

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



CÁLCULO PREDICTIVO DE LOS CAMPOS ELÉCTRICO Y MAGNÉTICO EN LAS LÍNEAS DE TRANSMISIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE LAS REDES ELÉCTRICAS DEL PERÚ

INFORME DE SUFICIENCIA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO ELECTRÓNICO

PRESENTADO POR:

EDGAR ESCRIBA GUTIÉRREZ

**PROMOCIÓN
2004 - I**

**LIMA - PERÚ
2010**

**CÁLCULO PREDICTIVO DE LOS CAMPOS ELÉCTRICOS Y
MAGNÉTICOS EN LAS LÍNEAS DE TRANSMISIÓN Y
DISTRIBUCIÓN DE LAS REDES ELÉCTRICA DEL PERÚ**

A mi madre por su esfuerzo, sacrificio
y dedicación permanente.

SUMARIO

En el presente informe se realiza un análisis y una propuesta de cálculo predictivo para el control de la exposición a campos eléctricos y magnéticos en las líneas eléctricas de alta tensión a frecuencia de 60 Hz y una evaluación en el cumplimiento de las recomendaciones internacionales y normas adoptados en el Perú. Es crucialmente importante especificar las condiciones de exposición a RNI (Radiaciones No Ionizantes) tan precisamente como sea posible para prevenir los efectos causados en la salud humana, el medio ambiente y la previsión a futuro de la exposición a los campos eléctrico y magnético.

Los mecanismos de interacción de los campos eléctricos y magnéticos con la materia tienen su origen en el acoplamiento de los campos con el tejido biológico:

Los campos eléctricos inducen una carga superficial en un cuerpo expuesto, la cual induce en el interior del cuerpo corrientes cuya magnitud está en relación con la densidad de carga superficial.

Los campos magnéticos también actúan sobre los seres vivos induciendo campos y corrientes eléctricos en el interior del cuerpo.

En este Informe se muestran las conclusiones de la evidencia científica actual concerniente a la exposición de los campos eléctricos y magnéticos de baja frecuencia, los efectos causados en la salud humana y el medio ambiente, los resultados de la propuesta del cálculo predictivo y de la evaluación para el cumplimiento de los límites de exposición basados en las recomendaciones de la ICNIRP (Comisión Internacional sobre Protección frente a Radiaciones No Ionizantes) y los Estándares de Calidad Ambiental para Radiaciones No Ionizantes adoptados en el Perú.

ÍNDICE

PRÓLOGO	1
CAPÍTULO I	
PLANTEAMIENTO DE INGENIERÍA DEL PROBLEMA	4
1.1. Problemática de los campos eléctricos y magnéticos de las líneas de transmisión y distribución eléctrica.....	4
1.2. Objetivos.....	5
1.3. Limitaciones del cálculo analítico de los campos.....	5
CAPÍTULO II	
MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL	6
2.1. Características físicas de los campos eléctricos y magnéticos.....	6
2.1.1. Electricidad y magnetismo.....	6
2.1.2. Cantidades y unidades.....	8
2.1.3. Campos variables en el tiempo.....	9
2.1.4. Polarización de campo y homogeneidad.....	11
2.1.5. Energía transportada por el campo eléctrico.....	11
2.1.6. Inducción de campos eléctricos por campos magnéticos.....	12
2.2. Interacción física de los campos eléctricos y magnéticos con la materia.....	12
2.2.1. Propiedades eléctricas de la materia.....	12
2.2.2. Propiedades magnéticas de la materia.....	14
2.2.3. Interacción con la materia.....	16
2.3. Fuentes naturales y artificiales.....	17
2.3.1. Fuentes naturales de campos estáticos y variables en el tiempo.....	17
2.3.2. Fuentes artificiales de campos variables en el tiempo.....	19
2.3.3. Fuentes de exposición en el lugar de trabajo.....	22
2.4. Dosimetría.....	23
2.4.1. Campos eléctricos.....	23
2.4.2. Campos magnéticos.....	25
2.4.3. Absorción de energía por exposición a los campos.....	28
CAPÍTULO III	
EFFECTOS CAUSADOS POR LOS CAMPOS ELÉCTRICOS Y MAGNÉTICOS (RNI) DE ELF SOBRE LA SALUD HUMANA Y EL MEDIO AMBIENTE	29

3.1.	Efectos biológicos causados por exposición a campos de ELF.....	29
3.1.1.	Efectos en la reproducción.....	31
3.1.2.	Efectos genéticos.....	31
3.1.3.	Efectos de leucemia y otros tipos de cáncer.....	32
3.2.	Clasificación de los campos ELF con respecto al cáncer.....	33
3.3.	Efectos medioambientales de los campos eléctricos y magnéticos de ELF.....	34

CAPÍTULO IV

MARCO NORMATIVO NACIONAL E INTERNACIONAL..... 35

4.1.	Organizaciones normativas internacionales.....	35
4.2.	Normas y límites de exposición a RNI elaborados por organismos internacionales.....	36
4.2.1.	Exposición ocupacional.....	36
4.2.2.	Exposición poblacional.....	36
4.2.3.	Restricciones básicas.....	37
4.2.4.	Niveles de referencia.....	38
4.3.	Normativa nacional de exposición a Radiaciones No Ionizantes (RNI).....	39
4.4.	Valores máximos de exposición a campos eléctricos y magnéticos a 60 Hz en el Perú.....	41
4.5.	Reglas de seguridad en las líneas eléctricas de AT.....	41
4.5.1.	Faja de servidumbre.....	42
4.5.2.	Distancias verticales de seguridad.....	42

