puntos de Medición de RI en Perímetro de SE Pontchartrain [6] .....	29
Figura 26. Valores de RI en Perímetro de SE operando a 115 kV [6] .....	29
Figura 27. Radio Interferencia medida en Líneas de 132 kV [7].....	30

## 1. ESTUDIO DE CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS

### 1.1. Antecedentes Generales

#### 1.1.1. Características del Proyecto

El presente proyecto “RT Sulfuros” consistirá en la explotación de nuevas fases de minerales sulfurados de la mina RT y su procesamiento mediante una nueva planta concentradora en RT de capacidad 200 ktpd. El Proyecto se localiza en las comunas de Calama en la provincia de El Loa; Sierra Gorda, Antofagasta y Mejillones en la provincia de Antofagasta y extendiéndose hasta las comunas de Tocopilla y María Elena, en la provincia de Tocopilla, todas ubicadas en la Región de Antofagasta.

Para cubrir los requerimientos de agua para el desarrollo de este Proyecto, se contempla la instalación de una nueva Planta Desaladora, la cual estará ubicada en la costa de la comuna de Tocopilla, en el sector denominado “Km 14” de la ruta CH-1, al sur de la ciudad de Tocopilla. Además, se considera una nueva subestación eléctrica, alimentada desde línea eléctrica existente en 23 kV, por medio de switchgear. La instalación tipo GIS contendrá dos transformadores de 110/23.

#### Sector RT

- Subestación Concentradora DRT: Esta obra se alimenta desde S/E Crucero, en 220 kV a través de la nueva LAT Crucero - DRT. La tecnología empleada para su accionamiento en alta y media tensión será en GIS, minimizando los espacios requeridos para estas instalaciones; con 4 transformadores de poder se alimentará el sistema de distribución primario de la planta en media tensión.
- Líneas Eléctricas: Para el suministro eléctrico de la planta concentradora se proyectan dos líneas eléctricas, en la Tabla 1 se muestra un resumen de sus principales características.

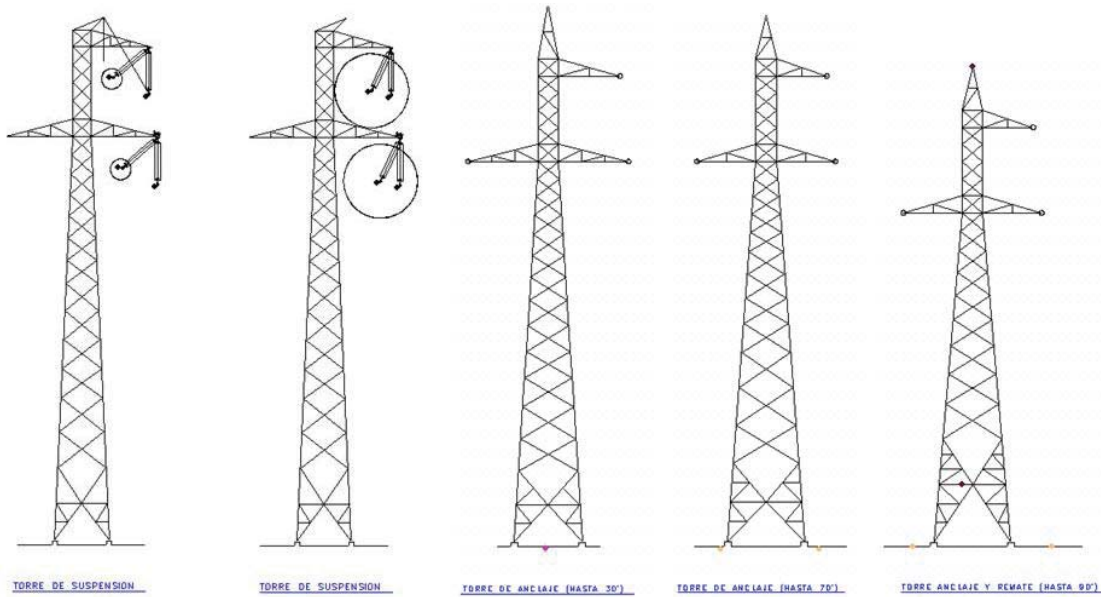
**Tabla 1. Características Líneas Eléctricas Área Concentradora**

Línea Eléctrica	Característica				
	Tensión de la línea	Frecuencia del sistema	Nº de fases	Tipo de línea	Longitud de la línea
LAT Principal RT – DRT	220 kV	50 Hz	3	Simple circuito	1,3 km aproximadamente
LAT DRT – Reservoirio Agua Industrial	34,5 kV	50 Hz	3	Simple circuito	1,45 km aproximadamente

La nueva LAT Principal RT – DRT conectará la S/E Principal RT, existente, con la nueva S/E Concentradora DRT.

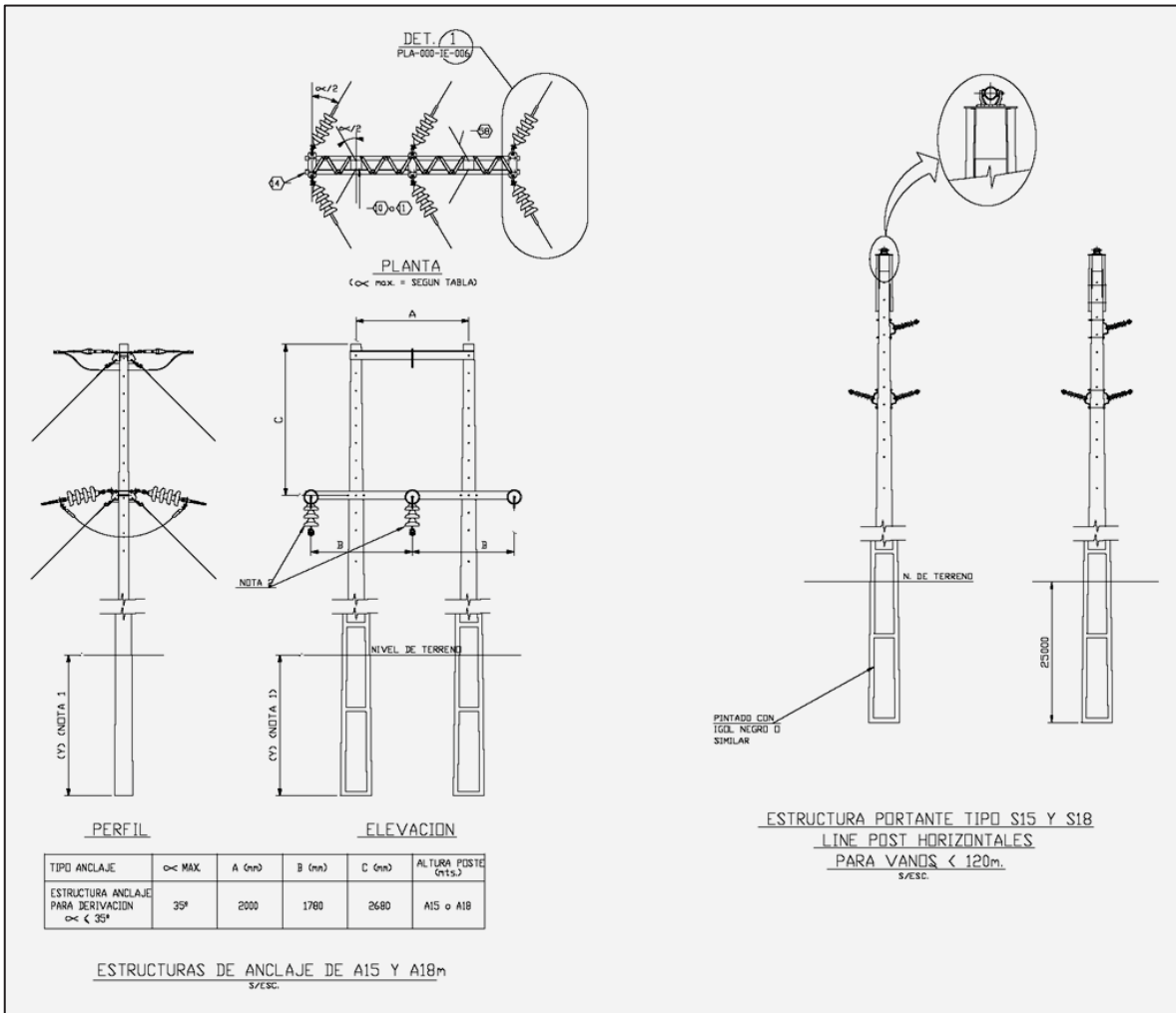
Las estructuras de suspensión y anclaje de la LAT Principal RT – DRT en 220 kV se han diseñado en torres con forma tronco piramidal reticulada de acero galvanizado, las que se muestran en la Figura 1.

**Figura 1. Siluetas de Estructuras de Suspensión y Anclaje LAT en 220 kV**



La LAT DRT – Reservoirio Agua Industrial considera estructuras de suspensión tipo S15 y S18 y como remate las estructuras de anclaje A15 y A18, en postes de hormigón pretensado de 13,5 metros. La Figura 2 muestra una silueta de las estructuras proyectadas de la línea, que corresponde al mismo diseño de silueta a utilizar en líneas de 23 kV.

**Figura 2. Siluetas Estructuras de Suspensión y Anclaje LAT en 34,5 kV y en 23 kV**



### Sector Planta Desaladora

- **Subestación km 14**

Esta obra se alimenta desde S/E Tamaya, desde donde es alimentada en 110 kV a través la nueva LAT Tamaya – Km 14. La instalación diseñada con tecnología GIS en alta tensión, a objeto de minimizar los espacio requeridos, contendrá dos transformadores de 110/23 kV.

### Sector Tranque Talabre

- ✓ **Área Relaves Convencionales**

- **Subestación elevadora Salar**

Esta obra será alimentada en 13,8 kV desde S/E Salar, a través de una conexión de 120 metros, conectado al switchgear de esta subestación. La instalación contendrá transformadores elevadores de 13,8/23 kV.

- **Líneas Eléctricas**

Para el área Relaves Convencionales se proyectan dos líneas eléctricas, en la Tabla 2 se muestra un resumen de sus principales características.

**Tabla 2. Características Líneas Eléctricas Área Relaves Convencionales**

Línea Eléctrica	Característica				
	Tensión de la línea	Frecuencia del sistema	N° de fases	Tipo de línea	Longitud de la línea
Línea Eléctrica Salar – Sentina RT	23 kV	50 Hz	3	Simple circuito	21,5 km aproximadamente
Línea Eléctrica Salar – Bombeo Talabre RT	23 kV	50 Hz	3	Simple circuito	18,3 km aproximadamente

Las líneas consideran estructuras de suspensión tipo S15 y S18 y como remate las estructuras de anclaje A15 y A18, en postes de hormigón pretensado de 13,5 metros. Cada estructura tendrá una malla de puesta a tierra alrededor de la estructura de la longitud suficiente para lograr la resistencia adecuada, con una conexión a tierra inmersa en la fundación para evitar pérdidas. La Figura 2 muestra una silueta de las estructuras proyectadas de la línea.

- ✓ **Área Relaves Espesados**

- **Subestaciones Eléctricas**

Para el área Relaves Espesados se proyectan cuatro estaciones de bombeo alimentadas en media tensión (23 kV), todas con tecnología en switchgears de media tensión, alimentadas desde una S/E Común de 100/23 kV, cuyas características se muestran en la Tabla 3.



