



**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**INTERACCIÓN DE CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS DE EXTRA BAJA FRECUENCIA
CON EL CUERPO HUMANO.
MEDICIONES DE CAMPO MAGNETICO EN INSTALACIONES DE MEDIA TENSIÓN**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
ELECTRICISTA**

GERMÁN ANDRÉS CONCHA VIELMA

**PROFESOR GUÍA:
NELSON MORALES OSORIO**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
OSCAR MOYA ARAVENA
MIGUEL SEGURA CARRASCO**

SANTIAGO, CHILE

2010



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO INGENIERÍA ELÉCTRICA

**INTERACCIÓN DE CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS DE EXTRA BAJA FRECUENCIA
CON EL CUERPO HUMANO.
MEDICIONES DE CAMPO MAGNETICO EN INSTALACIONES DE MEDIA TENSION**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
ELECTRICISTA

GERMÁN ANDRÉS CONCHA VIELMA

COMISIÓN EXAMINADORA

CALIFICACIONES

		NOTA (N°)	(LETRAS)	FIRMA
Profesor Guía:				
Sr. NELSON MORALES OSORIO	:
Profesor Co-Guía:				
Sr. OSCAR MOYA ARAVENA	:
Profesor Integrante:				
Sr. MIGUEL SEGURA CARRASCO	:

SANTIAGO, CHILE

2010

Agradecimientos

Quisiera en estas líneas dedicar este trabajo a las cuatro personas más importantes en mi vida: Mis Padres María Elisa y Germán, mi hermana Claudí, Trompita y mi amorcito Valentina.

A mis Padres por su infinito amor, comprensión y apoyo incondicional en cada momento, en cada decisión, quienes me inculcaron desde pequeño el deseo de aprender, de imaginar, de ser mejor ser humano. A ellos les debo en este momento estar culminando mis estudios.

A mi hermanita Trompita, por alegrarme la vida, por su sonrisa, por alentarme siempre, por su lealtad inquebrantable.

A mi amorcito Valentina, por ser mi complemento y compañera en la vida, por todos estos años de amor y compañía, por su constante apoyo a lo largo de mi carrera, sobre todo en este último tiempo de conclusión de este trabajo, te debo mucho Morcito.

No puedo dejar de mencionar a mis compañeros y amigos con los cuales compartimos largas horas de estudio y entretención a lo largo de estos años, Mike, Adrián, Lucho, Lorenzo, Chino, Conde, Milko, Javier, Medel, Man...a todos ellos éxito y los mejores deseos.

Por último un agradecimiento especial para los profesores miembros de la comisión, que me ayudaron siempre con la mejor disposición, y a las personas de Chillectra y Metro.

RESUMEN DE LA MEMORIA
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL ELECTRICISTA
POR: GERMÁN ANDRÉS CONCHA VIELMA
FECHA: ENERO DE 2010
PROF. GUÍA: SR. NELSON MORALES OSORIO

**INTERACCIÓN DE CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS DE EXTRA BAJA FRECUENCIA CON EL CUERPO HUMANO.
MEDICIONES DE CAMPO MAGNETICO EN INSTALACIONES DE MEDIA TENSION**

La interacción de campos magnéticos y eléctricos con los seres vivos, en especial con las personas, ha sido un campo de investigación y últimamente de preocupación en diversos sectores científicos y medio ambientales. Muchas de estas investigaciones se han centrado en campos electromagnéticos de extra baja frecuencia, 50-60 [Hz], debido a que existe una exposición permanente de la comunidad a campos electromagnéticos de las frecuencias señaladas. Entre todas las publicaciones disponibles sobre esta problemática, hay un consenso que existe una interacción entre los organismos biológicos y los campos electromagnéticos, pero no se ha podido demostrar que esta interacción sea perjudicial para las personas.

En este trabajo de memoria, que ha sido estructurado en 8 capítulos, se presenta primero una completa revisión de la teoría electromagnética que sientan las bases para comprender la interacción de los campos electromagnéticos con los seres vivos.

En el tercer capítulo, se presenta una revisión de las fuentes de campos electromagnéticos, junto con los valores de magnitud de campos eléctricos y magnéticos radiados por las diversas fuentes.

En el cuarto capítulo se exponen las bases teóricas de interacción de campos electromagnéticos con seres vivos, presentando modelos matemáticos computacionales que han sido desarrollados por diversos laboratorios, de manera de cuantificar los campos eléctricos y magnéticos inducidos al interior del cuerpo humano. Se resumen los principales asuntos de dosimetría a tener en consideración tanto para campos eléctricos como magnéticos inducidos en el cuerpo humano.

En el capítulo 5 se realiza una completa revisión de la normativa internacional vigente sobre los valores máximos de exposición a los campos electromagnéticos, tanto para la población que trabaja en ambientes eléctricos como para la población en general. Es sabido que los campos eléctricos son fácilmente mitigados por todas las construcciones civiles donde se desenvuelven las personas, lo cual no se verifica para el caso de campos magnéticos; en el capítulo 6 se presenta una revisión de las técnicas de apantallamiento de estos campos electromagnéticos, aplicadas principalmente a sistemas de transmisión y distribución.

Debido a la creciente demanda de energía eléctrica necesaria para el desarrollo del país, se incorporará próximamente la transmisión de electricidad usando tecnología de alto voltaje en corriente continua HVDC. La problemática medio ambiental asociada a esta tecnología se presenta en el capítulo 7.

Por último, en el capítulo 8 se incluye una serie de medidas de campos magnéticos realizadas en instalaciones de media tensión y altas corrientes, lugares en los que se supone una magnitud de campo magnético alto y se contrastan estas medidas con los valores recomendados en la normativa.

De esta manera, en el presente trabajo de título se presenta una revisión completa de los asuntos involucrados en la interacción de campos electromagnéticos con el cuerpo humano, desde una revisión teórica y las ecuaciones que rigen estos fenómenos físicos hasta mediciones experimentales de campos magnéticos producidos por fuentes de altas corrientes, pasando por el estudio de las principales fuentes y magnitudes de campos radiados por estas, las normativas internacionales vigentes que determinan valores máximos de exposición dependiendo de las características de los diversos campos y de las características de la población expuesta, se revisan las técnicas de apantallamiento o mitigación de campos electromagnéticos y se revisan los principales asuntos medio ambientales involucrados en las nuevas tecnologías de transmisión de electricidad, representado por los enlaces HVDC.

TABLA DE CONTENIDOS

Contenido

Capítulo 1	9
Motivación	9
Alcance	10
Objetivos	10
Objetivos Generales	10
Objetivos Específicos.....	11
Capítulo 2	12
Revisión Teórica de Campos Electromagnéticos.....	12
Electroestática.....	12
Magnetoestática.	16
Ecuación de continuidad de la carga eléctrica.....	19
Corriente De Desplazamiento De Maxwell	19
Ley De Inducción De Faraday	20
Ecuaciones Microscópicas De Maxwell.....	21
Clasificación de campos electromagnéticos	21
Capítulo 3	23
Fuentes de campos electromagnéticos.	23
Campos Eléctricos.	23
Campos Magnéticos.....	25
Magnitudes de Campos Eléctricos y Magnéticos.....	27
Cables subterráneos.....	28
Distribución espacial	29
Equipos Electrodomésticos	30
Subestaciones de Distribución y Transformadores.....	31
Capítulo 4	33
Interacción de campos eléctricos y magnéticos de baja frecuencia con el cuerpo humano.....	33
Campos eléctricos y magnéticos en el cuerpo.....	35
Modelos de cuerpos de humanos y animales.....	36
Dosimetría de Campo Eléctrico.....	37
Métodos computacionales.....	38

Dosimetría de Campo Magnético.	39
Métodos de cálculos de campos magnéticos.	40
Capítulo 5	43
Recomendaciones para mitigar los posibles efectos de campos electromagnéticos.....	43
Normatividad Y Mitigación.....	43
Recomendaciones para minimizar los campos magnéticos producidos por las líneas de potencia. .	43
Recomendaciones para minimizar niveles de campo magnético en sistemas de distribución	44
Normas de exposición a campos electromagnéticas de extra baja frecuencia.....	45
Recomendaciones dadas por IEEE.	46
Límites de exposición.	47
Valores De Exposición Máximo Permitidos Para La Densidad De Flujo Magnético.....	48
Exposición de la cabeza y torso para campos sinusoidales.	48
Exposiciones de brazos o piernas.....	49
Valor peak del campo en el interior de tejidos.	49
Máximos valores de exposición permitidos: campos eléctricos ambientales.	50
Exposición constante del cuerpo completo a campos eléctricos sinusoidales.....	50
Límites permitidos para corrientes de contacto y corrientes inducidas.....	51
Recomendaciones Para Limitar La Exposición a los CEM.....	52
Justificación general de los factores de seguridad.....	52
Valores de umbral recomendados hoy	52
Normas de exposición a campos eléctricos y magnéticos	53
Recomendación publicada por el diario oficial de la comunidad europea.....	55
Capítulo 6	57
Técnicas de Apantallamiento y Blindaje para Campos Electromagnéticos de baja frecuencia.....	57
Técnicas aplicables a sistemas de transmisión.	58
Líneas de Transmisión	58
Capítulo 7	65
Problemas medioambientales producidos por enlaces de alto voltaje en corriente continua HVDC.....	65
Efecto Corona.....	66
Ruido audible	67
Impacto visual	67
Corrientes por tierra y efectos de corrosión.....	68

Efectos de campo eléctrico	70
Efectos de Campos Magnéticos	72
Fuentes de campos magnéticos y niveles.	73
Mecanismos de Interacción	74
Consideraciones para exposición en la población.	75
Derivación de los límites de exposición de campos magnéticos estáticos.	75
Límites de exposición propuestos por ICNIRP.....	76
Capítulo 8	77
Mediciones de Campos Magnéticos en instalaciones de media tensión.....	77
Descripción del equipo de medida.....	77
Características del Emdex II	79
Especificaciones Del Hardware del Emdex II.....	79
Software Utilizado Por Emdex II.....	81
EMCALC2000	82
REQUISITOS PARA LA INSTALACIÓN DEL SOFTWARE EMCALC2000	84
Mediciones realizadas en S/E Lord Cochrane, Chilectra.	84
Medida 1: Sala de alimentadores.....	86
Medida 2: Equipos aislados en SF6.	90
Medida 3: Cables de poder 110 kV	92
Medida 4: Alimentadores 12 kV.....	94
Medida 5: Perímetro S/E Lord Cochrane	96
Mediciones realizadas en S/E Metro, Metro SA.	99
Medida 1: Sala de alimentadores.....	99
Medida 2: Sala de interruptores.	101
Medida 3: Sala de onduladores.....	102
Medida 4: Sala de reuniones.....	104
Medida 5: Transformadores de poder.	105
Medida 6: Vereda oriente Edificio Metro.	106
Medida 7: Galería de Cables 20 kV.....	107
Medida 8: Sala de cables de poder 110 kV	109
Medida 9: Andén del Metro.....	110
Conclusiones.....	111
Bibliografía	113

ANEXO I 116

Base Biológica Para Limitar La Exposición (Hasta 100 Khz.).....116

 Los efectos a largo término: la epidemiología.116

 Estudios epidemiológicos en empleados de compañías eléctricas.....117

 Resultados en la reproducción.....117

 Estudios residenciales del cáncer.....118

 Estudios Ocupacionales.....121

 Estudios en voluntarios.122

 Efectos indirectos de los campos magnéticos y eléctricos.124

 Campos electromagnéticos y cáncer.125

 Baja frecuencia.126

 Resumen de los efectos biológicos y de los estudios epidemiológicos para campos de hasta 100 [kHz].126

 Resumen de los efectos supuestos o conocidos de los campos eléctricos y magnéticos.128

 Efectos Biológicos de los Campos de Extra baja frecuencia.....129

 Evidencias de interacción y mecanismos.130

Capítulo 1

Motivación

La comunidad en general se encuentra cada vez más expuesta a campos electromagnéticos, debido al uso generalizado y extendido de la electricidad. Es por esta razón, que hace décadas existe una preocupación por parte de la comunidad científica y medio ambiental, acerca del posible efecto perjudicial que los campos electromagnéticos de frecuencia extremadamente baja, 50-60 [Hz], producen sobre la salud. Esto último es aún una pregunta abierta, puesto que no se ha podido demostrar a cabalidad un efecto perjudicial, aunque sí ha sido reconocido y demostrado que existe una interacción de este tipo de campos con los seres humanos.

Por lo tanto una de las motivaciones de este trabajo es realizar una investigación del estado de conocimiento actual existente sobre esta problemática, de manera de establecer las bases teóricas para entender el problema desde el punto de vista físico y biológico, estudiar la normativa internacional vigente sobre el tema, conocer e identificar las diversas fuentes de campos electromagnéticos y la intensidad de campos radiados por éstos.

Últimamente, debido a la creciente demanda energética del país, varias compañías del sector eléctrico estudian la construcción de grandes centrales en la zona sur del país, por lo cual, para la evacuación de esas grandes cantidades de energía, ha sido necesario innovar en el aspecto de transmisión de electricidad, surgiendo la alternativa de transmisión en alto voltaje en corriente continua, o HVDC, la cual es una alternativa altamente factible y que, dadas las grandes longitudes de las líneas proyectadas y de los bloques de transmisión planificados, se presenta como la única alternativa técnico-económicamente competitiva.

Por esto último, otro tema abordado en el presente trabajo, consiste en una revisión del impacto medio ambiental que involucran estas instalaciones, revisándose también la normativa de radiación electromagnética que aplica sobre estas instalaciones.

Es sabido que el campo eléctrico proveniente de instalaciones principalmente de transmisión y distribución, es rápidamente mitigado por instalaciones donde se desenvuelven las personas, como casas, edificios, etc. Incluso el cuerpo humano actúa como un medio mitigador de campos eléctricos, encontrándose que los campos eléctricos inducidos en el interior de las personas, son varios órdenes de magnitud inferior a los campos exteriores que inducen estos campos. Esto no sucede en el caso de los campos magnéticos, debido a que la permeabilidad de los materiales comunes es prácticamente igual a la permeabilidad del vacío. Es por esto que muchas de las investigaciones últimas, se han enfocado en el estudio de la interacción de estos campos magnéticos con los tejidos biológicos. Por esto último, otra

motivación importante, es conocer los valores de campo magnético presente en instalaciones de media tensión y altas corrientes. Para este fin, el departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Chile, cuenta con un instrumento digital, capaz de medir el campo magnético simultáneamente en los tres ejes. Este instrumento será usado para efectuar las medidas de campos magnéticos en instalaciones de media tensión y altas corrientes.

Alcance

Los alcances de este trabajo, se centran en la investigación de la interacción de seres humanos con campos electromagnéticos de frecuencia extremadamente baja o industrial, vale decir, 50-60 [Hz], centrado básicamente en los sistemas de transmisión y distribución de energía eléctrica. Se realiza una revisión de la normativa internacional, relativa a campos electromagnéticos de extra baja frecuencia, se presentan los aspectos medio ambientales de sistemas de transmisión HVDC, así como la normativa vigente y aplicable a estas instalaciones. Por último, el Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Chile, dispone de un muy buen aparato de medición de campos magnéticos en sus tres componentes y campo eléctrico en una componente. Este equipo será usado para la medición de campos magnéticos en instalaciones de media tensión y altas corrientes, siguiendo y completando la trayectoria de medidas en instalaciones de media y alta tensión existente en el DIE.

Objetivos

Objetivos Generales

Los objetivos generales del presente trabajo de memoria, consisten en la investigación y documentación de los temas relacionados con la interacción de campos electromagnéticos de frecuencias extremadamente bajas con los seres humanos, explorando las bases teóricas de campos electromagnéticos, métodos de modelamiento de seres vivos, fuentes de campos electromagnéticas e intensidades radiadas, técnicas de apantallamiento de campos electromagnéticos y medidas de mitigación, mediciones experimentales de campos magnéticos en instalaciones de altas corrientes, media tensión.

Objetivos Específicos.

- Describir teoría de electromagnetismo aplicable a la problemática.
- Identificar las fuentes de campos electromagnéticos.
- Describir los procesos de interacción seres vivos/campos electromagnéticos.
- Presentar normas internacionales que fijen valores de exposición. (IEEE, ICNIRP, OJEC).
- Identificar el impacto medioambiental de instalaciones HVDC relativo a la interacción de campos estáticos con seres vivos y normativa vigente.
- Realizar medidas de intensidad de campos magnéticos en instalaciones de media tensión y altas corrientes.

Capítulo 2

Revisión Teórica de Campos Electromagnéticos.

Electroestática.

La teoría que describe el fenómeno físico relacionado con la interacción entre cargas eléctricas estacionarias o distribuciones de carga en un espacio finito, recibe el nombre de *Electroestática*. Por un largo tiempo, la Electroestática, bajo el nombre de “*Electricidad*” fue considerada una teoría física independiente, junto con otras teorías físicas como el Magnetismo, Mecánica, Óptica y Termodinámica.

Ley de Coulomb

En la electroestática clásica, ha sido experimentalmente encontrado que la interacción entre cargas eléctricas estacionarias, puede ser descrita en términos de una fuerza mecánica. Considerando el caso descrito en la figura 1, denotamos por \mathbf{F} la fuerza actuando sobre la partícula de carga eléctrica q , cuya posición está dada por el vector \mathbf{x} , debido a la presencia de otra partícula de carga eléctrica q' , cuya posición está dada por el vector \mathbf{x}' . De acuerdo a la ley de Coulomb, esta fuerza F en el vacío, está determinada por la expresión:

$$F(x) = \frac{qq'}{4\pi\epsilon_0 |\mathbf{x} - \mathbf{x}'|^3} = -\frac{qq'}{4\pi\epsilon_0} \nabla \left(\frac{1}{|\mathbf{x} - \mathbf{x}'|} \right) \quad (1.1)$$

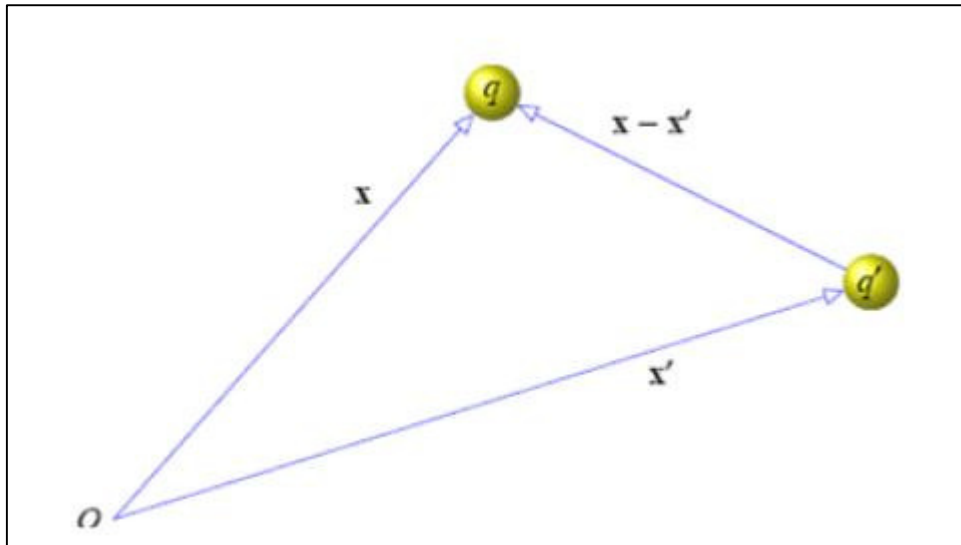


Figura 1: La ley de Coulomb describe como una carga eléctrica q , localizada en x , experimenta una fuerza electrostática de otra partícula de carga q' , localizada en x' .

De acuerdo a las unidades del S.I., está fuerza es medida en Newton [N], las cargas eléctricas q y q' en Coulomb [C], y el vector $|x - x'|$ en metros [m]. La constante $\epsilon_0 = \frac{10^7}{4\pi c^2} \approx 8.8542e^{-12} \left[\frac{F}{m}\right]$ (Farad por metros), corresponde a la *permitividad del vacío* y $c \approx 2.9979e^8$ es la velocidad de la luz en el vacío.

Campo Eléctrico

En vez de describir la interacción electrostática como una “fuerza de acción a distancia”, resulta en la mayoría de los casos más útil introducir el concepto de *campo* para describir la interacción electrostática en términos de un Campo Eléctrico estático vectorial \mathbf{E} , definido mediante el siguiente proceso de límite:

$$E = \lim_{q \rightarrow 0} \frac{F}{q} \quad (1.2)$$

Donde F corresponde a la fuerza electrostática definida en (1.1) originada en la distribución de cargas q' sobre la carga q . Debido a que el propósito de la definición como un proceso de límite es para asegurar que la carga de prueba q no distorsiona el campo producido por la distribución de carga q' , la expresión para E no depende explícitamente de q , sino sólo de las cargas q' y el vector relativo $|x - x'|$. Esto significa que podemos decir que cualquier carga eléctrica produce un campo eléctrico en el espacio que la rodea, independientemente de la existencia de una segunda carga en cualquier parte del espacio.

El campo electroestático E en el punto x (punto de observación), debido a la carga q' en el punto de fuente x' está dado por la siguiente expresión:

$$E(x) = \frac{q'}{4\pi\epsilon_0} \frac{x - x'}{|x - x'|^3} = -\frac{q'}{4\pi\epsilon_0} \nabla \left(\frac{1}{|x - x'|} \right) \quad (1.3)$$

En la presencia de muchos campos producidos por cargas eléctricas discretas q_i' , localizadas en los puntos x_i' , $i = 1, 2, 3 \dots$, respectivamente, la suposición de la linealidad del vacío, nos permite superponer sus contribuciones individuales en un campo eléctrico total dado por la siguiente expresión:

$$E(x) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum q_i' \frac{x - x'}{|x - x'|^3} \quad (1.4)$$

Si las cargas eléctricas discretas son pequeñas y suficientemente numerosas, se introduce el concepto de *densidad de carga eléctrica* ρ , medido en $[C/m^3]$, localizada en x' dentro de un volumen V' , se reemplaza la sumatoria de la expresión 1.4 por una integración sobre el volumen V' .

Esto nos permite describir el campo total como:

$$\begin{aligned} E(x) &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{V'} d^3x' \rho(x') \frac{x - x'}{|x - x'|^3} = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{V'} d^3x' \rho(x') \nabla \left(\frac{1}{|x - x'|} \right) \\ &= -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \nabla \int_{V'} d^3x' \left(\frac{\rho(x')}{|x - x'|} \right) \quad (1.5) \end{aligned}$$

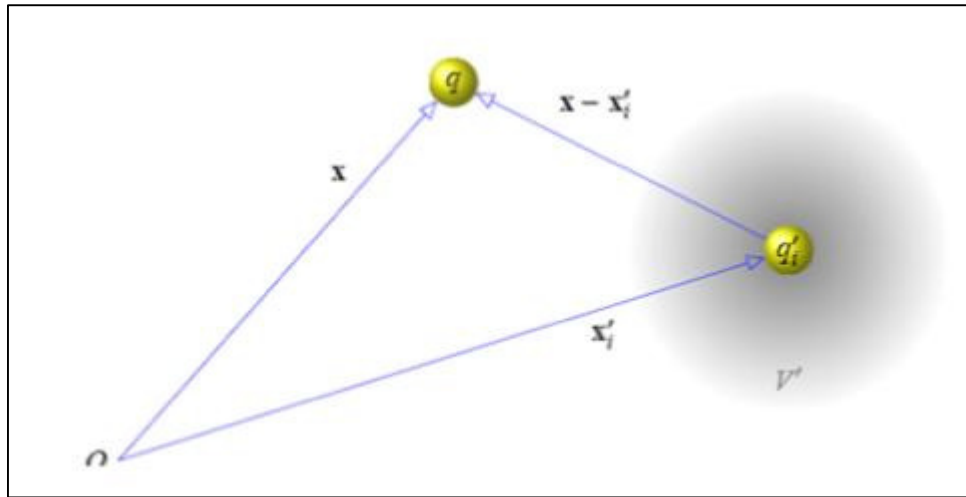


Figura 2: Ley de Coulomb para una distribución de cargas individuales q_i' localizadas dentro de un volumen V_i' .

Bajo la suposición de superposición lineal, la ecuación presentada en 1.5 es válida para una distribución de cargas eléctricas, incluyendo cargas discretas, en cuyo caso ρ es expresado en términos de la distribución Delta de Dirac:

$$\rho(x') = \sum_i q_i' \delta(x' - x_i') \quad (1.6)$$

Como se ilustra en la figura 2. Insertando esta expresión en 1.5, recuperamos la expresión dada en 1.4.

Tomando la divergencia de la expresión general para E dada en 1.5, para una distribución arbitraria de cargas, y usando la representación de la distribución Delta de Dirac, se encuentra que:

$$\nabla \cdot E(x) = \nabla \cdot \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{V'} d^3x' \rho(x') \frac{x - x'}{|x - x'|^3}$$

$$\nabla \cdot E(x) = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{V'} d^3x' \rho(x') \nabla \cdot \nabla \left(\frac{1}{|x - x'|} \right) = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{V'} d^3x' \rho(x') \nabla^2 \left(\frac{1}{|x - x'|} \right)$$

$$\nabla \cdot E(x) = -\frac{1}{\epsilon_0} \int_{V'} d^3x' \rho(x') \delta(x - x') = \frac{\rho(x)}{\epsilon_0} \quad (1.7)$$

La última expresión corresponde a la forma diferencial de la ley de Gauss de electrostática.

Recordando la siguiente identidad del cálculo vectorial $\nabla \times [\nabla\alpha(x)] = 0$ para cualquier campo escalar $\alpha(x) \in \mathbb{R}^3$, inmediatamente se encuentra que en electrostática se cumple la siguiente relación:

$$\nabla \times E(x) = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \nabla \times \left(\nabla \int_{V'} d^3x' \left(\frac{\rho(x')}{|x-x'|} \right) \right) = 0 \quad (1.8)$$

La expresión 1.8 significa que el campo eléctrico E es irrotacional.

En resumen, electrostática puede ser descrita en términos de dos ecuaciones diferenciales vectoriales:

$$\nabla \cdot E(x) = \frac{\rho(x)}{\epsilon_0}$$

$$\nabla \times E(x) = 0$$

Las cuales representan cuatro ecuaciones diferenciales escalares.

Magnetoestática.

Mientras que la electrostática se preocupa de cargas eléctricas estáticas, la Magnetoestática describe las corrientes eléctricas estacionarias, es decir, cargas eléctricas moviendo a velocidad constante, y la interacción entre corrientes eléctricas.

Ley de Ampere

Los experimentos relacionados con la interacción entre dos loops pequeños de corrientes eléctricas ha mostrado que ellos interactúan mediante una fuerza mecánica, más o menos en la misma forma que las cargas eléctricas interactúan. En la figura 3, denotemos como \mathbf{F} la fuerza actuando sobre un loop pequeño \mathbf{C} , con elemento tangencial de línea $d\mathbf{l}$ transportando una corriente eléctrica I a través de su elemento tangencial $d\mathbf{l}$ localizado en \mathbf{x} , debido a la presencia de un pequeño loop \mathbf{C}' , el cual transporta un corriente eléctrica I' en la dirección de su elemento de línea $d\mathbf{l}'$ localizado en \mathbf{x}' .

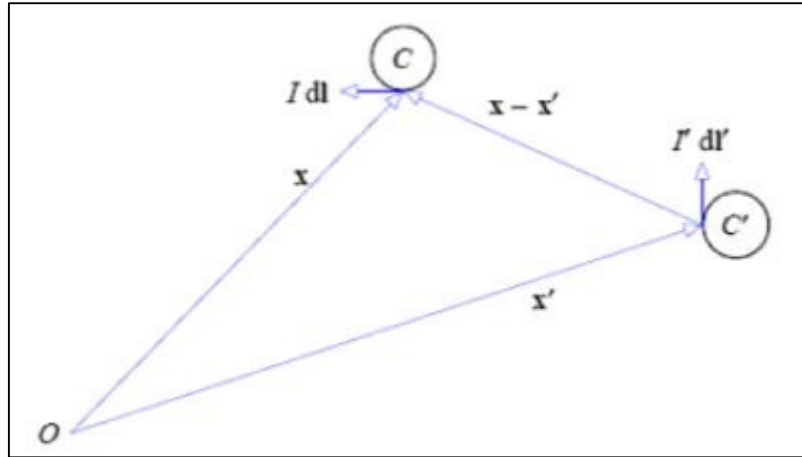


Figura 3: La ley de Ampere describe cómo un loop pequeño C , transportando una corriente eléctrica I a través de su elemento de línea tangencial dl localizado en x , experimenta una fuerza Magnetoestática desde un pequeño loop C' , el cual transporta un corriente eléctrica I' localizado en x' .

De acuerdo a la ley de Ampere, esta fuerza \mathbf{F} , en el vacío, está dada por la siguiente expresión:

$$F(x) = \frac{\mu_0 I I'}{4\pi} \oint_C dl \times \oint_{C'} dl' \times \frac{x - x'}{|x - x'|^3} = -\frac{\mu_0 I I'}{4\pi} \oint_C dl \times \oint_{C'} dl' \times \nabla \left(\frac{1}{|x - x'|} \right)$$

En las unidades del Sistema Internacional, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \approx 1.2566 \times 10^{-6} \frac{H}{m}$ es la *permeabilidad del vacío*.

Usando las identidades del cálculo vectorial, la expresión anterior se puede escribir de la siguiente manera, de manera que denote una simetría entre la fuerza que C' aplica sobre C y viceversa:

$$F(x) = -\frac{\mu_0 I I'}{4\pi} \oint_C \oint_{C'} \frac{x - x'}{|x - x'|^3} dl dl'$$

Campo Magnético

En analogía con el caso electroestático, podemos atribuir la interacción magnetostática a un campo magnético estático vectorial \mathbf{B} . El elemento infinitesimal se define de la siguiente manera:

$$dB = \frac{\mu_0 I'}{4\pi} dl' \times \frac{x - x'}{|x - x'|^3}$$

La cual expresa un elemento pequeño $d\mathbf{B}$ del campo magnético estático en el punto x por un pequeño elemento de línea $d\mathbf{l}'$ de una corriente estacionaria I' ubicada en x' . Las unidades en el sistema

internacional para el campo magnético, a veces llamado *densidad de flujo magnético* o *inducción magnética* es el Tesla (\mathbf{T}).

Si generalizamos la expresión anterior a una integral estacionaria, debido a una densidad de corriente eléctrica $\mathbf{j}(\mathbf{x})$, medida en A/m^2 en unidades del sistema internacional, obtenemos la ley de Biot-Savart:

$$B(\mathbf{x}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \nabla \times \int_{V'} d^3x' \frac{\mathbf{j}(\mathbf{x}')}{|\mathbf{x} - \mathbf{x}'|}$$

De manera de determinar cuáles son las propiedades del vector \mathbf{B} , podemos aplicar a la relación anterior la divergencia y el rotor, de manera que, aplicando las propiedades del cálculo vectorial, podemos escribir:

$$\nabla \cdot B(\mathbf{x}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \nabla \cdot \left(\nabla \times \int_{V'} d^3x' \frac{\mathbf{j}(\mathbf{x}')}{|\mathbf{x} - \mathbf{x}'|} \right) = 0$$

$$\nabla \times B(\mathbf{x}) = \mu_0 \mathbf{j}(\mathbf{x})$$

De esta manera, las leyes de la electrostática y magnetostática, pueden ser resumidas en dos pares de ecuaciones en derivadas parciales, independientes del tiempo, llamadas las ecuaciones clásicas de la electrostática:

- $\nabla \cdot E(\mathbf{x}) = \frac{\rho(\mathbf{x})}{\epsilon_0}$ (1)

- $\nabla \times E(\mathbf{x}) = 0$ (2)

Y para Magnetostática tenemos:

- $\nabla \cdot B(\mathbf{x}) = 0$ (3)

- $\nabla \times B(\mathbf{x}) = \mu_0 \mathbf{j}(\mathbf{x})$ (4)

Cuando en estas ecuaciones se incluye la dependencia del tiempo, ambas teorías se unifican en una única teoría, *Electrodinámica Clásica*. Esta unificación de las teorías de la electricidad y magnetismo, es motivada por dos hechos establecidos empíricamente:

- La carga eléctrica es una cantidad conservativa y la corriente eléctrica es un transporte de cargas eléctricas. Este hecho se manifiesta en la ecuación de continuidad, y como consecuencia, en la corriente de desplazamiento de Maxwell.
- Un cambio en el flujo magnético a través de un loop inducirá un campo eléctrico en el loop. Esto corresponde a la ley de inducción de Faraday.

Ecuación de continuidad de la carga eléctrica.

Podemos denotar $j(t,x)$ la densidad de corriente dependiente del tiempo. La conservación eléctrica de la carga puede ser formulada en la siguiente ecuación de continuidad:

$$\frac{\partial \rho(t, x)}{\partial t} + \nabla \cdot j(t, x) = 0$$

Esta ecuación de continuidad viene derivada de dos de las ecuaciones de Maxwell. Establece que la divergencia de la densidad de corriente es igual al negativo de la derivada de la densidad de carga respecto del tiempo. En otras palabras, sólo podrá haber un flujo de corriente si la cantidad de carga varía con el paso del tiempo, ya que está disminuyendo o aumentando en proporción a la carga que es usada para alimentar dicha corriente.

Corriente De Desplazamiento De Maxwell

Una corriente de desplazamiento es una cantidad que está relacionada con un campo eléctrico que cambia o varía en el tiempo. Esto puede ocurrir en el vacío o en un dieléctrico donde existe el campo eléctrico. No es una corriente física, en un sentido estricto, que ocurre cuando una carga se encuentra en movimiento o cuando la carga se transporta de un sitio a otro. Sin embargo, tiene las unidades de corriente eléctrica y tiene asociado un campo magnético. La corriente de desplazamiento de Maxwell está incorporada en la ley de Ampere, cuya forma original funcionaba sólo en superficies que estaban bien definidas (continuas y existentes) en términos de corriente. Una superficie $S1$ elegida tal que incluya únicamente una placa de un condensador debería tener la misma corriente que la de una superficie $S2$ elegida tal que incluya ambas placas del condensador. Sin embargo, como la carga termina en la primera placa, la Ley de Ampere concluye que no existe carga encerrada en $S1$. Para compensar esta diferencia, Maxwell razonó que esta carga se encontraba en el flujo eléctrico, la carga en el campo eléctrico, y mientras que la corriente de desplazamiento no es una corriente de carga eléctrica, produce el mismo resultado que aquella generando un campo magnético.

Pese a que hay gente que afirma que la corriente de desplazamiento no existe realmente, se puede pensar en ella como la respuesta de un material dieléctrico a un campo eléctrico variante. La corriente de desplazamiento es la única corriente que atraviesa un dieléctrico perfecto.

La corriente de desplazamiento de Maxwell, conforma la ecuación de fuente de un campo magnético, la cual se expresa de la siguiente manera:

$$\nabla \times B(t, x) = \mu_0 j(t, x) + \frac{1}{c^2} \frac{\partial}{\partial t} E(t, x)$$

Donde el último término de lado derecho de la ecuación anterior representa la corriente de desplazamiento de Maxwell. La existencia de este término tiene consecuencias físicas importantes, como predecir la existencia de radiación electromagnética que puede transportar energía y momentum a largas distancias, incluso en el vacío.

