

ANEXO E

CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS

DECLARACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL AMPLIACIÓN S/E CALDERA 110/23KV

Preparado por:
PROUST CONSULTORES LTDA.

1. INTRODUCCIÓN

En física se denomina 'campo' a la zona del espacio donde se manifiestan fuerzas. Asimismo, un campo electromagnético es una zona donde existen campos eléctricos y magnéticos, creados por las cargas eléctricas y su movimiento, respectivamente. Los campos electromagnéticos se dan de forma natural en nuestro entorno donde se reconoce una compleja adaptabilidad del organismo al espectro de influencia de los campos; por ejemplo, el campo eléctrico y magnético estático natural de la Tierra, los rayos X y gamma provenientes del espacio y los rayos infrarrojos y ultravioletas que emite el Sol, sin olvidarnos de que la propia luz visible es una radiación electromagnética.

A muy altas frecuencias (como en el caso de los rayo X) la energía que transmite una onda electromagnética es tan elevada que puede llegar a dañar el material genético de la célula -el ADN-, siendo capaz de iniciar un proceso cancerígeno. A las radiaciones situadas en esta zona del espectro se les conoce como 'ionizantes'.

Se reconocen como fuentes inductoras de campos electromagnéticos a las subestaciones y líneas de transmisión eléctrica, los cuales funcionan a una frecuencia extremadamente baja (50 Hz, ó 60 Hz, lo que se denomina 'frecuencia industrial'), dentro de la región de las radiaciones no ionizantes del espectro, por lo que transmiten muy poca energía. Además, a frecuencias tan bajas el campo electromagnético no puede desplazarse (como lo hacen, por ejemplo, las ondas de radio), lo que implica que desaparece a corta distancia de la fuente que lo genera. Al igual que cualquier otro equipo o aparato que funcione con energía eléctrica, las subestaciones y líneas eléctricas de alta tensión generan un campo eléctrico y magnético de frecuencia industrial. Su intensidad dependerá de diversos factores, como el voltaje, potencia eléctrica que transporta, geometría del apoyo, número de conductores, distancia de los cables al suelo, etc.

Adicionalmente, en todas las líneas y subestaciones eléctricas con niveles de tensión iguales o superiores a 66 kV el efecto corona comienza a tener importancia. Las manifestaciones más importantes del fenómeno corona son la generación de ruido acústico y campos electromagnéticos. Estos campos electromagnéticos tienen un amplio espectro de frecuencia que va desde los pocos Hz a los GHz, y su principal consecuencia son las interferencias en las telecomunicaciones. Esta interferencia es más evidente en la banda de radio AM (535-1.605 KHz) y de televisión (90 a 220 MHz).

A continuación se presenta el estudio referencial, que permite demostrar el rango de magnitud de las inducciones electromagnéticas e interferencias de radiofrecuencia inducidas por los equipos e instalaciones proyectadas para la ampliación de la subestación eléctrica Caldera. Los resultados expuestos se articulan en base a estudios desarrollados para múltiples subestaciones de mismo género con variabilidad en los voltajes de operación, cuyos valores son contrastados con la normativa internacional los que establecen límites permisibles de exposición.

2. EVALUACIÓN CAMPOS ELECTROMAGNETICO GENERADO POR S/E CALDERA

2.1 MARCO CONCEPTUAL

2.1.1 Campo Eléctrico

El campo eléctrico en un punto cualquiera del espacio representa la fuerza, en magnitud y dirección, que sería aplicada a una carga unitaria positiva ubicada en ese punto. Sus unidades son Volt por metro (V/m) o kilovolt por metro (kV/m) en alta tensión.

En la vecindad de una subestación o línea aérea de alta tensión, la presencia de este campo se debe a que el conductor de alta tensión está directamente expuesto al aire (no existe aislación sólida, la aislación está definida por espaciamientos de aire) y sobre dicho conductor está aplicado un alto voltaje respecto de tierra, que actúa como conductor de referencia a potencial cero.

Para investigar sus efectos, se acostumbra caracterizar al campo eléctrico cerca de una instalación de alta tensión por el concepto "Campo eléctrico a nivel del suelo", que corresponde al campo eléctrico medido o calculado a 1 metro de altura sobre el suelo, en ausencia de otros objetos conductores.