**Tabla 3. Características Subestaciones Área Relaves Espesados**

Nombre de Subestación	Característica		
	Alimentación	Salidas	Transformador (N°)
Común	LAT Salar – Común	Línea Eléctrica Común – Bombeo Relaves CH-MH	100/23 kV (1)
		Línea Eléctrica Común – Bombeo Relaves RT	
		Línea Eléctrica Común – PEAD	
Bombeo Relaves CH-MH	Línea Eléctrica Común – Bombeo Relaves CH-MH	-	23/4,16 kV (1)
Bombeo Relaves RT	Línea Eléctrica Común – Bombeo Relaves RT	-	23/4,16 kV (1)
PEAD	Línea Eléctrica Común – PEAD	-	23/4,16 kV (1)
Bombeo Booster	Línea Eléctrica Salar – Bombeo Booster	-	23/4,16 kV (1)

- **Líneas Eléctricas**

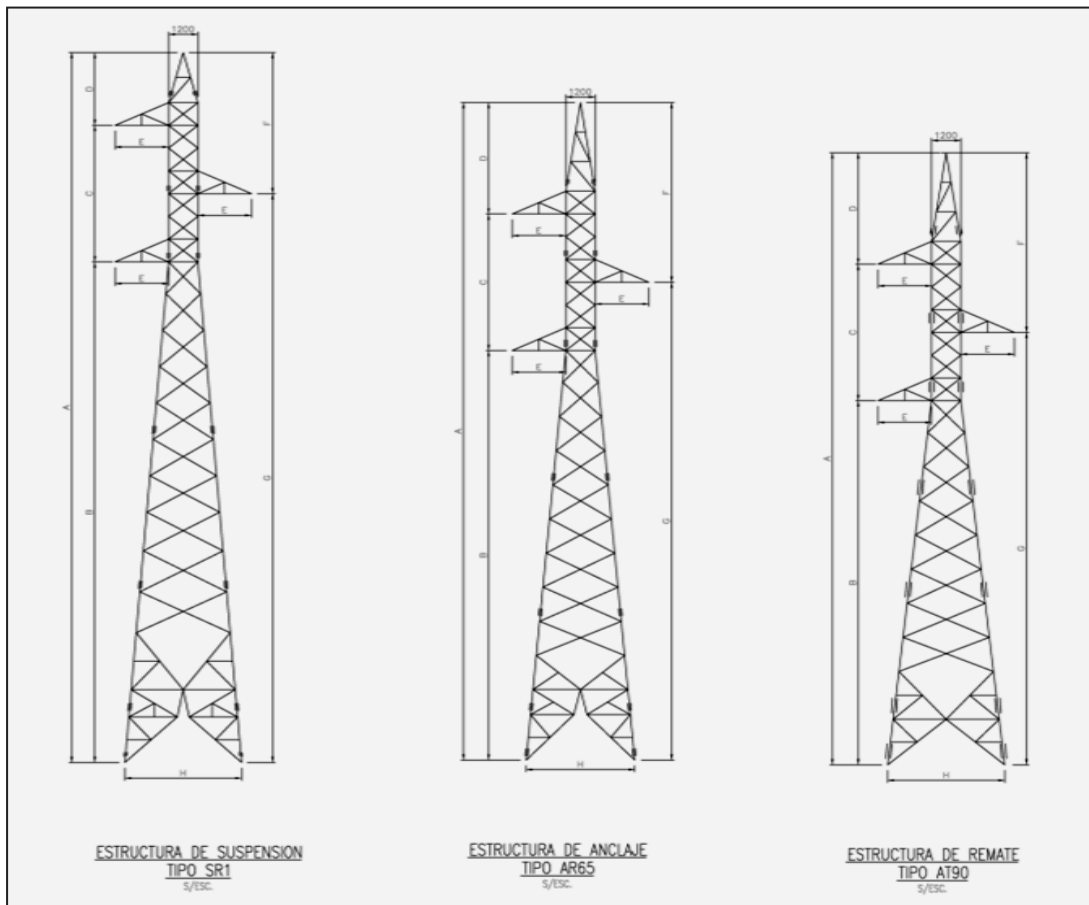
Para el área Relaves Espesados se proyectan cinco líneas eléctricas, cuyas principales características se resumen en la Tabla 4.

**Tabla 4. Características Líneas Eléctricas Área Relaves Espesados**

Línea Eléctrica	Característica				
	Tensión de la línea	Frecuencia del sistema	N° de fases	Tipo de línea	Longitud de la línea
LAT Salar – Común	100 kV	50 Hz	3	Simple circuito	12,5 km aproximadamente
Línea Eléctrica Común – Bombeo Relaves CH-MH	23 kV	50 Hz	3	Circuito simple	3,5 km aproximadamente
Línea Eléctrica Común – Bombeo Relaves RT	23 kV	50 Hz	3	Circuito simple	3 km aproximadamente
Línea Eléctrica Común – PEAD	23 kV	50 Hz	3	Doble circuito	3 km aproximadamente
Línea Eléctrica Salar – Bombeo Booster	23 kV	50 Hz	3	Circuito simple	1,6 km aproximadamente

Las estructuras de suspensión y anclaje de las LAT en 100 kV se han diseñado en torres con forma tronco piramidal reticulada de acero galvanizado de 31 metros. Cada estructura tendrá una malla de puesta a tierra alrededor de la estructura y radiales de la longitud suficiente para lograr la resistencia adecuada, con una conexión a tierra inmersa en la fundación para evitar pérdidas. La Figura 3 muestra la silueta de las estructuras proyectadas para la LAT.

**Figura 3. Siluetas Estructuras Suspensión y Anclaje LAT Salar – Común en 100 kV**



Las estructuras de suspensión y anclaje de las líneas eléctricas en 23 kV se han diseñado en postes de hormigón pretensado de 13,5 metros. Cada estructura tendrá una malla de puesta a tierra alrededor de la estructura de la longitud suficiente para lograr la resistencia adecuada, con una conexión a tierra inmersa en la fundación para evitar pérdidas. La Figura 2 muestra una silueta de las estructuras proyectadas de las líneas.

## Sector Planta Desaladora – RT

Para el área Sistema de Impulsión se proyectan cinco subestaciones, una por cada estación de bombeo. Las S/E serán de tipo GIS, cuyas características se muestran en la Tabla 5.

**Tabla 5. Características Subestaciones Área Sistema de Impulsión**

Nombre de Subestación	Característica		
	Alimentación	Salidas	Transformador (N°)
Estación de Bombeo N°1	Switchgear desde S/E Km 14 en 23 kV	Línea de distribución EB1-EB2	23/6,9 kV (3) 6,9/0,4 kV
Estación de Bombeo N°2	Línea de distribución EB1-EB2	-	23/6,9 kV
Estación de Bombeo N°3	Tap-off desde LAT Crucero - DRT	-	220/6,9 kV (2)
Estación de Bombeo N°4	Tap-off desde LAT Crucero - DRT	-	220/6,9 kV (2)
Estación de Bombeo N°5	Tap-off desde LAT Crucero - DRT	-	220/6,9 kV (2)

Cada subestación se encuentra localizada dentro del polígono de la estación de bombeo homóloga.

- **Líneas Eléctricas**

Para el área Sistema de Impulsión se proyectan tres líneas eléctricas, en la Tabla 6 muestra un resumen de sus principales características.

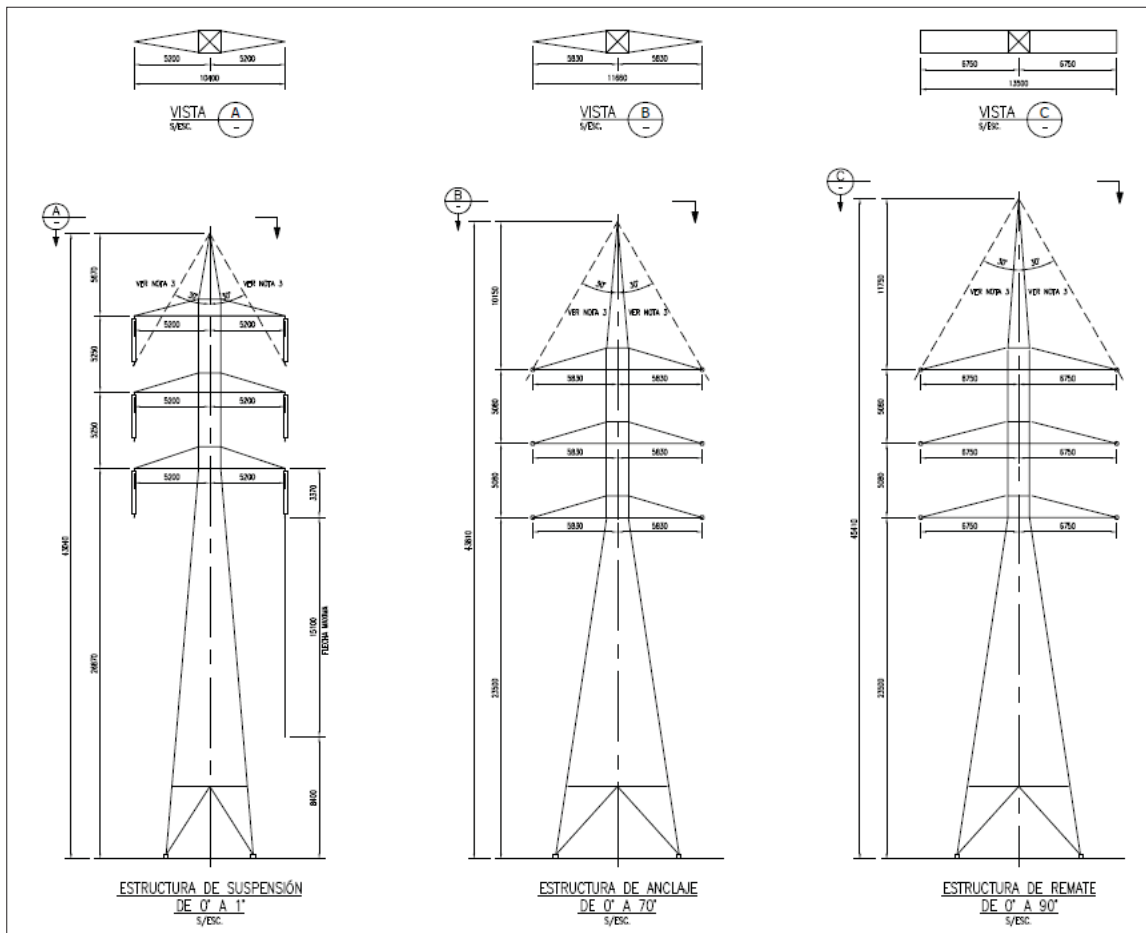
**Tabla 6. Características Líneas Eléctricas Área Sistema de Impulsión**

Línea Eléctrica	Característica				
	Tensión de la línea	Frecuencia del sistema	N° de fases	Tipo de línea	Longitud de la línea
LAT Crucero - DRT	220 kV	50 Hz	3	Doble circuito	85 km aproximadamente
LAT Tamaya – Km 14	110 kV	50 Hz	3	Circuito simple	14 km aproximadamente
Línea de distribución EB1-EB2	23 kV	50 Hz	3	Circuito simple	4 km aproximadamente

Las estructuras de suspensión y anclaje de la línea de 220 kV se han diseñado en torres con forma tronco piramidal reticulado de acero galvanizado. La

Figura 4 muestra la silueta de las estructuras proyectadas en la línea de 220 kV.