Ley De Inducción De Faraday

La Ley de inducción electromagnética de Faraday (o simplemente Ley de Faraday) se basa en los experimentos que Michael Faraday realizó en 1831 y establece que el voltaje inducido en un circuito cerrado es directamente proporcional a la rapidez con que cambia en el tiempo el flujo magnético que atraviesa una superficie cualquiera con el circuito como borde:

$$\oint_C E \cdot dl = - \frac{d}{dt} \iint_S B \cdot dA$$

La permutación de la integral de superficie y la derivada temporal se puede hacer siempre y cuando la superficie de integración no cambie con el tiempo.

Por medio del teorema de Stokes puede obtenerse una forma diferencial de esta ley:

$$\nabla \times E = - \frac{\partial B}{\partial t}$$

Ésta es una de las ecuaciones de Maxwell, las cuales conforman las ecuaciones fundamentales del electromagnetismo. La ley de Faraday, junto con las otras leyes del electromagnetismo, fue incorporada en las ecuaciones de Maxwell, unificando así al electromagnetismo.

Ecuaciones Microscópicas De Maxwell

El siguiente set de ecuaciones, son la base del electromagnetismo clásico, las cuales son válidas para variaciones arbitrarias de los campos eléctricos y magnéticos acoplados ($E(t,x)$ y $B(t,x)$). Las ecuaciones son las siguientes:

- $\nabla \cdot E = \frac{\rho}{\epsilon_0}$
- $\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}$
- $\nabla \cdot B = 0$
- $\nabla \times B = \epsilon_0\mu_0 \frac{\partial E}{\partial t} + \mu_0 j(t, x)$

En estas ecuaciones, $\rho(t, x)$ representa la carga eléctrica total, dependiente del espacio y el tiempo, y $j(t, x)$ las corrientes eléctricas dependientes del espacio y el tiempo

Clasificación de campos electromagnéticos

Los campos electromagnéticos se clasifican de acuerdo a su frecuencia en:

- CEM de baja frecuencia y extra baja frecuencia (3-300 Hz.). Sus fuentes principales son líneas de transmisión y distribución de energía eléctrica, redes de telefonía y por la mayoría de los electrodomésticos.
- CEM de frecuencia intermedia (300 Hz. y 10 MHz.). Sus fuentes son las pantallas de computadores, dispositivos antirrobo y de seguridad, antenas de radio AM.
- CEM de alta frecuencia (10 MHz. y 300 GHz.). Sus fuentes principales son sistemas de radiodifusión, televisores, hornos microondas, teléfonos celulares, antenas de radares, en orden creciente de frecuencia.

Para comprender la ubicación de estas ondas, se suele recurrir al espectro electromagnético:

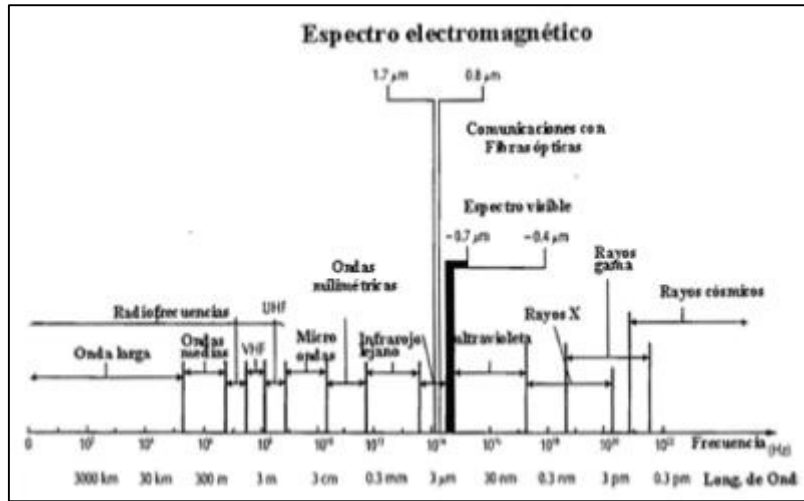


Figura. 4: Espectro Electromagnético.

También, de acuerdo a la longitud de onda, la radiación electromagnética se puede clasificar en radiación ionizante, y en radiación no ionizante.

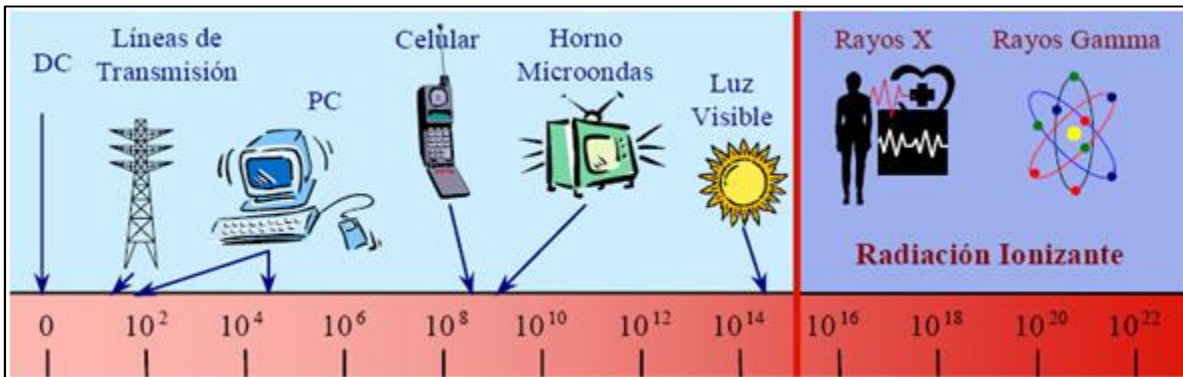


Figura 5: Espectro electromagnético según longitud de onda clasificado en radiación ionizante y no ionizante.

Capítulo 3

Fuentes de campos electromagnéticos.

Campos Eléctricos.

Fuentes Artificiales.

Las principales fuentes de campos electromagnéticos de extra baja frecuencia, provienen invariablemente el resultado de la actividad humana, al particular la operación de sistemas eléctricos de potencia o la operación de las principales aplicaciones dentro del hogar.

Líneas Eléctricas de Alta tensión

El campo eléctrico en un punto cerca de una línea de alta tensión, depende principalmente del voltaje de la línea, la distancia del punto a la línea y que tan juntos se encuentran los conductores que conforman la línea. El radio de los conductores, es también un factor relevante. Los campos eléctricos producidos por sistemas simétricos tienen una menor intensidad y decrecen más rápidamente con la distancia que para los producidos por otro tipo de sistemas. Adicionalmente, los campos eléctricos son los menores cuando las tres fases del sistema de poder se encuentran balanceado y crecen con el desbalance. La intensidad de los campos eléctricos más intensos a nivel del suelo producidos por líneas de alta tensión, se encuentran típicamente alrededor de los $10 \left[\frac{kV}{m} \right]$.

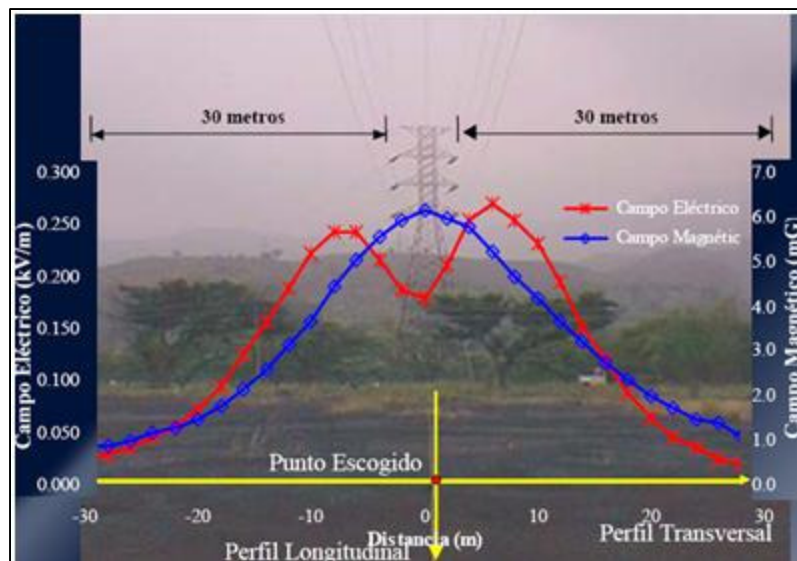


Figura 6: Distribución típica de campo eléctrico y magnético en una línea de transmisión.

Cables en el hogar y electrodomésticos.

El campo eléctrico producido por cualquier fuente al exterior del hogar, será atenuado considerablemente por la estructura de la casa. Todos los materiales comunes de construcción son suficientemente conductores como para atenuar los campos eléctricos. El cociente entre los campos fuera del hogar y los campos en el hogar varía típicamente en el rango de 10 a 100. Dentro del hogar, sin embargo, hay fuentes de campos eléctricos, así como hay fuentes de campos magnéticos. Dentro de las principales fuentes de campos eléctricos dentro de un hogar podemos encontrar el alambrado eléctrico que conforma su sistema eléctrico, cuyos campos se ven atenuados dependiendo del material que conforme la aislación de estos cables eléctricos.

La otra fuente importante de campos eléctricos dentro de un hogar, corresponde a los dispositivos eléctricos con los cuales vivimos todo el tiempo. Sin embargo, en la mayoría de los casos, estos campos son débiles, y tienen su mayor expresión a pocos centímetros de la fuente,

Cables subterráneos y Subestaciones eléctricas

Cuando un cable de poder es dispuesto bajo tierra, éste produce un campo magnético sobre la superficie. Sin embargo, el mismo cable no produce campos eléctricos sobre la superficie, principalmente por el efecto de apantallamiento de la tierra. Subestaciones eléctricas, raras veces producen también campos eléctricos fuera de perímetro. Las subestaciones eléctricas de Alto Voltaje, no se encuentran rigurosamente encapsuladas, pero están usualmente rodeadas de una franja de seguridad, fuera de la cual, la intensidad de campos eléctricos se encuentran por debajo de los valores de seguridad recomendados por las normas internacionales.

Campos Magnéticos

Líneas de Transmisión.

Los campos magnéticos producidos por líneas de alta tensión, dependen de múltiples factores entre los cuales podemos encontrar:

- El número de conductores de la línea (3 para una línea de simple circuito, 6 para una línea de doble circuito y así sucesivamente).
- El arreglo geométrico en el cual estos conductores están dispuestos:
 - *La separación de los conductores:* La cual es determinada por la necesidad de evitar descargas entre los conductores, incluyendo un margen de oscilación de los conductores por efecto del viento. La separación aumenta con el aumento del nivel de voltaje de la línea en cuestión.
 - *Disposición relativa de fases:* Si en una línea de transmisión de doble circuito, en un circuito las fases están dispuestas en el orden a-b-c de arriba hacia abajo, y en el circuito paralelo las fases están dispuestas de manera equivalente, los dos circuitos producen campos magnéticos que están alineados y se refuerzan entre ellos. En cambio si el circuito paralelo está arreglado en el orden inverso, esto es, c-b-a, los campos magnéticos producidos estarán en direcciones opuestas y se cancelaran parcialmente entre ellos. El campo magnético resultante decae con el cubo de la distancia, en vez de con el cuadrado de la distancia. Esto es conocido como fases rotadas o transposición. Otros tipos de arreglos producen generalmente mayores campos magnéticos a nivel del suelo.
- La corriente eléctrica transportada por la línea, incluyendo:
 - Corriente de carga.
 - Corrientes desbalanceadas.
- Cualquier corriente transportada por el cable de tierra o por la tierra misma.
- La altura de los conductores con respecto al suelo. La distancia mínima de los cables con respecto al suelo están determinados por el voltaje y por la necesidad de prevenir descargas eléctricas de los conductores al suelo.

Las líneas de alta tensión usualmente transportan corrientes eléctricas altas y tienen una distancia considerable entre conductores. Por consiguiente, las líneas de alta tensión generan usualmente campos magnéticos intensos, los cuales no dependen del nivel de voltaje de la línea.

Las corrientes en las líneas de alta tensión varían en el transcurso del día, con las estaciones y año a año según la variación de la demanda eléctrica. Estas variaciones afectan la intensidad de los campos magnéticos producidos, por un lado, debido a que la intensidad de corriente es directamente proporcional con la intensidad del campo magnético producido, y debido a que a mayor corriente transportada, mayor es la temperatura del conductor, lo que provoca su dilatación y por consiguiente la disminución de la distancia de éste al suelo. Las líneas de alta tensión, se operan usualmente por debajo de su capacidad de transferencia, y por lo tanto, la intensidad de los campos producidos por éstas, están por debajo del valor máximo teórico que la línea es capaz de producir.

Armónicos y Transientes.

La naturaleza de los sistemas de poder y el uso de la electricidad, provoca que algunos armónicos sean más prevaletentes que otros. En particular, el tercer armónico es el más fuerte. En muchas situaciones, los armónicos son muy pequeños, de magnitud de un pequeño porcentaje de la componente fundamental. Sin embargo, particularidades de algunos tipos de construcciones que usan ciertos tipos de aparatos, principalmente usos industriales de la energía, el contenido de armónico de puede incrementar y la componente de tercera armónica puede hacerse comparable con la magnitud fundamental. La presencia de armónicos tiende a ser pequeña en los sistemas de transmisión, mayor en los sistemas de distribución y aún mayor en los circuitos finales de distribución y hogares.

Fenómenos transientes también ocurren en los sistemas de poder. Fenómenos transientes en el voltaje (y por lo tanto en las magnitudes de los campos eléctricos), se producen por las siguientes causas:

- ***Caída de rayos en Líneas Eléctricas:*** Un aumento de la tensión de produce cuando un rayo cae directamente sobre un conductor de una línea de alta tensión. Sin embargo esta sobretensión se disipa rápidamente, por el efecto de dispositivos instalados para este propósito como son los pararrayos.
- ***Eventos de Conmutación:*** Cuando un evento de conmutación ocurre en un circuito, se produce una sobretensión que es disipada en un tiempo que depende de las características eléctricas del sistema.

Fenómenos transientes en las magnitudes de las corrientes (y por consiguiente de los valores de los campos magnéticos), resultan de las siguientes causas:

- ***Cortocircuitos:*** Durante la duración del cortocircuito (hasta que se produce el aclaramiento del cortocircuito, o más usualmente, hasta que el cortocircuito es aclarado por la operación de un

fusible o un interruptor de poder), nos niveles de corriente que fluyen por el sistema son muy elevados, lo que produce la aparición de campos magnéticos de altas magnitudes, pero de muy corta duración.

- **Eventos de conmutación:** Se pueden producir corrientes transientes de muy elevada magnitud cuando se energizan por ejemplos transformadores de poder, cuyas corrientes de *inrush* pueden tener una magnitud de varias veces la corriente nominal del sistema, lo que produce, al igual que en caso anterior, campos magnéticos de elevada intensidad pero corta duración.

Magnitudes de Campos Eléctricos y Magnéticos

Las líneas de transmisión pueden producir campos magnéticos del orden de μT (o décimas de mG) en periodos de demanda máxima. Sin embargo, estos valores decrecen rápidamente con la distancia, llegando a unas pocas centésimas de T a algunos metros de distancia de la línea de transmisión. La densidad de flujo magnético crece además con niveles de voltaje menores del sistema de transmisión, principalmente debido a que los niveles de corrientes aumentan progresivamente en los sistemas de subtransmisión y distribución. De la literatura disponible y mediciones realizadas, los valores promedios de campos magnéticos de 43 tipos de líneas diferentes conformantes de la red de transmisión y distribución del Reino Unido, se exponen en la siguiente tabla:

Distancia [m]	Campo promedio [μT]
0	4
50	0.52
100	0.136
200	0.034
300	0.015

Tabla 1: Campos promedios a diferentes distancias a líneas de transmisión.

Niveles típicos de campos magnéticos en μT para líneas de transmisión.						
Tipo de línea.	Medida	Niveles máximos	Distancia desde las líneas			
			15 m	30 m	60 m	90 m
115 kV	Promedio	3	0.7	0.2	0.04	0.02
	Peak	6.3	1.4	0.4	0.09	0.04
230 kV	Promedio	5.8	2	0.7	0.18	0.08
	Peak	11.8	4	1.5	0.36	0.16
500 kV	Promedio	8.7	2.9	1.3	0.32	0.14
	Peak	18.3	6.2	2.7	0.67	0.3

Tabla 2: Niveles típicos de campos magnéticos para líneas de transmisión [1].

Cables subterráneos.

Cuando una línea de alto voltaje es dispuesta de manera subterránea, los conductores individuales se encuentran aislados y pueden ser puestos más juntos que cuando se trata de una línea aérea. Esto tiende a disminuir los campos magnéticos producidos. Sin embargo, los cables pueden estar a tan sólo un metro bajo tierra, en vez de diez metros sobre ella cuando se trata de líneas aéreas. Esto trae como resultado que el campo magnético producido por el cable subterráneo, puede ser a los lados del cable, significativamente menor que en su equivalente aéreo, pero en la línea del cable mismo, los campos producidos a nivel de la superficie, pueden ser mayores que los producidos por una línea aérea en los puntos sobre la superficie bajo los conductores. Ejemplo de valores típicos de campos eléctricos y magnéticos producidos por un cable subterráneo se resumen en la siguiente tabla [1].

Ejemplos de campos para cables subterráneos a 1 m sobre nivel del suelo.							
Voltaje	Especificaciones cable.	Ubicación	Carga	Campo magnético en μT medido a las siguientes distancias del eje del cable.			
				0 m	5 m	10 m	20 m
275 kV	Directo	0.5 m espacio	Máxima	96.17	13.05	3.58	0.92
	Enterrado	0.9 m profundidad	Típica	24.06	3.26	0.9	0.23
132 kV	Núcleos Separados	0.3 m espacio	Típica	9.62	1.31	0.36	0.09
	Cable Único	1 m profundidad	Típica	5.01	1.78	0.94	0.47
33 kV	Cable Único	0.5 m profundidad	Típica	1	0.29	0.15	0.07
11 kV	Cable Único	0.5 m profundidad	Típica	0.75	0.22	0.11	0.06
400 V	Cable Único	0.5 m profundidad	Típica	0.5	0.14	0.07	0.04

Tabla 3: Ejemplos de campos para cables subterráneos a 1 m sobre nivel del suelo [1].

Dependiendo del voltaje de la línea, los conductores pueden estar contenidos dentro de una misma aislación, de manera de formar un solo cable, en cuyo caso los conductores típicamente se disponen de manera helicoidal, lo cual disminuye la intensidad de los campos generados.

Distribución espacial

Las magnitudes de los campos electromagnéticos de cualquier fuente, disminuyen a medida que se aumenta la distancia respecto a la fuente. Dependiendo de la configuración de la fuente, la magnitud de los campos electromagnéticos son proporcionales con $1/r$, $1/r^2$ o $1/r^3$, siendo r la distancia con respecto a la fuente. Cabe mencionar que estas formas de decrecimiento en la mayoría de los casos son buenas aproximaciones, ya que en la práctica, la magnitud de los campos rara vez sigue una fórmula exacta. Dentro de nuestros hogares, los campos electromagnéticos del ambiente, varían relativamente poco, debido a que éstos provienen generalmente del exterior, y sus magnitudes no tienen una gran variación den un volumen acotado. Sin embargo, superpuestos a estos campos provenientes del ambiente exterior, puede haber sectores del hogar donde se presenten campos de mayor intensidad, producidos por los electrodomésticos presentes en el hogar o por el cableado del sistema eléctrico del hogar. Estos campos varían generalmente proporcionales a $1/r^3$

Equipos Electrodomésticos

La fuente más común de campos magnéticos dentro del hogar corresponde a toda clase de equipos y electrodomésticos que están en un hogar. Cada uno de estos dispositivos produce un campo magnético cuando se encuentra funcionando, debido a las corrientes eléctricas que por ellos circulan. En un hogar típico, los campos magnéticos consisten en campos magnéticos casi constante provenientes del exterior, con peaks de intensidades alrededor de cada dispositivo. La exposición a campos provenientes de estos dispositivos, puede considerarse separada de la exposición de campos debido a líneas de poder. Las líneas de poder producen campos de una relativa baja intensidad y de gradientes más pequeños, los cuales están siempre presentes en el hogar, en cambio, los campos producidos por electrodomésticos son invariablemente más intensos, con pasos de gradiente espacial mayor, y en la mayoría de los casos, son solo experimentados esporádicamente.

Los dispositivos que producen los mayores campos magnéticos, son aquellos que contienen motores eléctricos, transformadores o inductores, ya que todos ellos dependen justamente de campos magnéticos para su funcionamiento. Los campos magnéticos alrededor de aquellas aplicaciones dependen fuertemente del diseño involucrado. Si el diseño prioriza el bajo costo, tamaño pequeño o bajo peso, el resultado es que generalmente se tienen campos magnéticos mayores. De esta manera, los campos magnéticos más intensos son producidos por pequeños transformadores y por motores baratos, pequeños y compactos.

Ejemplos de campos magnéticos usualmente encontrados a cortas distancias de varias aplicaciones, se presentan en la siguiente tabla [1].

Lugar casa	Fuente	Densidad de flujo Magnético [μT]	
		Intensidad promedio	Desviación Estándar
Baño	Secador de pelo	0.12	0.1
	Afeitadoras eléctricas	0.84	0.25
	Duchas eléctricas	0.44	0.75
Cocina	Batidoras	0.97	1.05
	Abridores de lata	1.33	1.33
	Cafeteras	0.06	0.07
	Lavavajilla	0.8	0.46

	Procesador de comida	0.23	0.23
	Horno microonda	1.66	0.63
	Mezcladores	0.69	0.69
	Hornos Eléctricos	0.39	0.23
	Refrigeradores	0.05	0.03
	Congeladores	0.04	0.02
	Tostadoras	0.09	0.08
	Cuchillos eléctricos	0.12	0.05
	Licadoras	0.29	0.11
	Extractor de aire	0.5	0.93
Lavandería	Secadores de ropa	0.34	0.42
	Lavadoras	0.96	0.56
	Planchas	0.03	0.02
	Calentadores portátiles	0.22	0.18
	Aspiradoras	0.78	0.74
Living-room	Televisores	0.26	0.11
	Peceras	0.32	0.09
	Equipos de música	0.08	0.14
	Relojes alarma	0.05	0.05

Tabla 4: Intensidades de campos magnéticos en electrodomésticos [1].

Subestaciones de Distribución y Transformadores

Líneas aéreas y cables subterráneos, independientemente de su voltaje, usualmente terminan en subestaciones. Todas las subestaciones usualmente contienen equipos de alta tensión para realizar funciones similares, esto es, transformación de niveles de voltaje, conexiones con inyecciones y retiros. Los tamaños de las subestaciones varían desde contener simplemente un transformador de poder a subestaciones que abarcan cientos de metros cuadrados, con complejas configuraciones. Lo que tienen en común los distintos tipos de subestaciones, es que siempre se encuentran cerradas al acceso del público general y generalmente se encuentran en regiones estratégicas, alejadas de zonas pobladas, por lo que la exposición del público general a campos electromagnéticos generados por subestaciones, es limitado.

A pesar que las subestaciones varían en su complejidad y tamaño, el principio físico que determina el campo magnético que ellas producen, es el mismo. Primero, en todas las subestaciones, hay un número de componentes que producen un campo magnético despreciable fuera de los límites físicos de la

subestación. Esto incluye los transformadores de poder, virtualmente todos los desconectadores e interruptores de poder, y también por supuesto, todos los equipos involucrados en el control y protección de la subestación. Segundo, en muchos casos, los campos electromagnéticos de mayor magnitud presentes en regiones accesibles a la comunidad en general, son producidos por líneas aéreas y cables subterráneos de poder, que entran y salen de las subestaciones. Tercero, todas las subestaciones contienen un sistema de conductores, usualmente conocidos como “barras” de las subestaciones, las cuales conectan varios componentes de las subestaciones entre sí. Las barras de las subestaciones son usualmente la principal fuente de campos magnéticos dentro de la subestación, que produce campos medibles fuera de las subestaciones. La magnitud de las corrientes y la separación de las barras son mayores en subestaciones que involucran voltajes altos (subestaciones de transmisión) que en subestaciones que involucran bajos voltajes (subestaciones de distribución). Sin embargo, los límites perimetrales de las subestaciones tienden a estar lejos de la posición física de las barras de la subestación. En ambos casos, los campos magnéticos producidos en las diferentes subestaciones, decaen rápidamente con la distancia a la subestación.

Valores típicos para subestaciones de transmisión, para subestaciones de 245 kV a 400 kV tienen un valor típico de $10\mu\text{T}$, mientras que para subestaciones de distribución, con valor de voltaje de 11 kV, tienen un valor de $1.6\mu\text{T}$.



Figura 7: Vista Satelital Instalaciones S/E Alto Jahuel, Transelec Chile.

Capítulo 4

Interacción de campos eléctricos y magnéticos de baja frecuencia con el cuerpo humano.

Los campos electromagnéticos tienen una gran influencia en el comportamiento de todos los sistemas vivientes. Además, los campos electromagnéticos son extremadamente usuales en nuestro diario vivir. El incremento en el número de sistemas de potencia y redes de telecomunicaciones, incrementan nuestra exposición a estos campos cada vez más. Por otro lado, surge que los campos electromagnéticos son usados para el diagnóstico médico o para el tratamiento de algunas enfermedades específicas. Cuando se analiza la interacción entre campos electromagnéticos y el cuerpo humano, dos categorías principales pueden ser identificadas:

1. Los campos electromagnéticos pueden ser considerados como peligrosos para la salud. Usando los resultados de estudios epidemiológicos y aplicando el principio de ALARA (del inglés “As low as reasonably achievable” o tan bajo como razonablemente alcanzable), algunos gobiernos han impuesto algunas limitaciones a los campos radiados por sistemas de potencia. Los biólogos y físicos han realizado un gran número de pruebas clínicas por varios años. Ellos han propuesto un conjunto de máximos valores a los campos radiados, de acuerdo con la frecuencia de éstos. Desafortunadamente, estos son sólo valores externos, que no toman en cuenta la manera en que los campos se desarrollan en el cuerpo, y tampoco tienen en consideración el ambiente en que las personas están. Por eso se hace necesario incrementar el conocimiento de las distribuciones de los campos en el interior del cuerpo humano, en orden de dar límites más detallados o más estrictos. La única manera de obtener estos resultados, es mediante el cómputo de los campos electromagnéticos en el interior del cuerpo. El cuerpo humano está formado por muchos materiales no usuales para que modelos clásicos, como los usados en máquinas eléctricas, puedan ser usados para lograr estos cálculos, por lo que el desarrollo de modelos específicos son requeridos para cumplir esta tarea. Estos modelos son generalmente complejos, dados las características eléctricas y magnéticas de los diferentes órganos, así como las complejas geometrías involucradas.
2. Los campos electromagnéticos pueden tener propiedades muy positivas para el tratamiento de algunas enfermedades y para el diagnóstico de algunos problemas de salud. Algunos ejemplos de esto son los siguientes:
 - a. La exploración médica (MRI) usa campos magnéticos. Para obtener un óptimo diseño de estos complejos equipos, es necesario tener un buen entendimiento de la distribución de los campos en

el interior del cuerpo y particularmente en el área donde los campos interactúan con células bajo exploración.

- b. El tratamiento de algunos tumores cancerosos mediante técnicas de calor intenso es bien conocido desde algunos años. La manera de incrementar la temperatura del tumor puede ser mediante técnicas de microondas. El calor debe ser concentrado sólo en el tumor canceroso de manera de mantener las células vecinas saludables. El cálculo de los campos electromagnéticos en el cuerpo puede ayudar otra vez de manera de optimizar el diseño de estas técnicas médicas.

La exposición humana a campos electromagnéticos de extra baja frecuencia (50-60 Hz), ha sido largamente investigada por más de una década. La exposición a campos electromagnéticos está mayormente asociada con la transmisión y distribución de la energía eléctrica y con el uso de varios dispositivos eléctricos y electrónicos en el trabajo y hogar. El riesgo de los shocks y quemaduras resultantes del contacto con conductores eléctricos energizados y con objetos metálicos de grandes dimensiones no puestos a tierra, sometidos a campos eléctricos intensos, se conocen desde tempranamente, en los comienzos del uso de la electricidad. También, se ha reconocido y explotado en medicina que campos eléctricos fuertes causan estimulaciones en los tejidos nerviosos y musculares, tales como fibrilación cardíaca. Sin embargo, en las últimas décadas, la preocupación se ha trasladado a los posibles efectos nocivos que campos electromagnéticos débiles de baja frecuencia pueden producir sobre la salud de las personas.

Como resultado de esto, una serie de estudios epidemiológicos han sido publicados sobre el tema, mostrando muchos de ellos resultados inconsistentes o contradictorios entre ellos. Muchos gobiernos e industrias eléctricas alrededor del mundo, han invertido recursos para investigación académica e investigación de laboratorios. Las investigaciones se han enfocado principalmente en evaluación de exposición humana, cálculos de campos inducidos en el cuerpo, epidemiología, estudios en animales, estudios en células, mecanismos de interacción y evaluación de riesgos.

Durante las últimas cinco décadas, unos pocos laboratorios de investigación han realizado intensiva investigación en el cálculo de campos eléctricos y densidades de corriente inducidas en modelos heterogéneos del cuerpo humano, al estar presentes campos electromagnéticos uniformes y no uniformes, de frecuencias de 50 Hz y 60 Hz. Existe una convergencia en los resultados obtenidos por varios grupos de investigación y una concordancia en las medidas donde ellas están disponibles. El resultado de estos cálculos, más allá del futuro desarrollo de modelos de tejidos más detallados y sofisticados, son importantes por varias razones. Los campos inducidos y su distribución dentro de los tejidos, están relacionados con mecanismo de interacciones bien conocidos para campos fuertes

(estimulación del tejido excitable, fosfenos visuales). Tejidos diferentes, células y sus componentes, tienen permisividades complejas que varían en un gran espectro (constantes dieléctricas y conductividades). Estas propiedades son indicativas de su interacción con los campos eléctricos. Por el contrario, la permeabilidad magnética de los tejidos, con muy pocas excepciones, es la misma que la del aire, por lo cual los campos magnéticos de baja frecuencia en los tejidos, son los mismos que en el entorno local externo. Un número significativo de estudios biológicos, indican la presencia de corrientes inducidas en los tejidos en la presencia de campos eléctricos. Interacciones a nivel subcelular, debido a la actuación de fuerzas sobre componentes con carga eléctrica de la membrana celular, diferencias de potencial en zonas intercelulares, y efectos de interacción no lineal con tejidos complejos, requieren conocimiento de los campos eléctricos inducidos localmente y las densidades de corriente inducidas. Estos parámetros son necesarios para establecer mecanismos de interacción plausibles que sean razonablemente completos y consistentes con el conocimiento biológico y sus efectos. La evaluación de los campos inducidos en los órganos y tejidos a una escala milimétrica es sólo el primer paso. De un punto de vista más pragmático, si las normas de exposición son desarrolladas y hechas obligatorias en la industria eléctrica, la dosimetría humana en términos de la densidad de corriente inducida y evaluación de campos eléctricos inducidos harán críticos en el establecimiento de límites de exposición seguros y racionales.

Campos eléctricos y magnéticos en el cuerpo.

En lo que sigue se presentarán las técnicas actuales para la cuantificación experimental de los campos eléctricos y magnéticos y sus cantidades asociadas como densidades de corriente dentro del cuerpo humano.

Para frecuencias industriales de 50/60 [Hz], los métodos desarrollados generalmente cuantifican las intensidades de campos eléctricos y magnéticos de manera separada, debido a que se pueden asumir condiciones cuasi-estáticas. De esta manera, en una exposición simultánea a campos eléctricos y magnéticos, la medida de campo dentro del cuerpo humano se puede obtener por superposición.

La exposición a campos eléctricos o magnéticos, resulta en la inducción de un campo eléctrico y una densidad de corriente en los tejidos conductivos. Las magnitudes y configuraciones espaciales de estos campos y de las corrientes inducidas, depende fuertemente de las características del campo al que se es expuesto, vale decir, su frecuencia, magnitud, orientación, y depende también del tamaño, forma y propiedades eléctricas del cuerpo expuesto.

La primera medida dosimétrica corresponde al campo eléctrico inducido. Una vez cuantificado este valor, la densidad de corriente J puede ser obtenida mediante la ley de Ohm:

$$J = \sigma E$$

donde σ corresponde a la conductividad del tejido, y es comúnmente un tensor en un tejido anisotrópico, como por ejemplo un músculo.

Los primeros intentos de modelos de cuerpo humano, se llevaban a cabo modelando el cuerpo humano como elipsoides homogéneas, o formas muy simplificadas. Durante los últimos años, unos pocos laboratorios de investigación han desarrollado métodos computacionales para realizar cálculos de campos eléctricos inducidos y densidades de corrientes en modelos del cuerpo humano heterogéneos expuestos a campos eléctricos o magnéticos de 50/60 [Hz] uniformes o no uniformes, llegándose a un consenso en los métodos y resultados de los diferentes grupos de investigadores [1, 10]

Modelos de cuerpos de humanos y animales.

Últimamente, varios laboratorios han desarrollado modelos heterogéneos del cuerpo humano con una anatomía realista y una identificación de un gran número de tejidos. Muchos de estos modelos han sido desarrollados por segmentación computacional usando información proveniente por ejemplo de imágenes de resonancia magnética. Para el desarrollo de estos modelos, se ha tenido un cuidado especial de hacer estos modelos anatómicamente realistas. La tabla 6 resume características esenciales de los modelos desarrollados. Típicamente, sobre 30 órganos y tejidos han sido identificados y representados por celdas cúbicas, de aristas de entre 1 y 10 [mm]. A estos cubitos, se les ha asignado una conductividad basado en mediciones que se han realizado para varios órganos y tejidos. También se han utilizado modelos de cuerpos humanos basados en cuerpos geométricos de revolución. En todos estos modelos se han representado los órganos más importantes como cerebro, corazón, pulmones, riñones, hígado, etc.

La siguiente figura muestra un modelo desarrollado, en el cual se ha representado la piel, esqueleto y los órganos principales [1].

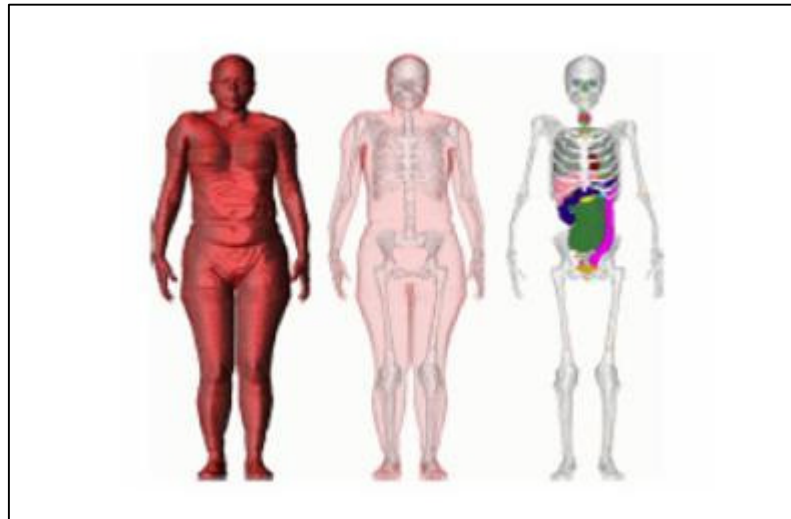


Figura 8: Modelo moderno de cuerpo humano donde se representa la piel, esqueleto y órganos principales.