CAPÍTULO V

CÁLCULO DE LOS CAMPOS ELÉCTRICOS Y MAGNÉTICOS EN LÍNEAS

DE TRANSMISIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE ALTA TENSIÓN..... 43

5.1.	Método de las imágenes en el campo eléctrico.....	43
5.2.	Efecto de la tierra en el campo magnético creado por una línea eléctrica aérea..	43
5.3.	Modelo de la catenaria para las líneas eléctricas aéreas.....	44
5.4.	Campo eléctrico creado por las líneas eléctricas de alta tensión.....	45
5.4.1.	Cálculo del potencial eléctrico en una línea eléctrica aérea de AT de un sistema trifásico con un conductor por fase.....	45
5.4.2.	Cálculo del campo eléctrico creado por línea eléctrica aérea de AT de un sistema trifásico con un conductor por fase.....	47
5.5.	Cálculo del campo magnético creado por líneas eléctricas aérea de AT de un sistema trifásico con un conductor por fase.....	49

CAPÍTULO VI

PROPUESTA DE CÁLCULO PREDICTIVO PARA EL CONTROL DE LA

EXPOSICIÓN A RNI EN LAS LÍNEAS DE ALTA TENSIÓN.....	52
6.1. Protocolo de cálculo predictivo de campos eléctricos y magnéticos en líneas eléctricas aéreas.....	52
6.1.1. Inspección de campo en las líneas eléctricas.....	52
6.1.2. Perturbación del campo.....	53
6.1.3. Seguridad de las personas propiedad pública y privada y medio ambiente.....	53
6.1.4. Fuentes de campo eléctrico y magnético.....	54
6.2. Cálculo predictivo de campos eléctricos y magnéticos.....	54
6.2.1. Cálculo de los parámetros de la catenaria.....	54
6.2.2. Cálculo de la altura del conductor imagen.....	54
6.2.3. Software de simulación para los campos eléctrico y magnético.....	55
CAPÍTULO VII	
EVALUACIÓN PARA EL CUMPLIMIENTO DE LAS NORMAS.....	59
7.1. Evaluación de los resultados con respecto a las Recomendaciones ICNIRP.....	59
7.1.1. Evaluación de la Intensidad de campo eléctrico.....	59
7.1.2. Evaluación del campo magnético (densidad de flujo magnético)	59
7.2. Evaluación de los resultados con respecto a las Reglas de Seguridad.....	60
7.2.1. Evaluación de la faja de servidumbre.....	60
7.2.2. Evaluación de la distancia vertical de seguridad.....	60
7.2.3. Evaluación del índice de compacidad.....	61
RESUMEN GENERAL.....	62
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	64
Anexo A.....	67
Normativa complementaria – Código Nacional de Electricidad – Suministro 2009 (en pre-publicación)	
Anexo B.....	80
Valores del parámetro “a” de la catenaria para diferentes longitudes del vano Con respecto a la diferencia de las alturas en las líneas eléctricas	
Anexo C.....	82
Valores de la profundidad adicional del conductor imagen por efecto de la tierra para 60 Hz con respecto a la resistividad del suelo para el cálculo del campo magnético	
Anexo D.....	85
Gráfica de longitudes reales de vanos de líneas eléctricas de AT para 220 kV y de faja de servidumbre	
Anexo E.....	87

Evaluación de campos eléctrico y magnético para una configuración triangular Sin cable de guarda de una línea de 220 kV y 370 A	
Anexo F.....	91
Evaluación de campos eléctrico y magnético para una configuración vertical sin cable de guarda de una línea de 220 kV y 370 A	
Anexo G.....	95
Programa de simulación para el cálculo y evaluación de los campos para una configuración triangular sin cable de guarda de una línea de 220 kV y 370 A	
Anexo H.....	99
Cálculos analíticos para la solución exacta de los campos generados por las Líneas eléctricas empleando el modelo de la catenaria	
Anexo I.....	113
Mapa de las líneas de transmisión eléctrica del Perú 2010	
Anexo J.....	115
Glosario de términos	
BIBLIOGRAFÍA.....	118

PRÓLOGO

Los niveles de los campos eléctricos y magnéticos (CEM) provenientes de las fuentes artificiales en especial de las líneas eléctricas, se han incrementado continuamente en el lapso de las últimas décadas. La mayoría de las exposiciones a los CEM vienen con el incremento del uso de la electricidad y las nuevas tecnologías. Razón por la cual en las últimas dos décadas ha ido en aumento el interés y una importante preocupación de la población peruana sobre los posibles efectos biológicos y posibles consecuencias en la salud en condiciones habituales de exposición a las radiaciones no ionizantes (RNI) en especial de las antenas de telecomunicaciones y de las redes de energía eléctrica.

Es por eso que hasta la fecha han sido desarrollados muchos estudios en los últimos años respecto a este tema, habiéndose realizado importantes evaluaciones de los mismos. Se han presentado estudios sobre los campos magnéticos y el cáncer, sobre la reproducción y sobre las reacciones neurológicas y de comportamiento. El estudio de los efectos biológicos de los campos eléctricos y magnéticos es multidisciplinario; se vale de la física, ingeniería, matemática, biología, química, medicina y la salud ambiental.

Es crucialmente importante especificar la condición de exposición tan precisamente como sea posible cuando se discute los efectos biológicos y sobre la salud de la exposición a los campos eléctrico y magnético. La física y la ingeniería proporciona los medios para medir las intensidades reales de los campos y describir las características de la exposición cuantitativamente con este propósito.