**Figura 4. Siluetas de Estructuras de Suspensión y Anclaje LAT Crucero - DRT**



Las estructuras de suspensión y anclaje de las LAT en 110 kV se han diseñado en torres con forma tronco piramidal reticulada de acero galvanizado de 31 metros, como se muestra en la Figura 3.

La línea de distribución EB1-EB2 sólo considera las estructuras de anclaje de A15 y A18, cuya silueta se muestra en la Figura 2. Las estructuras de la línea eléctrica en 23 kV se han diseñado en postes de hormigón pretensado de 13,5 metros.

### 1.1.2. Objetivos y Alcance del Estudio

En este Informe se efectúa una estimación de los campos electromagnéticos de baja y alta frecuencia que pueden presentarse en las subestaciones eléctricas tipo GIS de 220 kV en operación, y en las configuraciones de las líneas de transmisión de 110 kV (equivalente 100 kV) y 220 kV del Proyecto RT Sulfuros, al incorporar las nuevas líneas proyectadas.

Se entrega las normas de referencia aplicables en Chile respecto de la exposición humana a campos electromagnéticos de 50 Hz y posteriormente se presentan valores medidos del campo eléctrico y campo magnético en instalaciones similares a las subestaciones en referencia, publicados en la bibliografía. Para las líneas de 110 kV y 220 kV, se realiza la modelación de las distintas configuraciones de estructuras y cálculo de campo eléctrico y campo magnético con apoyo de un programa computacional que aplica el método de los elementos finitos. Finalmente estos valores se confrontan con las recomendaciones y límites admisibles para establecer una conclusión respecto al impacto ambiental de la S/E y de las líneas de transmisión, desde el punto de vista técnico de la emisión electromagnética de baja frecuencia.

Similarmente se realiza una estimación del nivel perturbador a frecuencias de radio generado por las líneas y la subestación debido al fenómeno corona, en base a medidas referenciales informadas en la bibliografía, y se compara con valores límites establecidos por recomendaciones internacionales.

### 1.1.3. Normas de Referencia Aplicables en Chile Respecto de la Exposición Humana a Campos Electromagnéticos de 50 Hz

En nuestro país no existe reglamentación relativa a los valores límites permitidos de exposición de las personas a los campos electromagnéticos de frecuencia industrial. 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 Supremo N° 95 del Ministerio Secretaría General de la Presidencia, publicado en el Diario Oficial del 07/12/2002, indica en su Artículo 7:

**“Artículo 7.-** Las normas de calidad ambiental y de emisión que se utilizarán como referencia para los efectos de evaluar si se generara 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 de Argentina, Australia, República Federativa del Brasil, Confederación de Canadá, Reino de España, Estados Unidos Mexicanos, Estados Unidos de Norteamérica, Nueva Zelanda, Reino de los Países Bajos, República de Italia, 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.”

Las tablas que se indican a continuación presentan las principales normas de referencia aplicables en Chile, de acuerdo a lo señalado en el Artículo anterior.

**Tabla 7. Límites de Exposición Humana a Campos Electromagnéticos de 50 Hz**

Público general			
País	Campo Eléctrico	Campo magnético	
	[kV/m]	[micro Tesla]	
Alemania	5,0	100,0	
Argentina	3,0	25,0	Borde franja de seguridad o perímetro subestación
Australia	5,0	100,0	
Canadá	No existe	No existe	
España	CEU	CEU	
Italia	5,0	10,0	Sólo LT ; 3,0 micro Tesla nuevas LT
Japón	3,0	No existe	Solo LT
U.S.A.	2,0 - 11,8	15,0 - 20,0	
Reino de los Países Bajos (Gobierno)	ICNIRP	ICNIRP	0,4 micro Tesla Aplica a nuevas líneas aéreas cerca de recintos con niños
Reino de los Países Bajos (Consejo de Salud)	8,0	120,0	
Suecia	No explícito	No explícito	Principio de precaución
Suiza	5,0	100,0	1,0 micro tesla nuevas instalaciones de LT y cable
ICNIRP	5,0	100,0	
IEEE	5,0	904,0	
Consejo de Unión Europea (CEU)	5,0	100,0	

#### 1.1.4. Valores Límites Recomendados de Radio Interferencia provocada por Instalaciones de Alta Tensión

En la referencia [3], se propone la siguiente recomendación para el límite de campo electromagnético perturbador de alta frecuencia (radio interferencia) emitida por líneas de transmisión y subestaciones, según su nivel de tensión:

**Tabla 8. Valores de Interferencias de Radio, recomendados por Asociación de Normas Canadienses y acogida como Regulación del Gobierno Federal**

Voltaje nominal entre fases (KV)	Nivel de Radio Interferencia (dB/ 1 $\mu$ V/m)
Menos de 70	43
70 – 200	49
200 – 300	53
400 – 600	60
Sobre 600	63
Para líneas de transmisión, valores indicados a 15 m de la fase externa y a 1,0 MHz Para subestaciones, valores medidos a 15 m del cerco del recinto de la subestación	

Para una línea de transmisión o subestación de 220 kV, el valor límite corresponde a **53 [dB/1 $\mu$ V/m]**. Para una línea de transmisión o subestación de 110 kV, el valor límite corresponde a **49 [dB/1 $\mu$ V/m]**.

### 1.2. Campos Electromagnéticos y Perturbaciones en Instalaciones de 220 kV

#### 1.2.1. Subestación GIS de 220 KV

Las subestaciones GIS tienen sus partes bajo tensión aisladas en gas hexafluoruro de azufre (SF<sub>6</sub>), en lugar de aislación en aire como en las subestaciones abiertas. Cada equipo de alta tensión, incluyendo las barras principales o colectoras, está encapsulado independientemente en un compartimiento metálico provisto de un ambiente de gas SF<sub>6</sub> a presión mayor que la atmosférica. Se forman así módulos individuales por equipo, que luego se interconectan mecánica y eléctricamente entre sí para formar distintas configuraciones.

##### 1.2.1.1. Campo Eléctrico provocado por la Subestación GIS

En una subestación eléctrica GIS, el campo eléctrico está confinado al interior del encapsulado. Adicionalmente, como se trata de una instalación interior, las estructuras, al comportarse como medio conductor en baja frecuencia, contribuyen a apantallar el campo eléctrico. En consecuencia, el campo eléctrico en el exterior del encapsulado de la subestación es nulo.

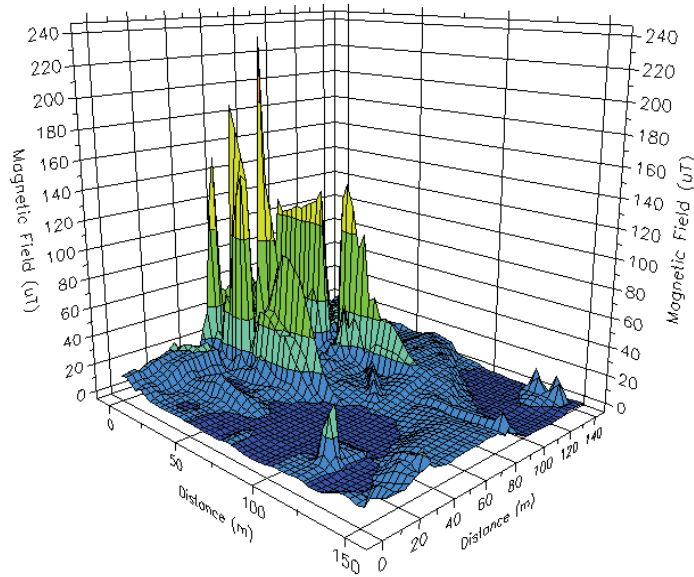
#### **1.2.1.2. Campo Magnético en el Entorno de una Subestación GIS**

Se ha tomado la información publicada en la referencia [2], que se reproduce en las figuras a continuación:

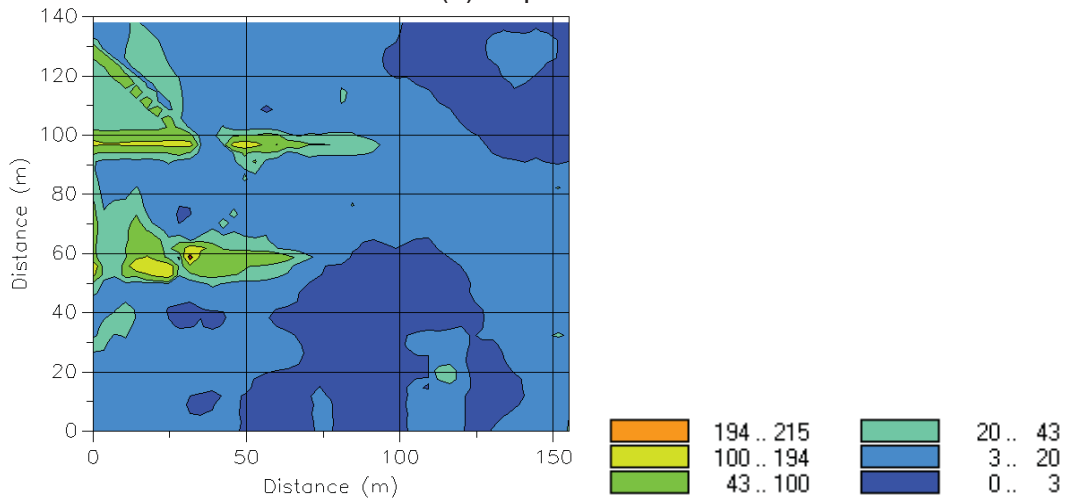


**Figura 5. Medidas de Campo Magnético en una Subestación GIS de 220 kV [2]**

5(a) Gráfico 3-D



5(b) Mapa a color

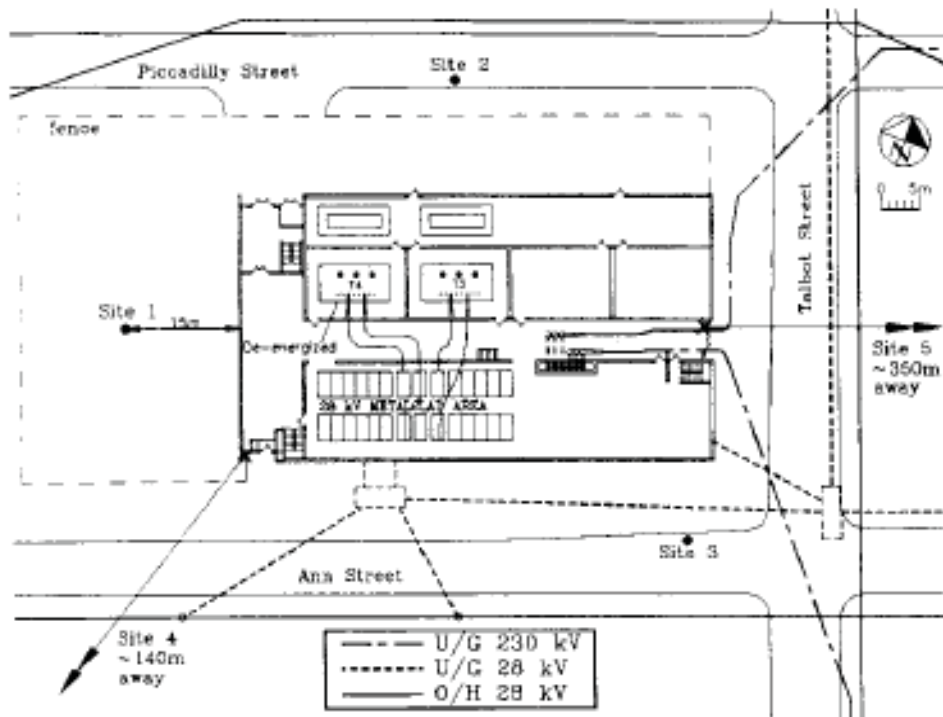


Se observa un campo magnético elevado al interior de la subestación, alcanzando 230 micro Tesla (2300 mili Gauss), el cual se reduce en el borde de la subestación a magnitudes no superiores a **20 micro Tesla (200 mili Gauss)** salvo en las salidas o entradas de líneas con valores hasta 100 micro Tesla (1000 mili Gauss).