Principales características de modelos derivados de MRI			
Modelo	NRPB	Universidad de Utah	Universidad de Victoria
Altura y masa	1.76 [m], 73 [kg]	1.76m, 71 kg	1.77 [m], 76 [kg]
Vóxel Originales	2.077 x 2.077 x 2.021 [mm]	2 x 2 x 3 [mm]	3.6 x 3.6 x 3.6 [mm]
Postura	De pie, con manos a los lados	De pie, con manos a los lados	De pie, con manos a los lados

Tabla 5: Principales características de los modelos derivados de datos de imágenes de resonancia magnética (MRI) desarrollados por diferentes laboratorios [10].

Dosimetría de Campo Eléctrico.

Como se mencionó anteriormente, el cuerpo humano perturba significativamente los campos eléctricos de baja frecuencia. En la mayoría de los casos prácticos de exposición de humanos, el campo es vertical respecto del suelo. A bajas frecuencias, el cuerpo humano es un buen conductor, de manera que el campo eléctrico es prácticamente normal en la superficie del cuerpo. El campo eléctrico en el interior del cuerpo es muchos órdenes de magnitud más pequeño que el campo externo. Debido a la exposición a un

campo eléctrico, se inducen cargas no uniformes en la superficie del cuerpo, las cuales se orientan principalmente de manera vertical.

De acuerdo a los modelos desarrollados últimamente, se pueden tener cómputos y distribuciones de campos eléctricos y cargas como se muestran en la siguiente figura.

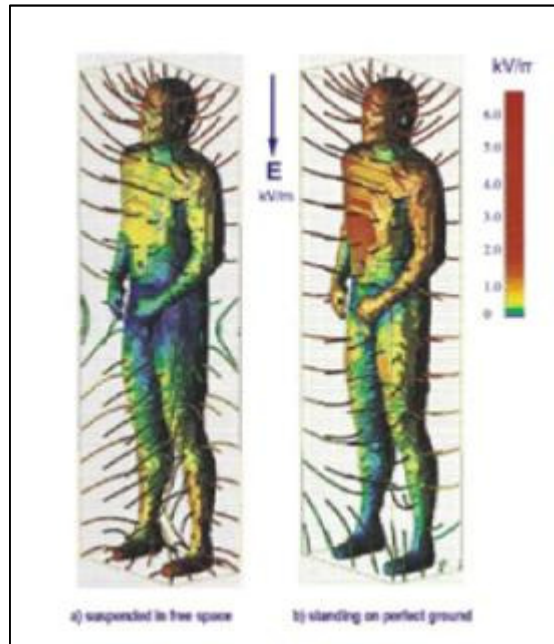


Figura 9: Cuerpo humano en un campo eléctrico uniforme de 1 kV/m a 60 Hz mostrando el campo eléctrico externo y la densidad de carga superficial en la superficie del cuerpo [10].

El campo eléctrico en el cuerpo depende también fuertemente del contacto existente entre el cuerpo y la tierra eléctrica. Los campos más altos se encuentran cuando el cuerpo está en perfecto contacto con la tierra a través de ambos pies. Mientras más lejos se encuentre el cuerpo de la tierra, los campos en los tejidos son menores. Para el mismo campo, el cociente máximo del campo eléctrico interno en tejidos para un cuerpo el contacto con la tierra y otro cuerpo no en contacto es de alrededor de dos.

Métodos computacionales.

Varios métodos computacionales han sido desarrollados y usados para evaluar los campos eléctricos inducidos en modelos de alta resolución. Los cómputos para exposición a campos eléctricos son generalmente más complicados que para evaluar la exposición a campos magnéticos, debido a la propiedad del cuerpo humano de perturbar el campo eléctrico al que se es expuesto. Los métodos numéricos se ven limitados por las propiedades eléctricas altamente heterogéneas del cuerpo humano y

las forma complejas de los órganos. Los métodos que han sido usados exitosamente hasta ahora por dosimetría de alta resolución son las diferencias finitas (FD), métodos en el dominio de la frecuencia y en el dominio del tiempo (FDTD) y los métodos de elementos finitos (FEM). Cada método y su implementación ofrece algunas ventajas y también tienen sus limitaciones.

En la resolución de los modelos, también tiene su influencia cuan precisa es la evaluación de las cantidades inducidas para los diferentes órganos. Por supuesto los órganos pequeños en cualquier dimensión están pobremente representados por celdas grandes. Las cantidades máximas inducidas son consistentemente mayores a medida que las dimensiones de las celdas con las cuales se representan los órganos decrecen. Las diferencias son típicamente del orden de un 30 – 50 % para celdas de 3.6 [mm] comparadas con celdas de 7.2 [mm].

Los principales asuntos de dosimetría para exposición de campos eléctricos de extra baja frecuencia se pueden resumir como sigue:

- Las magnitudes de los campos eléctricos inducidos son típicamente entre 10^{-4} a 10^{-7} veces la magnitud del campos eléctrico externo.
- Debido a que la exposición es predominantemente a campos verticales, la dirección predominante de los campos inducidos es también vertical.
- En el mismo campo de exposición, los mayores campos eléctricos son para los cuerpos humanos en contacto a través de sus pies con un plano de tierra conductor, los campos inducidos más débiles se presentan para cuerpos humanos en el espacio libre, o aislados de tierra.
- Las medidas de dosimetría globales para corrientes de cortocircuito para un cuerpo en contacto con tierra son determinadas por el tamaño del cuerpo y postura más que por la conductividad del tejido.
- Los valores de campo eléctrico inducido están en menor medida influenciados por la conductividad de varios órganos y tejidos que por los valores de corrientes eléctricas inducidas.

Dosimetría de Campo Magnético.

Los cuerpos de humanos y animales, a diferencia de lo que sucede con el campo eléctrico, no perturban el campo magnético externo al que se ven expuestos, de manera que el campo magnético en el interior de un cuerpo, es el mismo presente fuera del cuerpo, debido a que la permeabilidad magnética de los tejidos es la misma que la del espacio libre o aire.

Las cantidades de material magnético que están presentes en algunos tejidos son tan minúsculas que pueden ser despreciadas en una dosimetría macroscópica. La principal interacción de un campo

magnético con el cuerpo humano consiste en la inducción de un campo eléctrico y una corriente asociada en los tejidos conductivos, debido a la ley de inducción de Faraday.

En un tejido homogéneo, las líneas de flujo eléctrico son de forma solenoidal. En el caso de un tejido heterogéneo, consistente en regiones con distintas conductividades, las corrientes fluyen también en las interfaces entre los tejidos.

En el modelo más simple de un loop equivalente circular correspondiente al contorno de un cuerpo, el campo eléctrico inducido corresponde a:

$$E = frB$$

y la densidad de corriente corresponde a

$$J = \sigma\pi frB$$

donde f es la frecuencia eléctrica, r corresponde al radio del loop, y B corresponde al vector de densidad de flujo magnético normal al loop de corriente. Similarmente, se puede considerar loops elipsoidales para adaptarlos de mejor manera a la forma del cuerpo.

Los campos eléctricos y densidades de corrientes no son fáciles de medir en el cuerpo humano. Se han realizado medidas en animales, pero los datos recogidos son limitados y confiabilidad de ellos es relativamente pobre.

Métodos de cálculos de campos magnéticos.

Los modelos heterogéneos del cuerpo humano para cuantificar los campos magnéticos, similares a aquellos utilizados para cuantificar el campo eléctrico, han sido numéricamente analizados usando el método de impedancias (IM), y las técnicas de diferencias finitas de potencial escalar (SPFD) [1]. Existe una mayor cantidad de datos disponibles para el campo magnético que para el campo eléctrico. La influencia en las cantidades inducidas de la resolución del modelo, propiedades de los tejidos en general y específicamente la anisotropía muscular, la orientación de campo respecto al cuerpo han sido investigados. En el pasado, la máxima densidad de corriente en una parte del cuerpo se calculaba usando el mayor loop que cupiera en dicha parte del cuerpo. Últimamente se ha demostrado que los parámetros inducidos deben ser calculados para los órganos in situ en vez de en órganos aislados, debido principalmente a que existe una influencia significativa por parte de las estructuras que rodean el órgano.

Los principales asuntos de dosimetría para exposición de campos magnéticos de extra baja frecuencia se pueden resumir como sigue:

- Los campos eléctricos inducidos en el cuerpo dependen de la orientación del campo magnético respecto del cuerpo.
- Para la mayoría de órganos y tejidos, la orientación de flujo magnético normal al torso, produce los máximos de las cantidades inducidas.
- En el cerebro, líquido cefalorraquídeo, sangre, corazón, ojos y espina dorsal, las cantidades inducidas más altas son inducidas por campos magnéticos orientados lado a lado.
- Consistentemente los más bajos campos inducidos corresponden a campos magnéticos orientados a lo largo del eje vertical del cuerpo.
- Para un campo de una orientación e intensidad dada, los campos eléctricos más altos son inducidos en un cuerpo de mayor tamaño.
- Los valores de campos eléctricos inducidos están en menor grado influenciados por la conductividad de varios tejidos y órganos que por los valores de densidad de corriente inducida.

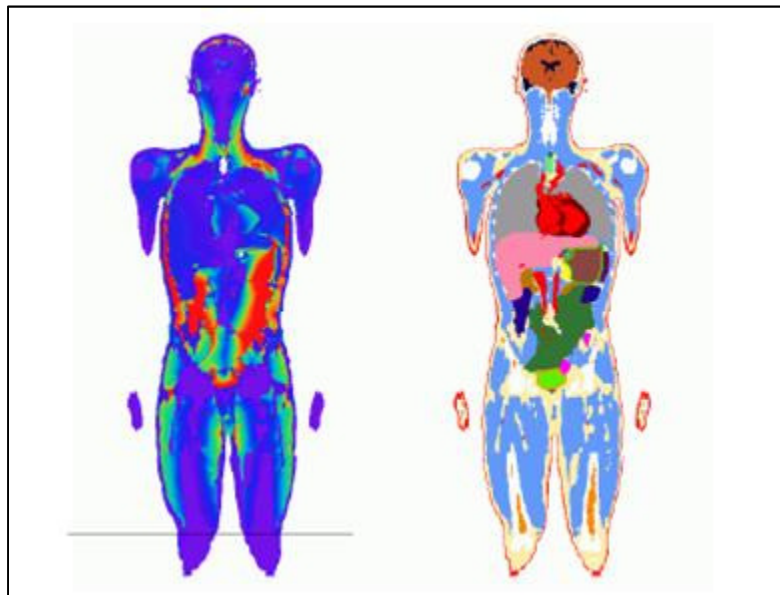


Figura 10: A la izquierda se muestra la densidad de corriente inducida por un campo magnético uniforme de 50 Hz perpendicular al plano frontal, calculado para un modelo heterogéneo de un cuerpo humano de forma anatómica, mostrado a la derecha. El mapa de colores de la densidad de corriente de la figura de la izquierda corresponde a un espectro, los valores más altos están en rojo y los más bajos en violeta, dando una vista general de la distribución de las corrientes inducidas [1].

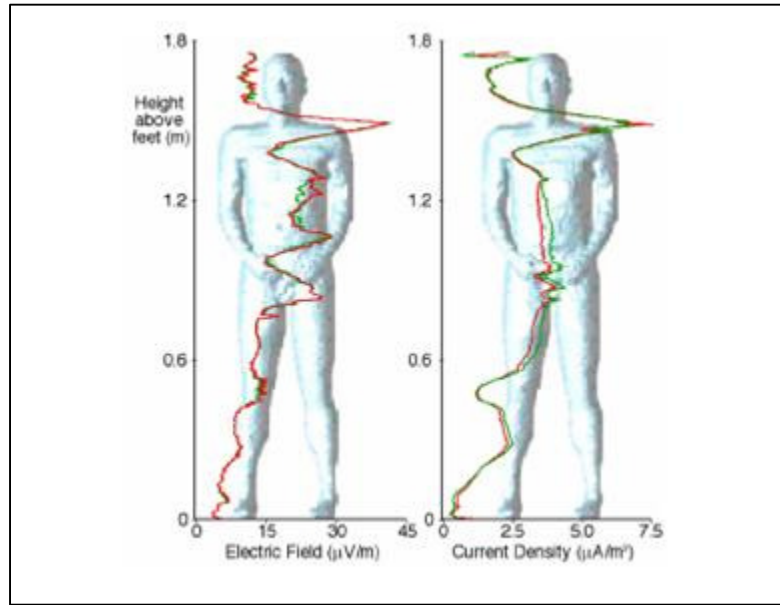


Figura 11: Magnitud promedio de un campo eléctrico en V/m y densidad de corriente en A/m^2 para la exposición a un campo magnético uniforme de $1\mu T$ de intensidad, 60 Hz de frecuencia orientado desde el frente hacia atrás. Las curvas rojas y verdes corresponden a dos sets de conductividades constituyentes del modelo de cuerpo humano usado [10].

Capítulo 5

Recomendaciones para mitigar los posibles efectos de campos electromagnéticos.

Normatividad Y Mitigación

La gran diversidad de la calidad de las investigaciones ha llevado a que cierto número de organizaciones profesionales y gubernamentales sólo haya publicado recomendaciones, mas no normas, sobre la exposición a campos de frecuencia industrial. Las recomendaciones presentadas por diferentes organizaciones y en épocas diferentes son inconsistentes en varios aspectos [2], razón por la cual sólo se presentan como referencias. Las más relevantes son la emitidas por National Radiological Protection Board- United Kingdom (**NRPB-UK**), International Commission on Non Ionizing Radiation Protection (**ICNIRP**), y American Conference of Governmental Industrial Hygienists (**ACGIH**). Valores sugeridos por éstas y otras organizaciones se muestran en la Tabla 6.

Público en general		Trabajadores	
Organización	Campo [μT]	Organización	Campo [μT]
NRPB-UK	1330	NRPB-UK	1330
ICNIRP *	100	ACGIH	1000
ICNIRP **	1000	ICNIRP ***	500
		ICNIRP **	5000
* exposición por 24 h			
** poco tiempo de exposición			
*** exposición continua			

Tabla 6. Límites para la exposición a campos de frecuencia industrial

Recomendaciones para minimizar los campos magnéticos producidos por las líneas de potencia.

Se presentan a continuación diversas recomendaciones encontradas en la literatura, tendientes a la disminución de los niveles de campo en diversos ambientes.

- **Incluir la *proximidad a la línea***, de personas, como uno de los factores a considerar en nuevos diseños. Existen empresas que ya están tomando en consideración estas medidas.
- **Incrementar los niveles de voltaje usados en transmisión.** Este método no es muy aplicable porque implicaría rediseño y reubicación de cada pieza de los equipos involucrados en la transmisión en bloque de energía. Además, a medida que el flujo de corriente incrementa con el crecimiento normal de la carga, el campo magnético inevitablemente alcanzará los niveles que tenía para voltajes menores.
- **Utilizar *diferentes configuraciones*** para los circuitos de las líneas. Existen arreglos de fases para cancelar parte del campo magnético de los circuitos de las líneas de transmisión.
- ***Disminuir la separación entre fases***: entre más cerca estén los conductores entre sí, menor será el campo magnético en las vecindades. Este método puede presentar incremento del potencial para producir corona, radio interferencia y ruido audible.
- ***Utilizar líneas de transmisión subterráneas***: permitiría eliminar el campo magnético de un circuito, pero sólo bajo algunas circunstancias específicas; en otras, esta opción podría incrementarlo (la tierra por sí sola no proporciona apantallamiento magnético).

Recomendaciones para minimizar niveles de campo magnético en sistemas de distribución

- **Las prácticas de *aterramiento para sistemas*** de bajo voltaje es una de las opciones para reducir el campo magnético alrededor de líneas de distribución y edificaciones. Entre menor sea el flujo de corriente de desequilibrio residencial, menor será el campo magnético generado.
- **Balanceo de circuitos**: revisar las redes y ubicar puntos en los que estén resultando flujos remanentes producidos por corrientes desbalanceadas con retorno por tierra; además, en lo posible tratar de que los circuitos trabajen balanceados.

- **Disminución de carga:** trasladar cargas a otros alimentadores o circuitos puede disminuir la corriente de carga total con lo cual seguramente se disminuye también el flujo resultante.
- **Utilizar tuberías de acero:** equivaldría a un blindaje magnético; reduciría el flujo resultante si se introducen en ellas los conductores de fase y neutro.
- **Alejamiento físico de cables:** el flujo resultante en el exterior será menor entre mayor sea la distancia a los conductores y entre menor sea la distancia entre ellos.

Normas de exposición a campos electromagnéticas de extra baja frecuencia.

El cuerpo humano se encuentra expuesto de una manera incremental al llamado “electrosmog”, debido al creciente uso de la energía eléctrica. La asociación exacta entre la exposición a campos electromagnéticos de extra baja frecuencia y el peligro que éstos representan para la salud humana es una pregunta abierta. La exposición a campos electromagnéticos probablemente no produce por si mismo ningún daño físico o químico al ADN humano. Desafortunadamente, lo anterior no es suficiente para asegurar que la exposición no tiene del todo efectos (positivos o negativos). Sin embargo, la principal preocupación con la exposición a EMF ELF corresponde al cáncer.

Los estudios previos se pueden clasificar aproximadamente en estudios de comportamiento, biológicos y estudios epidemiológicos. Los efectos más evidentes de ELF EMF en el cuerpo humano es la estimulación transitoria del sistema nervioso. Además, los campos eléctricos y magnéticos alternos inducen cargas superficiales y corrientes débiles que fluyen por el cuerpo. Esta es una razón del porqué los campos electromagnéticos tienen el potencial de causar efectos biológicos. Recientemente, ha sido sugerido que si hay algún efecto dañino para la salud, las corrientes inducidas son las causantes de estos efectos. Las magnitudes de éstas corrientes, incluso si un humano está ubicado directamente bajo una línea de transmisión, es extremadamente baja. Las corrientes inducidas por campos electromagnéticos de 50-60 [Hz] son más débiles que las corrientes naturales en el cuerpo, como aquellas presentes en la actividad normal de algunos órganos como el corazón o cerebro. La corriente máxima inducida por un campo

eléctrico proveniente de una línea de transmisión es mucho mayor que las corrientes naturales del cuerpo o las densidades de corriente en el cuerpo inducidas por campos magnéticos. De esta manera, las corrientes inducidas por campos eléctricos son más importantes que aquellas inducidas por campos magnéticos. El campo eléctrico a nivel del suelo bajo una línea de transmisión de alto voltaje es aproximadamente uniforme y las líneas de campo son verticales al plano de tierra. En la presencia de un cuerpo humano bajo la línea de alta tensión, el campo eléctrico se ve altamente perturbado, debido a la acumulación de cargas en la superficie del cuerpo. Debido a que la magnitud de las líneas de campo varían a lo largo de la superficie del cuerpo, las magnitudes de las corrientes inducidas también varían. La preocupación es que si estas corrientes pueden superar los límites establecidos por los organismos internacionales. Sobre este punto, en baja frecuencia, no hay un consenso sobre una cantidad física relevante para definir los límites de exposición; las guías de la ICNIRP están basadas en la densidad de corriente J inducida en el cuerpo humano, mientras que el comité del IEEE ha adoptado el campo eléctrico E . Lo claro, es que ambas cantidades son difíciles de medir.

Recomendaciones dadas por IEEE.

Este estándar define los niveles de exposición para proteger al público en general contra los campos electromagnéticos de frecuencias entre los 0-3 kHz. Este estándar fue desarrollado respecto a los mecanismos biológicos establecidos con respecto a la exposición de campos electromagnéticos.

Los límites de exposición están definidos para prevenir las siguientes reacciones de exposiciones de corto plazo:

- Estimulaciones dolorosas de las neuronas sensoriales o motoras.
- Excitaciones musculares que pueden llevar a lesiones mientras se realizan actividades potencialmente peligrosas.
- Excitación de neuronas o alteración directa de la actividad sináptica en el cerebro.
- Excitación cardíaca.
- Efectos adversos asociados con potenciales inducidos o fuerzas por cargas de movimiento rápido dentro del cuerpo, como en el tejido sanguíneo.

Los mecanismos de interacción de los seres vivos con los campos electromagnéticos, caen dentro de la categoría de efectos de corto plazo. Los límites de exposición expuestos en este estándar no están basados en los potenciales efectos a largo plazo debido a:

- En la actualidad no se cuenta con suficiente información confiable que permita concluir que la exposición de largo tiempo a campos electromagnéticos de magnitud común encontrada en comunidades o ambientes ocupacionales son adversos para la salud o que causan algún tipo de enfermedad como cáncer.
- No existe un mecanismo confirmado que pueda proveer un método para predecir efectos adversos debido a la exposición a campos electromagnéticos de baja intensidad y frecuencia.

Límites de exposición.

Restricciones básicas.

Las restricciones básicas se refieren a fuerzas eléctricas dentro del tejido biológico, que adecuadamente prevén de efectos adversos. Tales restricciones están derivadas considerando umbrales eléctricos adversos, su distribución dentro de la población y factores de seguridad.

La siguiente tabla muestra restricciones para lugares particulares del cuerpo en términos del campos eléctricos dentro de medios biológicos. Dos parámetros son considerados en la tabla:

E_0 : Corresponde a la magnitud del campo eléctrico umbral de mínima intensidad presente el tejido biológico.

f_e : Frecuencia superior de transición en una relación de “fuerza-frecuencia”.

Los límites se presentan en la siguiente tabla como se muestra en las siguientes ecuaciones:

$$E_i = E_0 \text{ para } f \leq f_e$$

$$E_i = E_0 \left(\frac{f}{f_e} \right) \text{ para } f \geq f_e$$

Donde E_i corresponde al máximo campo eléctrico inducido permitido en los tejidos. Las restricciones básicas del campo eléctrico inducido en los tejidos corresponden a un promedio aritmético determinado sobre una línea circular de 0.5 cm de radio orientada en cualquier dirección dentro del tejido identificado en la siguiente tabla.

En adición con los valores presentados en la tabla 7, el campo magnético en el tejido, para frecuencias debajo de los 10 [Hz] deberían ser restringidos a un valor peak de 167 [mT] para el público en general y 500 [mT] para un ambiente controlado. Para frecuencias sobre los 10 [Hz], el campo magnético en los tejidos no se especifica en el estándar IEEE.

Tejido Expuesto	f_e [Hz]	Público general	Ambiente controlado
		E_0 -rms [V/m]	E_0 -rms [V/m]
Cerebro	20	5.89×10^{-3}	1.72×10^{-2}
Corazón	167	0.943	0.943
Manos, Muñecas, Pies, Tobillos	3350	2.1	2.1
Otro tejido	3350	0.701	2.1

Tabla 7: Restricciones básicas aplicadas a varias regiones del cuerpo^{a,b}.

Consideraciones:

^a La interpretación de la tabla es la siguiente: $E_i = E_0$ para $f \leq f_e$; $E_i = E_0 \left(\frac{f}{f_e}\right)$ para $f \geq f_e$.

^b En adición con las restricciones listadas, la exposición de la cabeza y torso a campos magnéticos de frecuencia inferior a 10 [Hz] debería ser restringido a un valor peak de 167 [mT] para público general y 500 [mT] para ambientes controlados.

Valores De Exposición Máximo Permitidos Para La Densidad De Flujo Magnético

Exposición de la cabeza y torso para campos sinusoidales.

La tabla 8 muestra los límites de campos magnéticos máximos permisibles estipulados en el estándar IEEE (densidad de flujo B, magnitud de campo magnético H) para exposición de la cabeza y el torso. El tiempo promedio para una medida rms es de 0.2 seg para frecuencias sobre los 25 Hz. Para frecuencias más bajas, el tiempo promedio es tal que a lo menos, 5 ciclos están incluidos en el promedio, pero no superior a 10 seg.

Rango de frecuencia [Hz]	Público general		Ambiente controlado	
	B - rms [mT]	H - rms [mT]	B - rms [mT]	H - rms [mT]
< 0.153	118	9.34×10^4	353	2.81×10^5
0.153-20	18.1/f	$1.44 \times 10^4/f$	54.3/f	$4.34 \times 10^4/f$
20-759	0.904	719	2.71	2.16×10^3
759-3000	687/f	$5.47 \times 10^5/f$	2060/f	$1.64 \times 10^6/f$

Tabla 8: Máximos niveles de exposición de campos magnético en cabeza y torso.

El cumplimiento de los valores de la tabla 8, asegura el cumplimiento de los valores de la tabla 7. Sin embargo, el cumplimiento de la tabla 8 no necesariamente implica el cumplimiento de las restricciones básicas, pero rara vez es necesario evaluar si las restricciones básicas han sido alcanzadas. Si las restricciones básicas de la tabla 7 no se han excedido, entonces los valores MPE en la tabla 8 pueden ser excedidos. Consecuentemente, es suficiente con demostrar cumplimiento de las tablas 7 o 8.

Exposiciones de brazos o piernas.

Los niveles máximos de exposición permitidos para los brazos y piernas están listados en la tabla 9. El cumplimiento de los valores presentados en la tabla 9, asegura el cumplimiento de los valores de la tabla 7. Sin embargo, el cumplimiento de la tabla 9 no implica necesariamente el cumplimiento de las restricciones básicas.

Rango de frecuencia [Hz]	Público General B-rms [mT]	Ambiente controlado B-rms [mT]
< 10.7	353	353
10.7 - 3000	3790/f	3790/f

Tabla 9: Niveles de exposición máximos permisibles de densidad de flujo magnético en brazos y piernas.

Valor peak del campo en el interior de tejidos.

El valor peak del campo eléctrico en el interior de los tejidos, debe ser restringido a un valor obtenido al multiplicar los límites rms de la tabla 1 por un factor $\sqrt{2}$. Para interpretar esta tabla para formas de onda

no sinusoidales, la frecuencia f es definida como $f = \frac{1}{2t_p}$, donde t_p es la duración de la fase en que el campo eléctrico in-situ tiene una excursión por su peak. La duración de fase es definida como el tiempo entre cruces por cero de la forma de onda teniendo un promedio cero. Para una forma de onda exponencial, t_p es interpretado como la duración medida desde el punto de peak de la forma de onda hasta el punto en que decae a 0.37 del valor peak.

Máximos valores de exposición permitidos: campos eléctricos ambientales.

Exposición constante del cuerpo completo a campos eléctricos sinusoidales.

La tabla 10 determina los campos eléctricos E límites en términos de campo eléctrico no perturbado (ausente de personas). Se asume que el campo eléctrico no-perturbado es constante en magnitud, dirección y fase relativa en una extensión física comparable con el tamaño del cuerpo humano. El tiempo promedio para una medida rms debería ser de 0.2 seg para frecuencias sobre los 25 [Hz]. Para frecuencias más bajas, el tiempo promedio es tal que es superior a 5 ciclos de duración de la forma de onda, con un máximo de 10 [s].

Público General		Ambientes controlados	
Rango de frecuencia [HZ]	E - rms [V/m]	Rango de frecuencia [HZ]	E - rms [V/m]
1-368 ^c	5000 ^{a,d}	1-272 ^c	20000 ^{b,e}
368-3000	$1.84 \times 10^6/f$	272-3000	$5.44 \times 10^6/f$
3000	614	3000	1813

Tabla 10: Máxima exposición permitida para campos eléctricos ambientales. Exposición completa del cuerpo.

Consideraciones:

^aDentro de la franja de servidumbre de la línea, el límite se puede relajar a 10 kV/m bajo condiciones normales de carga.

^bDescargas dolorosas son fácilmente encontradas para campos eléctricos de intensidad de 20 kV/m y son posibles para campos de 5-10 kV/m sin medidas protectivas.

^cLímites bajo 1 [HZ] son no menores a los especificados para 1 [HZ]

^dCampos de 5 kV/m inducen descargas que serán dolorosas para aproximadamente el 7% de los adultos (en condiciones de buen aislamiento y tocando tierra)

^eEl límite de 20 kV/m puede ser excedido en un ambiente controlado cuando un trabajador no está al alcance de un objeto aterrizado.

Límites permitidos para corrientes de contacto y corrientes inducidas.

Corrientes sinusoidales.

Las corrientes de contacto debieran estar limitadas como se indica en la tabla 11, sujeto a las siguientes condiciones:

- Los límites expuestos en la tabla 11 para individuos aislados sin contacto con objetos metálicos no deben exceder los valores listados en las filas llamadas “Ambos pies” y “Cada pie”.
- Los límites de contacto de la tabla 5 asumen un individuo que está aislado de tierra mientras está en contacto con un conductor de retorno a tierra. El criterio no protege necesariamente contra sensaciones dolorosas provocadas por descargas de “chispas” justo antes del momento de tomar contacto con el conductor de retorno a tierra.
- El tiempo promedio de medida debe ser de 0.2 seg para frecuencias superiores a 25 [Hz]. Para frecuencias más bajas, el tiempo debe ser superior a 5 ciclos de duración de la forma de onda, pero no superior a 10 segundos.
- Contacto tipo 1: Se refiere al contacto de una persona a un objeto conductor, a través de un conductor. El área de contacto se asume como de 15 [cm²].
- Contacto tipo 2: Se refiere al contacto de un objeto conductor directamente con alguna parte del cuerpo.

Condición	Público general [mA-rms]	Ambiente controlado [mA-rms]
Ambos pies	2.7	6.0
Cada Pie	1.35	3
Contacto tipo 1	-	3
Contacto tipo 2	0.5	1.5

Tabla 11: Máximos valores permitidos de corrientes de contacto e inducidas medidas en [mA-rms] para ondas continuas sinusoidales de 0-3 [kHz]^{a, b}.

Consideraciones:

^aLos contactos de tipo 1 pertenecen a ambientes controlados donde el personal está capacitado y además se usan medidas protectoras para prevenir dichos contactos como por ejemplo guantes.

^bLímites aplicables a corrientes que fluyen entre el cuerpo y objetos aterrizados que pueden ser tocados por una persona.

Recomendaciones Para Limitar La Exposición a los CEM

Para las siguientes recomendaciones debemos diferenciar entre exposición ocupacional y exposición de público en general. La población expuesta ocupacionalmente consiste en adultos que generalmente están expuestos bajo condiciones conocidas y están entrenados para estar consientes del riesgo potencial para tomar las medidas adecuadas de protección.

El público general comprende individuos de todas las edades y estados de salud variables. En muchos casos los miembros del público no están consientes de su exposición a los CEM, por lo cual no se puede esperar que los miembros individuales del público tomen precauciones razonables para minimizar o evitar su exposición. Son estas consideraciones que soportan la adopción de restricciones más estrictas a la exposición del público que para la exposición de la población expuesta ocupacionalmente.

Justificación general de los factores de seguridad.

Existe poca información sobre los efectos biológicos producidos en personas y en animales de experimento debido a la exposición a CEM como para proporcionar niveles de seguridad estrictos para todos los rangos de frecuencia. Adicionalmente, parte de la incertidumbre con respecto al factor de seguridad apropiado, proviene de la falta de conocimiento concerniente a la apropiada dosimetría.

Valores de umbral recomendados hoy

Hoy en día existen variadas normas, recomendaciones, etc. Al respecto, publicadas en diversos países, por diversos organismos. Por lo anteriormente mencionado, no existen valores de umbral universalmente aceptados.

A continuación se presentan unas tablas resumen para valores umbrales a exposición de CEM en diferentes rangos de frecuencia. Los datos presentados están basados en **ICNIRP**.

La **ICNIRP** es 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 OMS y la Organización Internacional del Trabajo (OIT) para asuntos relativos a RNI.

Normas de exposición a campos eléctricos y magnéticos

Rango de frecuencia	E, V/m	B, μ T
Hasta 1 Hz.	-	2×10^5
1-8 Hz.	20000	$2 \times 10^5 / f^2$
8-25 Hz.	20000	$2 \times 10^4 / f$
0.025-0.82 kHz.	$500/f$	$25/f$
0.82-65 kHz.	610	30.7
0.065-1 MHz.	610	$2/f$
1-10 MHz.	$610/f$	$2/f$
10-400 MHz.	61	0.2
400-2000 MHz.	$3 \times f^{1/2}$	$0.01 \times f^{1/2}$
2-300 GHz.	137	0.45

Tabla 12: Limite máximo a nivel ocupacional para la exposición de campos eléctricos y magnéticos.

Rango de frecuencia	E, V/m	B, μ T
Hasta 1 Hz.	-	4×10^5
1-8 Hz.	10000	$4 \times 10^5 / f^2$
8-25 Hz.	10000	$500/f$
0.025-0.82 kHz.	$250/f$	$5/f$
0.82-65 kHz.	$250/f$	6.25
0.065-1 MHz.	87	6.25
1-10 MHz.	87	$0.92/f$
10-400 MHz.	$87/f^{1/2}$	$0.92/f$
400-2000 MHz.	$1.375 \times f^{1/2}$	$0.046 \times f^{1/2}$
2-300 GHz.	61	0.2

Tabla 13: Limite máximo para público general ante la exposición de campos eléctricos y magnéticos.

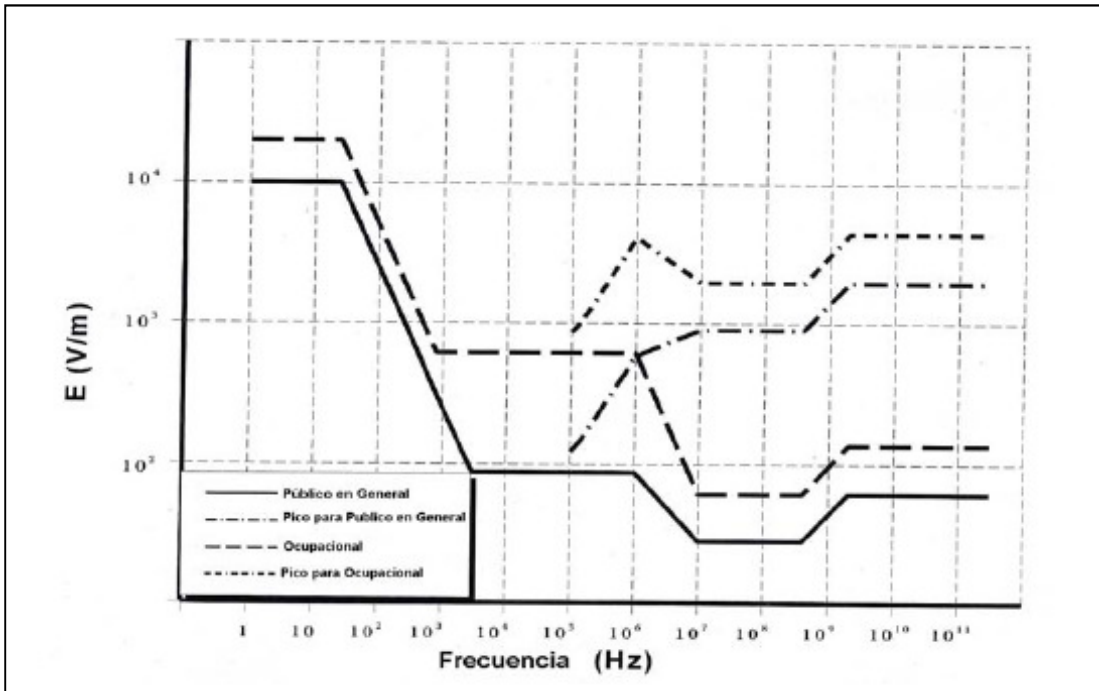


Figura 12: Niveles de Referencia ICNIRP para exposición a campos eléctricos variables en el tiempo.