Los efectos de inducción derivados de este campo eléctrico son de dos tipos:

- Voltaje inducido sobre objetos conductores aislados de tierra,
- Corriente inducida sobre objetos conductores conectados directamente a tierra.

Si el objeto está conectado a tierra a través de una impedancia de valor finito, se manifiestan conjuntamente ambos efectos.

Dado que el cuerpo humano se comporta eléctricamente como un volumen conductor frente al campo eléctrico de frecuencia industrial, a pesar de quedar expuesto a voltajes inducidos de cientos de Volts, se encuentra en estado equipotencial y por lo tanto en su interior el campo eléctrico es teóricamente nulo (en la realidad, de milésimas de V/m). Según referencias bibliográficas¹, el nivel mínimo de percepción directa del campo eléctrico de frecuencia industrial, a través de la manifestación de micro descargas en la piel, corresponde a valores entre 12-15 kV/m, valor efectivo.

Como además el "efecto condensador" del cuerpo humano es muy pequeño, la energía almacenada es también muy pequeña y su efecto más notorio puede ser una descarga transitoria similar a la que experimenta una persona al bajarse de un automóvil.

¹ "Electric and Magnetic Fields produced by Transmission Systems. Description of Phenomena. Practical guide for calculation" Working Group 36.01 CIGRE, 1980

En cuanto a la corriente inducida, en la situación más desfavorable, para una persona directamente en contacto con tierra, la corriente inducida en su cuerpo es del orden de 15 μA por kV/m (1 μA es una millonésima de Ampere). Para propósitos de comparación, el umbral de la percepción de la corriente eléctrica para el ser humano es de 1 milésima de Ampere. Se necesitaría estar en presencia de campos al menos 10 veces mayor a los habituales a nivel del suelo para experimentar recién la percepción o sensación de corriente eléctrica. Sin embargo, como resultado de rigurosos estudios², se ha encontrado que estimuladores muy sensibles, implantados en la región abdominal, pueden manifestar un funcionamiento defectuoso en campos superiores a 3 kV/m .

El método de mayor recurrencia para la estimación de campo eléctrico corresponde al Método de Simulación de Carga (MSC) donde la carga que está distribuida en la superficie de los conductores es sustituida por líneas de carga. La magnitud de estas cargas es determinada por la siguiente ecuación:

$$[P]^{-1}[V] = [Q]$$

Donde [P] es la matriz de potencial, [Q] el vector de las cargas a calcular y [V] el vector de las tensiones. Una vez realizados los cálculos de carga, el campo eléctrico, se obtiene de la siguiente manera:

$$E_x = \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{2\pi\epsilon_0} \left(\frac{x - x_i}{D_i^2} - \frac{x - x_i}{D_i'^2} \right)$$

$$E_y = \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{2\pi\epsilon_0} \left(\frac{y - y_i}{D_i^2} - \frac{y + y_i}{D_i'^2} \right)$$

Donde E_x , E_y son las componentes horizontal y vertical del campo eléctrico, (x,y) es el punto de cálculo, (x_i,y_i) la localización del conductor, D_i es la distancia del conductor al punto de evaluación y D_i' distancia reflejada del conductor al punto de evaluación, ϵ_0 permitividad del aire y es prácticamente independiente de las condiciones atmosféricas y es igual a la permitividad del vacío, cuyo valor es $8,85 \cdot 10^{-12}$ [F/m] y q_i es la carga del conductor.