### 1.2.1.3. Nivel de Radio Interferencia generado por Subestación Encapsulada

La interferencia generada por descarga corona en líneas de alta tensión corresponde a descargas eléctricas parciales en el aire alrededor de los conductores, producidas por la alta magnitud de campo eléctrico que provoca ionización del aire. En el caso de una subestación encapsulada, las descargas parciales existentes son mínimas por su construcción blindada, lo cual evita radio interferencias y disminuye el nivel de ruido. Dada la condición encapsulada de los conductores, en una estación GIS se prevé una magnitud menor de radio interferencia que en una subestación abierta. En la referencia [4] se incluye, entre otras subestaciones de diversos voltajes, valores medidos de radio interferencia en la vecindad de la Gas-Insulated Substation London-Talbot 230 kV. Se reproduce a continuación la tabla de valores medidos.

Figura 6. Esquema de Gas-Insulated Substation London-Talbot 230 kV [4]



**Tabla 9. Medidas de RI en varias Subestaciones GIS [4]**

Location	Site	Value at .05 MHz			Value at 0.5 MHz			Value at 5 MHz			Value at 73.5 MHz H-Polarization			Value at 73.5 MHz V-Polarization		
		PK	AVG	PK-AVG	PK	QP	PK-QP	PK	QP	PK-QP	PK	QP	PK-QP	PK	QP	PK-QP
London-Talbot TS	1	87	n/a*	n/a	54	50	4	39	35	4	50	24	26	51	30	21
	2	72	n/a	n/a	47	43	4	37	33	4	48	26	22	52	27	25
	3	77	59	18	48	44	4	37	33	4	59	29	30	57	27	30
	4	94	84	10	62	58	4	42	38	4	44	22	22	53	25	28
	5	67	57	10	44	41	3	35	32	3	62	34	28	57	32	25
Queensway General Hospital	A	56	43	13	38	35	3	32	29	3	62	34	28	60	34	26
	B	67	57	10	45	41	4	35	31	4	66	40	26	59	32	27
St. Joseph's Health Centre	C	65	49	16	52	47	5	35	30	5	57	27	30	56	26	30
	D	72	47	15	44	39	5	33	28	5	48	38	26	48	28	20
Mean,sites 1-3		79	59	18	50	46	4	38	34	4	52	27	26	53	28	25
Mean,sites 4-5		81	71	10	53	50	4	39	35	4	53	28	25	55	29	27
Mean,sites A-D		65	49	14	45	41	4	34	30	4	58	35	28	56	30	25

\*n/a not available

Los valores de RI medidos a 0,5 MHz en esta subestación están entre 41 y 50 [dB/1µV/m] (QP). Para trasladarlos a 1,0 MHz, se aplica la expresión:

$$RI_f = 20 \text{Log}_{10} \left[ \frac{1 + 0.5^2}{1 + f^2} \right]$$

Lo que determina una corrección de -4,08 [dB], es decir, a **1,0 MHz** estos valores oscilan entre **36,9 y 45,9 [dB/1µV/m]**.

#### 1.2.1.4. Campo Eléctrico en Líneas 220 kV

En esta sección se entrega los resultados de la simulación efectuada con el programa que aplica el método de elementos finitos, para evaluar campo eléctrico en las líneas de transmisión de simple y doble circuito en 220 KV. Se considera sistema equilibrado en voltajes y se evalúa el campo en el centro del vano, es decir, considerando la flecha media.

a) Línea de Simple Circuito

Figura 7. Disposición de Líneas Equipotenciales

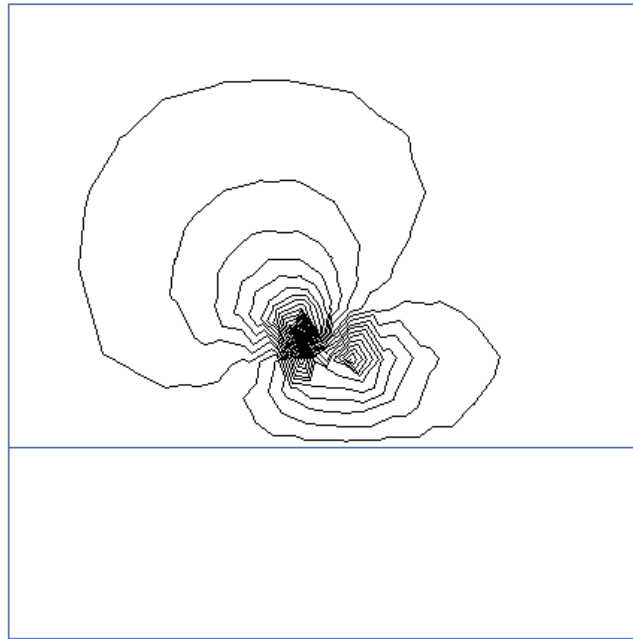
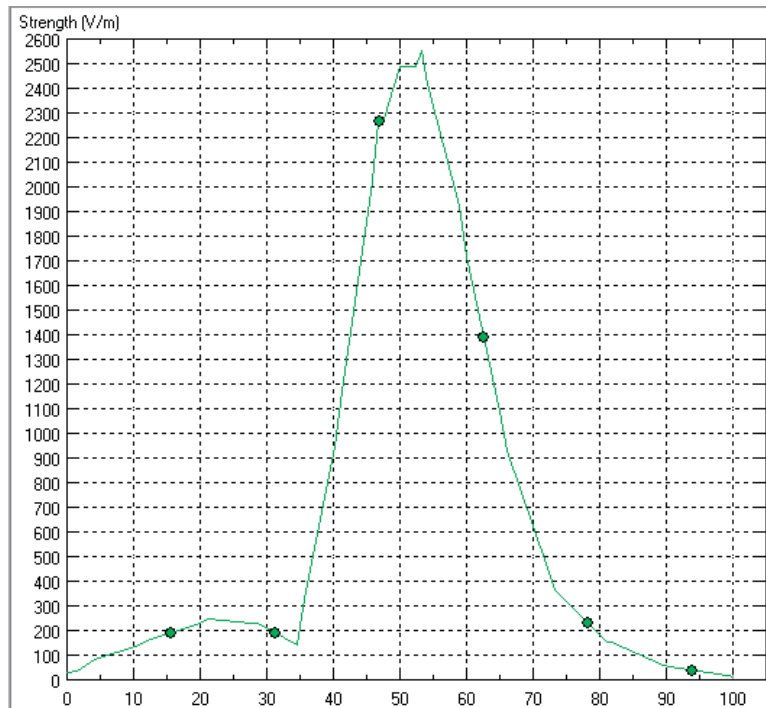


Figura 8. Magnitud de Campo a 1,0 m sobre el Suelo. L=50: Eje de la Línea



Se obtiene un valor máximo bajo la línea de 2540 Volts/m y en el borde de la franja, a 20 m del eje, **600 V/m**.

b) Línea de Doble Circuito

Figura 9. Disposición de Líneas Equipotenciales

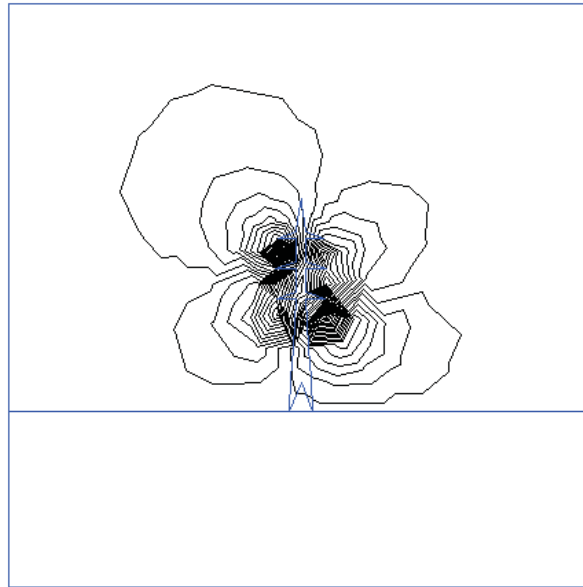
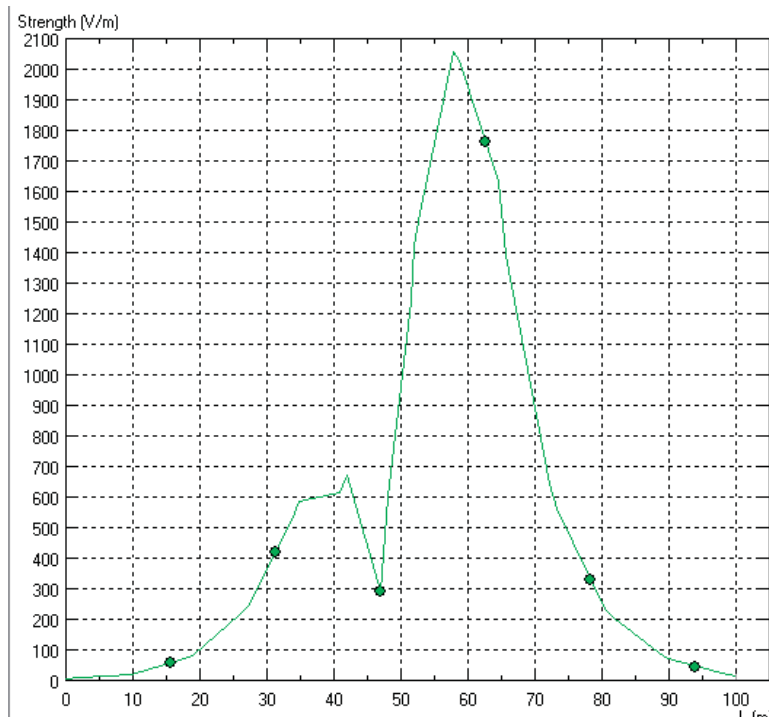


Figura 10. Magnitud de Campo a 1,0 m sobre el Suelo. L=50: Eje de la Línea



Se obtiene un valor máximo bajo la línea de 2050 Volts/m y en el borde de la franja, a 20 m del eje, **880 V/m**.