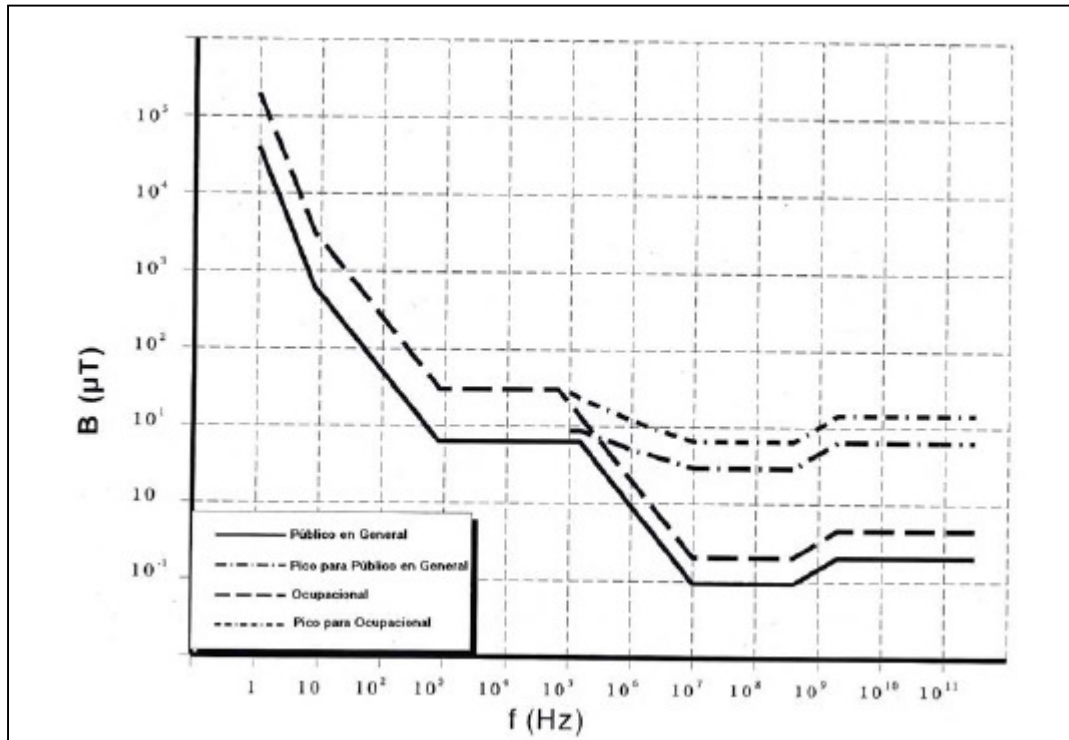


Figura 13: Niveles de Referencia ICNIRP para exposición a campos magnéticos variables en el tiempo.

Recomendación publicada por el diario oficial de la comunidad europea.

OJC 519 30.7.1999 [OJEC, 99]

Esta recomendación se refiere a la limitación en la exposición del público general a campos electromagnéticos (0 Hz. a 300 GHz.). Haremos mención a aquellas partes de [OJEC,99] que se aplican a 50-60 Hz.

[OJEC, 99] está basada, esencialmente, en las recomendaciones de [ICNIRP, 98], antes mencionadas.

En [OJEC, 99] se hace referencia al caso del público en general.

Restricciones básicas [OJEC, 99]

- En el rango de frecuencias que nos ocupa (4-1000 Hz.) se fija sólo la restricción básica para Densidad de corriente: $2 \frac{mA}{m^2}$ (rms).

Para frecuencias inferiores a 4 Hz. [OJEC, 99] establece las siguientes restricciones básicas:

- Para 0 Hz. $B = 40 \text{ mT}$
- Para $0 < f \leq 1 \text{ Hz.}$ $J = 8 \frac{mA}{m^2}$ (rms)
- Para $1 \text{ Hz.} < f \leq 4\text{Hz.}$ $J = \frac{8}{f} \frac{mA}{m^2}$ (rms)

Nota: f está en [Hz].

Niveles de Referencia [OJEC, 99] para frecuencias entre 25 y 800 Hz.

$$E = \frac{250}{f} (V / m)$$

$$B = \frac{5}{f} (\mu T)$$

Nota: f esta en [kHz].

Luego, los niveles de referencia para 50 [Hz]. según [OJEC, 99] son: 5 kV/m; 100 μ T.

Luego, los niveles de referencia para 60 Hz. según [OJEC, 99] son: 4167 V/m; 83.3 μ T.

Notas:

- No se da E para $f < 1$ Hz. Es decir para el caso de electricidad estática. Para la mayoría de las personas no hay percepción molesta del campo electrostático para valores bajo 25 kV/m.
- En el caso electrostático debe evitarse toda forma de descargas que cause molestias.
- Cuando el valor medido excede el nivel de referencia, no necesariamente la restricción básica ha sido excedida. Cuidando que se eviten efectos adversos a la salud de efectos indirectos (tales como microshoks), se acepta que los RL del público general sea excedido a condición de no sobrepasar la restricción básica en J (densidad de corriente).

Nivel de referencia establecido por [OJEC, 99] para corriente de contacto.

- Para 0 Hz – 2.5 KHz. $J_{\text{máx}} = 0.5$ mA.

[OJEC, 99] dice haber tomado en cuenta que el umbral de respuesta biológica en mujeres adultas y niños es de aproximadamente $2/3$ y $1/2$ respectivamente que el de hombres adultos.

Densidad de corriente inducida aceptable.

Todas las normas (esto dicho en sentido general: norma, recomendaciones, etc.) parten de 10 [mA/m²] a 50-60 [Hz]. Algunas adoptan factores de reducción, en particular ICNIRP [ICNIRP, 98] reduce por un factor 5, así llega al valor de 2 [mA/m²] que postula [OJEC, 99]

Campo eléctrico para el público en (kV/m)

5 [kV/m] es el menor valor especificado en la norma ICRNIP que es lo retenido en [OJEC, 99] para 50 [Hz]. En otras normas se encuentran valores mayores: 10 [kV/m] y 12 [kV/m].

Campo magnético tolerable por el público en general.

En las diferentes normas se encuentra desde 1.64 [mT] hasta 0.015 [mT]. [OJEC, 99] adoptó un valor algo inferior adoptado por ICNIRP: 0.1 mT = 100μT. a 50 Hz.

Capítulo 6

Técnicas de Apantallamiento y Blindaje para Campos Electromagnéticos de baja frecuencia

Actualmente, la implementación de normas que regulen la emisión de instalaciones eléctricas son escasas, esto debido a que no se ha creado conciencia para considerar seriamente el problema. Esto trae como consecuencia que en muchos casos no se puedan aplicar las medidas necesarias ni tampoco se puedan realizar correcciones a los diseños ya construidos. Las únicas medidas básicas actualmente existentes consisten en evitar la convivencia cercana entre las instalaciones y la población, pero ante el crecimiento poblacional, tales medidas se ven en muchos casos sobrepasadas.

Existen algunas técnicas que pueden usarse para reducir los campos magnéticos producidos por las líneas eléctricas, subestaciones, transformadores e incluso cableado doméstico. Sin embargo, una vez que los campos se han producido, el apantallamiento es muy difícil de lograr. Existen algunos materiales para apantallar zonas pequeñas, pero el costo de estos es muy elevado.

Para reducir las emisiones de campos electromagnéticos se puede aumentar la altura de las torres, lo cual reduce la intensidad de campo en los bordes de las franjas de servidumbre. El tamaño, espaciamiento y configuración de las torres de alta tensión, pueden ser modificados para reducir los campos magnéticos. También se pueden reemplazar las líneas de menor tensión por otras de mayor tensión de manera de reducir las corrientes por las líneas.

Otra alternativa es disponer de tendido subterráneo, ya que debido a los materiales aislantes que usan, como gomas, aceite o plástico, los campos eléctricos, y en menor medida, los campos magnéticos se reducen en gran medida. El problema es que construir una línea de alta tensión subterránea tiene un elevado costo, estimado en un millón de dólares por milla.

En Chile existen muy pocas técnicas concretas con respecto al diseño de instalaciones de alta, media o baja tensión desde el punto de vista de los campos magnéticos, o más bien este factor no se toma en cuenta en el diseño, esto por razones de costos y porque no existen normas de emisiones de campos electromagnéticos.

En el marco de evitar daños a la ciudadanía, en EE.UU., la comisión de Utilidad Pública estimó como política prudente para las empresas constructoras del área eléctrica, destinar un monto equivalente al 4% del costo del proyecto para solucionar problemas de cualquier tipo de interferencia.

Por lo mencionado anteriormente, las medidas básicas al momento de pensar en un diseño para disminuir los campos magnéticos y eléctricos en las instalaciones, se debe tener presente: Diseño, ubicación.

Técnicas aplicables a sistemas de transmisión.

Se analizarán principalmente los fenómenos en régimen permanente, ya que en periodos transitorios, los campos son más intensos y complejos, y no presentan un mayor interés debido a su baja ocurrencia.

Líneas de Transmisión

Distancia

Este es el método más común para reducir la exposición a los campos magnéticos. En el caso de sistemas de transmisión de energía, interesa seleccionar rutas para las líneas lo más alejadas posibles de sectores poblacionales. Esta materia debería ser tomada en cuenta por las compañías eléctricas para sus nuevos proyectos de transmisión y también debería ser tomada en cuenta por las compañías mobiliarias al ubicar sus nuevos centros habitacionales en sectores donde líneas ya han sido construidas.

En el caso de tener que trasladar la línea, es aconsejable disponer de un monto de un 4 % del valor de la línea para solucionar problemas.

Configuración de conductores.

La elección de la configuración correcta puede en algunos casos ayudar en forma eficiente a disminuir el campo para la misma corriente circulando por la línea. En general las configuraciones triangulares tienden a proveer una mayor cancelación del campo que las configuraciones horizontales.

La compactación de la línea puede disminuir la intensidad del campo debido a un efecto de cancelación de campos de distinta fase.

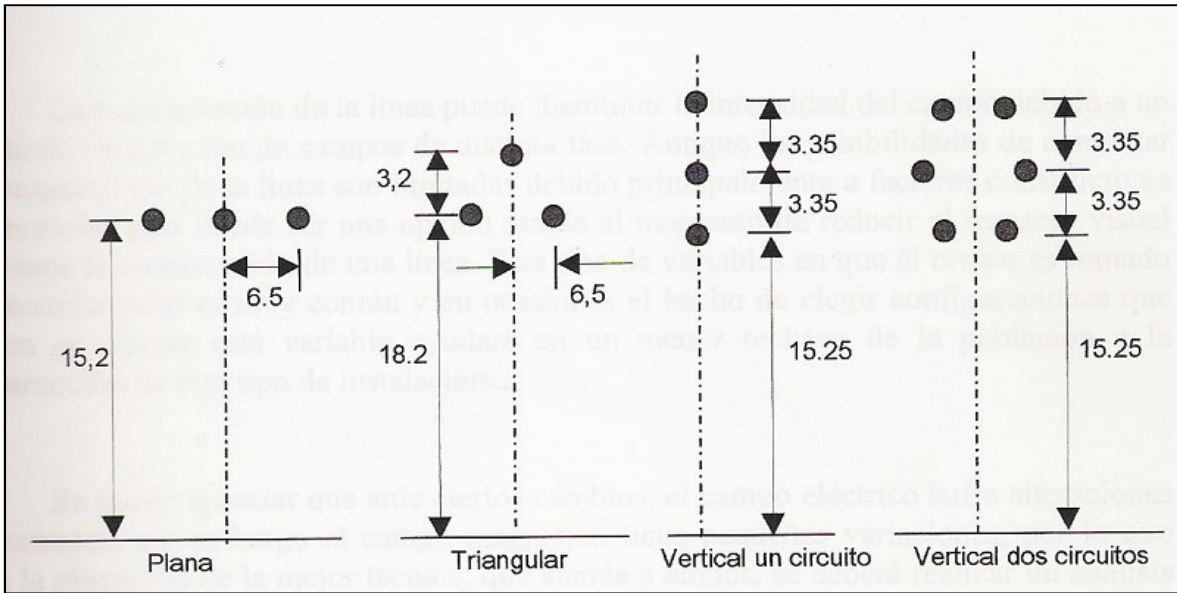


Figura 14: Configuración de conductores

División de circuitos

En el caso de líneas de un solo circuito es posible construirlas como dos circuitos paralelos, eligiendo la configuración o arreglo de fases que disminuya en mejor forma la emisión de campos magnéticos. Esta técnica es significativamente más cara que la forma usual de construir líneas de simple circuito por lo que es usada sólo en una forma correctiva de líneas existentes o en aquellos proyectos nuevos donde sea necesario disminuir la magnitud del campo magnético en pequeños sectores de la ruta.

Reducción de corriente

Para disminuir la magnitud del campo magnético, se puede disminuir el nivel de corriente por las líneas, produciendo una disminución proporcional en la intensidad de campo magnético. Para satisfacer la demanda, es necesario mantener un nivel de potencia constante, por lo que junto con la baja de corriente, hay que subir el nivel de voltaje de la línea, lo cual significa un costo importante.

Apantallamientos

La técnica de apantallamiento consiste en la reducción de la intensidad del campo en una cierta posición a través de la construcción o el aprovechamiento de alguna barrera entre la fuente del campo y el punto de interés. El campo eléctrico es fácilmente apantallado por una diversidad de objetos como árboles,

edificios, estructuras metálicas, etc. En cambio el campo magnético se ve disminuido levemente. En situaciones especiales, el apantallamiento de campo magnético es posible mediante el uso de algunas estructuras cerradas construidas con metales especiales, pero su implementación implica un elevado costo.

Circuitos compensadores energizados (Cancelación activa)

Este tipo de cancelación actúa sobre el campo producido por la corriente de flujo, proporcionando otra corriente opuesta con el fin de obtener una cancelación del campo total presente en la proximidad de la línea. Estos circuitos compensadores deben ser generados en forma independiente y optimizados en amplitud y ángulo de tal manera de obtener una cancelación de campo a los niveles deseados.

Esta técnica provee una disminución del campo magnético principalmente en la zona cercana a la franja de servidumbre de la línea, por lo que su uso dependerá de las necesidades de la zona y de las instalaciones anexas.

Líneas subterráneas

Usar cables subterráneos provee de un buen apantallamiento de campos electromagnéticos, debido principalmente a los materiales aislantes que se usan en el aislamiento de estos cables, entre ellos podemos mencionar gomas, resinas, aceites, plásticos, etc.

El uso de un cable trifásico producirá un campo magnético menor que aquel generado por la misma línea construida con tres cables monofásicos agrupados, debido a que en el primer caso los conductores están más cercanos y se producirá una mayor cancelación de campo.

La principal desventaja que poseen las líneas subterráneas tiene que ver con su elevado costo de construcción, como se mencionó anteriormente, estimado en un millón de dólares por cada 1.6 kilómetros.

Subestaciones de Transmisión

Los campos electromagnéticos producidos por subestaciones de transmisión son generalmente los campos eléctricos y magnéticos más intensos que se pueden observar, y son también mayores que los producidos por las líneas de transmisión. Como medida de precaución, las zonas donde se encuentres

concentradas las mayores intensidades de campos electromagnéticos deben estar restringidas al tránsito de personas.

Transmisión. Medidas de diseño

Para reducir principalmente las emisiones de campos magnéticos, se presentan aquí una serie de consideraciones para el diseño de las líneas de transmisión.

- Incrementar la distancia vertical de la línea a potenciales receptores.
- Configurar los conductores para minimizar las emisiones de campos magnéticos.
- Configurar las fases para minimizar el campo magnético.
- Usar conductores aéreos adicionales, arriba de 11.000 [V].
- Reducir la corriente.
- Apantallar o cancelar mediante circuitos compensadores.
- Localizar líneas bajo tierra.

Diseño de líneas de distribución

Podemos mencionar las siguientes consideraciones a tener presente para el diseño de líneas de distribución.

- Uso de distribución geométrica de conductores adecuada de manera de tener una mayor eficiencia de cancelación de campo.
- Uso de distintas configuraciones de postes de manera de aumentar la distancia vertical al punto de interés.
- Uso de cables subterráneos en lugares donde sea económicamente justificable.
- Uso de cables trifásicos en lugar de cables simples.
- Uso de cables aislados enrollados en lugar de cables sin aislamiento que provee una mayor eficiencia para la cancelación del campo.
- Para líneas de doble circuito, adoptar configuraciones de fase de baja reactancia cuando la corriente fluye en ambos circuitos en la misma dirección.

Subestaciones

Las subestaciones también son fuentes de campos electromagnéticos, producidos principalmente por los enrollados de los transformadores. Además, los campos magnéticos son más intensos en las zonas de baja tensión.

A continuación se presenta una serie de medidas que contribuyen a disminuir la intensidad de campos magnéticos, relativo a la percepción humana.

- Localizar las subestaciones lejos de lugares ocupados por oficinas, colegios, etc.
- Proyectar la subestación de tal forma que la zona de bajo voltaje quede lo más alejada posible de lugares habitados.
- Localizar los transformadores, barras de bajo voltaje, desconectores y cualquier otro equipo fuente potencial de campo magnético alejado de zonas habitadas.
- Orientar los transformadores y otras fuentes que tengan grandes desigualdades en la intensidad de campos emitidos de tal manera que no afecten el área de interés.
- Usar cables trifásicos, en lugar de tres cables monofásicos.
- En el caso de usar tres cables monofásicos, usar configuración trifilar, si además se dispone de cable de neutro, disponer éste en el centro. Con esto se contribuirá con eficiencia a la disminución del campo magnético.
- Posicionar el lado de bajo voltaje en zonas de difícil acceso, con defensas o bloqueadas por muros.

Medidores domésticos y alambrados.

- Como primera medida, ubicar los medidores y cajas de distribución teniendo en cuenta el campo magnético que ellos pueden producir.
- Localizar la conexión principal de cables lejos de las zonas de alto uso.
- Usar cables aislados y trenzados entre sí de manera de aumentar la cancelación de campo.
- En el caso que el medidor deba ir adyacente a la caja de distribución, estos deben ir espalda con espalda. Esto disminuiría las emisiones en cerca de un 80%.

Materiales empleados para apantallar Campos Electromagnéticos (MuMetal)

Un material capaz de apantallar o mitigar el campo magnético debe tener una alta permeabilidad. Los materiales comúnmente ofrecidos en el mercado se componen principalmente en un 80 % de níquel y 15 % de hierro, siendo balanceados con cobre, molibdeno o cromo, dependiendo del fabricante. Todos los materiales capaces de apantallar los campos magnéticos trabajan desviando el flujo magnético hacia ellos mismos. Formas geométricas cerradas como cilindros con casquete de acero, cajas con cubierta son las más eficientes para apantallar campos magnéticos. Los MuMetal ofrecen una alta permeabilidad para la senda que llevará las líneas de campo, encerrándolas, guiándolas e impidiendo que salgan de zonas no deseadas.

Los materiales MuMetal son capaces de producir un apantallamiento del orden de un 75% a un 95% dependiendo de la frecuencia del campo, de la intensidad del campo que se desee apantallar y de las condiciones de instalación. En la actualidad se pueden conseguir con facilidad estos materiales, a un precio razonable y en variedad de tamaños dependiendo de los requerimientos del consumidor.

Algunas de las recomendaciones dadas para este tipo de materiales son las siguientes:

- Formas cilíndricas generalmente proveen una mayor eficiencia de apantallamiento que las formas de hojas.
- No soldar ya que el calor permanente puede reducir la eficiencia del apantallamiento.
- Evitar ángulos fuertes que doblen la aislación.
- La hoja puede ser atornillada, clavada, etc.
- Aplicar materiales que cubran las partes puntiagudas.

Estos materiales se pueden encontrar también en pequeñas dimensiones, y se aplican principalmente en cajas eléctricas. Poseen una gran capacidad de atenuación, del orden del 95% para campos que van entre los 150 mG a 250 mG. Una hoja de este material de 30" x 29" x 0.020" (76.2 cms x 73.66 cms x 0.05 cms) tiene un costo de US\$ 327 aproximadamente. (\$ 173.310 pesos.)

La compañía MuShield, localizada en New Hampshire, USA, diseña y construye barreras magnéticas de alta permeabilidad a partir de la aleación MuMetal con 77% de níquel, para proteger a los microscopios de la interferencia magnética. MuMetal forma una "barrera de mínima resistencia" para el campo magnético absorbiéndolo.

Entre los clientes de MuShield se encuentra la compañía Japan Electro Optics Ltd. que fabrica microscopios electrónicos. La cantidad de protección requerida depende de la ubicación del microscopio y de la cantidad de interferencia a la cual está expuesto.

Si se tiene una interferencia muy fuerte, la protección de MuMetal puede llegar a saturarse y dejar de funcionar, no obstante, para la gran mayoría de las aplicaciones, se considera como el material óptimo para re-direccionar y absorber el flujo magnético. La aleación se encuentra disponible en hojas, laminillas, barras redondas, placas, forjas y tubería en una gran variedad de espesores, diámetros, largos y anchos, lo mejor de MuShield, que debe diseñar y fabricar protecciones de formas complejas para satisfacer las necesidades de varios clientes.

Las protecciones de forma esférica son las ideales pero rara vez son prácticas, de acuerdo a MuMetal. La siguiente forma más efectiva es la cilíndrica a una razón de 4 a 1 de relación longitud-diámetro. Las superficies redondeadas, incluyendo esquinas de radios muy amplios, son las más conductoras para la absorción magnética. Por otro lado, la forma menos efectiva para este fin son las superficies planas, especialmente cuando va formando más y más un ángulo recto con respecto al vector del campo magnético.

El mercado internacional en protección magnética está valuado de 50 a 100 millones de dólares americanos al año, menciona Grilli, e incluye aplicaciones tales como cubiertas de giroscopios de fibra óptica y algunos otros accesorios médicos, tubos del multiplicador de las cámaras de televisión y algunos productos para computación. Las protecciones también son utilizadas para mantener la radiación de los campos producidos por algunos dispositivos electrónicos.

Capítulo 7

Problemas medioambientales producidos por enlaces de alto voltaje en corriente continua HVDC.

El estudio del posible impacto medio ambiental de una línea de transmisión de alto voltaje, es un aspecto sumamente importante en el diseño y adjudicación de una nueva línea de transmisión. En este sentido, los gobiernos regionales o nacionales, requieren estar familiarizados con los efectos causados por las líneas de transmisión, en orden de sentar las bases para evaluar el impacto ambiental de una nueva línea de transmisión. El impacto visual de la línea, el efecto en la tierra y en el uso del agua, el efecto en la vida salvaje y las rutas de migración son algunos de los temas medioambientales a ser analizados en proyectos que consideren enlaces en alto voltaje en corriente continua.

En el presente capítulo se analizarán los efectos que los campos estáticos, eléctricos y magnéticos, producidos por enlaces en corriente continua HVDC, tienen sobre las personas, así como normativas disponibles en la literatura para limitar la exposición a estos.

Los posibles efectos en el ambiente causados por sistemas de transmisión HVDC incluyen:

- Los efectos del campo eléctrico.
- Los efectos del campo magnético.
- Radio interferencia.
- Ruido audible.
- Corrientes por tierra y efectos de corrosión.
- El uso de tierras para estaciones convertoras y línea que antes se usaban para otro propósito.
- Impacto visual.

Con el fin de minimizar, mitigar o controlar el efecto negativo de los enlaces HVDC en el ambiente, dos son los aspectos principales considerados para el diseño de una línea de alto voltaje en corriente continua:

- Un despeje adecuado del conductor con respecto a los objetos que lo rodean.
- Efecto Corona.

Para una línea DC, las franjas de servidumbre tienen dimensiones entre los 50 [m] a 300 [m], dependiendo del voltaje de la línea, y por lo tanto, del tamaño de las torres. Una vez que el criterio de distancia con respecto a objetos cercanos a la línea es satisfecho, es necesario verificar criterios de campos electromagnéticos.

Los sistemas HVDC tienen características particulares relacionadas con cada una de estas influencias sobre el ambiente. Estas características específicas de los sistemas HVDC tienen que ser consideradas en el proceso de elegir los trazados de las líneas de transmisión y en la concepción de un proyecto de línea de transmisión. En comparación con los sistemas de transmisión HVAC, muchas de estas características pueden ser consideradas como “positivas”, es decir, usualmente existen ventajas ambientales de los sistemas HVDC con respecto a los sistemas HVAC, mientras que otras características, desde el punto de vista medio ambiental, pueden ser consideradas como negativas.

A continuación se revisarán brevemente algunos de los aspectos más importantes de impacto ambiental de los enlaces HVDC.

Efecto Corona

Cuando el campo eléctrico en la superficie del conductor de la línea de transmisión supera un cierto valor, se producen descargas eléctricas en el aire que rodea el conductor, dando por resultado las descargas corona. La ocurrencia de este efecto, genera una serie de efectos corona, los cuales tienen influencia en el diseño de la línea de alta tensión. Los efectos corona que son considerados tanto para el diseño de líneas de alta tensión de tecnología AC como DC, corresponden a pérdidas corona, radio interferencia, ruido audible y efectos visuales. En el caso de líneas de transmisión HVDC, el efecto combinado del campo eléctrico y las corrientes iónicas generadas por efecto corona a niveles del suelo, deben ser consideradas en consideración en el proceso de diseño de la línea. La naturaleza básica del efecto corona en líneas HVAC y líneas HVDC es el mismo, pero existen diferencias físicas en los mecanismos involucrados en el efecto corona AC o DC. Mientras que en las líneas AC, los iones creados por efecto corona están sometidos a un movimiento oscilatorio debido al cambio de polaridad que sufre la superficie del conductor, en las líneas DC, los iones que tienen la misma polaridad que el conductor, son alejados de él, mientras que los iones que tienen polaridad opuesta al conductor son atraídos hacia él, neutralizándose con el conductor en ambos casos.

Ruido audible

Las características del ruido audible (RA) y la radio interferencia (RI) creados por efecto corona en líneas DC, difiere significativamente del ruido audible (RA) y radio interferencia (RI) creado por líneas AC. Mientras en las líneas AC, las tres fases contribuyen con RA y RI, en las líneas DC sólo el polo positivo contribuye en ambos fenómenos. En las líneas DC, los niveles de RA y RI son menores bajo malas condiciones meteorológicas, al contrario de lo que sucede con líneas AC. Las dos condiciones antes mencionadas, juegan importantes roles en la predicción del comportamiento en cuanto a RI y RA de una línea DC y en el establecimiento de criterios de diseño en la elección del conductor de la línea.

Impacto visual

Cuando las líneas de alta tensión, en su trayecto, cruzan por zonas pobladas, parques nacionales, reservas y otros territorios donde la conservación de la flora y fauna natural es importante, existen demandas especiales sobre las dimensiones de las líneas de transmisión. Por ejemplo, el alto de las torres se suele igualar con el alto de los árboles, de manera que las torres estén visualmente ocultas. En algunos casos, ya sea por requerimientos estrictos de estética o protección de parques nacionales, se debe considerar la inserción de cables de poder en el proyecto de la línea, lo que lógicamente, eleva los costos de construcción. En otros casos, cuando sólo líneas aéreas son usadas, el largo de los vanos puede verse incrementado en algunos casos, lo que conlleva a la utilización de diferentes tipos de torres.

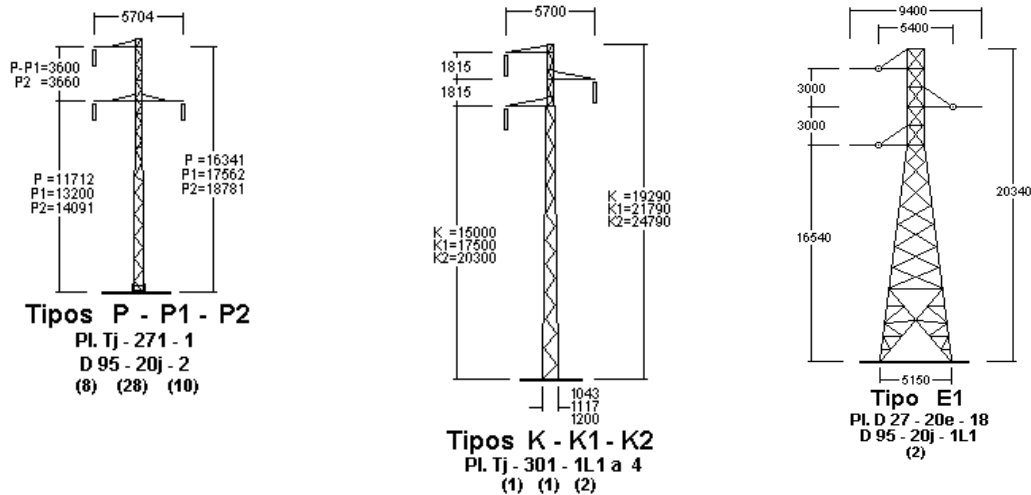


Figura 15: Diferentes tipos de torres usadas en una misma Línea HVAC

En este sentido, las líneas HVDC ofrecen una clara ventaja con respecto a las líneas tradicionales HVAC de la misma capacidad. Las estructuras de torres para un bipolo HVDC, al tener solo dos conductores, tienen un diseño más simple en comparación con una estructura trifásica de una línea HVAC.



Figura 16: Torres línea HVAC y HVDC

Para mitigar el impacto visual de las líneas de alta tensión, se pueden tomar las siguientes medidas:

- Consulta extensiva al público durante la etapa de definición de trazados de las líneas.
- Evaluación exacta en el cambio de valor de las propiedades por cercanía de la línea.
- Situar el trazado de las líneas considerando las vistas de los paisajes y rasgos de las comunidades y ambientes.
- Situar las torres de alta tensión en las zonas de menor población posible.
- Uso de cables subterráneos en zonas donde el trazado de la línea pasa por zonas residenciales o comerciales.

Corrientes por tierra y efectos de corrosión.

Tanto para los sistemas bipolares y monopoles de enlaces HVDC, es necesario proveer circuito de retorno. Existen muchos diseños de circuitos para ser usados en el retorno por tierra en el caso de operación asimétrica (caso de bipolos).

Para enlaces monopoles HVDC, el circuito de retorno se realiza por tierra. En el caso de una línea aérea operando después de la salida de emergencia de un polo, es posible el uso del cable de un polo de

emergencia como circuito de retorno. Incluso en estos casos, sin embargo, es necesario proveer la posibilidad del retorno por tierra de la corriente por algún tiempo. En algunos casos, un conductor especial adicional, que normalmente sirve como cable de guardia del enlace HVDC, ha sido usado para permitir la operación monopolar de los enlaces HVDC. Cuando el retorno de corriente se realiza por tierra, aparecen una serie de peculiaridades que deben ser consideradas en el diseño de los electrodos de puesta a tierra. La trayectoria de la corriente de retorno, usa todo el ancho del globo terráqueo, y su impacto ambiental en la superficie es limitado al área cercana a las instalaciones de puesta a tierra. Si existen conductores cercanos al área de puesta a tierra, como tuberías por ejemplo, las corrientes de retorno usan estos conductores. De esta manera, las infraestructuras metálicas sufren por efectos de electrocorrosión, cuyo nivel depende de la calidad de la aislación eléctrica que tengan y de las defensas especiales contra la corrosión, y por otro lado, de la magnitud de corriente que pase por el objeto. Los enlaces HVDC son mayoritariamente bipolares. Esta es la razón de que la operación monopolar de los enlaces tenga una naturaleza transitoria. Sin embargo, en todos los casos, excepto cuando se usa un conductor adicional, la operación monopolar no puede ser evitada, existiendo de manera permanente una corriente circulando a través de tierra. El valor de esta corriente se estima en aproximadamente un 1-3% de la corriente nominal del enlace. Los sistemas más complejos de puestas a tierra de SSEE HVDC existen, cuando la posibilidad del “retorno metálico” no ha sido considerada. En estos casos, los electrodos se sitúan a alguna distancia de la S/E, de manera de evitar la posibilidad de corrosión en los elementos metálicos subterráneos de la misma subestación. La instalación de puesta a tierra debe tener un diseño que no produzca voltajes de paso peligrosos en la zona del electrodo. Los electrodos están contruidos de materiales especiales, y medidas especiales son aplicadas en la tierra adyacente al electrodo, de manera que no pierda sus propiedades conductoras.

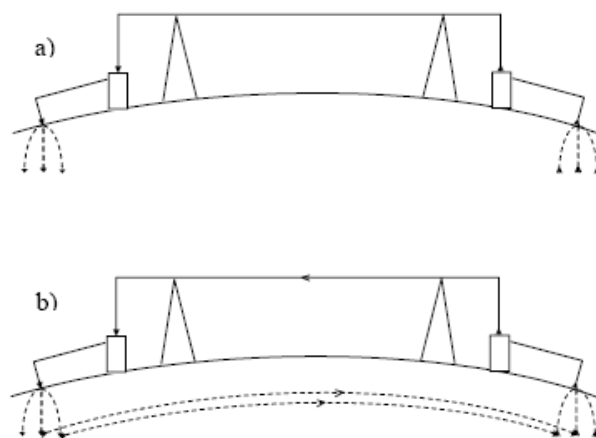


Figura 17: Sistema de puesta a tierra y retorno por tierra.

Efectos de campo eléctrico

El campo eléctrico producido por una línea de transmisión HVDC, corresponde a la combinación del campo electroestático producido por el voltaje de la línea con el campo eléctrico producido por el espacio cargado debido al efecto corona de la línea. La magnitud del campo eléctrico en la superficie del conductor depende no sólo del voltaje en sí, sino que además de la geometría del conductor. La intensidad máxima de campo eléctrico puede ser medida directamente bajo el conductor de la línea, y la intensidad aproximada para una línea monopolar o bipolar de 450 kV es de 21 kV/m a un metro sobre el nivel del suelo.

Diversas instituciones internacionales han realizado estudios de los efectos producidos en el ambiente por líneas aéreas de tecnología HVDC (un ejemplo de estos es el instituto de investigación de Hydro-Quebec) los cuales han mostrado que una persona bajo una línea de transmisión HVDC no muestra la misma incomodidad que siente típicamente al estar bajo una línea de transmisión HVAC. Estas incomodidades incluyen descargas de chispas de humanos a arbustos, pasto o vegetación. Estas descargas también ocurren en presencia de líneas de transmisión HVDC, las cuales, sin embargo, son mucho menos frecuentes que las causadas por HVAC (las cuales pueden llegar a 100 descargas por segundo a 50 Hz).

Subjetivamente, la sensación que percibe un humano bajo una línea HVDC, no va más allá del movimiento por estimulación electroestática en el pelo de la cabeza.