² "Campos eléctricos y magnéticos de 50 Hz: Análisis del estado actual de conocimientos" 2001, Red Eléctrica de España, UNESA

Esta publicación sintetiza las conclusiones y comentarios, entre otras, de las siguientes publicaciones:

[2-1] Comité Científico Director de la Unión Europea, 1999

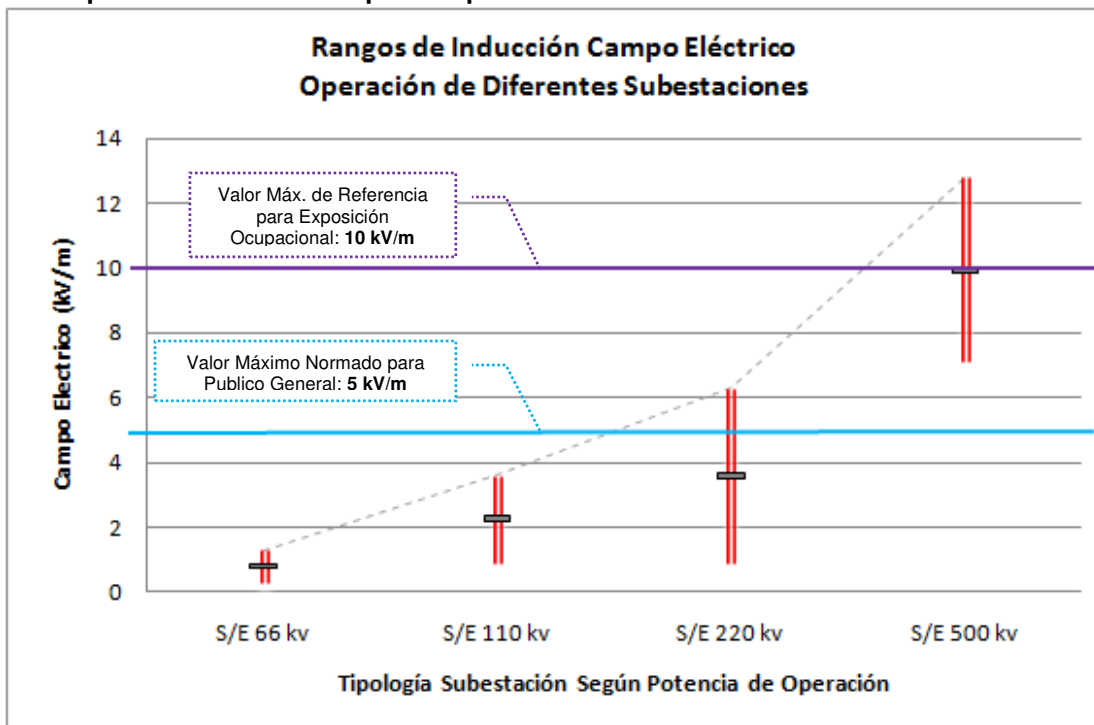
[2-2] Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE) Grupo de expertos COMAR (Comité Man and Radiation) 1999

[2-3] Informe del Grupo Asesor sobre Radiaciones No Ionizantes del NRPB (National Radiological Protection Board) Reino Unido 2001. Doc. NRPB, 12 (1), 164 (2001)

La gráfica siguiente presenta rangos estimados de inducción de campo eléctrico para diferentes subestaciones considerando voltajes nominales de operación de 66 kV, 110 kV, 220 kV y 500 kV³. Los valores expuestos tienen carácter conservador por cuanto son representativos de campo medido al interior del recinto. Al respecto, el campo eléctrico de frecuencia industrial es fuertemente apantallado por cualquier estructura conductora aterrizada; a esta frecuencia se incluye dentro de este comportamiento árboles, murallas, paredes de casas o edificios, rejas, estructuras, etc. Por lo tanto, el campo eléctrico en el exterior de las subestaciones es muy inferior al valor encontrado en el interior de las mismas.

Gráfico N° 1

Campo Eléctrico Inducido por la Operación de Subestaciones al interior del recinto



2.1.2 Campo Magnético

El campo magnético existente en la vecindad de una subestación o línea de alta tensión es generado por la corriente que circula por los conductores. Este campo se manifiesta también por fuerzas sobre cuerpos magnéticos o sobre otros conductores por los que circula corriente. La “inducción Magnética” o “densidad de flujo Magnético” (**B**) tuvo originalmente como unidad de medida el Gauss. Cuando se normalizó el sistema de unidades MKSA, se introdujo el Tesla. La relación entre ambas unidades es:

3 Las subestaciones consideradas, corresponden proyectos con Resolución de Calificación Ambiental aprobada, actualmente operativos o aprobados para operación.