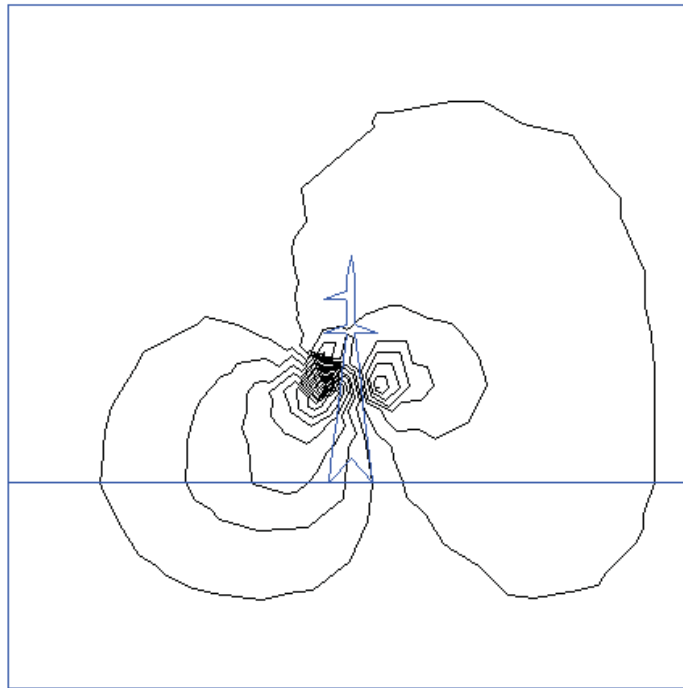
### 1.2.1.5. Campo Magnético en Líneas 220 kV

En esta sección se entrega los resultados de la simulación efectuada con el programa que aplica el método de elementos finitos, para evaluar campo magnético en el entorno de las líneas de transmisión de simple y doble circuito en 220 kV. Se ha considerado sistema equilibrado en corrientes en ambos casos; el análisis se efectúa directamente en fasores con una corriente máxima de **787** Amperes por conductor. En las figuras, la numeración de los conductores es de arriba – abajo y de izquierda a derecha, según el orden: Fase 1 - Fase 2 - Fase 3. La línea transversal en la figura indica la superficie del suelo.

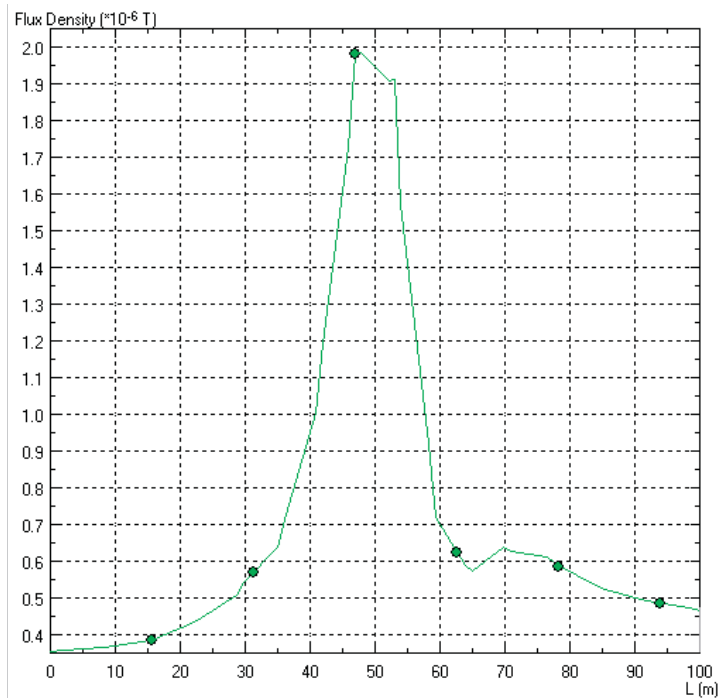
#### a) Línea de simple circuito

Referencia de corriente en fase central

**Figura 11. Disposición de Líneas Equipotenciales. Referencia en Fase Central**



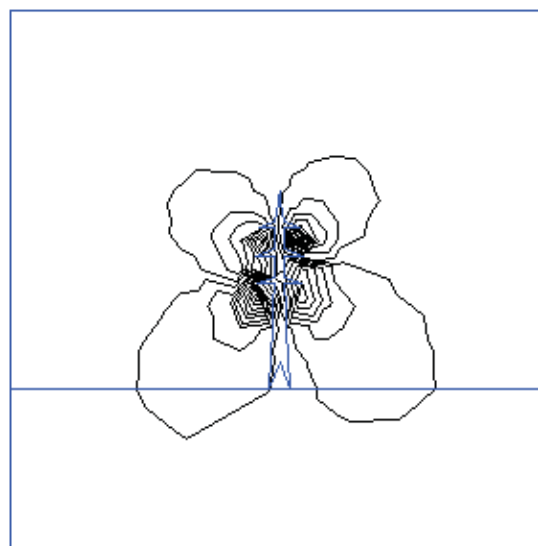
**Figura 12. Magnitud de Campo a 1,0 m sobre el Suelo. Referencia en Fase Central**



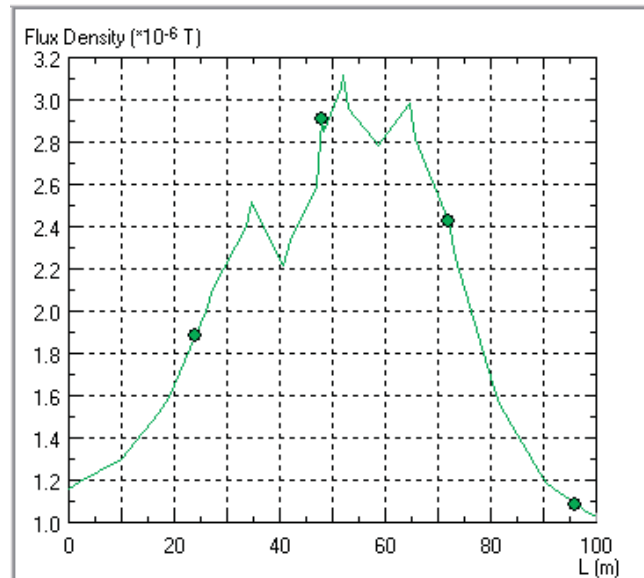
Se obtiene un valor máximo bajo la línea de 1,98 micro Tesla y en el borde de la franja, a 20 m del eje, **0,64 micro Tesla.**

**b) Línea de Doble Circuito**

**Figura 13. Disposición de Líneas Equipotenciales. Referencia en Fases Superior e Inferior**



**Figura 14. Magnitud de Campo a 1,0 m sobre el Suelo. Referencia en Fases Superior e Inferior**

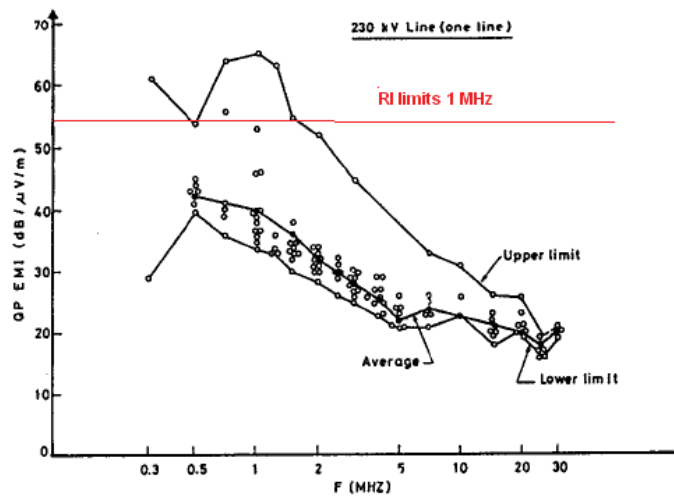


Se obtiene un valor máximo bajo la línea de 3,1 micro Tesla y en el borde de la franja, a 20 m del eje, **2,53 micro Tesla**.

#### 1.2.1.6. Radio Interferencia en Líneas de 220 kV

Se incluye información de medidas realizadas en Arabia Saudita, informadas en la referencia.[7] . Se ha agregado en el gráfico el límite para 1,0 MHz.

**Figura 15. Radio Interferencia Medida en Línea de 230 kV [7]**



EMI spectra for a 230 kV line.



Se estima que una línea de diseño convencional mantiene características similares, por lo que puede ser evaluada mediante medidas efectuadas en otras líneas de voltajes análogos. Un parámetro de alta incidencia en el fenómeno corona, causa de las perturbaciones radioeléctricas generadas por las líneas de transmisión, son las condiciones ambientales; los valores de la referencia se obtuvieron en condiciones climáticas semejantes a las características ambientales de las líneas en estudio. Por lo tanto, en promedio las líneas de 220 kV deben exhibir aproximadamente **40 dB/1  $\mu\text{V}/\text{m}$**  de radio interferencia.

### 1.3. Campos Electromagnéticos y Perturbaciones en Instalaciones de 110 kV

#### 1.3.1. Estimación de la Magnitud del Campo Eléctrico en Subestación de 110 kV

El campo eléctrico es naturalmente mayor en sectores donde el nivel de voltaje es mayor; en el caso de la subestación Km 14, en el patio de 110 kV. A continuación se incluye información de campo eléctrico medido en subestaciones de 110 kV.

En las figuras siguientes se muestran perfiles del campo eléctrico medidos a 1 m sobre el nivel del suelo en un patio de 110 kV de la subestación de 220/110 kV Los Almendros, según distintas direcciones [5].

**Figura 16. Campo Eléctrico a 1 m del Suelo, en Patio de 110 kV, [5]. Sector de Acceso de Empalmes a Edificio**

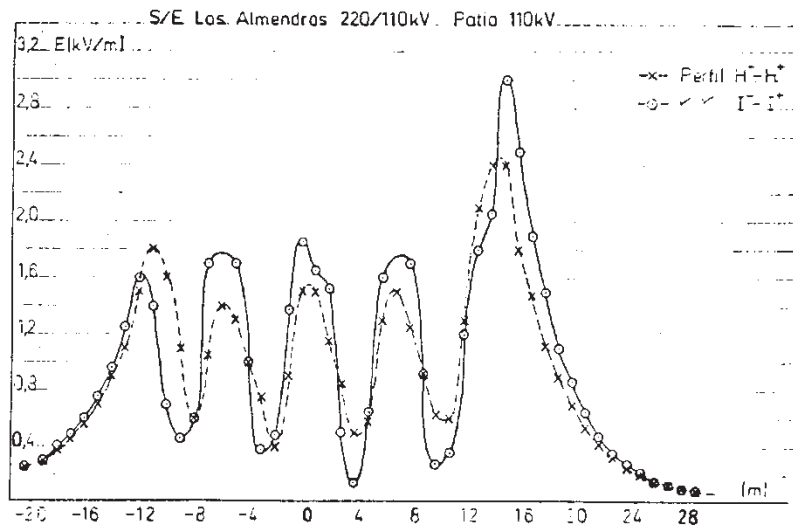
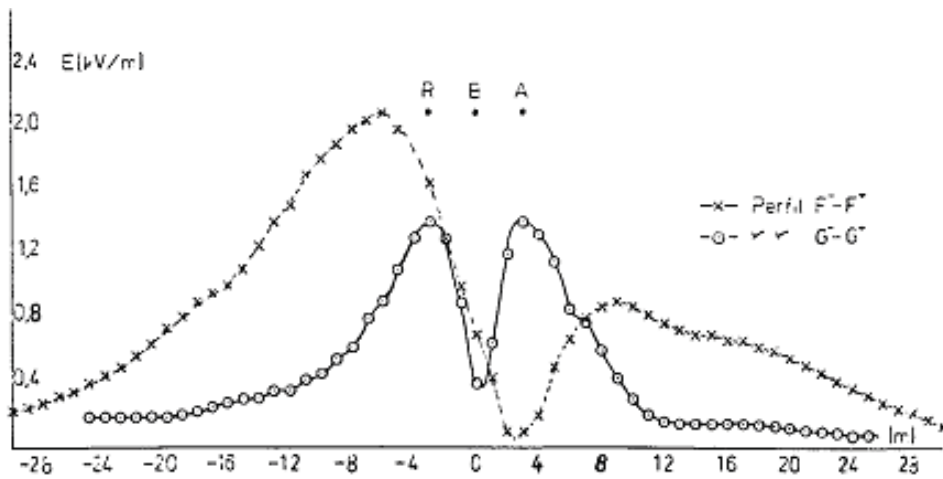