Un estudio con respecto a la habilidad de las personas de percibir campos eléctricos estáticos fue realizado en Canadá, en el cual voluntarios fueron expuestos a campos DC superiores a 50 kV/m y a densidades de corrientes iónicas de 120 nA/m². El resultado de este experimento, fue que el umbral promedio de detección fue de 45 kV/m. Altas densidades de corrientes iónicas fueron asociadas con una baja sensorial sustancial en la mayoría de los casos.

Adicionalmente, el hecho experimental que maquinaria grande con neumáticos de caucho no son cargadas eléctricamente a niveles peligrosos para un humano cuando están estacionadas bajo una línea de transmisión HVDC, debe ser considerado como un resultado significativo de la investigación. La resistencia eléctrica de los neumáticos de éstas maquinas (de alrededor de 10MΩ) es suficiente para prevenir la acumulación de carga peligrosa, incluso cuando la máquina se encuentra sobre asfalto seco. En el caso de líneas de transmisión HVAC, las corrientes capacitivas inducidas en máquinas grandes pueden ser letales en algunos casos.

Estos resultados, sugieren que los campos eléctricos bajo líneas HVDC no son lo suficientemente significativos ni peligrosos como para requerir niveles de exposición segura. La influencia del campo eléctrico producido por una línea HVDC en el ambiente, resulta ser muy limitada.

El grado de espacio cargado producto de la presencia de líneas HVDC es cambiante y difícil de predecir, debido a que es el resultado del efecto corona el cual depende, entre otros factores, de las condiciones del clima. La carga espacial presente en el campo DC produce un flujo de corriente iónica. El campo eléctrico total y la densidad de corriente iónica medida cerca de una línea de transmisión no es estática y puede ser descrita por parámetros estadísticos. Debido al carácter estadístico del impacto del campo eléctrico, existen diferentes aproximaciones usados para limitar los efectos de los campos eléctricos estáticos.

Los siguientes tipos de guías son usualmente usadas para limitar el impacto medio ambiental producido por los campos eléctricos estáticos.

- Límites impuestos en el campo eléctrico total producido por una línea DC por un cierto nivel de carga espacial.
- Límites impuestos separadamente para el campo electroestático y para la densidad de corriente iónica.

Las regulaciones rusas están diseñadas para asegurar la seguridad de las personas que trabajan en ambientes expuestos a campos DC, y en ellas se prescribes las regulaciones de tiempos de exposición mostrados en la siguiente tabla:

Field conditions	Time of exposure
$E=15\text{kV/m}$, $J=20\text{nA/m}^2$	$t=8\text{h}$
$E=15\text{-}20\text{kV/m}$, $J = 25 \text{ nA/m}^2$	$t=5\text{h}$
$E = 20 - 60 \text{ kV/m}$	$t = \frac{(E_m)^2}{(E - \beta J)^2} t_1 ; \beta = 0,25 \frac{\text{kVm}}{\text{nA}}$
$E_m = 60 \text{ kV/m}$	$t_1=1\text{h}$
$E > E_m$	-

In the Table above, E = electric field strength, and J = ion current density.

Basado en los valores establecidos en la tabla 18, los límites de magnitud de los campos y tiempos de exposición pueden ser derivados, lo cual corresponde a lo siguiente, la gente no puede estar en áreas de exposición por más de 8 horas y los límites son: $E = 15 \text{ KV/m}$ y $J = 20 \text{ nA/m}^2$.

Efectos de Campos Magnéticos

La intensidad del campo magnético que rodea una línea HVDC, como se vio en el capítulo uno, depende de la intensidad de corriente circulando por la línea y de la distancia desde el conductor. La densidad de flujo magnético decrece a medida que la distancia al conductor se incrementa mientras que el máximo valor para un sistema monopolar o bipolar no va más allá de $25 \mu\text{T}$. Este valor corresponde a una intensidad de corriente de 1 kA para un voltaje de operación usual de 450 kV , vale decir, una transferencia de 450 MW de potencia por el enlace. (El campo magnético natural de la tierra es del orden de $40 \mu\text{T}$).

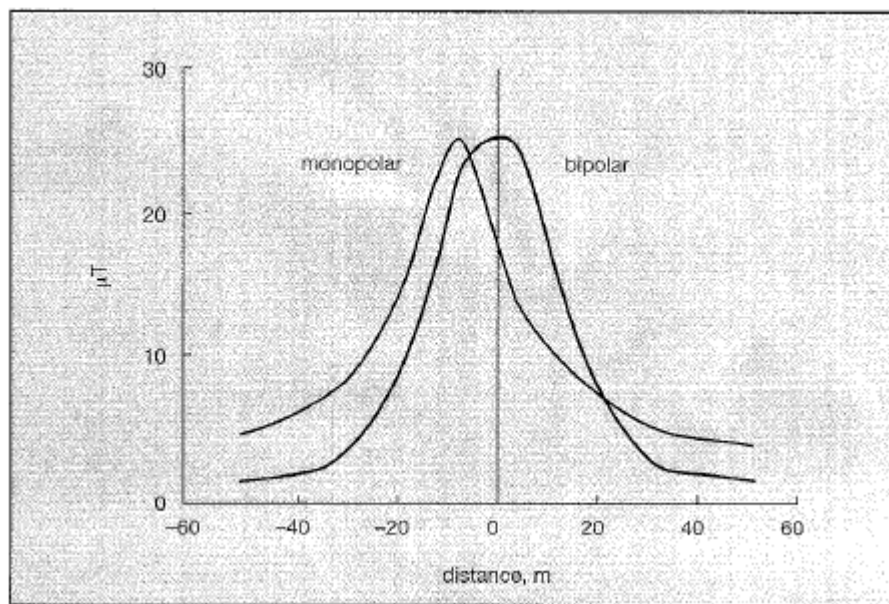


Fig. 18: Distribución típica de campo magnético para un enlace HVDC

El impacto en el ambiente producido por campos magnéticos provenientes de líneas de transmisión de tecnología HVDC ha sido menos estudiado que el caso de los campos eléctricos. Los campos magnéticos producidos los sistemas HVDC no producen al parecer efectos perceptibles. El campo magnético producido por los sistemas HVDC tienen las mismas magnitudes que los producidos por la Tierra.

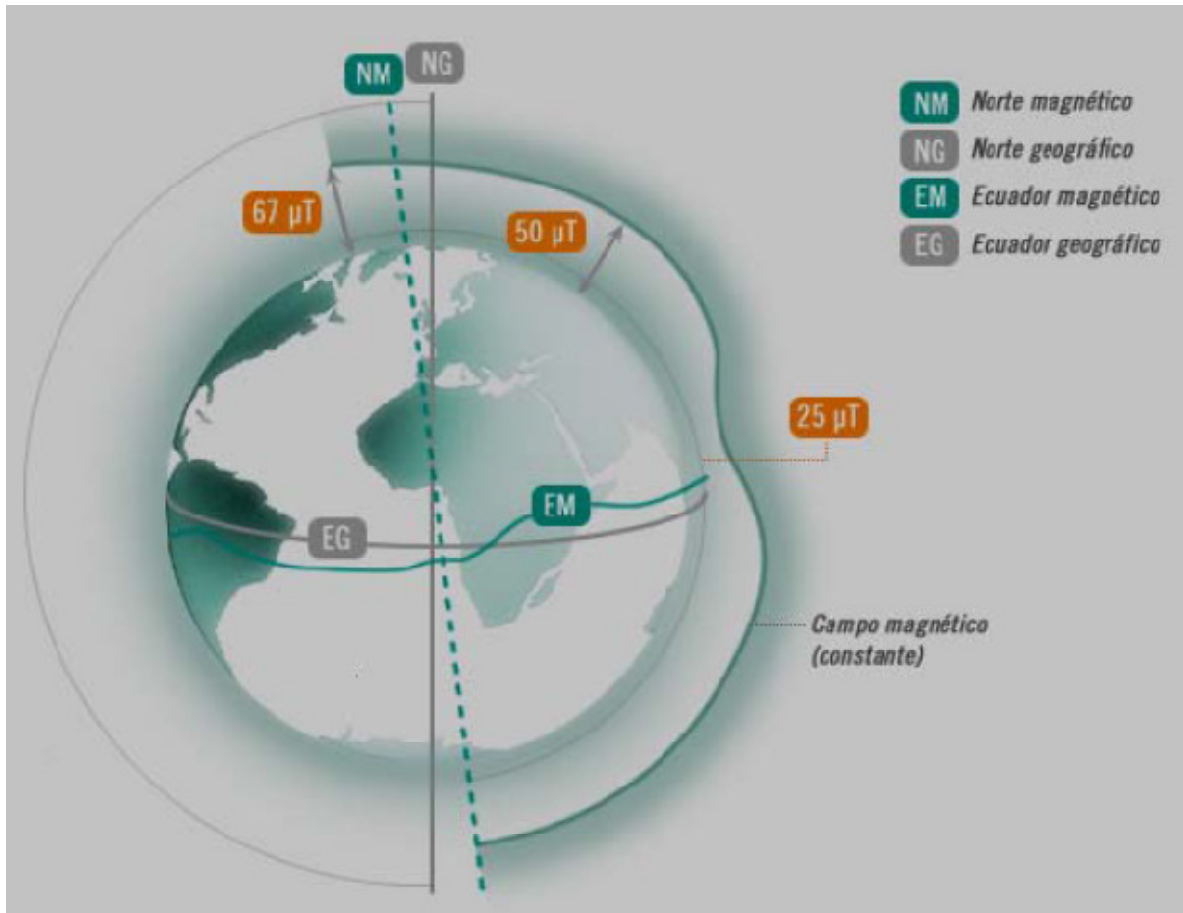


Fig. 19: Valores típicos de campos magnéticos naturales producidos por nuestro planeta.

Fuentes de campos magnéticos y niveles.

El campo magnético estático natural de la tierra tiene una magnitud promedio de $50 \mu\text{T}$, variando, según la localidad geográfica, de 30 a $70 \mu\text{T}$. Densidades de flujos magnéticos del orden de $20 \mu\text{T}$ son producidos por líneas de alta tensión HVDC. Esta es una cantidad sumamente baja si se contrasta por ejemplo con las densidades de flujo magnético producido por algunos diseños de trenes magnéticos levitadores.

La exposición a campos magnéticos estáticos más altos, pueden ocurrir cuando una persona es sometida a exámenes de resonancia magnética MRI, donde los campos magnéticos pueden alcanzar valores de entre 0.15 a 2 T, pero la exposición no supera los 0.5 horas.

Otras fuentes de campos magnéticos estáticos importantes corresponden a sistemas de alta energía como reactores termonucleares, sistemas magneto hidrodinámicos, superconductores, sistemas de transmisión y distribución DC.

Otras industrias donde puede ocurrir exposición a campos magnéticos fuertes, son aquellas que involucran procesos de electrólisis como la producción de aluminio y manufacturación de magnetos y materiales magnéticos.

Mecanismos de Interacción

Los tres mecanismos físicos establecidos a través de los cuales los campos magnéticos estáticos interactúan con los tejidos vivos son los siguientes: Inducción Magnética, fuerzas magnéticas e interacción electrónica.

Inducción magnética. Este mecanismo se origina a través de los siguientes mecanismos de interacción:

Interacción electrodinámica con electrolitos móviles.

Los campos magnéticos estáticos ejercen fuerzas de Lorentz sobre cargas iónicas móviles. Esta interacción es la base de los potenciales inducidos magnéticamente en el fluido sanguíneo, que ha sido estudiado tanto en campos electromagnéticos variables en el tiempo como estáticos.

Corrientes de Faraday.

Los campos magnéticos variables en el tiempo inducen corrientes en los tejidos orgánicos, de acuerdo a la ley de Faraday de inducción. Este mecanismo también puede presentarse en zonas donde existen campos magnéticos estáticos, debido al movimiento de las personas en él.

Efectos magneto-mecánicos. Los dos tipos de efectos magneto-mecánicos que los campos magnéticos estáticos pueden ejercer sobre tejidos biológicos son los siguientes.

Magneto orientación.

En un campo magnético uniforme estático, las moléculas paramagnéticas y diamagnéticas experimentan un torque que tiende a orientarlas de tal forma de minimizar la energía libre dentro del campo. Existen

ciertos tipos de macromoléculas de estos tipos que forman los arreglos de fotopigmentos de la retina. *Translación Magneto-mecánica*. Este efecto es más importante en materiales magnéticos. Debido a que en los tejidos biológicos, la cantidad de estas partículas es casi nula, su efecto es despreciable.

Consideraciones para exposición en la población.

Las recomendaciones de exposición a campos magnéticos estáticos, son diferentes para la población en general que para los trabajadores de instalaciones eléctricas. Esto es debido a que la población trabajadora de instalaciones eléctricas consiste en adultos expuestos bajo condiciones controladas, los cuales han sido entrenados para estar alerta a los posibles riesgos y tomar las precauciones necesarias. El público general consiste en gente de todas las edades y de diversas condiciones de salud. En muchas instancias, los miembros del público general no están al tanto que están siendo expuestos a campos magnéticos, y en la mayoría de los casos, ignoran los posibles riesgos que la exposición conlleva. Además, el público general puede estar expuesto las 24 horas del día, y durante toda la vida.

Derivación de los límites de exposición de campos magnéticos estáticos.

El conocimiento científico actual no sugiere ningún efecto perjudicial en los parámetros de comportamiento, fisiológicos o de desarrollo de organismos superiores para una exposición transiente a campos magnéticos estáticos por sobre los 2 [T].

De los análisis de los mecanismos de interacción entre el cuerpo humano y los campos magnéticos estáticos, se desprende que la exposición de largo plazo a campos magnéticos cuyas densidades de flujo sean de 200 [mT], no deberían tener efectos adversos sobre la salud.

El movimiento de una persona en un campo de 200 [mT], resultará en una densidad de corriente de entre 10-100 [mA/m²] (asumiendo un loop de 30 [cm] de radio y una conductividad del tejido de 0.2 [S/m]).

Se considera que estos valores de densidad de corriente, de frecuencias inferiores a 10 [Hz], no crean efectos adversos en las funciones del sistema nervioso central. Estos valores son consistentes con los

valores límites propuestos por IRPA/INIRC para campos electromagnéticos de frecuencias industriales (50-60 Hz).

Límites de exposición propuestos por ICNIRP.

Límites laborales.

Las personas del ámbito laboral relacionado con exposición a campos magnéticos, puede estar expuesto a una densidad de flujo magnético no superior a los 200 [mT]. El valor tope se exposición, está limitado a 2 [T]. Para las extremidades, un valor de 5 [T] puede ser permitido.

Público general.

Los miembros de la comunidad en general, no deberían estar expuestos en forma permanente a campos magnéticos cuya densidad de flujo supere los 40 [mT]. Los accesos a lugares donde las densidades de campo magnético superen los 40 [mT] pueden ser permitidos bajo condiciones apropiadas de control. En todo caso, los límites laborales no deben ser superados.

Características de exposición	Densidad de flujo magnético
Público Laboral	
Día completo de trabajo	200 [mT]
Valor máximo	2 [T]
Extremidades	5 [T]
Público general	
Exposición continua	40 [mT]

Tabla 14: Límites de exposición para campos magnéticos estáticos.

Capítulo 8

Mediciones de Campos Magnéticos en instalaciones de media tensión.

Descripción del equipo de medida.

En el presente capítulo, se mostrarán los resultados de las mediciones tomadas en instalaciones de media tensión, con el fin de conocer y reportar los valores de campo magnético que se producen en lugares de medias tensiones y altas corriente, lugares de los cuales se sospecha un valor elevado de campo magnético.

Para la toma de medias se utilizará el equipo EMDEX II, fabricado por la empresa ENERTECH, facilitado por la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, instrumento del cual se describirán sus principales características a continuación.



Figura 20: Equipo de medida EMDEX II.

EL EMDEX II es un equipo programable de medida y adquisición de datos, el cual posee una naturaleza de carácter "Tri-Axial", capaz de medir de manera independiente las componentes x, y y z del campo magnético.

Por otra parte, el EMDEX II es capaz de obtener la intensidad de corriente eléctrica y la componente vertical de campo eléctrico, mediante el uso de dos elementos:

- **Amp Logger:** Corresponde a un medidor de corriente tipo tenaza, con el cual es posible medir la corriente circulante por un conductor en forma simultánea mientras es realizada la medida de campo magnético.



Figura 21: Accesorio del EMDEX II, Amp-Logger.

- **E – Probe:** Es un sensor de campo eléctrico diseñado para realizar medidas con el EMDEX II constituido por dos placas de aluminio, calibradas para producir una corriente inducida que luego es medida por el EMDEX II y convertirla en una medida de campo eléctrico equivalente. El E – Probe tiene un rango de lecturas de 10 a 13000 V/m, con una exactitud de +/- 5% y una resolución de 1 V/m. El E-Probe adicionalmente adjunta un bastón de fibra de vidrio aislante, de manera que la presencia del cuerpo humano de la persona que realiza las medidas, no intervenga con la medida obtenida por el instrumento.



Figura 22: Accesorio del EMDEX II, E-probe.

El EMDEX II es capaz de almacenar los valores de medida en su memoria interna, valores que pueden ser traspasados al computador mediante el puerto serial RS232, para luego procesarlos, analizarlos y desplegarlos mediante un programa especializado llamado EMCALC2000. El EMDEX II es un dispositivo

pequeño, del tamaño de un teléfono celular antiguo (16.8 x 6.6 x 3.8 cm). El dispositivo EMDEX II tiene una pantalla digital en su cara frontal, lo que permite tener una lectura de las medidas que toma el dispositivo.

Características del Emdex II

Entre las principales características que presentan el EMDEX II y el Software EMCALC 2000, se encuentran los siguientes:

- Compatible con Windows 95, 98, 2000, XP y NT.
- Transmisión de datos por el puerto serial del computador, mediante el COM 1 al COM 4.
- Permite el análisis de las componentes x, y, z en conjunto y por separado.
- Permite agregar marcas personales a las gráficas obtenidas.
- Permite copiar datos en hojas de cálculo y gráficos en el clipboard de Windows.
- Permite enviar los datos obtenidos a cualquier impresora instalada en Windows.
- Datos presentados entendibles a simple vista.
- Presentación de los datos en 2D o 3D, con datos múltiples o simples.
- Existe una barra indicadora en el instrumento, el cual indica el estado de la transmisión de datos mientras se comunica con el computador.
- Posee herramientas indicativas sobre las medidas, como barras con etiquetas.
- Los parámetros como las unidades del campo magnético, campo eléctrico o constantes de calibración son guardados en los sets de datos.

Especificaciones Del Hardware del Emdex II

A continuación se presentará un listado con las principales características del hardware que posee el equipo de medida EMDEX II:

- Dimensiones: 16.8 x 6.6 x 3.8 cm.
- Peso: 784 gr. Sin batería.
- Temperatura de operación: 0 – 60°C.
- Humedad de operación: Entre 0 – 95 %.
- Voltaje utilizado: 9 V.

- Modos de operación:
 - Normal: Datos de la muestra se guardan en la memoria.
 - Inspección: Sólo se despliegan los valores en la pantalla LCD.
- Tipos de datos:
 - Resultante rms del campo magnético – Frecuencia Fundamental.
 - Resultante rms del campo magnético – Frecuencias armónicas.
 - Campo eléctrico equivalente.
- Computadora incorporada: Tattletale Modelo V.
- Memoria: 156 Kb CMOS – RAM (512 Kb de memoria disponible para expansión).
- Resolución de A/D: 0.1% a escala completa (10 bit de resolución).
- Intervalos de muestra:
 - Máximo: 1 muestra por 1.5 segundos.
 - Mínimo: 1 muestra por cada 327 segundos.
- Sensores: Tres bobinas sensoras de campos magnéticos orientadas ortogonalmente entre ellas.
- AUX Jack: Diseñado para aceptar una señal de un sensor externo de campo eléctrico u otro sensor especial. Entrada máxima: 0.99 mA.
- Jack REMOTO: Diseñado para enviar una transición baja/alta al contador del computador modelo V, cuando los aumentos de resistencia de entrada van desde 100 Ω a 1000 Ω .
- Ancho de banda:
 - Frecuencia fundamental: 40-800 Hz
 - Frecuencias armónicas: 100-800 Hz
- Respuesta de frecuencia :
 - Ancho de banda: la variación total de +/- 30% más el rango completo.
 - Armónicas: 100 Hz: +10% a -45%
 120 Hz: +25% a -30%
 150 Hz: +25% a -0%
 180 – 800 Hz: +25% a -25%
- Rechazo de campo a bajas frecuencias:
 - Señal de 10 Hz: Mayor que 1000 a 1.
 - Señal de 2 Hz: Mayor que 106 a 1.
- El rango del Campo Magnético resultante se muestra en la tabla 15.

Modo Normal	Modo de alto campo	
0.1- 3000 mG	4-120000 mG	Típico +/- 3%. Peor Caso +/- 10%
0.01-300 μ T	0.4-12000 μ T	Típico +/- 3%. Peor Caso +/- 10%

Tabla 15: Ancho de banda del campo magnético resultante.

- Campo Eléctrico equivalente:
 - Exactitud típica: +/- 5% más la exactitud del sensor.
 - La peor exactitud del caso: +/- 15% más la exactitud del sensor.
- Método de medida: La verdadera medida RMS (con el factor de cresta).
- Error del factor de cresta:
 - El factor de cresta es 2:1 Adicional +/- 2%.
 - El factor de cresta es 3:1 Adicional +/- 5%.

Nota: El factor de cresta de una señal periódica es proporcional a su cresta (Peak, máximo) y es su raíz media cuadrática (el rms).

Errores de temperatura: Las lecturas variarán no más de +/- 2% por 10°C para cambio de temperatura en el rango 0°C a 50 °C.

Software Utilizado Por Emdex II

La interfaz entre el equipo EMDEX II y la persona que realiza las mediciones, consiste en el Software llamado EMCALC2000, el cual permite interpretar las mediciones hechas por el equipo de una manera amigable y fácil. El Software EMCALC2000 es un programa que corre bajo la plataforma Windows y comunica el equipo EMDEX II con el computador en forma serial a través de un cable conector RJ11 (para conectar al instrumento) y RS232 (para conectar al computador), logrando de esta manera la comunicación.

EMCALC2000.

El software constituye una poderosa herramienta, el cual posee diversas funciones, entre las que destacan las descritas a continuación:

- Obtención de gráficos con los sets de datos obtenidos por el medidor EMDEX II. Este procedimiento se efectúa bajando los datos del medidor al computador, el cual los procesa a través del Software, obteniéndose los gráficos automáticamente.
- Tiene la opción de realizar una diferenciación de los eventos mediante etiquetas, lo cual se realiza en el programa solamente colocando etiquetas a los eventos, los cuales están identificados mediante el número de muestra.
- Descripciones estadísticas automáticas (mínimo, máximo, promedio, desviación estándar).
- Para el instrumento se pueden graficar tanto campos magnético v/s tiempo, como las tres componentes del campo en el espacio, gracias a las bobinas que equipan el instrumento, orientadas ortogonalmente entre sí.
- Permite ver los datos obtenidos tanto en forma gráfica como en tabla, además de poder ver los gráficos en forma ASCII, lo cual permite observar los datos como fueron obtenidos por el instrumento.

El EMCALC2000 al procesar los datos obtenidos por en EMDEX II, permite desplegar la información mediante una amplia gama de gráficos, entre los cuales destacan campo magnético en función del tiempo, campo magnético en función de la distancia, gráficos en 3 dimensiones, gráficos de curvas de nivel de campos, etc.

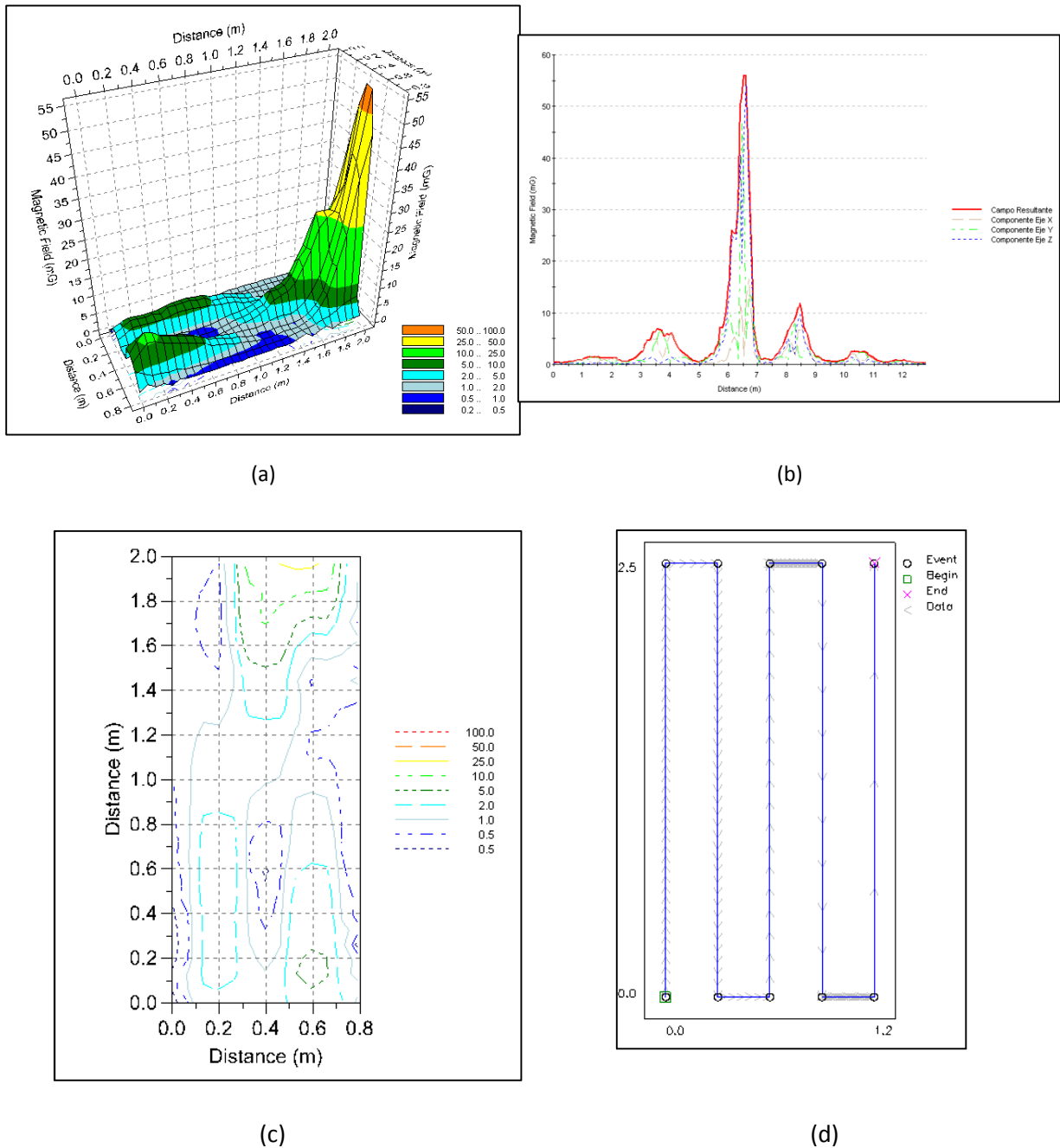


Figura 23: Gráficos posibles de obtener en programa Emscalc2000, en (a), gráfico de campos en 3D, en (b) gráfico de campos v/s distancia, en (c), gráfico de curvas de nivel o isocampos, en (d), estrategia de mapeo en 3D.

REQUISITOS PARA LA INSTALACIÓN DEL SOFTWARE EMCALC2000

Requerimientos de Software

- Windows 95, 98, 2000, XP o Windows NT

Requerimientos de Hardware

- Pentium 166 MHz
- 64 Mb RAM
- 15 Mb Disco duro.
- 256 colores en video como mínimo
- Impresión Laser o Color.

De más está decir que cualquier computador moderno cumple con estos requisitos mínimos.

Para el efecto del presente trabajo, se cuenta con un computador DELL facilitado por la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, el cual tiene instalado el Software EMCALC2000, cuyas características son las siguientes:

- Procesador Pentium Celeron de 266 Mhz.
- 32 Mb de memoria RAM.
- 4 Gb de disco duro.
- Puertos RS232, paralelo y USB

Este computador está destinado a uso exclusivo con el medidor EMDEX II.

Mediciones realizadas en S/E Lord Cochrane, Chilectra.

A continuación se presentarán una serie de mediciones tomadas en la S/E Lord Cochrane de propiedad de Chilectra. La S/E Lord Cochrane cuenta con dos transformadores de 110/12,5 kV, con una potencia de transformación de 44.7 MVA por transformador, además de transformadores de Servicios auxiliares de 12/0.4 kV. La S/E Lord Cochrane es alimentada desde S/E Renca y S/E Ochagavia, y tiene una conexión directa a través de cables de poder con la S/E Metro, alimentando el sistema 110/20 kV de la red Metro. Además, la S/E Lord Cochrane dispone de una serie de arranques en 12 kV, alimentando varias zonas de la zona centro de Santiago.

Es de particular interés disponer de mediciones en esta S/E, ya que presenta un ejemplo claro de bajo voltaje y altas corrientes, de manera que se sospecha la presencia de altos campos Magnéticos.

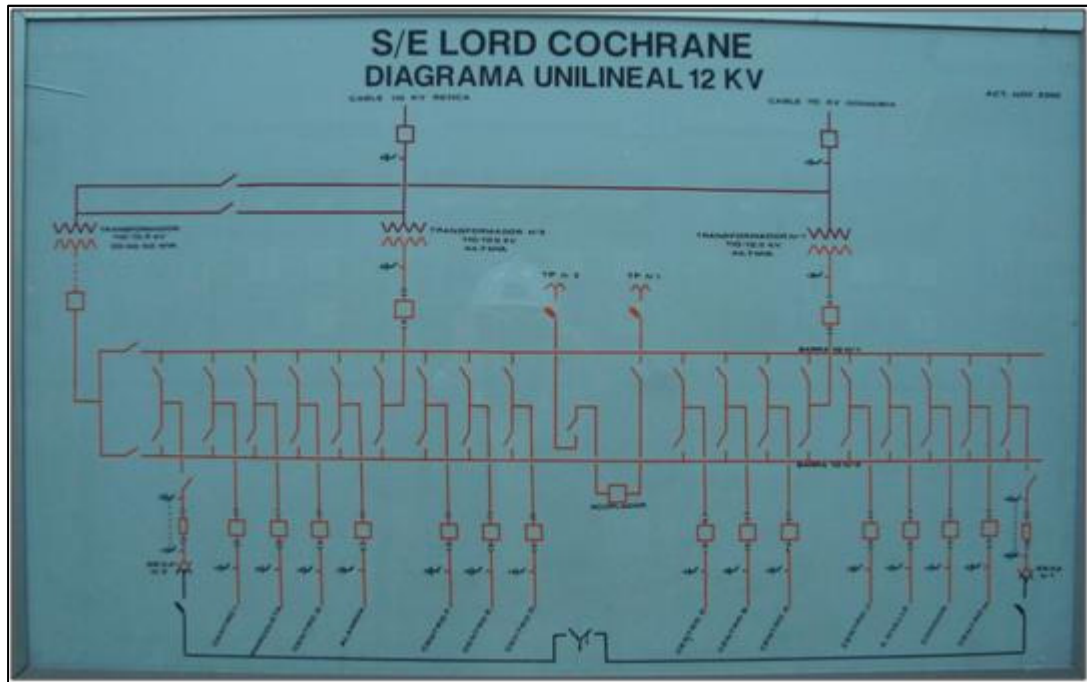


Figura 24: Diagrama unilineal S/E Lord Cochrane, Chilectra.

Medida 1: Sala de alimentadores

La primera medición fue llevada a cabo en la sala de alimentadores, obteniéndose mediciones por delante de los paneles de alimentadores, por detrás de los paneles de alimentadores y por delante del transformador de servicios auxiliares de 12/0.4 kV.

Para estas medidas se obtuvieron gráficos en formato campo versus distancia y campo magnético en tres dimensiones.



(a)



(b)

Figura 25: Mediciones en paneles de alimentadores 12 kV, (a): delante de alimentadores, (b), detrás de alimentadores.

Medidas delante de alimentadores:

En la figura 26 se presenta la gráfica de campo magnético v/s distancia. Se aprecia que en la mayoría del trayecto el campo magnético medido se mantiene en torno a los 5 μT , alcanzando un peak de 369.6 [mG] en las proximidades del transformador auxiliar de 12/0.4 [kV]. Estas medidas se encuentran al menos un orden de magnitud por debajo de los valores establecidos en las normativas presentadas, con excepción de la zona peak.

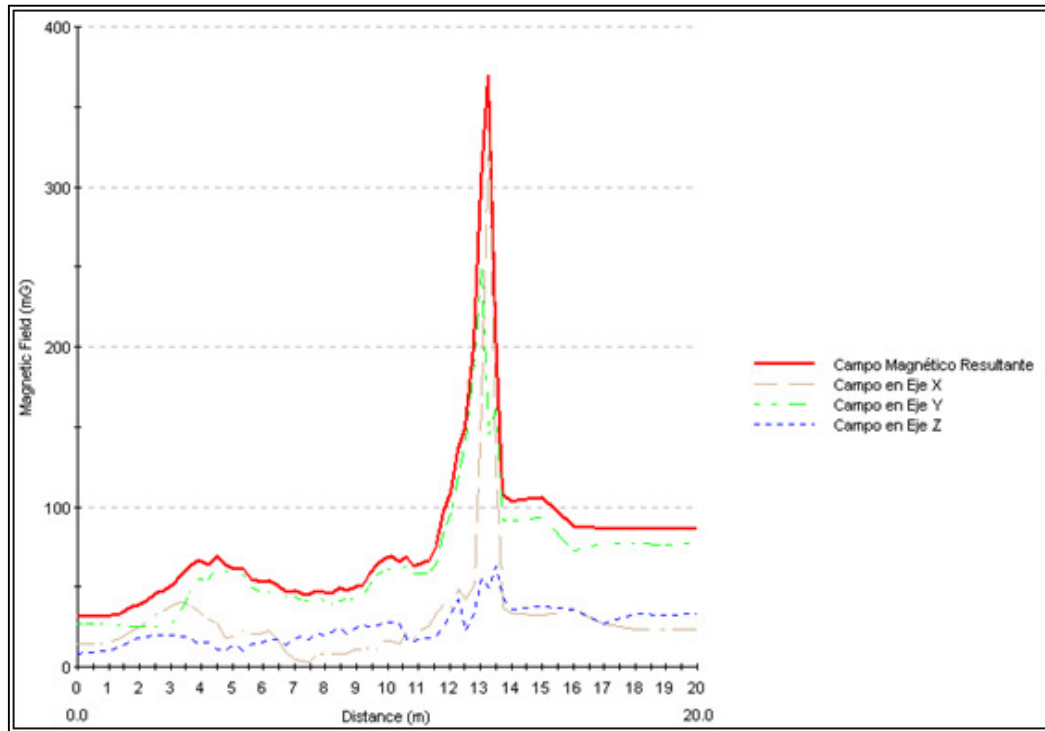


Figura 27: Gráfica de magnitud de campo magnético v/s distancia

Estadísticas Medición.

En la tabla 16 se muestran las estadísticas de la presente medida. Se observan valores de campo por debajo de las normativas vigentes. Las medidas tienen unidades de [mG].