1 Tesla = 104 Gauss

Las unidades prácticas de medida actual son el micro Tesla ($1\mu T = 10^{-6}$ Tesla) o el mili Gauss (1 mGauss = 10^{-3} Gauss) y se relacionan por:

$$1\mu T = 10\text{ mG}$$

Las instalaciones de alta tensión son trifásicas, y en operación normal, debido a condiciones de equilibrio de fases, la suma de las tres corrientes tiende a ser nula en cualquier instante. Por lo tanto, existe un grado de compensación entre los campos magnéticos generados por los conductores de cada fase. La inducción provocada por el campo magnético recibe el nombre de "inducción electromagnética" y se manifiesta mediante la inducción de voltajes y corrientes en otros circuitos. El efecto más importante corresponde a la inducción de corriente, para lo cual el circuito expuesto tendría que ser cerrado. Recordando que el terreno se comporta como conductor, son potenciales circuitos expuestos todos aquellos conductores conectados eléctricamente a tierra en forma directa o a través de una impedancia, en dos o más puntos, tales como los circuitos telefónicos, rieles, cercos metálicos, etc.

No obstante, para que los efectos sean significativos, se requiere además que el circuito expuesto se mantenga paralelo a la fuente emisora por varios cientos de metros o aún kilómetros. Por lo tanto, este riesgo es mínimo en el caso de subestaciones y solo puede ser relevante en el caso de líneas.

En el caso del cuerpo humano, su comportamiento conductor a frecuencia industrial permite que el campo magnético induzca micro-corrientes que circulan en su interior. El estudio del efecto de estas micro-corrientes ha promovido una gran cantidad de investigaciones. En la actualidad uno de los aspectos en que los científicos están más de acuerdo, es que los campos electromagnéticos de 50 Hz no son capaces de alterar la estructura del material hereditario, tampoco aumentan los efectos que otros agentes puedan tener sobre el mismo ni interfieren con la reparación de los daños al material hereditario provocados por agentes físicos o químicos. Por ello, se puede concluir que estos campos no actúan como "iniciadores" del proceso cancerígeno, acción que por cierto tiempo fue motivo de sospecha. Están aun en evaluación, estudios recientes de una posible relación entre enfermedades cardiovasculares y exposición a campos de baja frecuencia. Según estudio referencial⁴, fundamentado a partir de gran cantidad de estudios biológicos y epidemiológicos internacionales, sostiene que *"la gran mayoría de estudios epidemiológicos sobre adultos que viven o trabajan cerca de instalaciones eléctricas no han encontrado que los campos electromagnéticos representen un peligro para su salud"*.

⁴ "Environmental Effects of Electric Fields near Power Transmission Networks" CIGRE Report of Working Group 36.01

El método de mayor recurrencia para la estimación de campo magnético corresponde al "Método Corregido de la Imagen a una Distancia Compleja". El método está basado en sustituir el suelo resistivo por una corriente imagen de dirección inversa a la corriente fuente, colocada a una distancia compleja. Las componentes de las densidades de campo magnético en Tesla, en el punto (x,y), se calculan por las siguientes ecuaciones:

$$B_x = - \sum_{i=1}^n \frac{\mu_0 I_i}{2\pi} \left(\frac{y - h_i}{R_i^2} - \beta * \frac{y - h_i + \alpha}{R_i'^2} \right)$$

$$B_y = \sum_{i=1}^n \frac{\mu_0 I_i}{2\pi} \left(\frac{x - d_i}{R_i^2} - \beta * \frac{x - d_i}{R_i'^2} \right)$$