Los campos eléctricos y magnéticos de frecuencia extremadamente baja (ELF) y de muy baja frecuencia (VLF) abarcan el intervalo de frecuencia por encima de los campos estáticos (> 0 Hz) hasta los 30 kHz. La ELF se considera comprendida en el intervalo de frecuencia de 0 a 300 Hz y la VLF en el intervalo de 300 Hz a 30 kHz. En el intervalo de frecuencia > 0 a 30 kHz, las longitudes de onda varían entre ∞ (infinito) y 10 km, en estas frecuencias bajas se aplican las condiciones de campo cercano, por lo que los campos eléctricos y magnéticos actúan de forma esencialmente independiente entre si y deben ser tratados por separado, (no tienen comportamiento de onda plana).

En el presente documento se analizaran y se caracterizaran los campos producidos por las principales configuraciones empleadas en líneas eléctricas de alta tensión para la realización del cálculo predictivo y su evaluación en el cumplimiento de las normas. Asimismo se revisaran los errores cometidos al obtener el campo eléctrico y magnético.

Si no se indica lo contrario, los valores de campo eléctrico y campo magnético que se muestran en el presente trabajo se han obtenido a 1 m del suelo, valor comúnmente empleado tanto para cálculo como para la medida. Asimismo, los puntos donde se mide el campo corresponden a una trayectoria transversal perpendicular a la dirección de los conductores.

Es conveniente aclarar por ultimo que en los ejemplos que se van a mostrar las alturas y distancias entre fases corresponden a valores típicos en líneas de alta tensión.

La estructura del presente informe se expone a continuación:

- a) En el capítulo 1 se analiza la problemática de los campos eléctricos y magnéticos de las líneas de transmisión y distribución eléctrica.
- b) En el capítulo 2 se revisan los conceptos relacionados con las características físicas básicas de los campos eléctricos y magnéticos en el rango de extremadamente baja frecuencia (ELF), así como la interacción física de los campos eléctricos y magnéticos con la materia que constituye el tejido biológico.
- c) El capítulo 3 presenta los estudios científicos hasta la fecha sobre los efectos causados por los campos eléctricos y magnéticos (RNI) de ELF sobre la salud humana y medio ambiente.
- d) El capítulo 4 presenta las recomendaciones y límites de exposición a RNI elaborados por organismos internacionales así como el establecimiento de los valores máximos de exposición a campos eléctricos y magnéticos a 60 Hz y las reglas de seguridad en el Perú.
- e) El capítulo 5 muestra por formulación analítica los cálculos de los campos eléctrico y magnético en las líneas de transmisión y distribución de alta tensión en las principales configuración empleando el modelo de conductor rectilíneo indefinido (RI) de altura variable, es decir cuya altura coincide con la de la catenaria.
- f) El capítulo 6 presenta una propuesta de calculo predictivo para el control de la exposición a RNI en las líneas de transmisión y distribución de alta tensión.
- g) En el capítulo 7 se realiza una evaluación del cálculo teórico respecto al cumplimiento de las recomendaciones de la ICNIRP y respecto a las reglas de seguridad.
- h) En el capítulo 8 se realiza un resumen general de las características físicas de los campos, efectos en la salud y de la investigación disponible hasta el momento.
- i) Se presentan las principales conclusiones y recomendaciones del trabajo desarrollado en tema de cálculo predictivo y evaluación.

Por ultimo se incluye la bibliografía utilizada y los siguientes anexos:

- a) El anexo A presenta la normativa complementaria del Código Nacional de Electricidad – Suministro 2009 en pre-publicación.

- b) El anexo B presenta valores del parámetro “a” de la catenaria para diferentes longitudes del vano con respecto a la diferencia de alturas en las líneas eléctricas.
- c) El anexo C presenta valores de la profundidad adicional del conductor imagen por efecto de la tierra para 60 Hz con respecto a la resistividad del suelo para el cálculo del campo magnético.
- d) El anexo D presenta una grafica de longitudes reales de vanos de líneas eléctricas de AT para 220 kV y de fajas de servidumbre.
- e) El anexo E presenta una evaluación de los campos eléctrico y magnético para una configuración triangular sin cable de guarda de una línea de 220 kV y 370 A.
- f) El anexo F presenta una evaluación de los campos eléctrico y magnético para una configuración vertical de doble terna sin cable de guarda de una línea de 220 kV y 370 A.
- g) El anexo G presenta el programa de simulación para el cálculo y evaluación de los campos eléctrico y magnético para una configuración triangular sin cable de guarda de una línea de 220 kV y 370 A.
- h) El anexo H presenta los cálculos analíticos para la solución exacta de los campos generados por las líneas eléctricas empleando el modelo de la catenaria.
- i) El anexo I muestra el mapa de las líneas de transmisión eléctrica del Perú 2010.
- j) El anexo J contiene el glosario de términos utilizados en este informe.

Quisiera dedicar unas palabras de reconocimiento a aquellos especialistas y compañeros que han colaborado por sus aportes conceptuales, sugerencias y comentarios muy provechosos para que este trabajo haya llegado a buen fin y a la organización científica internacional ICNIRP, por la investigación científica y el desarrollo de las recomendaciones internacionales sobre los límites de exposición contra las radiaciones no ionizantes.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DE INGENIERÍA DEL PROBLEMA

1.1. Problemática de los campos eléctricos y magnéticos de las líneas de transmisión y distribución en las redes eléctricas.

En la última década el Perú viene atravesando un crecimiento sustancial en la economía que a su vez está acompañado por el aumento significativo de la demanda en el consumo eléctrico.

El consumo energético se distribuye entre los sectores de actividad económica como la minería, la industria (agroindustria, metalúrgico, textiles, alimenticios), los servicios (educación, sanidad, comercio, banca, hostelería, etc.), residencial, alumbrado público. El consumo acumulado de la energía eléctrica en el 2010 creció a 6,8% y al culminar el año se espera que llegue a 7,5%. Por lo tanto se requiere mayor capacidad instalada de electricidad. En el 2006, el país tenía una capacidad instalada de 6.7 GW.