	Mínimo	Máximo	Promedio
Campo Resultante	31.5	369.6	76.9
Campo eje X	2.5	337.6	31.71
Campo eje Y	24.7	248	62.83
Campo eje Z	8.3	62.4	22.86

Tabla 16: Estadísticas mediciones.

Medidas detrás de alimentadores:

En la figura 27 se presenta la gráfica de campo magnético v/s distancia. Se aprecia que en la mayoría del trayecto el campo magnético medido se mantiene en torno a los 160 [mG], alcanzando un peak de 251.2 [mG] en las proximidades del transformador auxiliar de 12/0.4 [kV]. De todas maneras estas medidas se encuentran por debajo de los valores establecidos en las normativas presentadas.

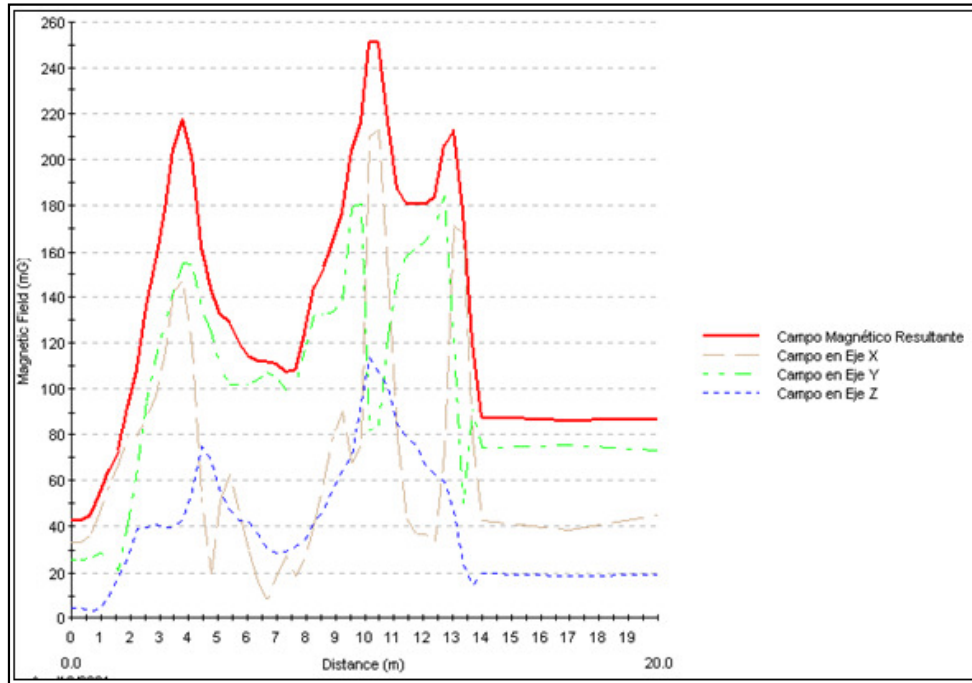


Figura 28: Gráfica de magnitud de campo magnético v/s distancia

Estadísticas Medición.

En la tabla 17 se muestran las estadísticas de la presente medida. Se observan valores de campo por debajo de las normativas vigentes. Las medidas tienen unidades de [mG].

	Mínimo	Máximo	Promedio
Campo Resultante	42.3	251.2	143.91
Campo eje X	8.3	212.8	71.24
Campo eje Y	21.1	184	106.7
Campo eje Z	2.7	113.6	45.82

Tabla 17: Estadísticas mediciones.

Medidas en transformador de 12/0.4 kV.

Del gráfico de mediciones delante de alimentadores, se advierte que en la zona cercana al transformador de 12/0.4 kV existen campos magnéticos por sobre el promedio de los perfiles lineales de los alimentadores. Por esta razón se realizó un mapeo en tres dimensiones de los campos presentes delante del transformador, obteniéndose los siguientes resultados:

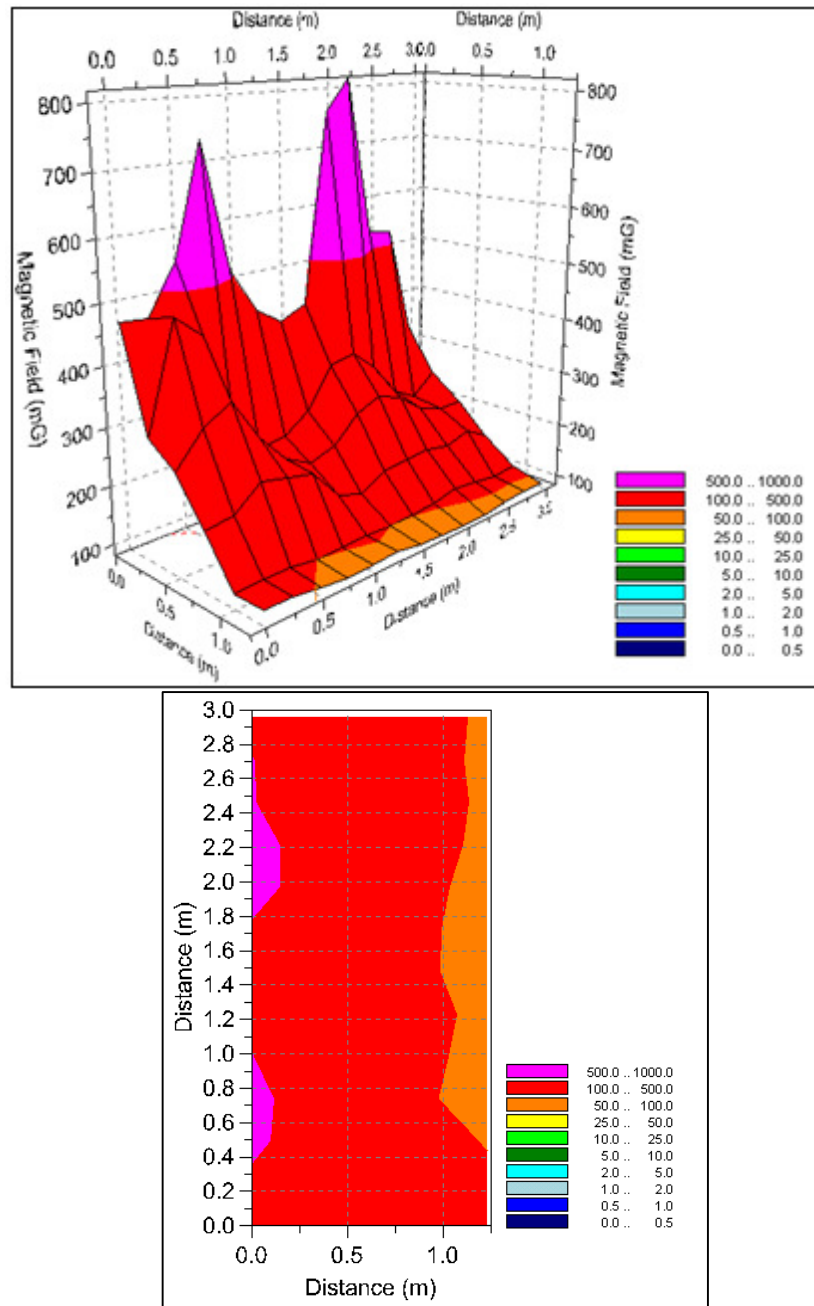


Figura 29: Gráfica de magnitud de campo magnético en 3D.

Estadísticas Medición.

En la tabla 18 se muestran las estadísticas de la presente medida. Se observan valores de campo por debajo de las normativas vigentes. Las medidas tienen unidades de [mG].

	Mínimo	Máximo	Promedio
Campo Resultante	82.3	817.6	239.92
Campo eje X	22.9	513.6	165.96
Campo eje Y	4.1	680	142.06
Campo eje Z	8.9	193.6	47.88

Tabla 18: Estadísticas mediciones.

Medida 2: Equipos aislados en SF6.

El siguiente set de medidas fue tomado en la sala de equipos de 110 kV aislados en SF6. El interés de esta sala se centra en la obtención de medidas de campos en las zonas cercanas a los cables de poder de 110 kV que se muestran en la figura a continuación:



Figura 30: Cables de poder 110 kV.

Resultados medida cables de poder.

En la siguiente gráfica 3D, se muestran las magnitudes de campos magnéticos en las proximidades de los cables de poder. Se pueden apreciar magnitudes relativamente altas de campos, las cuales en su valor máximo alcanzan los 1.78 [G], el cual, se encuentra por sobre los valores recomendados por la normativa presentada para publico general (1G), aunque inferiores a los valores definidos para nivel ocupacional (5G).

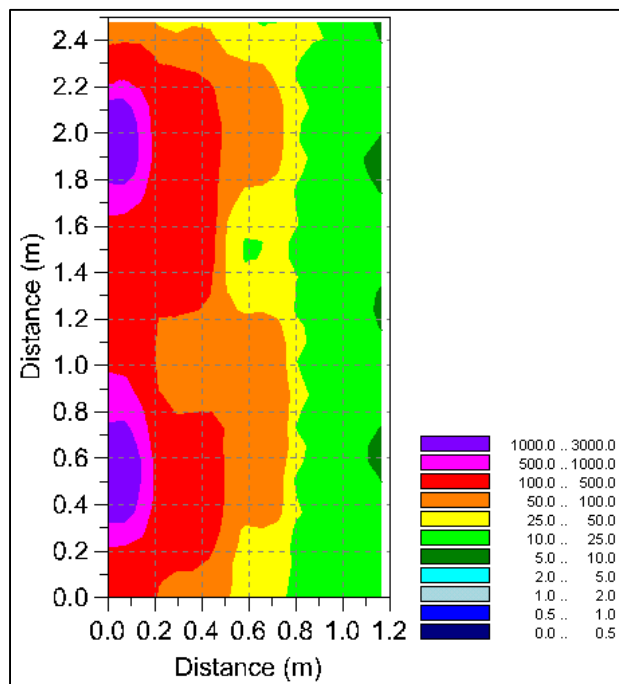
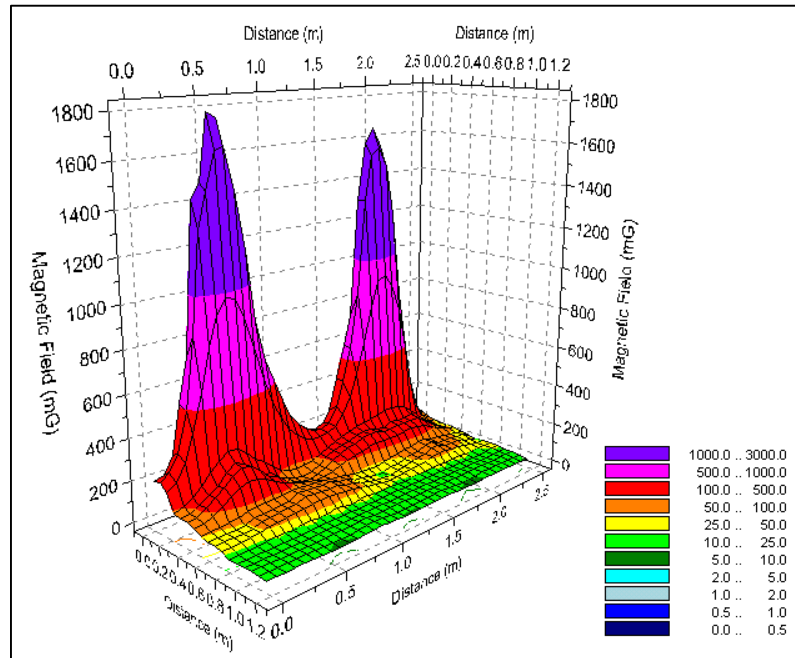


Figura 31: Gráficas de campos 3D para cables de poder 110 kV.

Estadísticas Medición.

En la tabla 19 se muestran las estadísticas de la presente medida. Se observan valores de campo por debajo de las normativas vigentes para nivel ocupacional (5000 mG). Las medidas tienen unidades de [mG].

	Mínimo	Máximo	Promedio
Campo Resultante	8.3	1784	214.51
Campo en X	5.1	1361.6	145.64
Campo en Y	1.3	1150.4	114.35
Campo en Z	1.1	1179.2	81.28

Tabla 19: Estadísticas mediciones.

Medida 3: Cables de poder 110 kV

La siguiente medida fue obtenida en una sala justo debajo de la sala de 110 kV en SF6, la cual se muestra en la figura a continuación:



Figura 32: Sala bajo sala de 110 kv Gis.

Resultados medida.

En la siguiente gráfica 3D, se muestran las magnitudes de campos magnéticos en las proximidades de los cables de poder. Se pueden apreciar magnitudes relativamente altas de campos, las cuales en su valor máximo alcanzan los 3.4 [G], el cual, se encuentra por debajo de los valores recomendados por la normativa presentada a nivel ocupacional (5G).

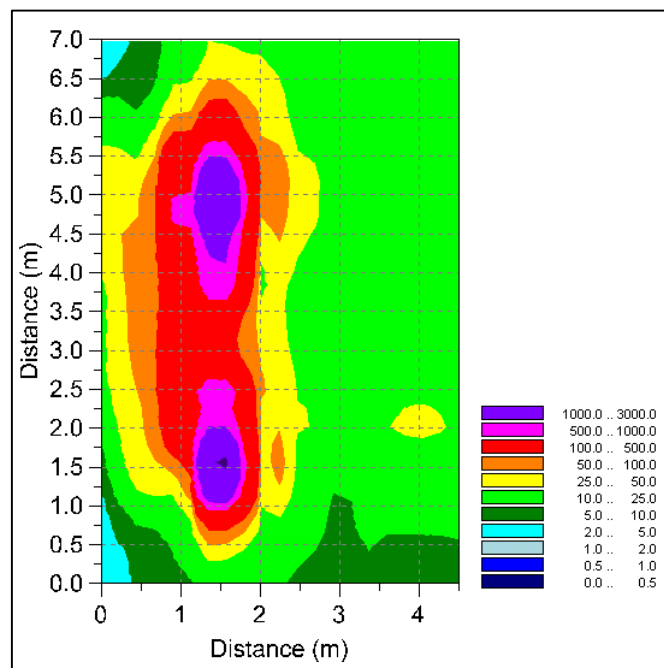
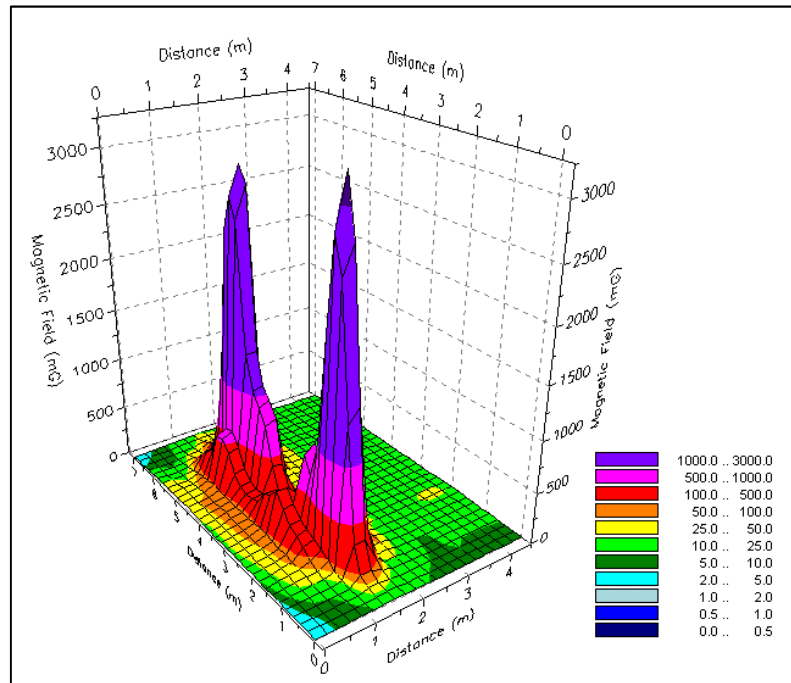


Figura 33: Gráficas de campos 3D para cables de poder 110 kV.

Estadísticas Medición.

En la tabla 20 se muestran las estadísticas de la presente medida. Se observan valores de campo por debajo de las normativas vigentes presentadas de nivel ocupacional. Las medidas tienen unidades de [mG].

	Mínimo	Máximo	Promedio
Campo Resultante	2.87	3419.2	125.52
Campo en X	0.41	2756.8	91.79
Campo en Y	0.51	2273.6	62.63
Campo en Z	0.61	1140.8	37.19

Tabla 20: Estadísticas mediciones.

Medida 4: Alimentadores 12 kV

La siguiente medida fue realizada en la sala que contiene los alimentadores de 12 kV, mostrados en la siguiente fotografía:



Figura 34: Sala de alimentadores de 12 kV.

Resultados medida:

En la siguiente gráfica 3D, se muestran las magnitudes de campos magnéticos en las proximidades de los cables de poder. Se pueden apreciar magnitudes relativamente altas de campos, las cuales en su valor máximo alcanzan los 3.4 [G], el cual, se encuentra por debajo de los valores recomendados por la normativa presentada a nivel ocupacional (5 [G]).

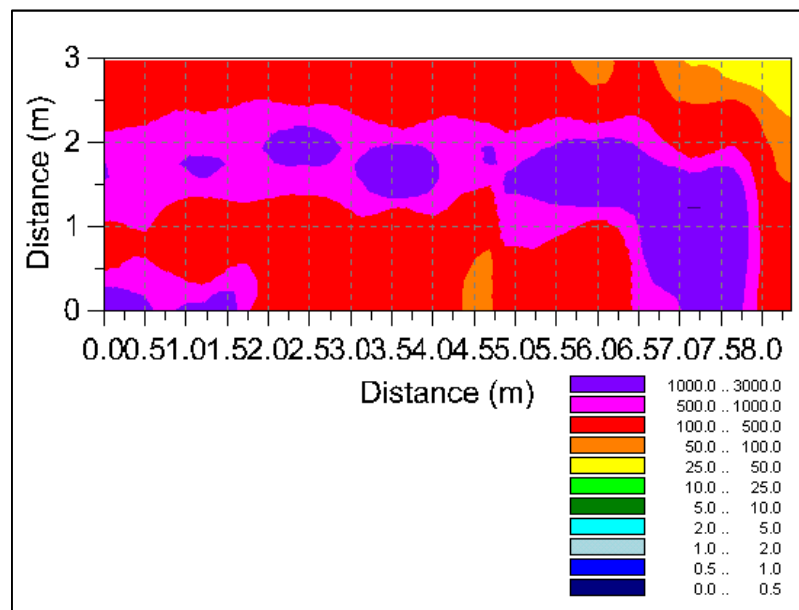
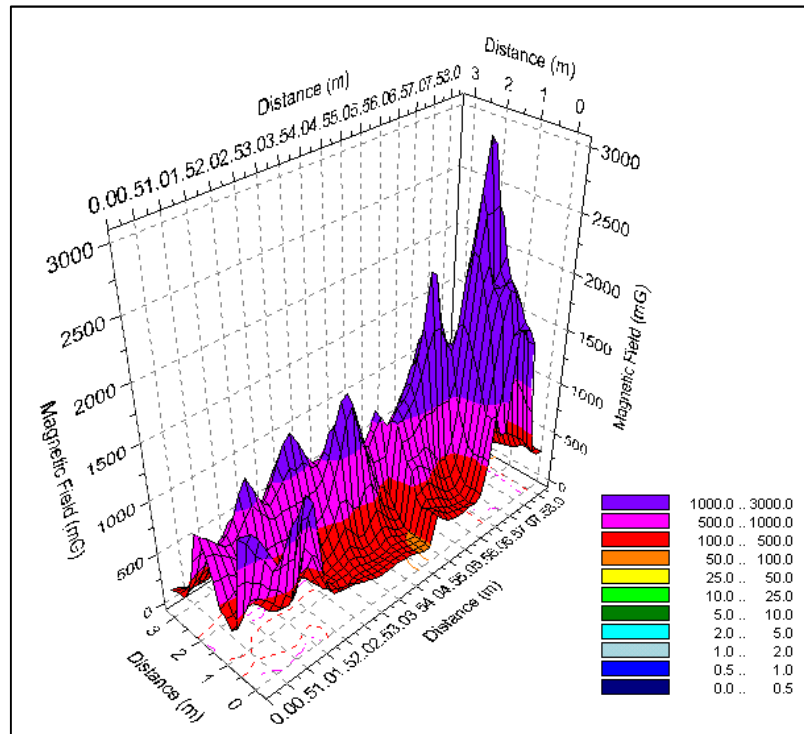


Figura 35: Gráficas de campos 3D para alimentadores de 12 kV.

Estadísticas Medición.

En la tabla 21 se muestran las estadísticas de la presente medida. Se observan valores de campo por debajo de las normativas vigentes a nivel ocupacional. Las medidas tienen unidades de [mG].

	Mínimo	Máximo	Promedio
Campo Resultante	33.7	3086.4	502.12
Campo en X	15.9	2689.6	210.2
Campo en Y	23.3	1992	251.92
Campo en Z	14.5	1489.6	272.08

Tabla 21: Estadísticas mediciones.

Medida 5: Perímetro S/E Lord Cochrane

El siguiente conjunto de medidas, fue realizado en los bordes periféricos de la S/E Lord Cochrane, con el fin de conocer los posibles campos magnéticos que puedan ser emanados desde esta subestación hacia la vía pública.

Para la toma de medidas, se usaron las trayectorias que se muestran en la figura a continuación:



Figura 36: Vista satelital S/E Lord Cochrane y trayectoria usada para tomar las mediciones.

Los resultados obtenidos para las mediciones de campo magnético son los siguientes:

Resultados Medida:

Mediciones tomadas en sentido Norte-Sur, por el lado poniente de la subestación. Se aprecian niveles de campo de baja intensidad, por debajo de la normativa presentada para público general (1 [G]).

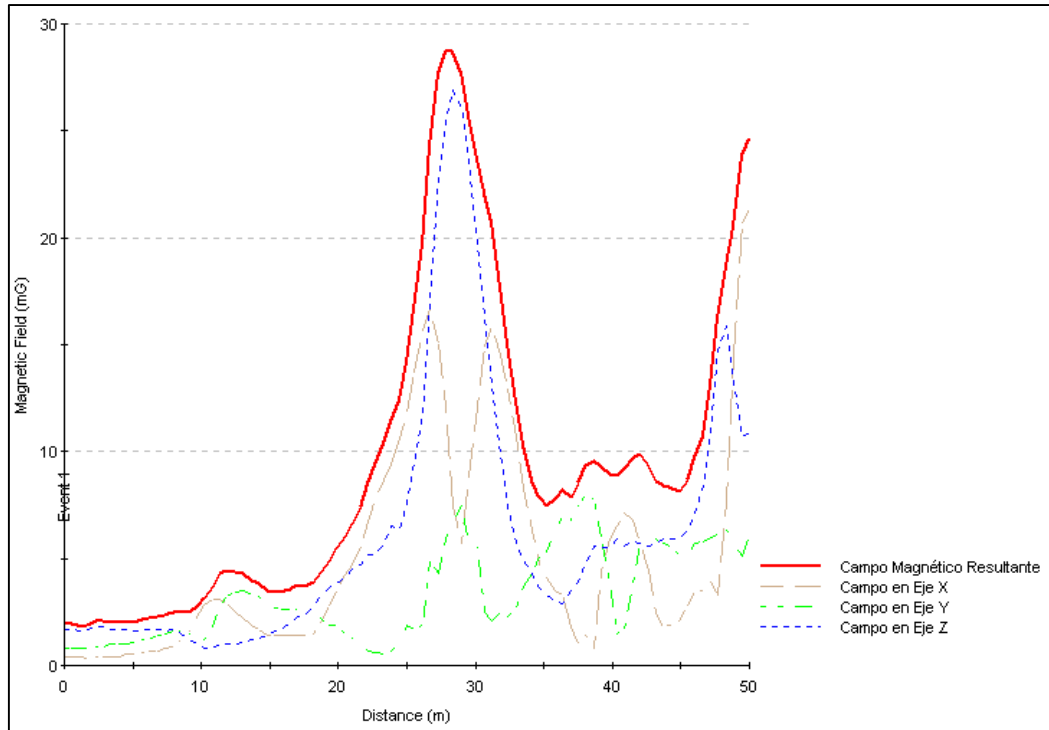


Figura 36: Grafica de magnitud de campo magnético v/s distancia.

Estadísticas Medición.

En la tabla 22 se muestran las estadísticas de la presente medida. Se observan valores de campo por debajo de las normativas vigentes. Las medidas tienen unidades de [mG].

	Mínimo	Máximo	Promedio
Campo Resultante	1.84	28.7	9.43
Campo en X	0.31	21.3	5.2
Campo en Y	0.51	7.91	3.34
Campo en Z	0.81	26.9	6.17

Tabla 22: Estadísticas mediciones.

Resultados Medida

Mediciones tomadas en sentido Oeste-Este, por el lado sur de la subestación. Se aprecian niveles de campo de baja intensidad, por debajo de la normativa vigente para público general.

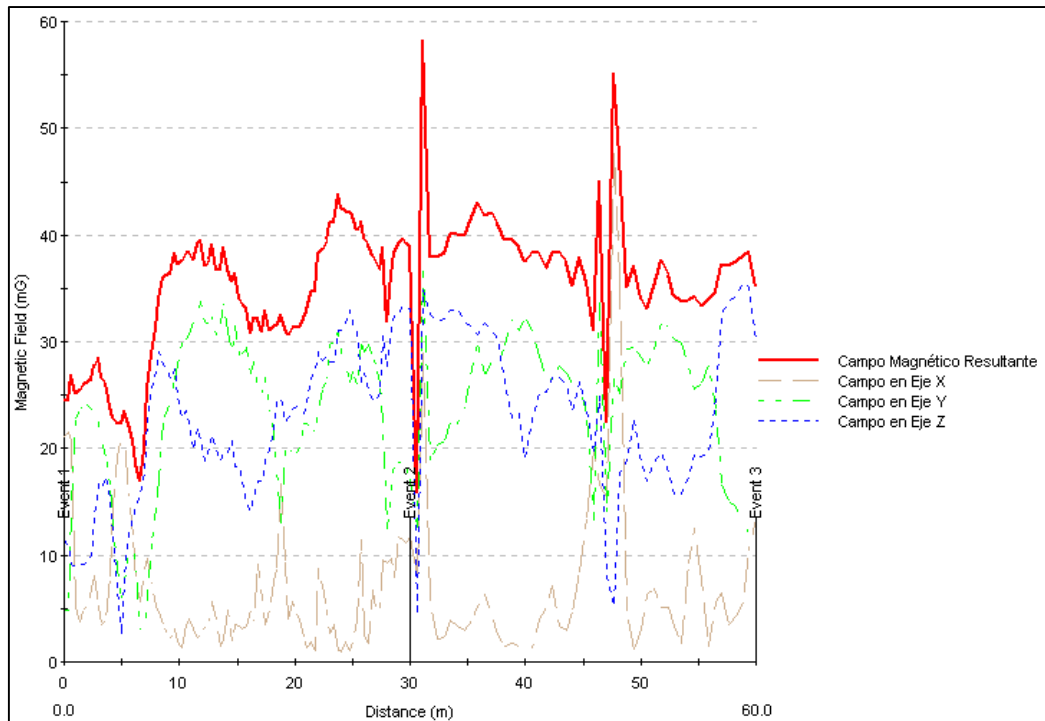


Figura 37: Grafica de magnitud de campo magnético v/s distancia.

Estadísticas Medición.

En la tabla 23 se muestran las estadísticas de la presente medida. Se observan valores de campo por debajo de las normativas vigentes para público general. Las medidas tienen unidades de [mG].

	Mínimo	Máximo	Promedio
Campo Resultante	15.7	58.3	34.85
Campo en X	0.9	47.9	6.88
Campo en Y	2.9	36.9	23.38
Campo en Z	2.5	35.5	22.64

Tabla 23: Estadísticas mediciones.

Mediciones realizadas en S/E Metro, Metro SA.

A continuación se presentarán una serie de mediciones tomadas en la S/E Metro, propiedad de Metro S.A. La S/E Metro es alimentada con cables de poder de 110 kV, bajando la tensión a 20 kV con lo cual se alimenta la red de Metro. El presente set de medidas tiene por objeto investigar las intensidades de campo magnético a las cuales están sometidas las personas, puesto que en el mismo lugar donde está la S/E Metro se encuentra el edificio corporativo de Metro, por lo que los trabajadores de Metro están muy cercanos a una potencial fuente de campos magnéticos.

Es de particular interés disponer de mediciones en esta Subestación, ya que presenta un ejemplo de lugar de trabajo donde sus colaboradores podría verse sometido diariamente a campos magnéticos más altos de lo habitual.

Medida 1: Sala de alimentadores

El primer set de medidas fue tomado en el quinto piso del edificio metro, donde se encuentra una sala de alimentadores. Para esta medida se tomó un perfil longitudinal que atraviesa toda la galería.



Figura 38: Galería de alimentadores, quinto piso edificio Metro.

Resultados Medida

En la figura 39 se muestra la gráfica de campo magnético v/s tiempo para esta medida. Se puede observar que los valores medidos son bajos, varios órdenes de magnitud por debajo de los valores establecidos en la normativa presentada.

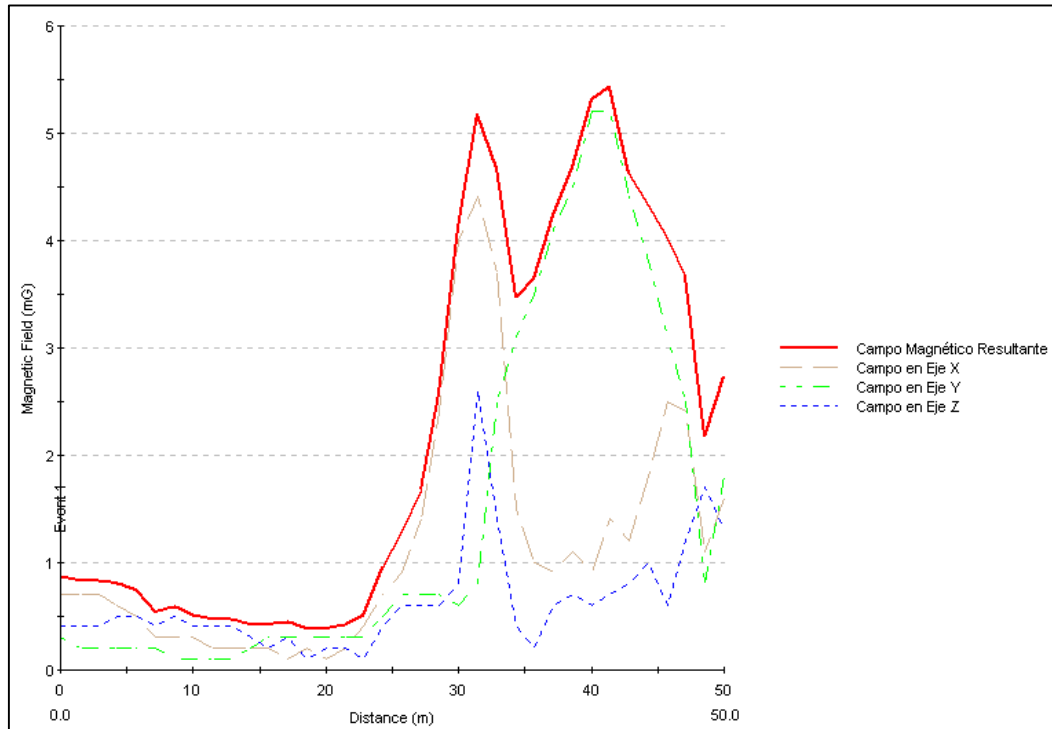


Figura 39: Gráfica de magnitud de campo magnético v/s distancia.

Estadísticas Medición.

En la tabla 24 se muestran las estadísticas de la presente medida. Se observan valores de campo por debajo de las normativas vigentes. Las medidas tienen unidades de [mG].

	Mínimo	Máximo	Promedio
Campo Resultante	0.38	5.43	2.18
Campo eje X	0.11	4.41	1.14
Campo eje Y	0.11	5.21	1.46
Campo eje Z	0.11	2.61	0.63

Tabla 24: Estadísticas mediciones.

Medida 2: Sala de interruptores.

El segundo set de medidas fue tomado en el quinto piso del edificio metro, donde se encuentra una sala de interruptores. Para esta medida se tomó un perfil longitudinal que atraviesa toda la galería.



Figura 40: Galería de interruptores, quinto piso edificio Metro.

Resultados Medida

En la presente medida, se destacan valores bajos de campos magnéticos, no superando la normativa presentada.

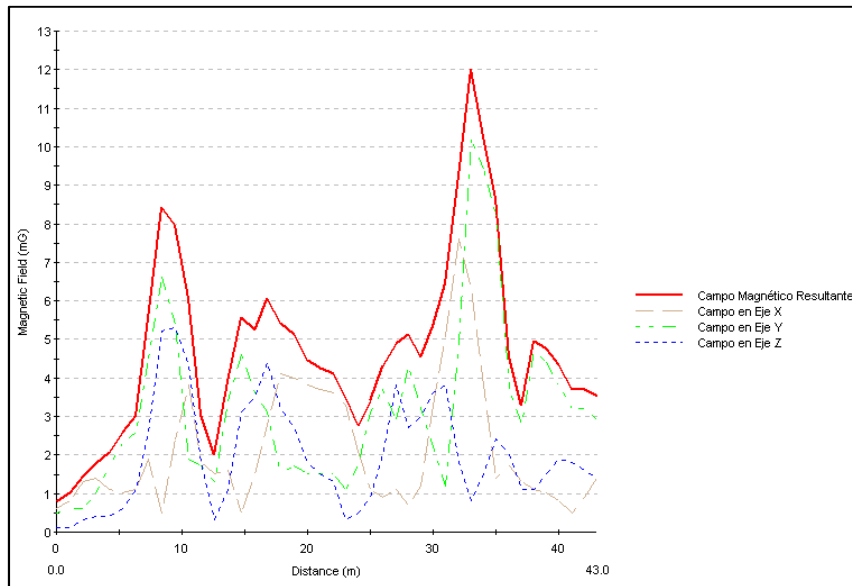


Figura 40: Gráfica de magnitud de campo magnético v/s distancia.

Estadísticas Medición.

En la tabla 25 se muestran las estadísticas de la presente medida. Se observan valores de campo por debajo de las normativas vigentes. Las medidas tienen unidades de [mG].

	Mínimo	Máximo	Promedio
Campo Resultante	0.79	12.02	4.73
Campo eje X	0.51	7.61	2.13
Campo eje Y	0.51	10.21	3.21
Campo eje Z	0.11	5.31	1.97

Tabla 25: Estadísticas mediciones.

Medida 3: Sala de onduladores

El segundo set de medidas fue tomado en el quinto piso del edificio metro, donde se encuentra una sala de onduladores o inversores. Para esta medida se tomó un perfil longitudinal que atraviesa toda la galería.



Figura 41: Galería de interruptores, quinto piso edificio Metro.

Resultados Medida.

En la presente medida, se destacan valores bajos de campos magnéticos, no superando la normativa presentada.