Donde las componentes, R, R', β, α, δ, son obtenidas de la siguiente manera:

$$R_i = \left[(x_i - d_i)^2 + (y_i - h_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$R_i' = \left[(x_i - d_i)^2 + (y_i - h_i + \alpha)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$\alpha = \delta(1 - i)$$

$$\delta = \frac{2}{\sqrt{\mu_0 \sigma \omega}} \approx 503 \sqrt{\frac{\rho}{f}}$$

$$\beta = 1 + \left(\frac{1}{3} \right) * \left(\frac{\alpha}{R_i'} \right)^4$$

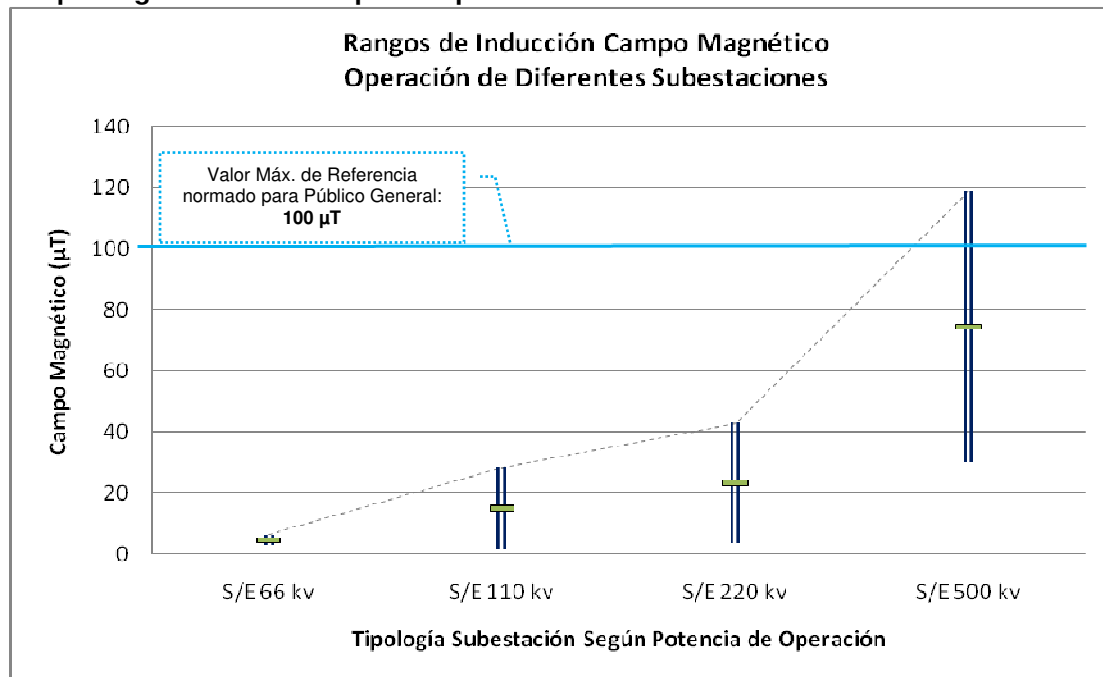
h_i es la altura del conductor al suelo, d_i distancia horizontal del conductor al eje de la línea, I_i es la corriente que circula por el conductor ([A], rms), μ_0 es la permeabilidad del vacío, ρ resistividad de la tierra [Ωm], $\omega=2\pi f$ siendo f la frecuencia Hz.

La gráfica siguiente presenta rangos estimados de inducción de campo magnético de diferentes subestaciones considerando voltajes nominales de operación de 66 kV, 110 kV, 220 kV y 500 kV⁵. Los valores expuestos tienen carácter conservador por cuanto son representativos de campo medido al interior del recinto. Al respecto, tal como se señaló previamente, el campo eléctrico de

⁵ Las subestaciones consideradas, corresponden proyectos con Resolución de Calificación Ambiental aprobada, actualmente operativos o aprobados para operación.

frecuencia industrial es fuertemente apantallado por cualquier estructura conductora aterrizada; a esta frecuencia se incluye dentro de este comportamiento árboles, murallas, paredes de casas o edificios, rejas, estructuras, etc. Por lo tanto, el campo eléctrico en el exterior de las subestaciones es muy inferior al valor encontrado en el interior de las mismas.

Gráfico N° 2
Campo Magnético Inducido por la Operación de Subestaciones al interior del recinto S/E



2.1.3 Interferencia de Radiofrecuencia

El concepto de “radio - interferencia” o “interferencia a frecuencias de radio” se empleó debido a que inicialmente la preocupación surgió por la perturbación a las frecuencias de radiocomunicaciones, pero actualmente el concepto se mantiene para otros rangos de frecuencia. Esta interferencia o perturbación puede afectar la calidad de recepción de una señal de audio, de radio-comunicación, de televisión, o de telecomunicaciones, pero no representa riesgo para el ser humano.