Es necesario también mencionar que la tasa de crecimiento promedio anual de la población peruana es de 1,6% y la densidad poblacional es de 22,0 Hab./km² en el territorio peruano, según Censo Nacional 2007, XI de población y VI de vivienda.

Los niveles de los campos eléctricos y magnéticos (CEM) provenientes de las fuentes artificiales básicamente en 60 Hz se han incrementado continuamente en el lapso de las últimas décadas. La mayoría de las exposiciones a los CEM vienen con el incremento del uso de la electricidad y las nuevas tecnologías. La exposición a los campos eléctricos y magnéticos se produce en todos los ámbitos de la sociedad: en el hogar, en el trabajo, en los centros de enseñanza. Allí donde hay conductores eléctricos, motores eléctricos, medios de transporte de propulsión eléctrica y equipo electrónico, se crean campos eléctricos y magnéticos. Se han calculado niveles de intensidades de campo por encima de los niveles de referencia (límites máximos permisibles) a exposición poblacional en viviendas debajo de líneas de alta tensión o en sus proximidades.

La exposición a campos eléctricos y magnéticos externos de extremadamente baja frecuencia inducen una carga superficial en un cuerpo expuesto, la cual induce campos eléctricos y corrientes dentro del cuerpo, generando posibles efectos biológicos y posibles consecuencias en la salud y al medio ambiente en condiciones habituales de exposición.

Por otro lado existe una carencia de actividades de divulgación y sensibilización social por parte de las autoridades competentes y de las empresas eléctricas, de las recomendaciones para limitar la exposición a campos eléctricos y magnéticos a frecuencias de 60 Hz emitidas por diferentes organismos internacionales, como de la progresiva normalización de los niveles de campo eléctrico y magnético, de las reglas de seguridad correspondiente a las líneas eléctricas y de los posibles efectos biológicos y posibles consecuencias en la salud.

1.2. Objetivos del informe.

El objetivo principal de este informe es, por tanto, desarrollar y validar una propuesta de cálculo predictivo por medio de formulación analítica que permita, por un lado, analizar los campos eléctrico y magnético creado por líneas eléctricas de alta tensión, especialmente la red de transmisión de 220 kV y la futura red de 500 kV por el método de conductor rectilíneo de longitud infinita con altura variable, es decir, cuya altura coincide con la de la catenaria, y por otro, evaluar la eficacia de este cálculo predictivo para la evaluación y control de la exposición a RNI en el cumplimiento de las normas en las líneas eléctricas de alta tensión. Este análisis se realiza no solo lejos de la línea eléctrica (distancia del orden de 50m), sino en puntos cercanos a la línea e incluso bajo la misma. Analizando además la variación del índice de compacidad del campo al borde de la faja de servidumbre con respecto a los campos máximos.

Adicionalmente, se ha tenido acceso a nuevos aportes en relación a la formulación matemática empleada en el cálculo de los campos eléctrico y magnético como el empleo de la ecuación de la catenaria, el efecto de la tierra en los conductores para el cálculo del campo magnético y se han comparado entre si los niveles de campo creados por las principales configuraciones empleadas en líneas eléctricas de alta tensión.

1.3. Limitaciones del cálculo analítico de los campos.

El cálculo analítico para la solución exacta de los campos eléctrico y magnético generados por las líneas eléctricas requiere de cálculos computacionales avanzados que todavía son complicados, por tal motivo para la representación de estructuras complejas, se han desarrollado diversas metodologías de cálculo del campo eléctrico y magnético mediante aplicaciones computacionales: métodos de diferencias finitas, de elementos finitos, método de Monte Carlo, método de elementos de contorno, método de simulación de cargas, método analítico numérico generalizado, etc, todos ellos con buena aproximación. En el anexo H se muestra la formulación analítica exacta de los campos eléctrico y magnético para su solución.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL

2.1. Características físicas de los campos eléctricos y magnéticos

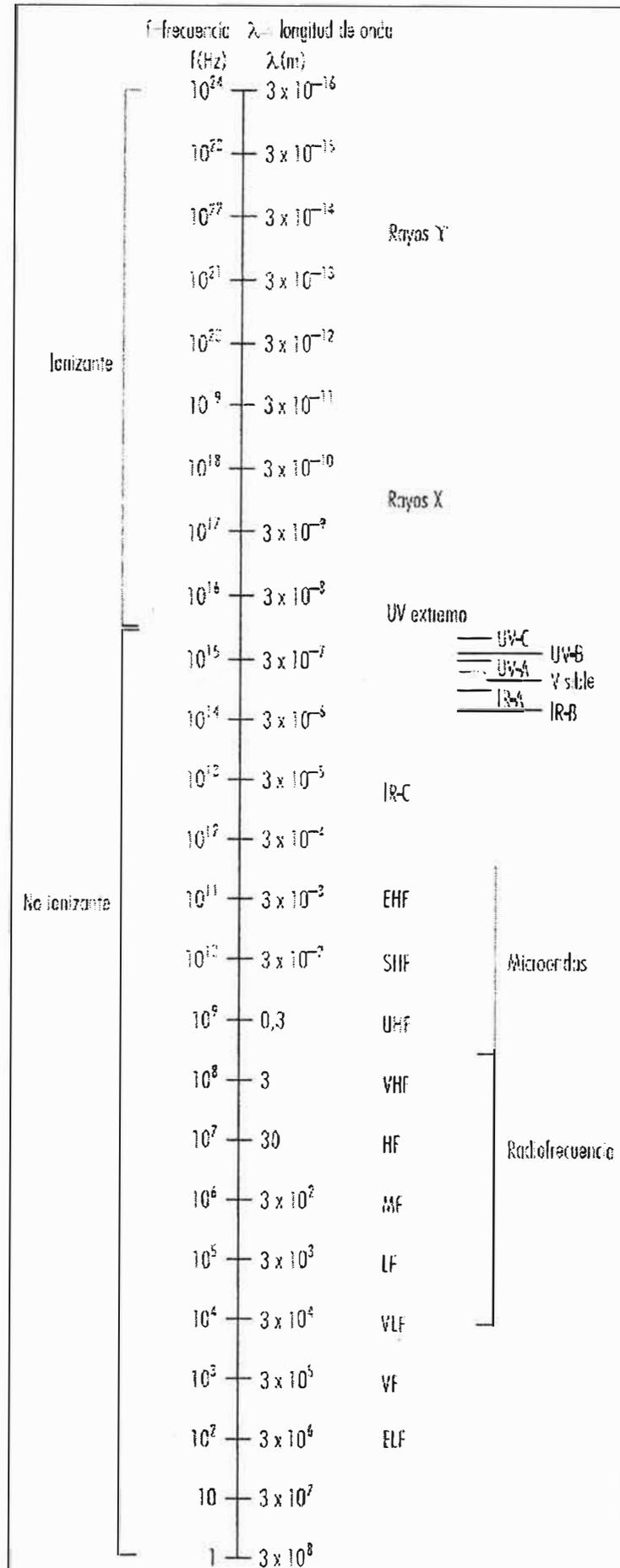
Del mismo modo que la luz visible o el sonido impregnan nuestro entorno, el espacio en que vivimos y trabajamos, también lo hace la energía de los campos electromagnéticos. Análogamente, igual que la mayor parte de la energía acústica a la que estamos expuestos la crea la actividad humana, lo mismo ocurre con la energía electromagnética: desde los débiles niveles emitidos por los electrodomésticos que usamos a diario hasta los elevados niveles que aplican los médicos con fines beneficiosos; por ejemplo, en la diatermia (tratamientos por calor). En general, la intensidad de tal energía disminuye rápidamente con la distancia a la fuente. Los niveles naturales de estos campos en el entorno son bajos. El espectro electromagnético se representa en la Fig. 2.1.

La radiación no ionizante (RNI) engloba toda la radiación y los campos del espectro electromagnético que no tienen suficiente energía para ionizar la materia. Es decir, la RNI es incapaz de impartir suficiente energía a una molécula o un átomo para alterar su estructura quitándole uno o más electrones. La división entre la RNI y la radiación ionizante suele establecerse en una longitud de onda de 100 nanómetros aproximadamente.

Al igual que cualquier forma de energía, la energía RNI tiene el potencial necesario para interactuar con los sistemas biológicos, y las consecuencias pueden ser irrelevantes, perjudiciales en diferentes grados o beneficiosas. En el caso de la radiofrecuencia (RF) y la radiación de microondas, el principal mecanismo de interacción es el calentamiento, pero en la región de baja frecuencia del espectro, los campos de alta intensidad pueden inducir corrientes altas en el cuerpo y por ello resultar peligrosos.

2.1.1. Electricidad y magnetismo

La electricidad y el magnetismo son fenómenos distintos mientras las cargas y corrientes sean estáticas o cuasi-estáticas. Solamente, cuando existen cambios suficientemente rápidos, de modo que las derivadas respecto del tiempo de las ecuaciones de Maxwell lleguen a ser significativas, entonces E y H dependen apreciablemente una de la otra.



Las leyes físicas se aplican en el espacio libre. En la presencia de un medio, es necesario corregirlas para tomar en cuenta no solo los campos externos sino también los campos que se originan dentro del medio debido a la redistribución de las cargas y corrientes microscópicas de los átomos.

Tales efectos pueden ser tomados en cuenta simplemente reemplazando ϵ_0 y μ_0 por ϵ y μ . Es costumbre expresarlas como:

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r \quad \text{y} \quad \mu = \mu_0 \mu_r \quad (2.1)$$

Donde ϵ_r y μ_r son la permitividad relativa y la permeabilidad relativa del medio. Para cualquier medio biológico, μ_r es muy cercano a la unidad de tal manera que para cualquier propósito práctico μ puede ser reemplazado por μ_0 . Esto no se aplica a la permitividad que puede asumir valores muy diferentes. Ello está relacionado a una redistribución de las cargas atómicas bajo la influencia de un campo eléctrico externo y su valor cambia no solamente de un medio a otro sino también con varios parámetros tales como temperatura, frecuencia y la longitud de onda (especialmente en el intervalo de RF) y del tipo de tejido.

2.1.2. Cantidades y unidades

Mientras que los campos eléctricos están asociados solamente con la presencia de la carga eléctrica, los campos magnéticos son el resultado del movimiento físico de las cargas eléctricas (corriente eléctrica). Un campo eléctrico E ejerce fuerzas sobre una carga eléctrica y se expresa en voltios por metro (V/m). Similarmente los campos magnéticos pueden ejercer fuerzas en las cargas eléctricas; pero solamente cuando las cargas están en movimiento. Los campos eléctrico y magnético se caracterizan por la magnitud y dirección en cada punto (son vectores); un campo magnético puede ser especificado en dos formas, como densidad de flujo magnético B , expresado en teslas (T), o como intensidad de campo magnético H , expresado en amperios por metro (A/m), en el intervalo de baja frecuencia, el campo magnético suele expresarse en términos de la densidad de flujo magnético B , expresado en microtesla (μT). En algunos textos, la densidad de flujo se expresa en gauss (G), y la conversión entre estas unidades es (para campos en el aire): $1 \text{ T} = 10^4 \text{ G}$ o $0,1 \mu\text{T} = 1 \text{ mG}$ y $1 \text{ A/m} = 1,26 \mu\text{T}$, las dos cantidades están relacionados por:

$$B = \mu_0 H \quad (2.2)$$

Donde μ_0 es la permeabilidad magnética; en el vacío o en el aire, así como también en materiales no magnéticos (incluyendo materiales biológicos) $\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ (H/m)}$.