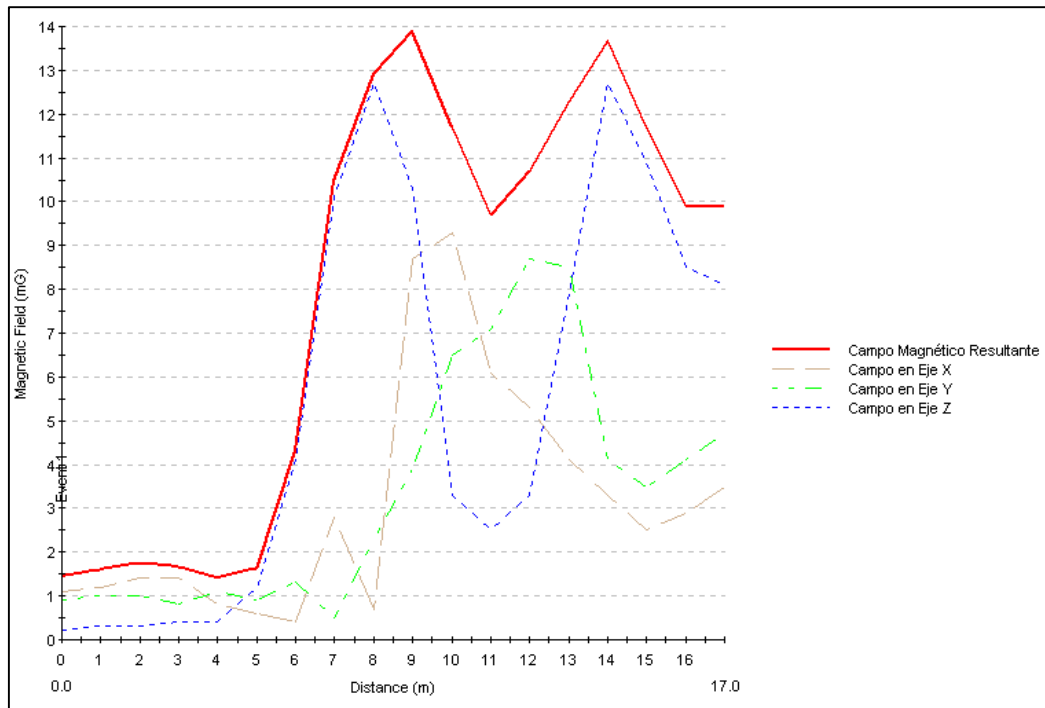


Figura 41: Gráfica de magnitud de campo magnético v/s distancia.

Estadísticas Medición.

En la tabla 26 se muestran las estadísticas de la presente medida. Se observan valores de campo por debajo de las normativas vigentes. Las medidas tienen unidades de [mG].

	Mínimo	Máximo	Promedio
Campo Resultante	1.42	13.9	7.82
Campo eje X	0.41	9.3	3.12
Campo eje Y	0.51	8.7	3.39
Campo eje Z	0.21	12.71	5.4

Tabla 26: Estadísticas mediciones.

Medida 4: Sala de reuniones.

El siguiente set de medidas ha sido tomado en la sala de reuniones del edificio Metro. Esta medición centra su interés por la presencia de cables de 20 Kv que pasan por detrás de una de las paredes de la sala.

Resultados Medida

En la siguiente gráfica se muestran los valores de campos obtenidos. Destaca un valor alto de campo en las cercanías de los cables de 20 kV, pero en promedio los valores de campo se encuentran entorno a los 45 [mG], valor muy inferior a los valores máximos tolerables establecidos en la normativa para público general.

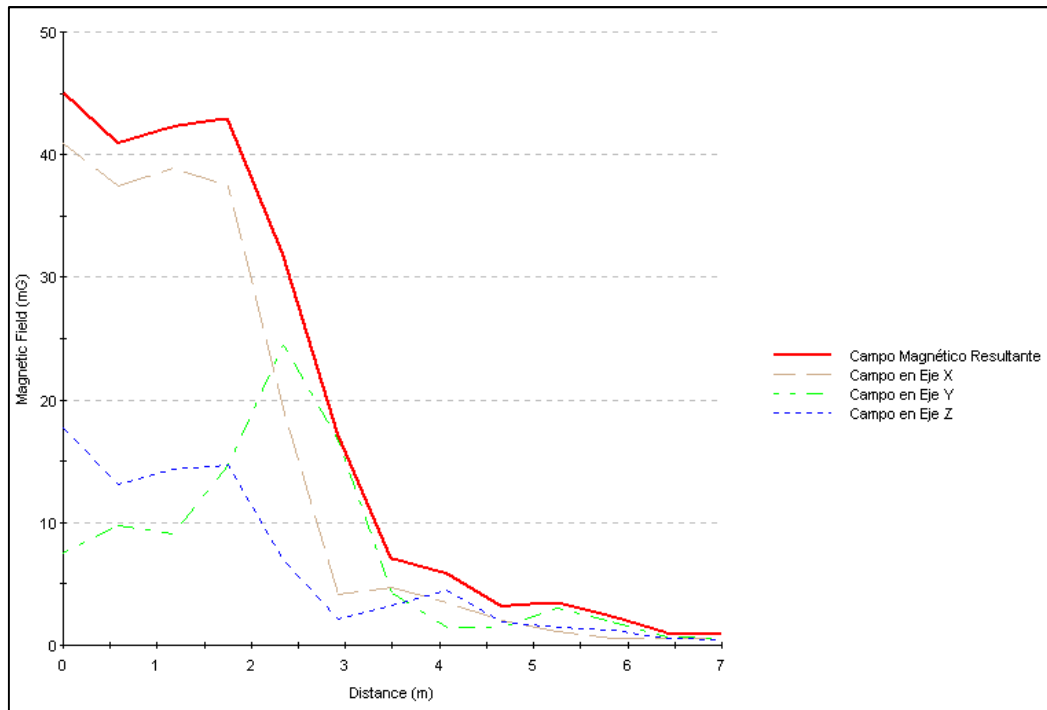


Figura 42: Gráfica de magnitud de campo magnético v/s distancia.

Estadísticas Medición.

En la tabla 27 se muestran las estadísticas de la presente medida. Se observan valores de campo por debajo de las normativas vigentes para público general. Las medidas tienen unidades de [mG].

	Mínimo	Máximo	Promedio
Campo Resultante	0.88	45.1	18.79
Campo eje X	0.51	40.9	14.7
Campo eje Y	0.61	24.5	7.36
Campo eje Z	0.41	17.7	6.33

Tabla 27: Estadísticas mediciones.

Medida 5: Transformadores de poder.

El siguiente set de medidas, fue tomado en pared aleña a los transformadores de poder la subestación. Cabe mencionar que entre la sala de transformadores y la calle exterior, existe una pared de concreto de grandes dimensiones.

Resultados Medida.

En la presente medida, se destacan valores bajos de campos magnéticos, no superando la normativa presentada.

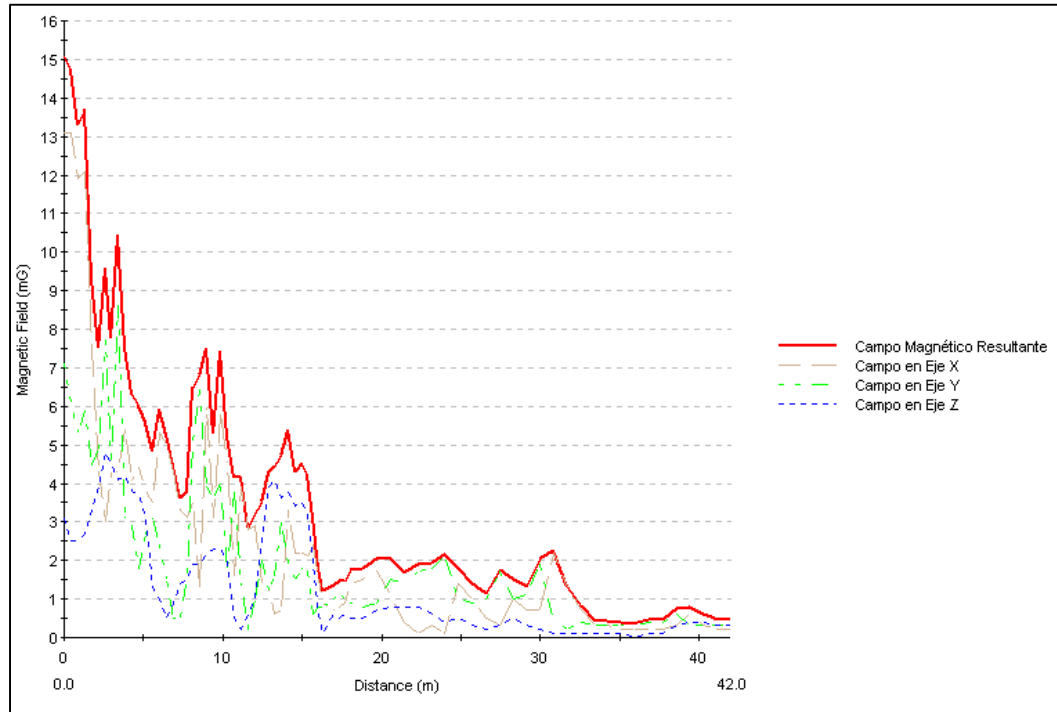


Figura 43: Gráfica de magnitud de campo magnético v/s distancia.

Estadísticas Medición.

En la tabla 28 se muestran las estadísticas de la presente medida. Se observan valores de campo por debajo de las normativas vigentes. Las medidas tienen unidades de [mG].

	Mínimo	Máximo	Promedio
Campo Resultante	0.37	15.1	3.99
Campo eje X	0.11	13.1	2.64
Campo eje Y	0.21	8.61	2.08
Campo eje Z	0.01	4.81	1.52

Tabla 28: Estadísticas mediciones.

Medida 6: Vereda oriente Edificio Metro.

El siguiente set de medidas, fue tomado en la vereda oriente del edificio Metro, la cual se encuentra aproximadamente a 11 metros de la pared aledaña a la sala de transformadores (medida 5). El siguiente set de medidas tiene su objetivo en comparar las magnitudes con las de la medida 5 y cuantificar los posibles campos magnéticos emanados desde la subestación a la calle.

Resultados Medida.

En la presente medida, se destacan valores bajos de campos magnéticos, no superando la normativa presentada. Los peak de campos se detectan en las llegadas de los cables de poder de 110 kV provenientes de la S/E Lord Cochrane.

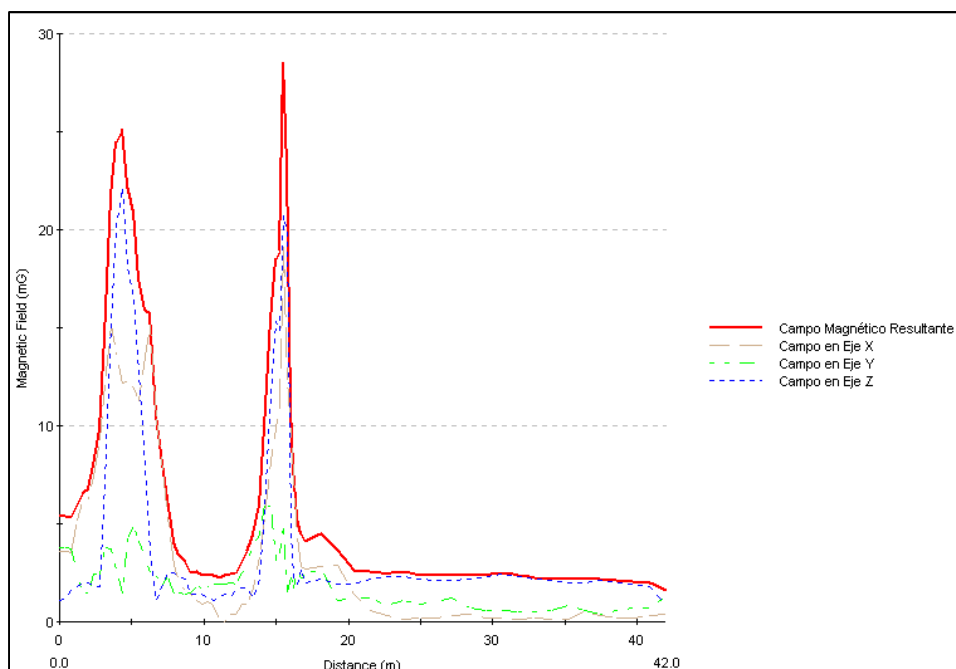


Figura 44: Gráfica de magnitud de campo magnético v/s distancia.

Estadísticas Medición.

En la tabla 29 se muestran las estadísticas de la presente medida. Se observan valores de campo por debajo de las normativas vigentes. Las medidas tienen unidades de [mG].

	Mínimo	Máximo	Promedio
Campo Resultante	1.63	28.5	7.35
Campo eje X	0.01	19.1	4.5
Campo eje Y	0.41	6.01	2.17
Campo eje Z	0.91	22.1	4.57

Tabla 29: Estadísticas mediciones.

Medida 7: Galería de Cables 20 kV

El siguiente set de medidas fue tomado en un túnel de galería de cables, donde se disponen los cables de 20 kV provenientes de la subestación Metro que alimentan los rectificadores del Metro.



(a)



(b)

Figura 45: Galería de cables 20 kV Metro.

Resultados Medida.

En la siguiente gráfica se muestran los resultados de las mediciones. Destaca un peak de campo magnético de 160 [mG], y un promedio de campo magnético de 25 [mG], valores por debajo de los valores estipulados en la normativa presentada.

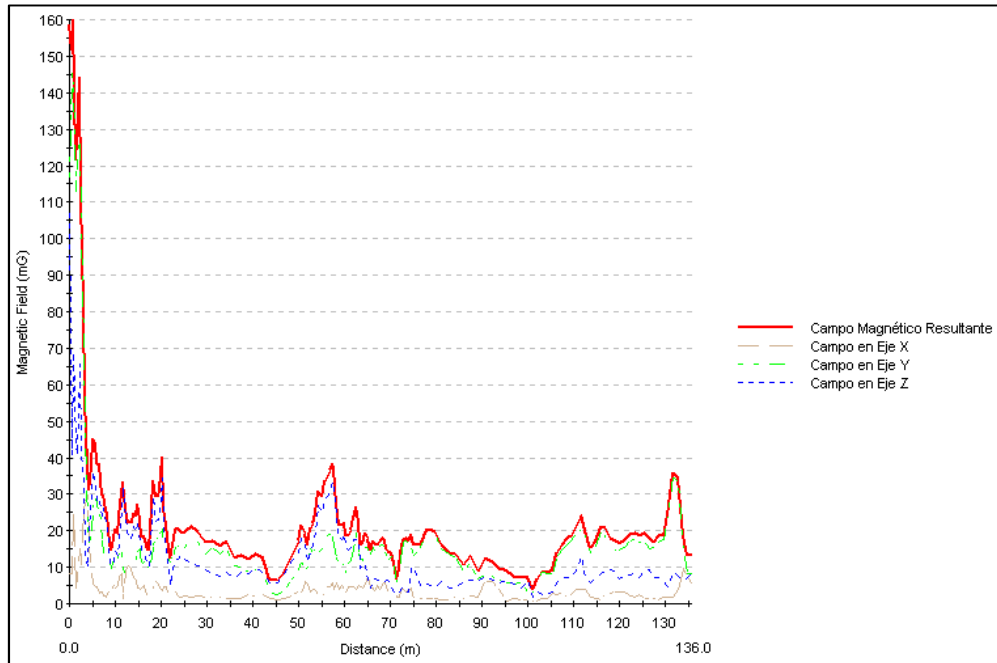


Figura 46: Gráfica de magnitud de campo magnético v/s distancia.

Estadísticas Medición.

En la tabla 30 se muestran las estadísticas de la presente medida. Se observan valores de campo por debajo de las normativas vigentes. Las medidas tienen unidades de [mG].

	Mínimo	Máximo	Promedio
Campo Resultante	3.84	159.9	25.42
Campo eje X	0.72	29.7	4.32
Campo eje Y	2.41	145.7	18.84
Campo eje Z	1.81	106.9	14.6

Tabla 30: Estadísticas mediciones.

Medida 8: Sala de cables de poder 110 kV

El siguiente set de medidas fue tomado en la sala de llegada de los cables de poder de 110 kV que alimentan la S/E Metro. Estos cables de poder subterráneos provienen de las subestaciones Renca y Ochagavía.

Resultados Medida

En la siguiente gráfica se muestran los resultados de las mediciones. Destaca un peak de campo magnético de 62 [mG], y un promedio de campo magnético de 27 [mG], valores por debajo de los valores estipulados en la normativa presentada.

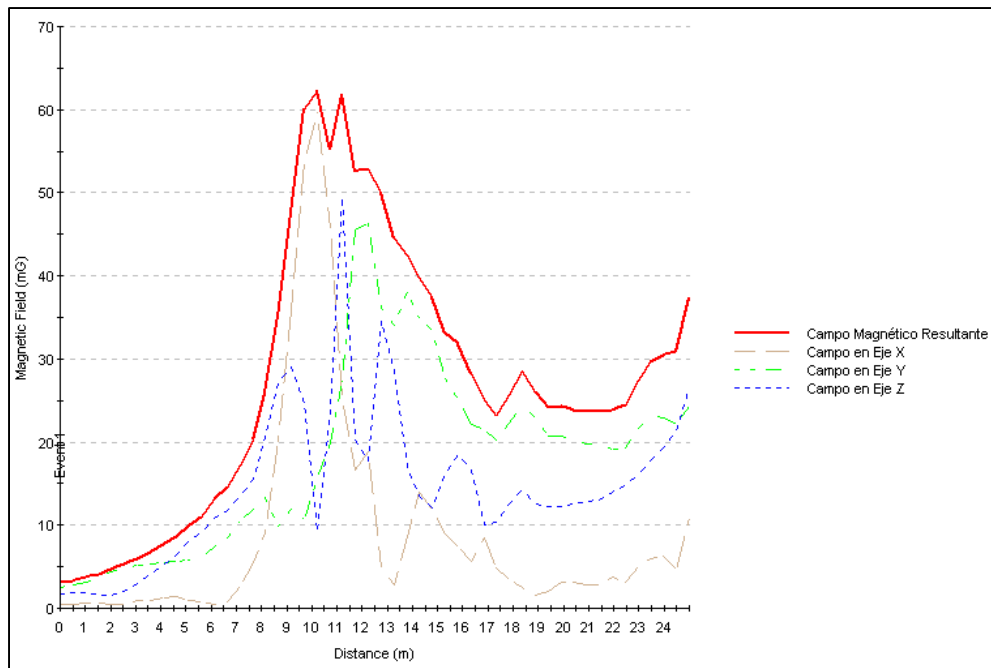


Figura 47: Gráfica de magnitud de campo magnético v/s distancia.

Estadísticas Medición.

En la tabla 31 se muestran las estadísticas de la presente medida. Se observan valores de campo por debajo de las normativas vigentes. Las medidas tienen unidades de [mG].

	Mínimo	Máximo	Promedio
Campo Resultante	3.07	62.3	27.08
Campo eje X	0.41	59.7	8.86
Campo eje Y	2.51	46.3	18.22
Campo eje Z	1.51	49.5	14.58

Tabla 31: Estadísticas mediciones.

Medida 9: Andén del Metro.

El siguiente set de medidas corresponde a una medida de intensidad de campo magnético versus tiempo en el andén de una estación del Metro. La idea es medir la intensidad de campo permanente que se presenta en una estación del Metro, y medir los peak de campos magnéticos que se producen con la tracción de los trenes.

Resultados Medida.

En la presente medida, se destacan valores bajos de campos magnéticos, no superando la normativa presentada.

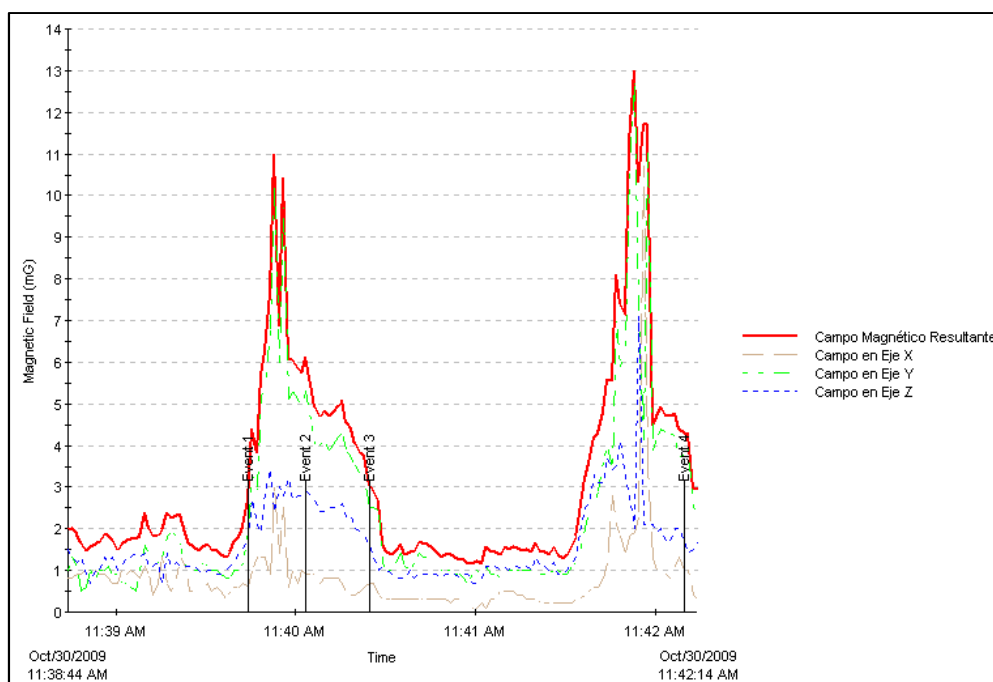


Figura 48: Gráfica de magnitud de campo magnético v/s distancia.

Estadísticas Medición.

En la tabla 32 se muestran las estadísticas de la presente medida. Se observan valores de campo por debajo de las normativas vigentes. Las medidas tienen unidades de [mG].

	Mínimo	Máximo	Promedio
Campo Resultante	1.16	13.01	3.22
Campo eje X	0.11	10.7	0.81
Campo eje Y	0.51	12.71	2.5
Campo eje Z	0.71	7.1	1.64

Tabla 32: Estadísticas mediciones.

Conclusiones

Los seres humanos están constantemente expuestos a campos electromagnéticos de diversas características, entendiéndose por esto magnitudes y frecuencias. En cuanto a las frecuencias de los campos omnipresentes en prácticamente cada rincón de las ciudades, los campos de extra baja frecuencia, 50 [Hz] en Chile, son radiados principalmente por la vasta red de distribución de electricidad presente en las ciudades, como también por los diversos equipos eléctricos que hacen posible el quehacer diario de las personas. Con respecto a la intensidad de estos campos radiados, se ha podido apreciar durante el desarrollo de este trabajo, que sus intensidades son relativamente bajas, no sobrepasando generalmente los valores presentes en las normas internacionales que limitan la exposición a estos campos. En cuanto a las mediciones realizadas, se observa que existen campos que sobrepasan los niveles recomendados por las normativas internacionales para público general, no así los valores recomendados para público ocupacional. Estos campos están presentes de todas formas en lugares muy puntuales, y como se mostró en las diversas gráficas, su decaimiento es muy rápido conforme la distancia crece con respecto a estas fuentes. En cuanto a la población en Chile, si bien no existe una normativa nacional que fije valores máximos de exposición a campos de frecuencias industriales, los campos radiados por instalaciones de distribución se encuentran generalmente muy por debajo de los valores recomendados por organismos internacionales (ICNIRP, IEEE), principalmente debido a que se han adoptado medidas de mitigación de campos, como el uso de distancias respecto del suelo, arreglo de conductores en disposiciones especiales que permiten la cancelación de los campos, instalación de subestaciones en lugares generalmente apartados de la comunidad. Con respecto a los valores de campos radiados por los dispositivos domésticos y por los sistemas de distribución y transmisión, se concluye que estos son menores a los valores recomendados, por lo tanto se puede decir que la población se encuentra segura respecto de estos valores.

Las normativas internacionales han seguido dos corrientes típicas para establecer los límites de exposición, una de ellas consiste en los campos eléctricos inducidos en los tejidos y la otra consiste en las densidades de corriente inducidas en los tejidos. Para la medición de estas cantidades, se hace indispensable contar con modelos anatómicos detallados de los diversos tejidos y que componen el organismo. Sobre este punto cabe destacar que existe en la actualidad una tendencia mundial en encontrar modelos cada vez más precisos y detallados del organismo, modelos que son alimentados con información proveniente de la tecnología médica, como son los exámenes de resonancias magnéticas. Estos modelos cada vez más precisos y complejos, nos darán mejores respuestas acerca de las cantidades inducidas en los tejidos, de manera que las normas internacionales vigentes podrían usar esta

información, de manera de perfeccionar los valores recomendados, relajando los valores o reduciéndolos según sean los resultados de las investigaciones.

Según la bibliografía revisada y la vasta cantidad de información existente sobre el tema, se puede apreciar que existe una preocupación mundial por la problemática medio ambiental y de salubridad que implica la constante exposición a campos electromagnéticos. Sobre este punto, se ha publicado una gran cantidad de información, información que varía mucho en cuanto a la seriedad de los estudios y que muchas veces es contradictoria y a veces alarmista. El factor común de la mayoría de las publicaciones, es que se reconoce una interacción de los campos electromagnéticos de extra baja frecuencia con los seres vivos, pero no se ha demostrado que esta interacción sea perjudicial para la salud de la gente expuesta.

Es bien sabido que los campos eléctricos son fácilmente apantallados por cualquier medio conductor, incluso el cuerpo humano se comporta como un buen conductor, mitigando los campos eléctricos inducidos en el interior del organismo. Este no es el caso de los campos magnéticos, en que la permeabilidad de los materiales es prácticamente la misma que la del aire, de manera que los campos magnéticos no son fácilmente mitigados. Por lo tanto en las mediciones de campo magnético realizadas, se pudo constatar que si bien, en instalaciones de media tensión, existen campos magnéticos de altas intensidades, estos son rápidamente mitigados con la distancia al objeto fuente, en este caso cables de poder de media tensión, de manera que incluso en las proximidades de estas instalaciones se siguen cumpliendo las normas y recomendaciones internacionales. Se concluye de esta manera que las subestaciones de media tensión y altas corrientes no constituyen una fuente importante de campos magnéticos hacia la comunidad, por lo cual, si en estas instalaciones se cumplen los valores recomendados de campos magnéticos por las normas vigentes, es difícil que en los ambientes normales donde se desenvuelven las personas no se cumplan los valores estipulados, concluyendo de esta manera que la población se encuentra segura respecto la normativa vigente internacional revisada en este trabajo.

Bibliografía

1. **World Health Organization 2007**. Extremely Low Frequency Fields. Environmental Health Criteria 238. <http://www.who.int>.
2. **N Siauve, R. Scorretti, N. Burais, L. Nicolas, A. Nicolas**, "Electromagnetic Fields and Human Body: a New Challenge for the Electromagnetic Fields Computation", Ecole Central de Lyon.
3. **A. Bossavit**, "A Theoretical Approach to the Question of Biological Effects of Low Frequency Fields", IEEE Transaction on Magnetics, Vol 29, No. 2, March 1993.
4. **Hayri Yildirim, Ozcan Kalenderli**, "Computation of Electric Field Induced Currents on Human Body Standing Under a High Voltage Transmission Line by Using Charge Simulation Method", IEEE 1998, 2nd International Biomedical Engineering Days.
5. **Weiping Wang and Solomon R. Eisenberg**, "A Three Dimensional Finite Element Method for Computing Magnetically Induced Currents in Tissues", IEEE Transaction on Magnetics, Vol 30, No. 6, November 1994.
6. **Trevor W. Dawson and María A. Stuchly**, "High-Resolution Organ Dosimetry for Human Exposure to Low-Frequency Magnetic Fields", IEEE Transaction on Magnetics, Vol 34, No. 3, May 1998.
7. **Le Ha Hoang, R. Scorretti, N. Burais, Damien Voyer**, "Numerical Dosimetry of Induced Phenomena in the Human Body by a Three-Phase Power Line", IEEE Transaction on Magnetics, Vol 45, No. 3, March 2009.
8. **ICNIRP Guidelines**, "Guideline on Limits Of Exposure to Static Magnetic Fields", 1994 Health Physics Society.
9. **IEEE Standards C95.6**, "IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Electromagnetic Fields, 0-3 kHz", IEEE Standards Coordinating Committee 28.
10. **María A. Stuchly and Trevor W. Dawson**, "Interaction of Low-Frequency Electric and Magnetic Fields with the Human Body", Proceeding of the IEEE, Vol. 88, No. 5, May 2000.
11. **L. H. Hoang, R. Scorretti, N. Burais, A. Nicolas**, "Induced Current into the Human Body by Power frequency electric and magnetic Fields, Université de Lyon.
12. **Pablo Bellino, Franco Fiorini**, "Apantallamiento magnético debido a corrientes inducidas en conductores", Dpto. de Física, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, U.B.A

13. **Olalla Varela Silvalde, Inés Riveiro Sierra**, “Efectos de Campos Electromagnéticos en el Organismo”.
14. **S. Mukhopadhyay, Ashis Sanyal**, “A Review of the effects of non ionizing Electromagnetic Radiation on Human Body and Exposure Standars”, IEEE Proceeding of the International Conference on Electromagnetic Interference and Compatibility, 1997.
15. **Carlos Garrido, Antonio F. Otero, Camilo Carrillo y José Cidrás**, “Estudio de Campos Electromagnéticos generados por equipos eléctricos”, Dpto. de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Vigo.
16. **William L. Cotten, Kai Ramsing**, “Design Guidelines for Reducing Electromagnetic Field Effects from 60 [hZ] Electrical Power System”.
17. **José Luis Sebastián Franco**, “Interacción de campos electromagnéticos con sistemas biológicos: Dosimetría y microdosimetría”, Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Complutense de Madrid.
18. **Claudia Cabal, Gerardo Otero, José Acuña**, “Informe sobre campos electromagnéticos y salud humana”, Universidad de la República, Uruguay.
19. **National Health and Medical Research Council NHRMS**, “Interin Guidelines on limits of exposure to 50/60 [hZ] electric and magnetic fields”.
20. **Dra. Susana I. García**, “La salud humana y los campos electromagnéticos de frecuencia extremadamente baja”, Asociación Toxicológica Argentina.
21. **Gerhard Schmidt, Bernd Fiegl, Stefan Kolbeck**, “HVDC transmission and the enviroment”.
22. **The ELF Working Group**, “Health Effect and Exposure Guidelines related to Extremely Low Frequency electric and magntic fields – An Overview”, OSHA.
23. **L.A Koshcheev**, “Environmental Characteristic of HVDC Overhead Transmission Lines”, May 2003.
24. **World Health Organization**, “Static Fields”.
25. **World Health Organization**, “Volume 80, Non-Ionizing Radiation , Part 1: Static and Extremely Low-Frequency (ELF) Electric and Magnetic Fields”, March 2002.
26. **National Radiation Laboratoty**, “Electric and Magnetic Fields and your Health”, Ministry of Health, New Zealand.
27. **Bo Thidé**, “Electromagnetic Field Theory”, Swedish Institute of Space Physics Uppsala, Sweden.

28. **Pedro Rubén Romero Gutiérrez**, “Puesta a punto de mediciones de campo magnético y eléctrico a frecuencia industrial. Antecedentes Biológicos”. Memoria Universidad de Chile, 2004.
29. **Felipe Ignacio Ríos Pérez**, “Análisis y Modelación de Blindaje Electromagnético para sala de Microscopio Electrónico de Transmisión [T.E.M]”, Memoria Universidad de Chile, 2009.
30. **Grupo Pandora S.A**, “Campos Eléctricos y Magnéticos de 50 [Hz], 2001.
31. **Informe Técnico Elaborado por el Comité de Expertos**, “Evaluación Actualizada de los Campos Electromagnéticos en Relación con la salud Pública”, Madrid España, 2003.
32. **Informe de la OMS: Los campos electromagnéticos y la salud pública: las frecuencias extremadamente bajas (ELF)**, “Alta Tensión y Salud”, 2008.

ANEXO I

Base Biológica Para Limitar La Exposición (Hasta 100 Khz.)

Los siguientes párrafos proveen una revisión general de literatura relevante acerca de los efectos biológicos y a la salud que producen los campos eléctricos y magnéticos con rangos de frecuencia hasta 100 Khz., en el cual el principal mecanismo de interacción es la inducción de corrientes en tejidos. Para rangos de frecuencia entre 0 a 1Hz, la base biológica para las restricciones básicas y los niveles de referencia son proveídos por ICNIRP (1994).

Los efectos a largo término: la epidemiología.

El objeto de la epidemiología es analizar, en una cierta población, los factores del medio ambiente o sus modos de vida que pueden afectar la salud. Más precisamente, la epidemiología se fija como objetivo establecer vínculos de *causa y efecto* entre los factores de riesgo y la incidencia de ciertas enfermedades. Sin embargo, solo una experimentación controlada puede aportar una demostración causal, mientras que la epidemiología es una ciencia de observación que no interviene sobre el desarrollo de los acontecimientos. En consecuencia, la epidemiología pone en evidencia las correlaciones, de los posibles vínculos entre factores de riesgo y enfermedades. Es por lo tanto importante no confundir correlación con causalidad. Los resultados de las investigaciones epidemiológicas muestran que la *asociación* entre la exposición y el riesgo es débil. Una asociación fuerte es aquella que tiene un RR (riesgo relativo) de cinco o superior. Por ejemplo un fumador tiene un RR para cáncer de pulmón entre 10 y 30 veces mayor que una persona que no fuma. Un riesgo menor que 3 indica una asociación débil. Un RR menor que 2 no tiene prácticamente significación.

La mayoría de los estudios positivos sobre los CEM de EBF presentan un RR menor que 2. Los estudios de leucemia en su conjunto tienen un RR en el intervalo 0.8 - 2.0, mientras que los estudios sobre tumores cerebrales presentan en conjunto un RR de aproximadamente 0.8 - 1.7. Esto representa una asociación entre débil e inexistente.

Estudios epidemiológicos en empleados de compañías eléctricas.

Los empleados de compañías eléctricas, sobre todo aquellos cuyo trabajo se desarrolla en los sitios de mayor exposición a los CEM (generadores, estaciones transformadoras, líneas de transmisión, subestaciones transformadoras, líneas de distribución, etc.) han sido objeto de muy variados estudios epidemiológicos. A fines de los años 80, Hidro-Québec y Ontario-Hydro de Canadá se asociaron con Electricité de France (EDF) para realizar un estudio epidemiológico de gran amplitud, apropiado para superar las grandes dificultades inherentes a la epidemiología. Este estudio fue confiado a investigadores independientes de las tres compañías eléctricas, el INSERM de Francia, la Universidad Mc Gill de Montreal y la Universidad de Toronto de Canadá [17, 20, 30, 31, 32].

El estudio experimental abarcó poco más de 223.000 trabajadores de las tres compañías eléctricas, en un período de observación de 1978 a 1989. Se estimó la exposición media acumulada tomando como base la medición de la exposición de trabajadores que ocupan actualmente cargos similares. Los resultados son negativos en lo que se refiere a los diferentes tipos de cánceres: leucemias, tumores cerebrales o melanomas.