El distinto grado de calidad de recepción de una señal de radio y de una señal de TV, depende de la relación señal a ruido, esto es, según la diferencia en (dB /1 µV/m) en que el nivel de la señal se encuentra por sobre el nivel de ruido. Esta relación puede ser diferente dependiendo de la ubicación de la medida, la cercanía con las fuentes de señal, etc.

En todas las líneas y subestaciones eléctricas las inducciones de campos electromagnéticos tienen un amplio espectro de frecuencia que va desde los pocos Hz a los GHz. Esta interferencia es más evidente en la banda de radio AM (535-1.605 KHz) y de televisión (90 a 220 MHz).

El método de mayor recurrencia para el cálculo de la interferencia de radio corresponde al "Método de la FG Alemana". Este método está basado en una fórmula comparativa, que usa la Interferencia de Radio (RI) producida por un haz de conductores como referencia. La radio interferencia producida por cada fase, es:

$$RI = 53,7 \pm 5 + k(E - 16,95) + 40 \text{Log} \frac{d}{3,93} + 20K_d \text{Log} \frac{20}{D} + \Delta N + \Delta f + \Delta t$$

Donde los parámetros son los siguientes:

- K = 3 línea clase 750 [kV] y K = 3,5 para otras líneas con campo eléctrico entre 15 y 19 [kV/cm]
- E = campo eléctrico en el conductor en [kV/cm], valor rms
- d = diámetro del conductor en [cm]
- KD = 1,6±0,1 para f =0,5 a 1,0 [MHz]
- D = distancia de la fase al punto de cálculo
- ΔN = 10log(N / 4) para N>1
- ΔN = -4 [dB] para N=1
- N = número de conductores por fase
- Δt = 17±3 para condiciones de lluvia
- Δf = $20 \text{Log} \frac{1+0,5^2}{1+f^2}$, f. frecuencia en [MHz]

La interferencia de radio es obtenida, por la influencia de todas las interferencias individuales.

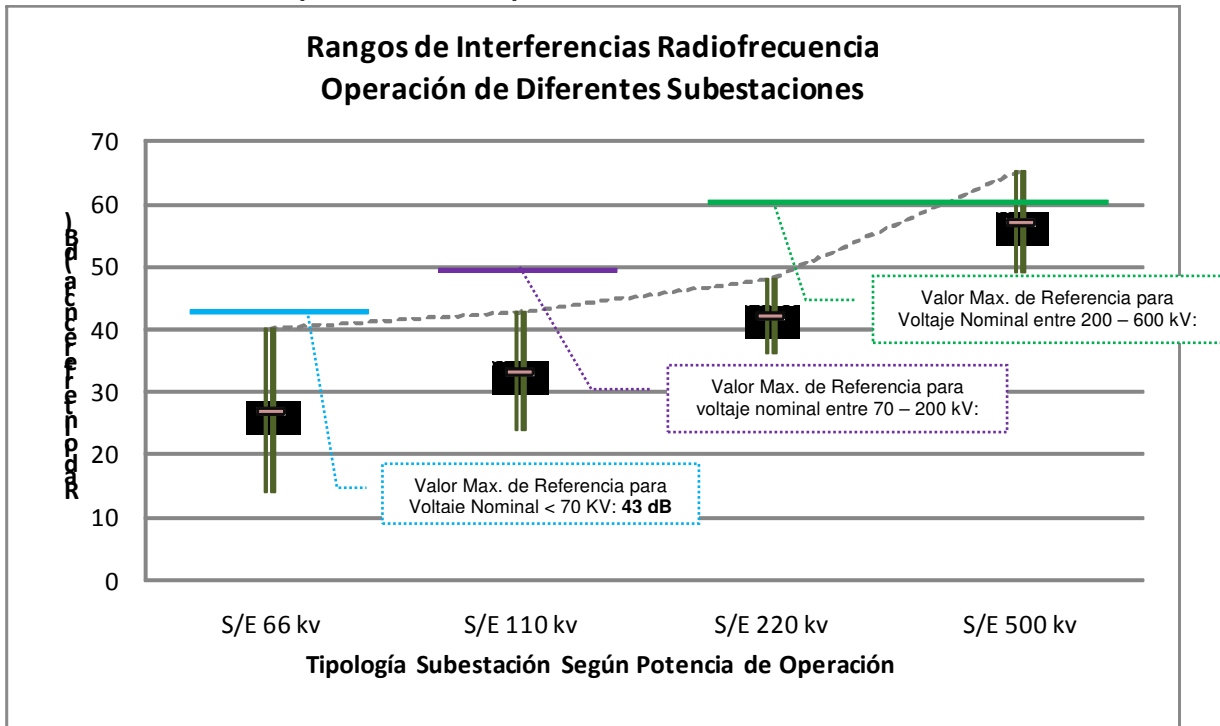
$$RI_{\text{linea}} = 10 \text{Log} \sum_{i=1}^n 10^{\frac{RI_i}{10}}$$