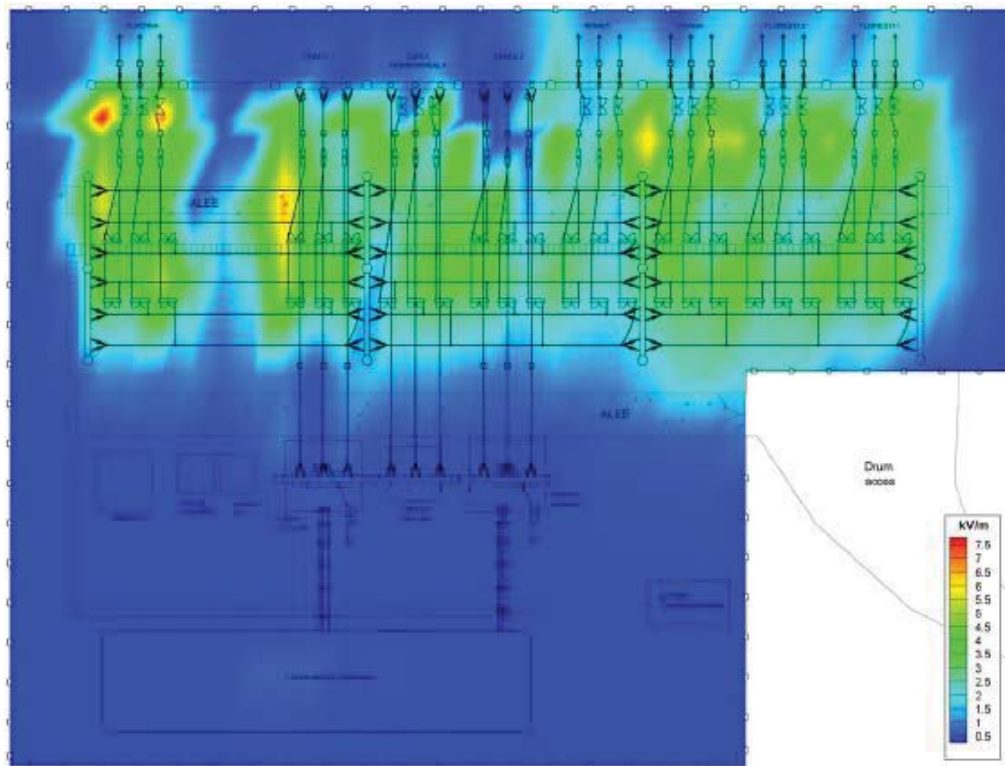
Figura 17. Campo Eléctrico a 1 m del Suelo, en Patio de 110 kV [5]



Se aprecia que el campo eléctrico baja drásticamente en los límites del patio, (extremos de las curvas) llegando a valores no superiores a **0,4 kV/m**.

De la referencia [6] se reproduce a continuación un mapa de campo eléctrico de la subestación Cluj - South de 110/20/10 kV

Figura 18. Distribución de Campo Eléctrico en Subestación de 110/20/10 kV [6]



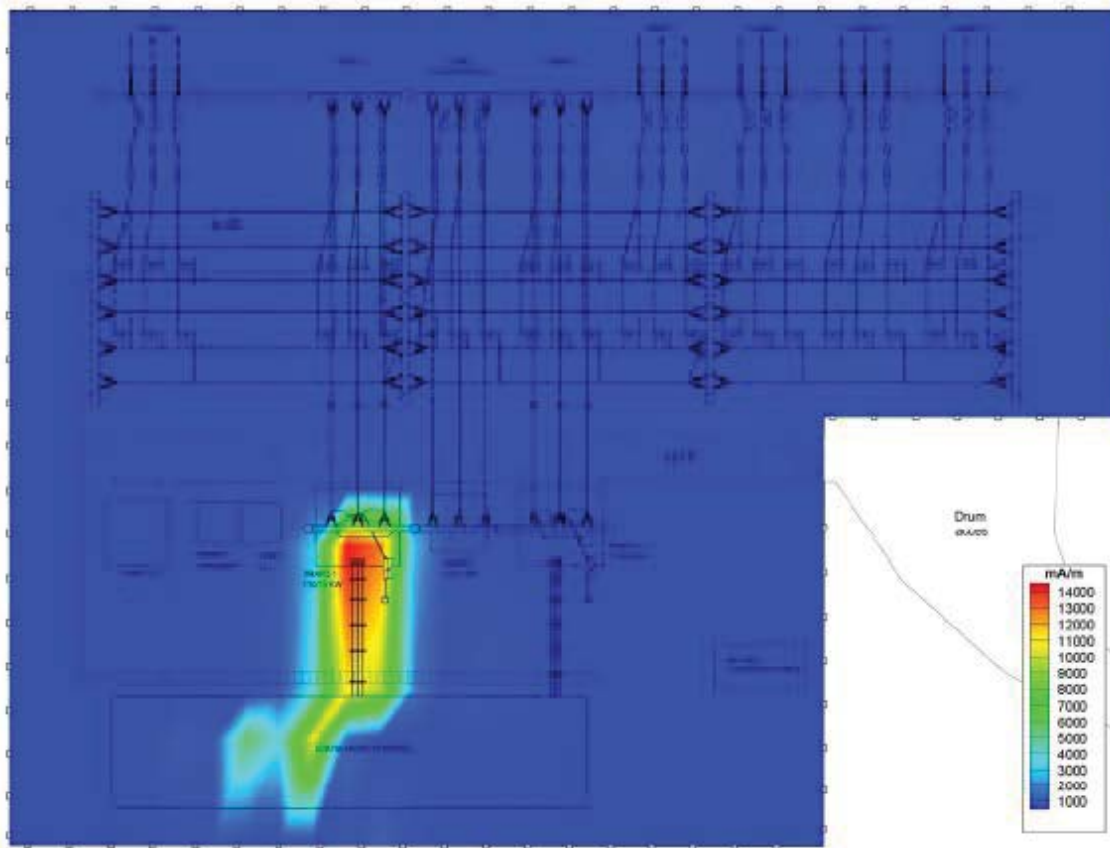
Se observa que en sectores muy localizados, puede alcanzarse valores tan altos como 7,5 kV/m, específicamente en patio de alta tensión, pero en el perímetro de la subestación la magnitud de campo eléctrico no supera **2,5 kV/m**.

### 1.3.2. Estimación de la Magnitud del Campo Magnético en la Subestación

Medidas directas informadas en referencias, indican que los campos magnéticos mayores son provocados por las barras de bajo voltaje de los transformadores, bancos de capacitores shunt, alimentadores de distribución y subidas de cables de alta tensión. Estos elementos llevan altas corrientes o bien las tres fases no están suficientemente cerca para cancelar el efecto de los tres campos. Es relevante recordar que el campo magnético es producido por la circulación de corriente y no depende del nivel de voltaje de la subestación.

De la referencia [6] se reproduce a continuación un mapa de campo magnético H (mili Amperes/m) de la subestación Cluj - South de 110/20/10 kV.

**Figura 19. Distribución de Campo Magnético [mA/m] en la Subestación Cluj - South de 110/20/10 kV [6]**



Se observa que el campo magnético está muy localizado en torno a los conductores de las líneas de baja tensión, reduciéndose notoriamente en el resto de la subestación y particularmente en el borde, donde no supera 1000 mA/m, que corresponde a **0,63 micro Tesla**. Esto justifica la afirmación que regularmente en una subestación la mayor magnitud del campo magnético se encontrará en el lado de baja tensión, por tratarse de las mayores corrientes.

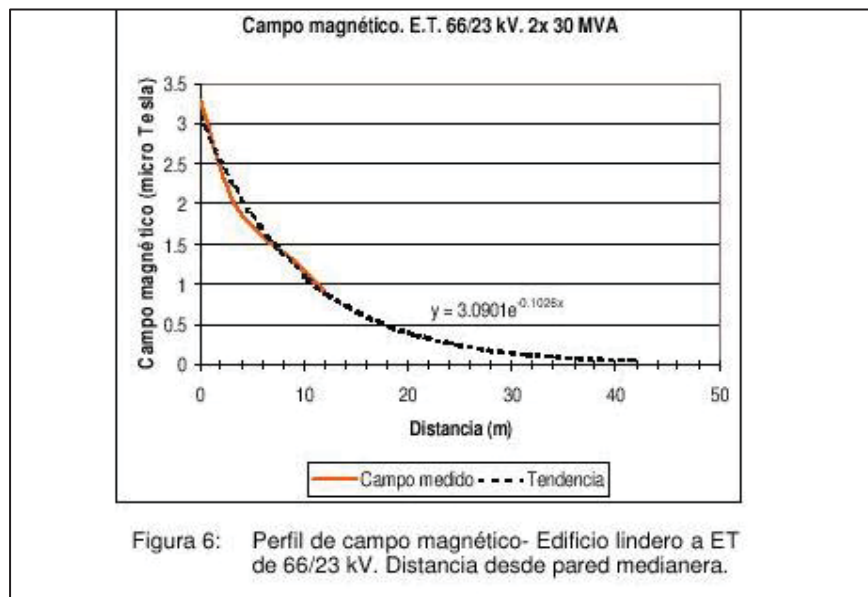
En base a lo afirmado anteriormente, se busca información de campo magnético medido en una subestación de similar potencia y en el nivel de voltaje 23 kV. En la referencia [7], se entrega el valor de 1 micro Tesla para el campo magnético máximo medido en el interior de una subestación transformadora de 66kV / 23 kV, 2 por 30 MVA, de configuración convencional.

**Tabla 10. Inducción Magnética en el Interior de Subestaciones (ET) [5]**

Lugar	B [microT]
Interior de ET 220/66 kV- trafo	25
Interior de ET 66/23 kV-	1
Interior de ET 66/23 kV- cables de 66 kV	220

De la misma referencia se reproduce además la figura del perfil de campo magnético medido desde la pared de la subestación, hacia afuera.