Sin embargo, se observó una correlación entre la leucemia mieloide aguda y la exposición acumulada a los campos magnéticos. Si se tiene en cuenta el número pequeño de casos (43 en total), de la ausencia de relación dosis-efecto, y de problemas de coherencia de los resultados entre las tres compañías, esta relación debe tomarse con cautela.

Los propios epidemiólogos que llevaron a cabo el estudio afirmaron que: *"a pesar de los esfuerzos realizados para asegurar una potencia estadística adecuada al estudio, la prueba definitiva de una asociación entre la exposición a los campos magnéticos y la ocurrencia de una leucemia o de un tumor cerebral no ha podido ser demostrada"*.

Estos mismos investigadores no han considerado justificado, sobre la base de este estudio, proponer la puesta en marcha de acciones de prevención respecto a los CEM por parte de los empleados de las compañías eléctricas.

Resultados en la reproducción.

Los estudios epidemiológicos acerca de resultados en el embarazo no han proveído de ninguna evidencia consistente de efectos reproductivos adversos en las mujeres que trabajaban con monitores de video (VDU). Por ejemplo, el meta-análisis no reveló ningún exceso de riesgo de aborto espontáneo o de malformación en estudios combinados que comparaban a mujeres embarazadas usando las VDU con mujeres que no usaban las VDU [17, 20, 30, 31, 32]. Otros dos estudios se concentraron en mediciones

reales de los campos eléctricos y magnéticos emitidos por VDUs; uno sugería una asociación entre los campos magnéticos de ELF y el aborto, mientras que el otro no encontró ninguna asociación. Un estudio prospectivo que incluyó una gran cantidad de casos, con altas tasas de participación y evaluación detallada de la exposición, señaló que ni el peso del recién nacido, ni la tasa de crecimiento intrauterina fue relacionado con la exposición al campo ELF. Los resultados reproductivos adversos no fueron asociados a niveles más altos de exposición. Las mediciones de la exposición incluyeron la capacidad real de las líneas de potencia fuera de los hogares, mediciones de siete días de exposición individual, mediciones de 24 horas en el hogar, incluyendo el uso de mantas eléctricas, de camas de agua caliente, y de las VDU. La mayoría de la información actualmente disponible no logra demostrar una asociación entre la exposición ocupacional a VDU y los efectos reproductivos adversos [17, 20, 30, 31, 32].

Estudios residenciales del cáncer.

Una controversia considerable rodea la posibilidad de una conexión entre la exposición a los campos magnéticos ELF y un elevado riesgo de cáncer. Varios informes acerca de este tema han aparecido desde el reporte de Wertheimer y Leeper (1979) [17, 20, 30, 31, 32] en el cual se establecía una asociación entre la mortalidad por cáncer en niños y la proximidad de los hogares a líneas de distribución de potencia con “alta configuración de corriente”. La hipótesis básica que emergió del estudio original era que la contribución a los campos magnéticos residenciales ambientales de 50/60 Hz por parte de fuentes externas tales como líneas de potencia podría estar ligada a un riesgo creciente de cáncer en niños.

Hasta la fecha ha habido más de una docena de estudios sobre cáncer en niños y la exposición a los campos magnéticos en frecuencias de potencia en hogares próximos a líneas de potencia. Estos estudios estimaron la exposición a campos magnéticos mediante mediciones de corta duración o en base a la distancia entre el hogar y las líneas de potencia y, en la mayoría de los casos, la configuración de línea; algunos estudios también tomaron en cuenta la carga de línea. Los resultados referentes a leucemia son los más consistentes. Más de 13 estudios (Wertheimer y Leeper 1979; Fulton y col. 1980; Myers y col. 1985; Tomenius 1986; Savitz y col. 1988; Coleman y col. 1989; London y col. 1991; Feychting y Ahlbom 1993; Olsen y col. 1993; Verkasalo y col. 1993; Michaelis y col. 1997; Linet y col. 1997; Tynes y Haldorsen 1997), todos menos cinco señalaron estimaciones de riesgo relativo de entre 1,5 y 3,0 [17, 20, 30, 31, 32].

Tanto las mediciones directas del campo magnético y el cálculo basado en líneas de potencia vecinas son aproximaciones gruesas a las exposiciones que han ocurrido en varios momentos antes de que los casos de leucemia fueran diagnosticados , además no está claro cuál de los dos métodos proporciona el

estimado más válido. Aunque, de hecho, los resultados sugieren que el campo magnético puede desempeñar un rol en asociación con el riesgo de leucemia, hay incertidumbre debido a la pequeña cantidad de la muestra y debido a la correlación entre el campo magnético y la proximidad a las líneas de potencia.

Los estudios que han examinado el uso de aparatos eléctricos (sobre todo mantas eléctricas) en lo referente a cáncer y a otros problemas de salud han señalado resultados generalmente negativos. Solamente dos estudios de caso-control han evaluado el uso de aparatos en lo referente al riesgo de la leucemia en la niñez. Uno fue conducido en Denver (Savitz y col. 1990) [17, 20, 30, 31, 32] y sugirió una conexión con el uso de mantas eléctricas en prenatales; el otro, realizado en Los Ángeles (London y col. 1991), encontró una asociación entre la leucemia y los niños usando los secadores de pelo y mirando televisión monocromática [17, 20, 30, 31, 32].

El hecho de que los resultados para la leucemia basada en la proximidad de hogares a las líneas de potencia son relativamente consistentes llevó al Comité de Ciencias de la Academia Nacional de los E.E.U.U. a concluir que los niños que viven cerca de líneas de potencia parecen estar en riesgo creciente de leucemia (NAS 1996). Debido a la pequeña magnitud de las muestras, los intervalos de confianza en los estudios individuales son amplios; cuando se toman en conjunto, sin embargo, los resultados son consistentes, con un riesgo combinado de 1,5 (NAS 1996). En contraste, las mediciones de corto plazo del campo magnético en algunos de los estudios no proporcionaron ninguna evidencia de una asociación entre la exposición a los campos de 50/60 Hz y el riesgo de leucemia o de ninguna otra forma de cáncer en niños. El Comité de la NAS no fue convencido de que este aumento en riesgo fuera explicado por la exposición a los campos magnéticos, puesto que no había asociación evidente cuando la exposición era estimada por lecturas de contadores de campo magnético en los hogares de los casos de leucemia y en los hogares de los casos de control. Se sugirió que hubo una confusión por un cierto factor de riesgo desconocido para la leucemia en la niñez, asociado a la residencia en la cercanía de líneas de potencia, pero no se postuló ningún factor probable [17, 20, 30, 31, 32].

Después de que el Comité de la NAS terminó su revisión, los resultados de un estudio realizado en Noruega fueron reportados (Tynes y Haldorsen 1997). Este estudio incluyó 500 casos de todos los tipos de cáncer en la niñez. Cada exposición individual era estimada por el cálculo del nivel del campo magnético producido en la residencia por las líneas de transmisión próximas, tomándose el promedio de un año completo. No se observó ninguna asociación entre el riesgo de leucemia y los campos magnéticos para residencia cuando se realizó el diagnóstico. La distancia de la línea de potencia, la exposición durante el primer año de la vida, la exposición de las madres en la época de la concepción y la exposición

a niveles más altos que el nivel medio de los casos-control no mostró ninguna asociación con leucemia, cáncer cerebral, o linfoma. Sin embargo, el número de casos expuestos era pequeño [17, 20, 30, 31, 32].

También un estudio realizado en Alemania ha sido reportado después de la terminación de la revisión de la NAS. Este fue un estudio caso-control de la leucemia de la niñez basada en 129 casos y 328 controles. La tasa de exposición abarcó mediciones del campo magnético en un periodo de 24 horas en el dormitorio del niño en la residencia donde el niño había estado viviendo por el periodo más largo antes de la fecha del diagnóstico. Un riesgo relativo elevado de 3,2 fue observado para niveles mayores a 0,2 μT .

Un estudio grande de caso-control en los EE.UU. (638 casos y 620 controles) para probar si la leucemia linfoblástica aguda de la niñez está asociada a la exposición a campos magnéticos 60-Hz fue publicado por Linet y col. (1997) [17, 20, 30, 31, 32]. Las exposiciones del campo magnético fueron determinadas usando mediciones promedio durante 24 horas con ponderación en tiempo en el dormitorio y mediciones de 30 segundos en las otras habitaciones. Las mediciones fueron tomadas en los hogares en los cuales el niño había vivido un 70% de los últimos 5 años anteriores al diagnóstico, o el período correspondiente para los controles. Los resultados encontrados en cuanto a las mediciones de campos magnéticos son intrigantes. Para los puntos de corte de 0,2 μT los análisis emparejados y no emparejados dieron riesgos relativos de 1,2 y 1,5, respectivamente. Para un punto de corte de 0,3 μT , el riesgo relativo para sujetos no-emparejados se estimó en 1,7 basados en 45 casos expuestos. Por lo tanto los resultados de las mediciones sugieren una asociación positiva entre los campos magnéticos y el riesgo de leucemia. Este estudio es una contribución importante en términos de tamaño, número de sujetos en categorías de exposición alta, oportunidad con respecto a la ocurrencia de leucemia (generalmente dentro de los 24 meses después del diagnóstico), otras mediciones utilizadas para obtener datos de exposición, y calidad de análisis permiten múltiples confusiones potenciales. Las debilidades potenciales incluyen el procedimiento para la selección del control, las tasas de participación, y los métodos usados para el análisis estadístico de los datos. Los instrumentos usados para las mediciones no tuvieron en cuenta ningún tipo de campos transitorios o armónicos de orden superior.

A través de los años también ha habido intereses substanciales en conocer si es que hay una asociación entre la exposición del campo magnético y el cáncer de cerebro en niños, el segundo tipo frecuente de cáncer encontrado en niños. Tres estudios recientemente completados después de la revisión del Comité NAS fallaron en proporcionar un soporte para una asociación entre, cáncer al cerebro y la exposición a

campos magnéticos en niños; indistintamente si la fuente de los campos fueron las líneas de potencia o mantas eléctricas.

Los datos sobre cáncer en adultos y la exposición residencial a campos magnéticos son escasos (NAS 1996). Los pocos estudios publicados hasta la fecha muestran hasta cierto punto una pequeña cantidad de casos expuestos, y ninguna conclusión puede ser desarrollada.

El juicio de ICNIRP es que los resultados de las investigaciones epidemiológicas en exposiciones a campos CEM y cáncer incluyendo leucemia en niños, no son suficientemente fuertes, por la ausencia de un soporte de investigaciones experimentales, para formar una base científica para establecer recomendaciones sobre la exposición. Este juicio también está en concordancia con revisiones recientes.

Estudios Ocupacionales.

Una gran cantidad de estudios epidemiológicos se han realizado para evaluar conexiones posibles entre la exposición a los campos de EBF y el riesgo del cáncer entre trabajadores de ocupaciones eléctricas. El primer estudio de este tipo (Milham 1982) [30, 31] aprovechó una base de datos de certificados de defunción que incluyó títulos e información del trabajo sobre mortalidad por cáncer. Como método grueso de evaluar la exposición, Milham clasificó los títulos del trabajo según la exposición presumida del campo magnético y encontró exceso de riesgo para la leucemia entre trabajadores eléctricos. Un estudio subsiguiente (Savitz y Ahlbom 1994) [30, 31] hizo uso de bases de datos similares; los tipos de cáncer para los cuales las tasas se elevaron variaron a través de estudios, particularmente cuando se caracterizaron subtipos de cáncer. Incrementos de riesgo de varios tipos de leucemia y de tumores del tejido nervioso, y, en algunos pocos casos, cáncer de pecho masculino y femenino, fueron reportados (Demers y col. 1991; Matanoski y col. 1991; Tynes y col. 1992; Loomis y col. 1994) [30, 31]. Estos estudios produjeron resultados inconsistentes, y además aproximaban en forma muy gruesa la evaluación de la exposición. También fallaron en controlar ciertos factores de confusión tales como la exposición a solventes de benceno en el lugar de trabajo.

Tres estudios recientes han intentado superar algunas de las deficiencias en el trabajo anterior midiendo la exposición del campo de ELF en el lugar de trabajo y tomando en consideración la duración del trabajo (Floderus y col. 1993; Thériault y col. 1994; Savitz y Loomis 1995) [30, 31]. Se observó un riesgo elevado de cáncer entre individuos expuestos, pero el tipo de cáncer varió de estudio en estudio. Floderus y col. (1993) encontraron una asociación significativa con leucemia; también fue observada por Theriault y col. (1994), pero solamente fue débil y no significativa, y no se observó ninguna conexión por Savitz y Loomis

(1995). Para los subtipos de la leucemia había incluso mayor inconsistencia, pero las muestras en los análisis eran pequeñas. Para los tumores del tejido nervioso, Floderus y col. (1993) encontraron un exceso de glioblastoma (astrocytoma III.IV), mientras que Theriault y col. (1994) y Savitz y Loomis (1995) encontraron solamente la evidencia sugestiva para un aumento en el glioma (astrocytoma I.II). Si hay verdaderamente una conexión entre la exposición ocupacional a los campos magnéticos y el cáncer, mayor consistencia y asociaciones más fuertes deberían esperarse de los estudios recientes basados en datos más sofisticados de la exposición.

Los investigadores también han estudiado la posibilidad de que los campos eléctricos de ELF tengan relación con el cáncer. Las tres facilidades eléctricas que participaron en el estudio de campos magnéticos de Theriault y col. (1994) también analizaron datos del campo eléctrico. Se reportó que era más probable que trabajadores con leucemia de una de las empresas hayan estado expuestos a campos eléctricos que los trabajadores del grupo de control. Además, la asociación era más fuerte en un grupo que había sido expuesto a altos campos eléctricos y magnéticos combinados (Molinero y col. 1996). En la segunda facilidad, los investigadores no señalaron ninguna asociación entre la leucemia y una exposición acumulativa más alta a los campos eléctricos en el lugar de trabajo; pero algunos de los análisis mostraron una asociación con el cáncer de cerebro (Guénel y col. 1996). Una asociación con el cáncer de colon también fue reportada, aunque en otros estudios de grandes poblaciones de trabajadores de las facilidades de electricidad este tipo de cáncer no se ha encontrado. En la tercera facilidad, no se observó ninguna asociación entre los campos eléctricos altos y el cáncer de cerebro o leucemia pero este estudio fue más pequeño y menos probable que detectara cambios pequeños (Baris y col. 1996).

Una asociación entre la enfermedad de Alzheimer y la exposición ocupacional a los campos magnéticos ha sido sugerida recientemente (Sobel y Davanipour 1996). Sin embargo, este efecto no se ha confirmado.

Estudios en voluntarios.

La exposición a un campo eléctrico variable en el tiempo puede dar lugar a la percepción del campo como un resultado de la carga eléctrica alterna inducida en la superficie del cuerpo, el cual causa que los vellos del cuerpo vibren. Varios estudios han mostrado que la mayoría de gente puede percibir campos eléctricos de 50/60 Hz mayores que 20 kV/m, y que una pequeña minoría puede percibir campos por debajo de 5 kV/m (UNEP/ OMS/ IRPA 1984; Tenforde 1991).

Pequeños cambios en la función cardiaca ocurrieron en los humanos voluntarios expuestos a campos eléctricos y magnéticos combinados de 60-Hz (9 kV/m, 20 μ T). El ritmo cardíaco de descanso estaba

levemente, pero significativamente, reducido (por 3 a 5 latidos por minuto) durante o inmediatamente después de la exposición. Esta respuesta estaba ausente en contacto con campos más fuertes (12 kV/m, 30 μ T) o más débiles (6 kV/m, 10 μ T) y reducida si el sujeto estaba mentalmente alerta. Ningunos de los sujetos en estos estudios podían detectar la presencia de los campos, y no hubo resultados consistentes en una batería de pruebas sensoriales y perceptivas.

No se observó ningún tipo de efectos fisiológicos o psicológicos adversos en estudios del laboratorio de la gente expuesta a los campos de 50 Hz en el rango de 2 a 5 mT. No hubo cambios observados en la química de la sangre, cantidad de células de la sangre, gases de la sangre, niveles del lactato, electrocardiograma, electroencefalograma, temperatura de la piel, o niveles de la hormona de la circulación. Estudios recientes en voluntarios no pudieron mostrar algún efecto de la exposición a campos magnéticos de 60 Hz en el nivel nocturno de melatonina en la sangre.

Campos magnéticos suficientemente intensos de EBF pueden provocar en los nervios periféricos y en el tejido muscular una estimulación directa, y se han utilizado clínicamente pulsos cortos del campo magnético para estimular los nervios en las extremidades para chequear la integridad de los caminos nerviosos. El estímulo de los nervios periféricos y de los músculos también ha sido reportado en voluntarios expuestos a gradientes de campos magnéticos de 1 kHz en sistemas experimentales de proyección de imagen de resonancia magnética. Las densidades de flujo magnético umbral eran varios mT, y las densidades de corriente inducidas correspondientes en los tejidos periféricos eran cerca de 1 A/m^2 ; para los pulsos de campo producidos por gradientes rápidamente conmutadas. Los campos magnéticos variables en el tiempo que inducen densidades de corriente sobre 1 A/m^2 en el tejido, producen la excitación de los nervios y son capaces de producir efectos biológicos irreversibles tales como fibrilación cardíaca. En un estudio que utilizaba grabaciones electromiográficas del brazo humano, se encontró que un campo pulsado con dB/dt mayor de 10^4 T/s era necesario para estimular el tronco nervioso medio. También se ha encontrado que un parámetro importante en el estímulo de tejidos excitables es la duración del estímulo magnético.

Umbral menor que 100 mA/m^2 se pueden derivar de estudios de las funciones visuales y mentales en voluntarios humanos. Cambios en el tiempo de respuesta para las pruebas de razonamiento complejo, han sido señalados en los voluntarios sujetos a corrientes eléctricas débiles en frecuencias de potencia pasadas a través de electrodos colocados en la cabeza y los hombros; las densidades de corriente fueron estimadas entre 10 y 40 mA/m^2 . Finalmente, muchos estudios han señalado que los voluntarios experimentaron sensaciones visuales débiles y titilantes, conocidas como fosfenos

magnéticos, durante la exposición a los campos magnéticos de EBF entre 3 a 5 mT. Estos efectos visuales también se pueden inducir por la aplicación directa de corrientes eléctricas débiles a la cabeza. En 20 Hz, densidades de corriente de cerca de 10 mA/m^2 en la retina han sido estimadas como el umbral para la inducción de fosfenos, que está por encima de las densidades de corriente endógena típicas en tejidos eléctricamente excitables. Umbrales más altos se han observado para frecuencias más bajas y más altas.

Algunos estudios han sido desarrollados en 50 Hz sobre potenciales visualmente evocados que exhibieron umbrales para los efectos en densidades de flujo del orden de 60 mT (Silny 1986). Consistentemente con estos resultados, no se obtuvo ningún efecto para potenciales visualmente evocados que fueron obtenidos por Sander y col. (1982), usando campos de 50 Hz y 5 mT, o Graham y col. (1994), con campos eléctricos y magnéticos combinados en 60 Hz de 12 kV/m y 30 μT , respectivamente.

Efectos indirectos de los campos magnéticos y eléctricos.

Los efectos indirectos de los campos electromagnéticos pueden ser resultado de un contacto físico (Ej. tacto o roce) entre una persona y un objeto, tal como una estructura metálica en el campo, con un potencial eléctrico diferente. El resultado de tal contacto es el flujo de carga eléctrica (corriente del contacto) que pudo haberse acumulado en el objeto o en el cuerpo de la persona. En el rango de frecuencia hasta aproximadamente 100 KHz., el flujo de corriente eléctrica de un objeto en el campo al cuerpo del individuo puede dar lugar al estímulo de los músculos y/o los nervios periféricos. Con el aumento de niveles de la corriente esto se puede manifestar como una percepción, dolor por descarga eléctrica y/o quemadura, falta de habilidad para soltar el objeto, dificultad en la respiración y en corrientes muy altas, fibrilación ventricular cardiaca. Los valores de umbral para estos efectos dependen de la frecuencia, el umbral más bajo ocurre en las frecuencias entre 10 y 100 Hz. Los umbrales para las respuestas de los nervios periféricos permanecen bajos para frecuencias de hasta varios kHz. Con la ingeniería y/o controles de administración apropiados, e incluso mediante el uso de ropa de protección para el personal, se puede evitar que estos problemas ocurran. Descargas de chispa pueden ocurrir cuando un individuo se acerca a un objeto con un potencial eléctrico diferente, sin realmente tocarlo. Cuando un grupo de los voluntarios, quienes estaban aislados eléctricamente de la tierra, mantuvieron la punta de un dedo cerca de un objeto puesto a tierra, el umbral para la percepción de descargas de chispa era tan bajo como 0,6-1,5 kV/m el 10% de casos. El nivel de umbral del campo reportado como causante de molestia bajo estas condiciones de exposición estuvo en el orden de 2,0-3,5 kV/m. Corrientes de contacto grandes pueden dar lugar a la contracción de los músculos. En los voluntarios

masculinos, el umbral del percentil 50 para no poder soltar un conductor cargado ha sido reportado como 9 mA en 50/60 Hz, 16 mA en 1 KHz., cerca de 50 mA en 10 KHz., y cerca de 130 mA en 100 kHz.

Las corrientes de umbral para varios efectos indirectos de campos con frecuencias hasta 100 KHz. se resumen en la siguiente tabla.

	Umbral de corriente [mA] a una frecuencia dada		
	50/60 [Hz]	1 [kHz]	100 [kHz]
Percepción al tocar	0.2 - 0.4	0.4-0.8	25-40
Dolor en el dedo que hace contacto	0.9 - 1.8	1.6 - 3.3	33 - 55
Descarga dolorosa/umbral	8 - 16	12 - 24	112 - 224
Descarga severa/dificultad para respirar	12- 23	21 - 41	160 - 320

Tabla 33: Rangos de corriente umbral para efectos indirectos incluyendo hombres, mujeres y niños.

Campos electromagnéticos y cáncer.

Está comprobado que por encima de ciertos umbrales, los campos electromagnéticos pueden desencadenar efectos biológicos. (OMS, 2003).

Los efectos de corto plazo como corrientes inducidas en el cuerpo, son efectos conocidos y comprobados. Para ellos, las prácticas de ingeniería normalmente adoptadas y las recomendaciones de los límites científicamente recomendados, como los ICNIRP, son más que suficientes para prevenir efectos en la salud.

Luego de numerosas investigaciones científicas; en los últimos 30 años se han publicado más de 25.000 artículos; hasta la fecha no hay pruebas que permitan concluir que la exposición a campos electromagnéticos de baja intensidad sea perjudicial para la salud. (OMS 2003).

Pese a la ausencia de pruebas, la existencia de algunos estudios epidemiológicos que sugieren cierta relación, causan preocupación en la sociedad.

Cabe mencionar que los estudios epidemiológicos que muestran una asociación positiva, los mismos presentan resultados que arrojan una débil fuerza de asociación.

Baja frecuencia.

Los datos sobre el riesgo de cáncer asociado a la exposición de campos de extrema baja frecuencia (0-300 [Hz]) entre los individuos que viven cerca de las líneas de electricidad son al parecer consistentes (es decir muestran el mismo incremento de la incidencia del mismo tipo de cáncer) en indicar un riesgo levemente más alto de leucemia infantil.

Estos estudios sugieren que en una población expuesta a campos magnéticos promedios en exceso de 0.3 a 0.4 [μ T], el doble de niños podría desarrollar leucemia comparada con una población en exposiciones más bajas. La leucemia infantil se presenta anualmente en 4 de cada 100.000 niños.

Los estudios sin embargo no indican un riesgo semejante para otro tipo de cáncer en niños o de cualquier tipo de cáncer en adultos. La base para la asociación entre la leucemia infantil y el residir cerca de líneas de energía eléctrica es aún desconocida. En ausencia de una base de estudios de laboratorio, los datos epidemiológicos son escasos para permitir que se establezcan recomendaciones para esta exposición.

En relación a la existencia de efectos subjetivos, como ser dolor de cabeza, este tipo de dolencias no han podido ser correlacionadas con la presencia de campos electromagnéticos, dado que sujetos expuestos no pudieron determinar si el campo estaba o no presente, mientras que las dolencias estaban presentes cuando creían que si estaban expuestos aunque no lo estuvieran.

Resumen de los efectos biológicos y de los estudios epidemiológicos para campos de hasta 100 [kHz].

Con la posible excepción de tumores mamarios, hay poca evidencia proveniente de los estudios de laboratorio que los campos magnéticos en frecuencias de potencia tienen un efecto de promover tumores. Aunque son necesarios estudios futuros en animales para clarificar los efectos posibles de los

campos de ELF en las señales producidas en células y en la regulación endocrina - ambas podrían influenciar el desarrollo de tumores promoviendo la proliferación de células iniciadas - solamente se puede concluir que actualmente no hay evidencia convincente para los efectos cancerígenos de estos campos y que estos datos no se pueden utilizar como base para desarrollar las recomendaciones para la exposición.

Los estudios de laboratorio en sistemas celulares y animales no han encontrado ningún efecto establecido de los campos de baja frecuencia que indiquen efectos adversos en la salud cuando la densidad de corriente inducida está en o debajo de $10 \text{ [mA/m}^2\text{]}$. A niveles más altos de densidad de corriente inducida ($10\text{-}100 \text{ [mA/m}^2\text{]}$), más efectos significativos sobre el tejido se han observado consistentemente- por ejemplo cambios funcionales en el sistema nervioso y otros efectos del tejido.

Los datos sobre el riesgo de cáncer asociado a la exposición a los campos de ELF entre los individuos que viven cerca de líneas de potencia son al parecer consistentes en indicar un riesgo levemente más alto de leucemia en niños, aunque estudios más recientes cuestionan la débil asociación previamente observada. Los estudios, sin embargo, no indican un riesgo semejantemente elevado de cualquier otro tipo de cáncer en la niñez o de cualquier forma de cáncer en adultos. La base para la conexión hipotética entre la leucemia de la niñez y la residencia cercana a las líneas de potencia es desconocida; si la conexión no se relaciona con los campos eléctricos y magnéticos de ELF generados por las líneas de potencia, luego factores de riesgo desconocidos para la leucemia tendrían que ser relacionados a las líneas de potencia de manera indeterminada. En ausencia de una base de estudios de laboratorio, los datos epidemiológicos son escasos para permitir que se establezcan recomendaciones para la exposición.

Ha habido informes de un riesgo creciente de ciertos tipos de cáncer, tales como leucemia, tumores del tejido nervioso y, de un número limitado, de cáncer de pecho, entre trabajadores eléctricos. En la mayoría de los estudios, los títulos del trabajo fueron utilizados para clasificar sujetos según niveles presumidos de la exposición del campo magnético. Algunos estudios más recientes, sin embargo, han utilizado métodos más sofisticados de tasa de exposición; todos estos estudios sugirieron un riesgo creciente de leucemia o de tumores del cerebro pero eran en gran parte contrarios con respecto al tipo de cáncer para el cual el riesgo era incrementado. Los datos son escasos para proporcionar una base para las recomendaciones de exposición al campo de ELF. En una gran cantidad de estudios epidemiológicos, no se ha proporcionado ninguna evidencia consistente de efectos reproductivos adversos.

La medición de respuestas biológicas en estudios de laboratorio y en voluntarios ha proporcionado poca evidencia de efectos nocivos de campos de baja frecuencia en niveles a los cuales las personas están expuestas comúnmente. Una densidad corriente del umbral de 10 mA/m^2 en las frecuencias hasta 1 KHz. se ha estimado para efectos de menor importancia sobre funciones del sistema nervioso. Entre voluntarios, los efectos más consistentes de la exposición son la aparición de fosfenos visuales y una reducción del ritmo cardíaco durante o inmediatamente después de la exposición a los campos de ELF, pero no hay evidencia que estos efectos transitorios están asociados a cualquier riesgo de salud a largo plazo. Una reducción de la síntesis de melatonina pineal nocturna se ha observado en varias especies de roedores después de la exposición a los campos eléctricos y magnéticos débiles de ELF, pero no se ha señalado ningún efecto consistente en los seres humanos expuestos a los campos de ELF bajo condiciones controladas. Estudios que implicaban exposiciones a campos magnéticos de 60 Hz, hasta $20 \mu\text{T}$, no han señalado efectos confiables sobre niveles de melatonina en la sangre.

Resumen de los efectos supuestos o conocidos de los campos eléctricos y magnéticos.

La siguiente tabla muestra un resumen de los principales efectos de corto plazo, cuya existencia es reconocida, además de efectos a largo plazo que no han sido confirmados aún.

	Efectos a corto plazo cuya existencia es reconocida.	Efectos a largo plazo no confirmados.
Manifestaciones.	Magnetofosfenos.	Cáncer.
	Estimulación muscular.	Reproducción.
	Vibración del sistema piloso.	
Parámetro pertinente.	Exposición instantánea extrema.	Exposición acumulada ponderada.
Umbral de aparición supuesto o real.	5 a $50 \mu\text{T}$; 50 kV/m .	0.2 a $0.3 \mu\text{T}$.
	Superior a la mayoría de las exposiciones.	Inferior a la mayoría de las exposiciones.
Competencia	Técnica.	Científica más política.
Estudios en curso o a hacer.	Normalización.	Epidemiología, Biología.
	Cálculo de corrientes inducidas.	Evaluación de riesgos.

Tabla 34: Tabla resumen efectos biológicos

Efectos Biológicos de los Campos de Extra baja frecuencia

Corrientes eléctricas inducidas.

Los campos eléctricos y magnéticos pueden inducir cargas superficiales en los humanos dando como resultado flujos de corriente dentro del cuerpo.

Una cantidad que es de interés al analizar las interacciones de los campos de ELF es la magnitud peak de la densidad de corriente inducida I_{peak} la cual puede ser calculada de la Ley de Ohm:

$$I_{peak} = \sigma E_{peak} = \sigma \pi r f B_0$$

Donde

B_0 : campo magnético sinusoidal aplicado a un circuito circular

$|E|_{peak}$: valor pico del campo eléctrico inducido

r: radio del circuito

f: frecuencia

σ : conductividad eléctrica del medio.

La ecuación anterior ayuda a calcular la magnitud del campo de ELF que eventualmente perturbaría el funcionamiento de tejidos biológicos críticos tales como el corazón y el sistema nervioso central.

Se ha estimado que las densidades de corriente endógenas (que se originan en el interior del organismo) asociadas con la actividad eléctrica del cerebro y el corazón tienen límites inferiores de 1 mA/m^2 y 10 mA/m^2 , respectivamente [1]. Como ejemplo de estimación basado en la anterior ecuación, para un campo magnético sinusoidal de 60Hz, aplicado a un lazo circular de tejido con

radio $r = 0.06$ m y una conductividad $\sigma = 0.2$ S/m, comparables a los del corazón humano, encontramos que la densidad de flujo magnético que induciría una densidad de corriente de 10mA/m^2 es de 4.4mT .

Debido a que campos magnéticos de EBF con intensidades mayores a varias militeslas están presentes en la vecindad de ciertos tipos de aparatos y maquinaria industrial, la inducción de campos en tejidos a niveles que podrían perturbar funciones biológicas es probable. Además, si existen grandes transitorios o se presentan armónicos de orden superior, es posible que se induzcan en el cuerpo corrientes eléctricas más fuertes que aquellas que ocurren en forma natural. Existen, también, parámetros que a menudo son omitidos en las investigaciones biológicas: la forma de onda, la frecuencia natural del campo y el espesor de la piel; que afectan significativamente el comportamiento del campo.

Cáncer

Se conjetura que los campos magnéticos pueden suministrar corrientes, torques o fuerzas en el cuerpo que podrían aumentar el riesgo de cáncer (por ejemplo, reducción de la melatonina de la glándula pineal) o que los campos magnéticos de ELF pueden ser parte de procesos biológicos de múltiples pasos.

Médicos e ingenieros coinciden en afirmar que un campo magnético de baja frecuencia no produce efectos o cambios biológicos significativos ya que ellos no involucran rupturas moleculares que llevarían al cáncer. A pesar de que todavía se conoce poco sobre las causas de cánceres específicos, sí se comprenden lo suficientemente bien los mecanismos de la carcinogénesis, como para que los estudios celulares y animales proporcionen información relevante con vistas a determinar si un agente causa o contribuye al cáncer.

Evidencias de interacción y mecanismos.

Campos eléctricos y magnéticos de extra baja frecuencia, incluyendo campos de 50 y 60 Hz, son conocidos de causar estimulación en algunos tejidos como nervios, músculos y corazón, una vez que la magnitud del campos eléctrico sobrepasa el valor umbral. Las membranas que rodean los músculos y células pueden ser excitadas una vez que el potencial de la membrana es alcanzado. El

potencial de acción (el potencial a través de la membrana que inicia la propagación a lo largo de la célula nerviosa o muscular), depende del tipo y dimensiones de la célula, de la frecuencia y la forma de onda de la señal estimulante. La excitación celular y la propagación del impulso nervioso son procesos no lineales complejos. Sin embargo, el comportamiento antes del inicio de la excitación, puede ser descrito por la ecuación de cable. Para una neurona (mielinizada o no mielinizada), el umbral de estimulación resultante de un campo eléctrico en el tejido, toma la siguiente forma:

$$\lambda^2 \frac{\partial^2 V_m}{\partial x^2} - \tau \frac{\partial V_m}{\partial x} - (V_m - V_r) = \lambda^2 \frac{\partial E_x}{\partial x}$$

Donde:

V_m : Potencial inducido en la membrana.

V_r : Potencial de descanso de membrana.

λ : Constante espacial neuronal.

τ : Constante temporal neuronal.

X : Posición longitudinal de la neurona.

$\frac{\partial E_x}{\partial x}$: Función de activación, siendo E_x la componente del campo eléctrico en la dirección del eje x .

Debido a que las neuronas en su mayoría no tienen una forma recta, una función de activación más general puede ser definida por $\frac{\partial E_l}{\partial l}$, donde l es el arco alrededor de la neurona. Entonces, incluso un campo uniforme en el tejido, puede provocar una excitación en la neurona, la cual depende de la forma de éste. Las constantes de la membrana λ y τ , dependen del tipo de célula y sus dimensiones. El umbral V_m , depende de la frecuencia de la señal, duración y forma de onda de la señal (ej.: pulso monopolar, pulso bipolar, sinusoidal, pulso único o pulsos repetidos). Un valor típico de V_m es de -20 mV . A pesar del hecho que es el cambio del campo eléctrico en el contorno de la neurona el responsable del inicio de la propagación del impulso nervioso, la mayoría de la información experimental disponible, se encuentran en términos del campo eléctrico y la densidad de corriente.

El campo eléctrico interno inducido E y la densidad de corriente J , están relacionados a través de la ley de Ohm:

$$J = \sigma E$$

Donde σ es la conductividad del tejido, el cual puede ser un tensor para tejidos anisotrópicos.

La mayoría de los datos disponibles de umbrales de estimulación, han sido obtenidos con electrodos de dimensiones limitadas y esta dado en términos de la corriente o densidad de corriente. También, aparentemente, el umbral de densidad de corriente de 10 mA/m² usado como un límite de exposición para campos eléctricos y magnéticos usado por una reciente guía de límites de exposición (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection ICNIRP).