En la región del campo lejano, el modelo de onda plana es una buena aproximación de la propagación del campo electromagnético. Las características de onda plana, son:

- Los frentes de onda tienen una geometría plana.
- Los vectores E y H y la dirección de propagación son mutuamente perpendiculares.
- La fase de los vectores E y H son las mismas, y el cociente de la amplitud E/H es constante a través del espacio. En el espacio libre, la relación $E/H=377$ ohmios que es la impedancia característica del espacio libre.
- La densidad de potencia S , es decir la potencia por unidad de área normal a la dirección de propagación, esta relacionada a los campos eléctricos y magnéticos por la expresión.

$$S = EH = E^2 / 377 = 377.H^2 \quad (2.3)$$

La situación en el campo cercano es mas complicada ya que los máximos y los mínimos de los campos E y H no ocurren en los mismos puntos a lo largo de la dirección de propagación tal como en la región del campo lejano. En la región del campo cercano, la estructura del campo electromagnético puede ser altamente no homogénea y habrá variaciones sustanciales de la impedancia de onda plana de 377 ohmios, es decir podría haber campos eléctricos puros en algunas regiones y campos magnéticos puros en otras. Las exposiciones en el campo cercano son mas difíciles de especificar porque se deben medir separadamente el campo eléctrico y el campo magnético y porque los patrones de los campos son mucho mas complicados; en esta situación la densidad de potencia ya no es una cantidad apropiada para expresar las restricciones a la exposición (como en el campo lejano).

La velocidad de una onda electromagnética en el espacio es igual a la velocidad de la luz, pero la velocidad en los materiales depende de las propiedades eléctricas de éstos, es decir, de su permitividad (ϵ) y permeabilidad (μ). La permitividad está relacionada con las interacciones del material con el campo eléctrico, en tanto que la permeabilidad expresa las interacciones del material con el campo magnético.

Las cantidades y unidades utilizadas para describir y cuantificar los campos eléctricos y magnéticos son resumidas en la tabla 2.1.

2.1.3. Campos variables en el tiempo

Las leyes físicas forman el fundamento teórico para toda la teoría clásica de campos electromagnéticos, pero para los sistemas complejos, tales como los cuerpos biológicos, son difíciles de resolver.

a) Campos eléctricos

Los campos eléctricos variables en el tiempo, inducen cargas superficiales sobre un cuerpo expuesto que da como resultado corrientes inducidas dentro del cuerpo, las magnitudes están relacionadas con la densidad de carga superficial. La densidad de corriente interna J (A/m^2) es directamente proporcional al campo eléctrico externo E .

Dependiendo de las condiciones de exposición, tamaño, forma y posición del cuerpo expuesto en el campo, la densidad de carga superficial puede variar significativamente resultando en una distribución variable y no uniforme de las corrientes dentro del cuerpo. Para campos eléctricos sinusoidales la magnitud de las corrientes dentro del cuerpo aumenta proporcionalmente con la frecuencia. Para los campos de 50 Hz el campo eléctrico interno es menor que alrededor de la 10^{-6} a 10^{-7} del campo externo al cuerpo. La distribución de la densidad de la corriente inducida varía inversamente con la sección del cuerpo y puede ser relativamente alta en el cuello y los tobillos de las personas.

Los objetos conductores podrán afectar fuertemente la distribución de los campos eléctricos. Por ejemplo, para hacer una medición utilizando una sonda, la presencia de una persona en las cercanías podrá cambiar considerablemente las características de los campos medidos. Esto debe tomarse en consideración cuando se realizan las mediciones de campo con el propósito de caracterizar las condiciones de exposición.

Tabla 2.1. Cantidades y unidades del campo eléctrico y magnético en el sistema SI [1]

Cantidad	símbolo	Unidad
Frecuencia	f	hertz (Hz)
Intensidad de campo eléctrico	E	voltio por metro (V/m)
Densidad de flujo eléctrico	D	culombio por metro cuadrado (C/m ²)
Capacitancia	C	faradio (F)
Conductividad eléctrica	σ	siemen por metro (S/m)
Corriente	I	amperio (A)
Densidad de corriente	J	amperio por metro cuadrado (A/m ²)
Carga Eléctrica	Q	culombio (C)
Impedancia	Z	ohmio (Ω)
Densidad volumétrica de carga	ρ	culombio por metro cúbico (C/m ³)
Intensidad de campo magnético	H	amperio por metro (A/m)
Densidad de flujo magnético	B	Tesla ^a (T)
Permitividad	ϵ	faradio por metro (F/m)
Permitividad del vacío	ϵ_0	$\epsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12}$ F/m
Permeabilidad	μ	henrio por metro (H/m)
Permeabilidad del vacío	μ_0	$\mu_0 = 12.57 \cdot 10^{-7}$ H/m
Tiempo	t	segundo (s)

^a 1 T = 10^4 gauss (G), una unidad en el sistema CGS

Además del acoplamiento directo entre el cuerpo y los campos variables en el tiempo, los mecanismos de acoplamiento indirecto son importantes cuando la persona expuesta está en la vecindad de otras personas u objetos. Los siguientes mecanismos de acoplamiento indirecto son de importancia [1]:

- las cargas eléctricas inducidas en un objeto conductor (por ejemplo, un automóvil) expuesto a un campo eléctrico variable en el tiempo pueden causar que una corriente pase a través de una persona en contacto con él.
- descargas transitorias (con frecuencia llamadas microshocks) pueden ocurrir cuando las personas y los objetos metálicos expuestos a un campo eléctrico fuerte llegan a una proximidad suficientemente cercana, y
- los campos eléctricos pueden interferir con los dispositivos médicos implantados (por ejemplo, los marcapasos cardiacos) y causar mal funcionamiento.

b) Campos magnéticos

Los campos magnéticos ejercen fuerzas sobre cargas en movimiento. Ya que la carga eléctrica en movimiento es una corriente eléctrica, los campos magnéticos son producidos por corrientes eléctricas e interactúan con otras corrientes eléctricas. El campo magnético es una cantidad vectorial.

Además de estos mecanismos de acoplamiento directo, los campos magnéticos que acoplan a un conductor (por ejemplo, una cerca de alambre) causan que corrientes eléctricas pasen a través del cuerpo de una persona en contacto con él. Los campos magnéticos pueden interferir con los dispositivos médicos implantados y causar mal funcionamiento.

2.1.4. Polarización de campo y homogeneidad

La mayoría de los campos eléctricos y magnéticos estarán polarizados lineal o elípticamente. Un campo está polarizado linealmente cuando el vector de campo se encuentra completamente en una dirección. La polarización horizontal ocurre cuando el campo cae en un plano paralelo a la superficie de la Tierra y la polarización vertical ocurre cuando el campo cae en un plano perpendicular a la superficie de la Tierra. Un campo está polarizado elípticamente cuando el vector de campo describe una elipse.

2.1.5. Energía transportada por el campo eléctrico

La exposición a campos electromagnéticos variables en el tiempo resulta en corrientes internas dentro del cuerpo y absorción de energía en los tejidos que dependen de los mecanismos de acoplamiento y de la frecuencia involucrada.

Cualquier efecto biológico está relacionado a la carga eléctrica sobre la superficie del cuerpo, así como los campos eléctricos, corrientes y densidades de corrientes inducidas dentro del cuerpo [1].

La absorción de los campos electromagnéticos en los tejidos es medida como una Tasa de Absorción Específica (SAR) dentro una masa de tejido dada. La unidad de la SAR es en vatios por kilogramo (W/Kg.) o por milivatio por gramo (mW/g). El SAR es la cantidad utilizada para medir la dosis de los campos de RF aproximadamente entre 1 MHz y 10 GHz.

2.1.6. Inducción de campos eléctricos por campos magnéticos

Los campos magnéticos variables en el tiempo actúan sobre cuerpos biológicos induciendo campos eléctricos y corrientes dentro del cuerpo. Con más detalle se tratara en el capítulo de Dosimetría.

Actualmente, las restricciones para la exposición a campos de frecuencia menores a 100 KHz son expresadas en términos de la densidad de corriente inducida [1].

La corriente es inducida en lazos circulares, en el plano perpendicular a la dirección del vector de flujo magnético B . La densidad de corriente interna J se correlaciona con la inducción magnética externa B según la ley de Faraday

$$J = \frac{1}{2} R \sigma \frac{dB}{dt} \quad (2.4)$$

Donde dB/dt es la tasa de cambio de la densidad de flujo magnético, R es el radio del lazo de corriente inductiva (m) y σ es la conductividad (S/m) del tejido.

Para campos sinusoidales la amplitud de J se reduce como se muestra en la ecuación:

$$J = \pi R \sigma f B_0 \quad (2.5)$$

Donde f es la frecuencia (Hz), y B_0 es la amplitud de la densidad de flujo magnético (T).

El radio del lazo inductivo depende de la orientación del campo magnético relativa al cuerpo conductor. En términos generales, las densidades de corriente mayores serán inducidas en la periferia y disminuirán hacia el centro del cuerpo conforme el radio del lazo inductivo disminuye. En la práctica, el cálculo de las densidades de corriente es complicado ya que las rutas de corriente exacta dependen de la distribución de las propiedades conductoras en objetos no homogéneos tales como el cuerpo humano.

2.2. Interacción física de los campos eléctricos y magnéticos con la materia

Toda la materia está constituida de átomos de varios elementos químicos. Estos átomos en si mismos están compuestos de partículas subatómicas que tienen carga positiva, negativa o neutra. La interacción de los campos eléctricos y magnéticos con la materia tiene su origen en el acoplamiento de los campos con estas cargas.

2.2.1. Propiedades eléctricas de la materia

a) Permitividad

Las propiedades eléctricas de la materia son representadas por la permitividad relativa (constante dieléctrica relativa) ϵ_r y conductividad σ . El origen de la permitividad relativa es la polarización de cargas en los átomos. Un par de cargas positivas y negativas separadas por una pequeña distancia producen un momento dipolar. Estas cargas están confinadas dentro de moléculas y son llamadas cargas de polarización. Un campo interno E fuerza a los dipolos a orientarse a lo largo de su dirección. El momento neto del dipolo por unidad de volumen es llamado polarización P . La polarización es un campo vectorial cuya magnitud es proporcional a la intensidad del campo Eléctrico E en un material lineal ideal. Deberíamos notar que la polarización esta relacionada a la permitividad relativa por:

$$\epsilon_0 E + P = \epsilon_0 \epsilon_r E \quad (2.6)$$

Donde ϵ_0 es la constante dieléctrica en el vacío.