La gráfica siguiente presenta rangos estimados de ruido de radiointerferencia de diferentes subestaciones considerando voltajes nominales de operación de 66 kV, 110 kV, 220 kV y 500 kV⁶. Los valores expuestos tienen carácter conservador por cuanto son representativos de campo medido al interior del recinto. Al respecto, tal como se señaló previamente, el campo eléctrico de frecuencia industrial es fuertemente apantallado por cualquier estructura conductora aterrizada; a

⁶ Las subestaciones consideradas, corresponden proyectos con Resolución de Calificación Ambiental aprobada, actualmente operativos o aprobados para operación.

esta frecuencia se incluye dentro de este comportamiento árboles, murallas, paredes de casas o edificios, rejas, estructuras, etc. Por lo tanto, el campo eléctrico en el exterior de las subestaciones es muy inferior al valor encontrado en el interior de las mismas.

Gráfico N° 3
Radiointerferencia producto de la Operación de Subestaciones al interior del recinto



2.2 MARCO REGULATORIO

Como marco regulatorio referencial respecto de los límites de exposición de las personas a campos electromagnéticos inducidos por instalaciones de indistinto género, en Chile normalmente se utiliza lo dispuesto en las normas de la *International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection* (ICNIRP), cuya razón institucional corresponde a una comisión científica independiente creada por la Asociación Internacional de Protección contra la Radiación (IRPA) para fomentar la protección contra la radiación no ionizante (RNI) en beneficio de las personas y del medio ambiente. Proporciona orientación científica y recomendaciones sobre protección contra la exposición a RNI, elabora directrices y límites internacionales de exposición a RNI independientes y con fundamento científico y representa a los profesionales de la protección contra la radiación de todo el mundo mediante su estrecha relación con la IRPA.

La ICNIRP es la organización no gubernamental oficialmente reconocida por la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Organización Internacional del Trabajo (OIT) para asuntos relativos a RNI.

La **Tabla N° 1** muestra los valores máximos de exposición a campos eléctricos y campos magnéticos recomendados por la ICNIRP para público general y para exposición ocupacional.

Tabla N° 1
Valores de exposición a campos electromagnéticos recomendados por la ICNIRP

TIPOLOGÍA DE CAMPO	UNIDAD	VALOR MÁXIMO PARA	VALOR MÁXIMO EXPOSICIÓN
		PÚBLICO GENERAL	OCUPACIONAL
Campo Eléctrico	(kilovolts/metro: kV/m)	5	10
Campo Magnético	(Microtesla: μ T)	100	500

Para el caso de las interferencias de radiofrecuencia se utiliza como norma de referencia lo dispuesto en la regulación canadiense que regula las interferencias de radio producidas por las líneas de alta tensión y subestaciones. En la **Tabla N° 2** se indican los valores recomendados por esta norma.

Tabla N° 2
Valores Interferencias de Radio, recomendados por Asociación de Normas Canadienses y acogida como Regulación del Gobierno Federal⁷.