**Figura 20. Campo Magnético Medido en S/E de 66/23 kV, 2 x 30 MVA desde Pared hacia Fuera. (1  $\mu$ T = 10 miliGauss) [7]**



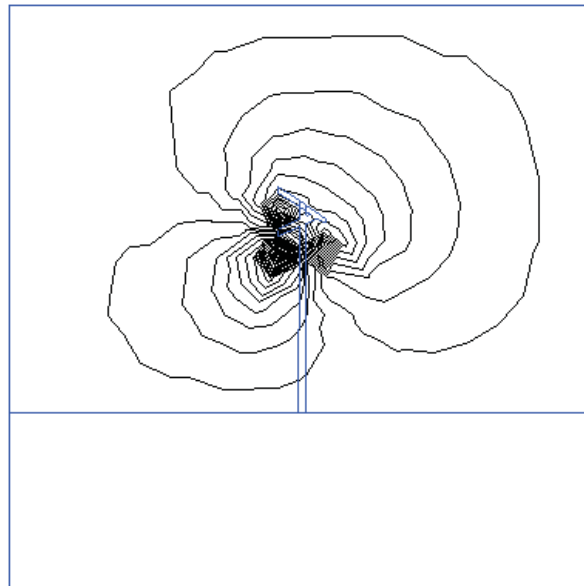
Tomando como referencia los valores mostrados en esta última figura, puede señalarse que en el perímetro de la subestación se espera valores de campo magnético no superiores a 3,3 micro Tesla (**33 mili Gauss**), pero ya a 2 metros del borde, la magnitud prevista es inferior a 2 micro Tesla (20 mili Gauss)

### 1.3.3. Estimación de la Magnitud del Campo Eléctrico a 1 metro de Altura sobre el Suelo, provocado por las Configuraciones de Líneas de 110 kV

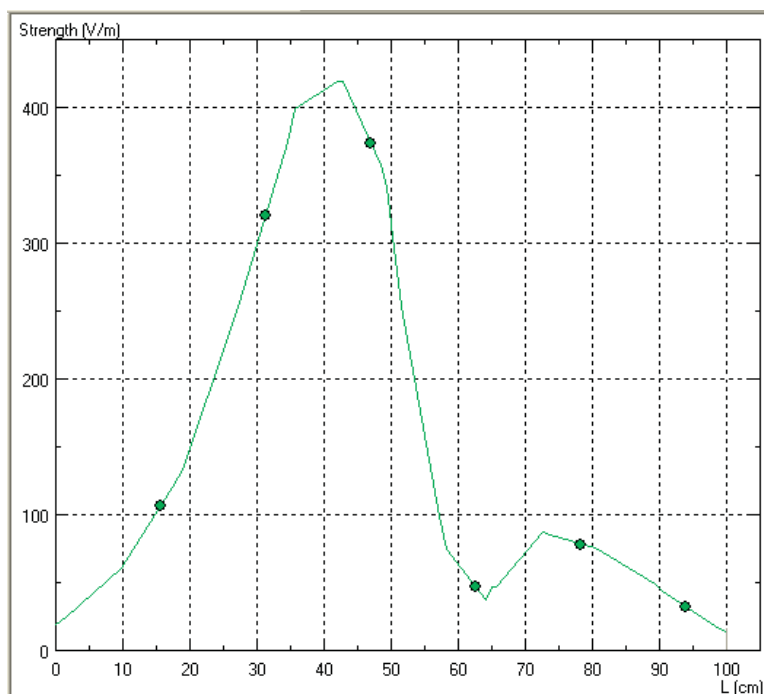
Ocupando la metodología de elementos finitos [1], se evalúa el campo eléctrico en el entorno de las líneas, en dirección transversal a su eje y a un metro de altura sobre el nivel del terreno, condiciones normalizadas. Se analiza la estructura de remate y anclaje en el caso de líneas de simple circuito y la de remate en el caso de doble circuito, por ser más bajas y en consecuencia con conductores más cerca del suelo, considerado sistema

equilibrado en voltajes y evaluación del campo en el centro del vano. Los resultados se muestran a continuación. En las figuras siguientes, la línea transversal indica la superficie del suelo y L=50 corresponde a la posición del eje de la línea.

**Figura 21. Disposición de Líneas Equipotenciales**



**Figura 22. Magnitud de Campo a 1,0 m sobre el Suelo**



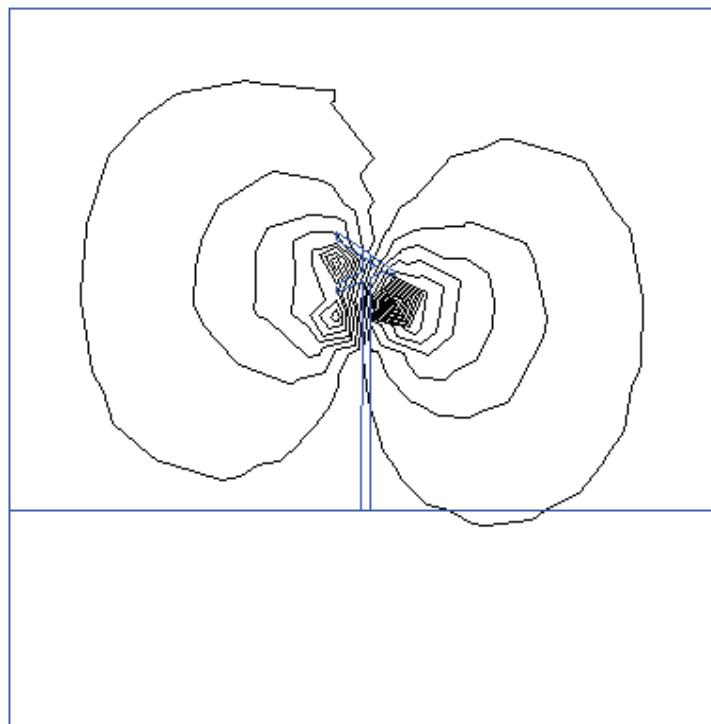
Se observa que el campo eléctrico máximo que se obtiene bajo la línea, de baja drásticamente en los límites del patio, (extremos de las curvas) llegando a valores no superiores a **0,4 kV/m**.

#### 1.3.4. Estimación de la Magnitud del Campo Magnético a 1 metro de Altura sobre el Suelo, provocado por las Configuraciones de Líneas de 100 kV

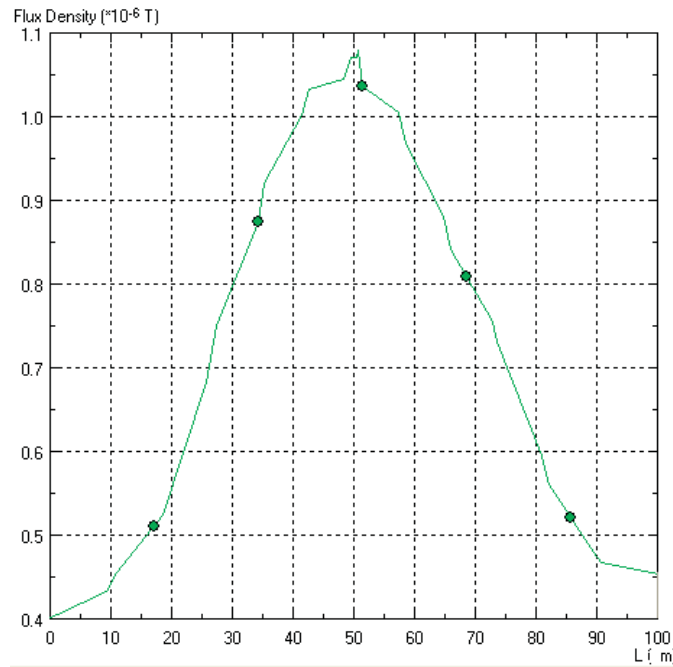
En esta sección se entrega los resultados de la simulación efectuada con el programa que aplica el método de elementos finitos, para evaluar campo magnético en las configuraciones de líneas de 220 kV del Proyecto RT Sulfuros.

Se ha considerado sistema equilibrado en corrientes, la evaluación del campo en el centro del vano, y una magnitud de corriente máxima de **525 Amperes** por fase. El análisis se efectúa directamente en fasores. La línea transversal en la figura indica la superficie del suelo.

**Figura 23. Disposición de Líneas de Campo**



**Figura 24. Magnitud de Campo a 1,0 m sobre el Suelo**



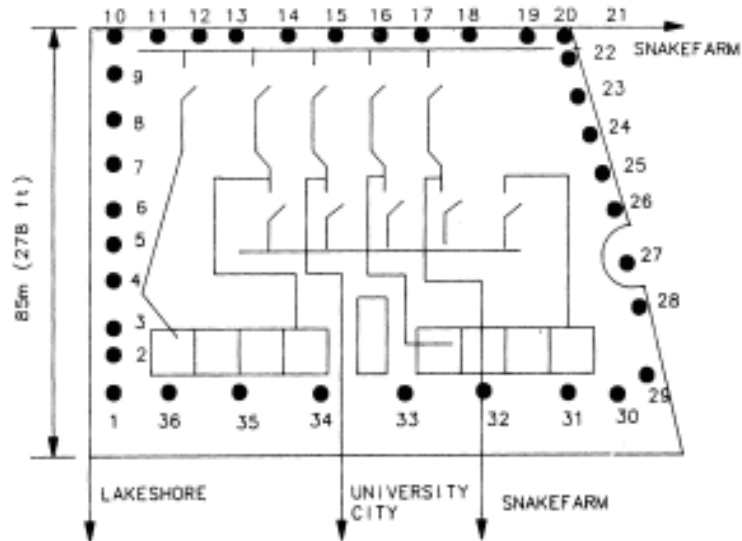
Se observa que la inducción magnética máxima que se obtiene bajo la línea, 1,75 micro Tesla, de baja drásticamente en los límites del patio, (extremos de las curvas) llegando a valores no superiores a **0,80 micro Tesla**.

### 1.3.5. Radio Interferencia en Subestaciones 110 kV

En la literatura internacional no ha sido posible encontrar medidas de radio interferencia en subestaciones de 110 kV o menor voltaje, pues existe consenso en que este efecto no es relevante a este nivel de voltaje. A continuación se incluye la información presentada en la referencia [6], correspondiente a una subestación (Pontchartrain) originalmente de 115 kV, que fue modificada a 230 kV. La Figura 25 muestra un esquema de la subestación, indicando los puntos de medida de RI, ubicados 1,5 m hacia el interior, desde la pared de la subestación.

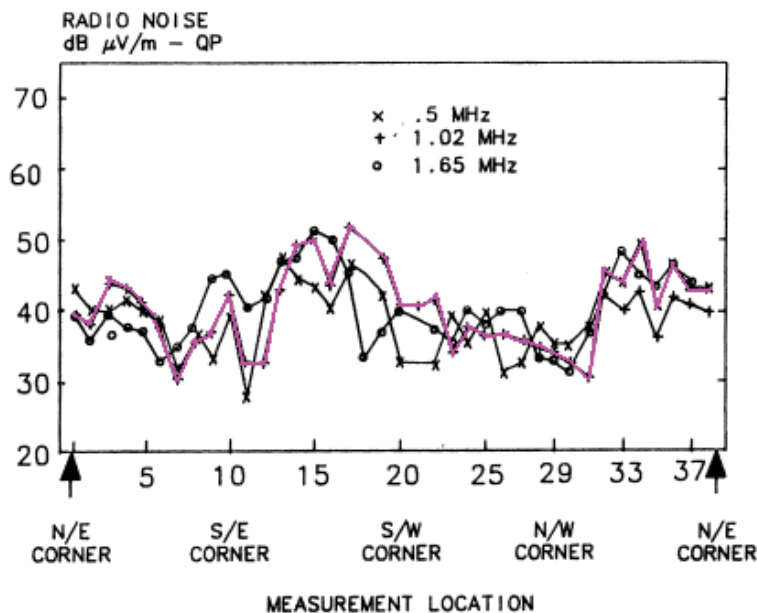


Figura 25. Puntos de Medición de RI en Perímetro de SE Pontchartrain [6]



En la Figura 26 se muestra los valores medidos de RI en el perímetro, destacándose los correspondientes a 1,02 MHz.