VOLTAJE NOMINAL FASE-FASE (Kv)	NIVEL DE INTERFERENCIA DE RADIO (DB SOBRE 1mV/M)
Menos de 70	43
70-200	49
200-300	53
400-600	60
Sobre 600	63

2.3 ESTIMACIÓN CAMPO ELÉCTRICO PARA LA OPERACIÓN DE LA S/E CALDERA

La **Tabla N° 3** presenta los valores máximos esperados de inducción de campo electromagnético y ruido de radiointerferencia al interior y en el límite de la S/E Caldera, en contraste con el marco

⁷ 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.

regulatorio internacional. De acuerdo con los valores presentados en dicha tabla y su comparación con los límites de referencia, se puede afirmar que la S/E Caldera de tensión 110 kV no representa un riesgo para las personas por efecto de campos electromagnéticos intensos a nivel del suelo. La reducción de los valores de campo eléctrico de frecuencia industrial entre el interior de la S/E y el límite de la misma se debe al efecto de apantallamiento de las estructuras conductoras aterrizadas (muro y cerco metálico).

Tabla N° 3
Valores máximos esperados de campo electromagnético y ruido de radiointerferencia
S/E Caldera

TIPOLOGÍA DE CAMPO	UNIDAD	NORMA PARA PÚBLICO GENERAL	VALOR MÁXIMO INTERIOR RECINTO	VALOR MÁXIMO LÍMITE RECINTO	SITUACIÓN
Campo Eléctrico	kilovolts/metro (kV/m)	5	3,6	1	Cumple
Campo Magnético	Microtesla (μT)	100	28,6	10	Cumple
Ruido de Radiofrecuencia	Decibel (dB)	49	43	30	Cumple

3. ANÁLISIS Y CONCLUSIONES

De los resultados expuestos en gráfica anterior, se puede sostener lo siguiente:

- La amplitud del rango de inducción de campo eléctrico estimado para la S/E Caldera 110 KV no supera el límite recomendado por la normativa internacional (igual a 5 kV/m) al interior del recinto. Cabe señalar que los máximos estimados de inducción electromagnética se presentan en la región interna del recinto de una subestación (escenario conservador). En efecto, el apantallamiento generado por los cierres perimetrales del recinto, permiten atenuar ostensiblemente los valores de campo respecto de los límites permisibles, incluso estimándose no superiores a 1 kV/m en el perímetro de la subestación. En definitiva, las magnitudes de campo eléctrico presentan valores poco significativos respecto del marco regulatorio de referencia (ICNIRP) para subestaciones con voltaje nominal de operación equivalente a 110 kV.
- La situación es homóloga para la amplitud del rango de inducción de campo magnético estimado para la S/E Caldera 110 KV, pues el rango no supera el límite recomendado por la normativa internacional igual a 100 μT, al interior del recinto. Cabe señalar que los máximos estimados de inducción electromagnética se presentan sólo para la región interna del recinto de una subestación (escenario conservador). En efecto, el apantallamiento

generado por los cierres perimetrales del recinto, permiten atenuar ostensiblemente los valores de campo respecto de los límites permisibles, incluso estimándose no superiores a 10 μ T en el perímetro de la subestación. En definitiva, las magnitudes de campo eléctrico presentan valores poco significativos respecto del marco regulatorio de referencia (ICNIRP) para subestaciones con voltaje nominal de operación equivalente a 110 kV.

- De acuerdo a la gráfica expuesta, la amplitud del rango ruido de radiofrecuencia estimado al interior del recinto de la S/E Caldera, no supera el límite recomendado por la normativa internacional (igual a 49 dB). Los valores de ruido de radiointerferencia presentan decaimiento sostenido conforme al aumento de la distancia del emisor, situación que permite sostener que a 10 m de la fuente emisora los valores de ruido de radiointerferencia no superan los 30 dB. Cabe señalar que las perturbaciones de ruido de radiointerferencia se asocia al efecto corona determinado por episodios de mal tiempo (lluvia), escenario divergente de la actual emplazamiento de la S/E Caldera donde los ciclos de lluvia son poco frecuentes a nulos en atención a las condiciones de aridez de la zona.