Figura 26. Valores de RI en Perímetro de SE operando a 115 kV [6]



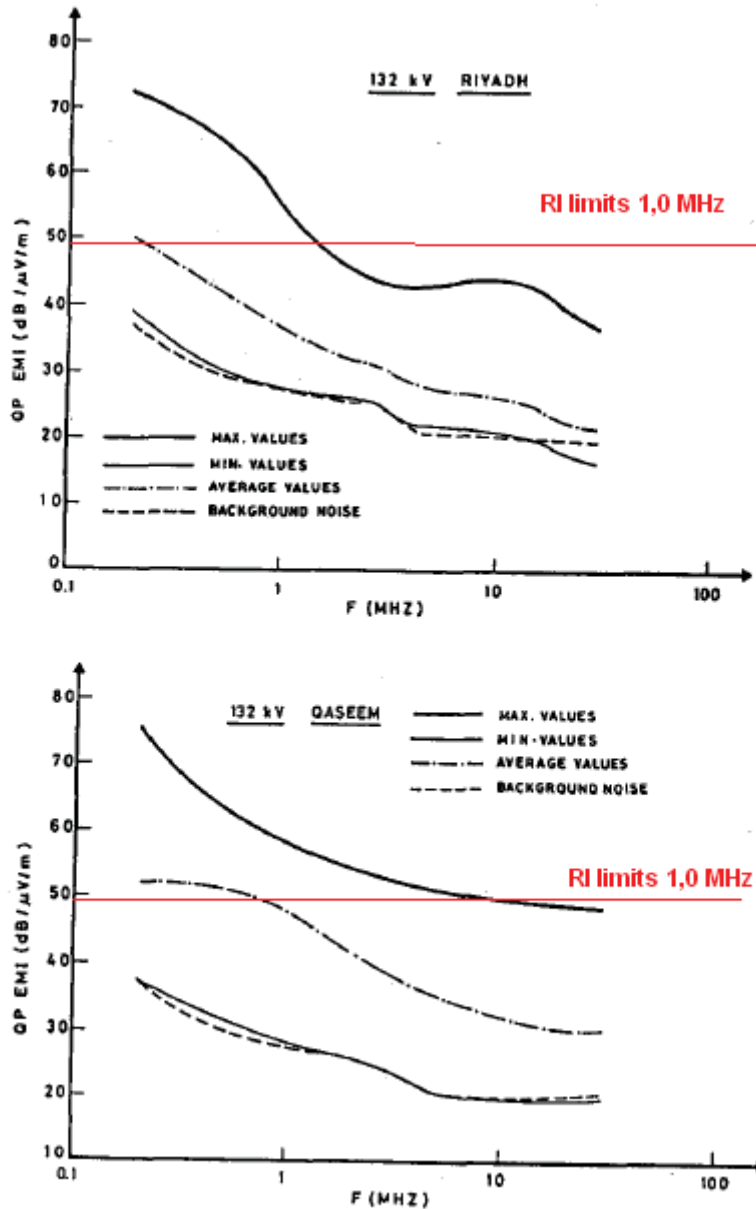
El máximo RI medido a 1,02 MHz y 1,5 m hacia adentro de la subestación, es 52 [dB/1 μV/m]. Aplicando los factores de corrección por frecuencia y distancia, se obtiene que el

valor máximo de RI a 1,0 MHz y 15 m de distancia lateral hacia fuera de la subestación, es 4,43 dB menor al medido, es decir, **47,57 [dB/1 $\mu$ V/m]**.

### 1.3.6. Radio Interferencia en Líneas de 100 kV

De la misma referencia anterior, se incluye los gráficos siguientes:

**Figura 27. Radio Interferencia medida en Líneas de 132 kV [7]**



**EMI frequency spectra for 132 kV lines.**

Se estima que una línea de diseño convencional mantiene características similares, por lo que puede ser evaluada mediante medidas efectuadas en otras líneas de voltajes análogos. Un parámetro de alta incidencia en el fenómeno corona, causa de las perturbaciones radioeléctricas generadas por las líneas de transmisión, son las condiciones ambientales; los valores de la referencia se obtuvieron en condiciones climáticas semejantes a las características ambientales de las líneas en estudio, luego, la radio interferencia de la línea es **48 dB/1 $\mu$ V/m**, inferior al límite.

#### 1.4. Conclusiones

De los análisis efectuados mediante modelos teóricos y de la información recogida en las referencias indicadas, se concluye lo siguiente:

##### a. Campos Electromagnéticos y Perturbaciones en Instalaciones de 220 kV

- Subestación GIS de 220 KV

##### Campo Eléctrico

En una subestación eléctrica GIS, el campo eléctrico está confinado al interior del encapsulado. Adicionalmente, como se trata de una instalación interior, las estructuras, al comportarse como medio conductor en baja frecuencia, contribuyen a apantallar el campo eléctrico. En consecuencia, el campo eléctrico en el exterior del encapsulado de la subestación **es nulo**.

##### Campo Magnético

Se observa una inducción magnética elevada al interior de la subestación, alcanzando 230 micro Tesla (2300 mili Gauss), el cual se reduce en el borde de la subestación a magnitudes no superiores a **20 micro Tesla (200 mili Gauss)** salvo en las salidas o entradas de líneas con valores hasta 100 micro Tesla (1000 mili Gauss).

##### Radio Interferencia

A 1,0 MHz en condiciones de la norma ANSI, los valores de radio interferencia generados por subestaciones GIS de 220 kV, oscilan entre **36,9 y 45,9 [dB/ 1 $\mu$ V/m]**.

En el siguiente cuadro se resume las características y los límites respectivos.

Subestación GIS 220 kV	Nivel Proyectado	Límite	Unidades	Norma
Campo eléctrico	0	5	kV/m	ICNIRP
Inducción magnética	20	100	micro Tesla	ICNIRP
Radio interferencia	45,9	53	dB/ $\mu$ V/m	Canadiense

- **Líneas de Transmisión de 220 kV**

**Campo Eléctrico**

En línea simple circuito, se obtiene un valor máximo de campo eléctrico bajo la línea de 2540 Volts/m y en el borde de la franja, a 20 m del eje, **0,60 kV/m**.

En línea doble circuito, se obtiene un valor máximo de campo eléctrico bajo la línea de 2050 Volts/m y en el borde de la franja, a 20 m del eje, **0,88 kV/m**.

**Campo Magnético**

En línea simple circuito, se obtiene un valor máximo bajo la línea de 1,98 micro Tesla y en el borde de la franja, a 20 m del eje, **0,64 micro Tesla**.

En línea doble circuito, se obtiene un valor máximo bajo la línea de 3,1 micro Tesla y en el borde de la franja, a 20 m del eje, **2,53 micro Tesla**.

**Radio Interferencia:**

En promedio las líneas de 220 kV deben exhibir aproximadamente **40 dB/1  $\mu$ V/m** de radio interferencia.

En el siguiente cuadro se resume las características y los límites respectivos.

Línea de transmisión 220 kV	Simple circuito	Doble circuito	Límite	Unidades	Norma
	Nivel Proyectoado	Medido referencia			
Campo eléctrico	0,60	0,88	5	kV/m	ICNIRP
Inducción magnética	0,64	2,53	100	micro Tesla	ICNIRP
Radio interferencia	40	40	53	dB/ $\mu$ V/m	Canadiense

**b. Campos electromagnéticos y perturbaciones en instalaciones de 110 kV**

- **Subestación de 110 kV**

**Campo Eléctrico**

La referencia de medida en Chile muestra que el campo eléctrico en los límites del patio, llega a valores no superiores a **0,40 kV/m**.

De referencias internacionales, se encuentra que en el perímetro de la subestación la magnitud de campo eléctrico no supera **2,50 kV/m**.

**Campo Magnético**

De referencias internacionales se encuentra que valores medidos en el borde no superan 1000 mA/m, que corresponde a **0,63 micro Tesla**. De otra referencia, 2 metros del borde, hacia fuera, la magnitud prevista es inferior a 2 micro Tesla (**20 mili Gauss**).

### Radio Interferencia

Valor máximo de RI a 1,0 MHz y 15 m de distancia lateral hacia fuera de la subestación, es 4,43 dB menor al medido, es decir, **47,57 [dB/1μV/m]**.

En el siguiente cuadro se resume las características y los límites respectivos.

Subestación 110 kV	Nivel Proyectado	Límite	Unidades	Norma
Campo eléctrico	0,40 - 2,50	5	kV/m	ICNIRP
Inducción magnética	2,0	100	micro Tesla	ICNIRP
Radio interferencia	47,6	49	dB/μV/m	Canadiense

- Líneas de Transmisión de 110 kV.

### Campo Eléctrico

En los límites de la franja de seguridad, los valores no superan **0,40 kV/m**.

### Campo Magnético

La inducción magnética no supera **0,80 micro Tesla** en los límites de la franja de seguridad.

### Radio Interferencia

La radio interferencia de la línea es **48 dB/1μV/m**, inferior al límite.

En el siguiente cuadro se resume las características y los límites respectivos.

Línea de transmisión 110 kV	Nivel Proyectado	Límite	Unidades	Norma
Campo eléctrico	0,40	5	kV/m	ICNIRP
Inducción magnética	0,8	100	micro Tesla	ICNIRP
Radio interferencia	48	49	dB/μV/m	Canadiense

## 1.5. Referencias

- [1] Students' QuickField (TM) Finite Element Analysis System  
Version 3.4 User's Guide  
Copyright (C) Tera Analysis Company, 1995.
- [2] Measuring human exposure to magnetic fields at lv and hv substations near residential areas  
Khaled a. Ellithy Department of electrical engineering, qatar university, qatar
- [3] Maruvada, P. Sarma: "Consideration of radio interference and audible noise in the design of high-voltage transmission lines", artículo presentado a la Conferencia Copimera en San Juan, Puerto Rico, 3 al 8 de Octubre de 1993
- [4] radio interference and transient field from gas-insulated substations  
S . M. Harvey, P.S. Wong, P.M. Balma,  
IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 10, No. 1, January 1995
- [5] Nelson Morales; Efraín Asenjo; Cristian López:  
"Medición de campo eléctrico de frecuencia industrial bajo líneas de transmisión y en subestaciones", Anales V ERLAC ( Quinto Encuentro Regional Latino Americano de la Cigré, Paraguay, mayo 1993)
- [6] Calin Munteanu, Gheorghe Visan, Ioan T. Pop, Vasile Topa, Emil Merdan, Adina Racasan " Electric and Magnetic Field Distribution inside High and Very High Voltage Substations" Proceedings, 20th Int. Zurich Symposium on EMC, Zurich 2009
- [5] P. L. Arnera – P. E. Issouribehere (IITREE- UNLP Argentina) C. Jara – R. Vely – A. Inchausti: "Evaluación de campos eléctricos y magnéticos en instalaciones de la Administración Nacional de Electricidad ANDE Asunción Paraguay"  
(ANDE Paraguay) Artículo 36-10 X ERLAC Décimo Encuentro Regional Latinoamericano de la CIGRE, Puerto Iguazú, Argentina, Mayo 2003
- [6] R. T. Carter, A. W. Grille, G. M. Bazile, N. D. Perkins, S. F. Mauser, "Analysis of radio interference and substation modifications for uprating a 115-kV substation to 230 kV "  
IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. PWRD-2, No. 2, April 1987
- [7] A.A. Al-Arainy, N.H. Maiik, L.N. Abdul-Aal  
Electromagnetic interference from transmission lines located in central region of Saudi Arabia. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No. 1, January 1989