La permitividad de los materiales depende fuertemente de la frecuencia. La heterogeneidad en células y tejidos también modifican las propiedades dieléctricas del material biológico. Por lo tanto las propiedades dieléctricas del tejido son muy complejas [1].

b) Conductividad

La conductividad de la materia explica la perdida de energía en el movimiento de la carga a través del medio. Cuando una corriente directa fluye en un material, los portadores de carga experimentan colisiones con átomos o moléculas. La perdida de energía debido a esta colisión es el origen de la resistencia de la materia. La conductividad está definida por la reciproca de la resistencia del material con una sección unitaria de longitud unitaria. En un campo eléctrico alterno, la fricción del movimiento causa el retardo de la polarización de oscilación resultando en una pérdida de energía.

En un material dieléctrico con pérdidas, la densidad de la corriente está representada por:

$$J = \sigma E \quad (2.7)$$

Y la densidad del desplazamiento de la corriente está representada por:

$$J_d = \frac{d(\epsilon E)}{dt} \quad (2.8)$$

La densidad total de la corriente es la suma de estas corrientes. La tangente de pérdida de un material está definida por la relación de σ a $\omega\epsilon$, donde ω es la frecuencia angular del campo. Esta cantidad es la relación de J a J_d . Si la tangente de pérdida es mucho más grande que la unidad, la propiedad eléctrica del material es más de un conductor que de un material dieléctrico. Es decir la conductividad, más que la

constante dieléctrica del material es la que gobierna la interacción del campo eléctrico con la materia. En la región de frecuencia extremadamente baja, las tangentes de pérdidas son mucho más grandes que la unidad para muchos materiales biológicos y tejidos, incluso si la permitividad relativa es extremadamente grande en esta región de frecuencia (ver tabla 2.2).

c) Propiedades eléctricas del tejido

Los valores dependen del contenido de agua de las muestras de las medidas y otros factores experimentales y anatómicos.

La tabla 2.2 muestra los valores típicos de las constantes eléctricas de tejidos a 50 Hz y 100 kHz [1].

Tabla 2.2. Valores típicos de constantes eléctricas de varios tejidos (Gabriel y Gabriel, 1996) [1]

Tejido	50 Hz			100 kHz		
	Conductividad [S/m]	permitividad relativa	Tangente de pérdida	Conductividad [S/m]	permitividad relativa	Tangente de pérdida
Sangre	0.7	5300	48000	0.7	5100	24
Fluido del cuerpo	1.5	99	5.50E+06	1.5	98	2800
Hueso cortical	0.02	8800	81000	0.02	23000	16
Cerebro, materia gris	0.075	1.20E+07	2.2	0.13	3200	7.5
Grasa	0.02	1.50E+06	4.8	0.024	93	47
Músculo	0.23	1.80E+07	4.7	0.36	8100	8
Piel (seca)	0.0002	1100	63	0.00045	1100	0.072

2.2.2. Propiedades magnéticas de la materia

a) Permeabilidad y susceptibilidad magnética

Algunos materiales tienen grandes permeabilidades relativas, por ejemplo el hierro. Estos materiales son llamados materiales magnéticos. Los tejidos biológicos virtualmente no contienen ningún material magnético, por lo tanto, su permeabilidad relativa es muy cercana a la del vacío (o la unidad).

El origen del magnetismo de la materia es el momento magnético derivado de los fenómenos quantum tales como los espines de los electrones en los átomos.

El momento magnético neto por unidad de volumen del material es llamado magnetización y es una función vectorial del espacio. La relación de la densidad de flujo magnético (B), la intensidad del campo magnético (H) y la magnetización (M) está representada por:

$$B = \mu_0(H + M) \quad (2.9)$$

De modo que M es inducido por el campo magnético aplicado. Existe una relación lineal entre H y M para materiales no magnéticos.

La constante X_m es llamada susceptibilidad magnética y está relacionada a la permeabilidad relativa.

$$M = X_m H \quad (2.10)$$

$$X_m = \mu_r - 1 \quad (2.11)$$

Los campos magnéticos ejercen fuerzas sobre un momento magnético cuando el campo tiene una gradiente en el espacio. Algunos materiales son atraídos hacia el campo magnético mientras que otros son repelidos. Esto significa que la permeabilidad relativa puede ser mayor o menor que la unidad, en contraste con la permitividad relativa de los materiales dieléctricos que siempre tiene valores mayores a la unidad. Los materiales con permeabilidades relativas mayores y menores que la unidad son llamados materiales paramagnéticos y diamagnéticos respectivamente. En otras palabras la susceptibilidad magnética es negativa en materiales diamagnéticos y positivos en materiales paramagnéticos.

b) Diamagnetismo

El diamagnetismo es una propiedad universal de materiales y algunos ejemplos de materiales con propiedad diamagnética y sus susceptibilidades magnéticas se muestran en la tabla 2.3.

El orden de la susceptibilidad magnética de materiales diamagnéticos es de 10^{-5} . Consecuentemente el efecto es muy débil y no puede ser observado en situaciones ordinarias. El efecto del diamagnetismo solamente se puede ver para campos magnéticos extremadamente fuertes.

c) Paramagnetismo

El paramagnetismo deriva del momento magnético permanente de moléculas. Los momentos magnéticos tienden a orientarse en la misma dirección que el campo magnético aplicado, produciendo magnetización en esta dirección. Este fenómeno es similar a la polarización de orientación del material dieléctrico en un campo eléctrico.

El origen principal del momento magnético permanente es el momento angular del espín del electrón. El espín del electrón en un átomo tiende a hacer que los elementos de un par apunten en direcciones opuestas para cancelar el momento magnético neto. Si el número de espines es impar como en el sodio por ejemplo, un espín se queda desapareado. En este caso el átomo tiene un momento magnético permanente. Los compuestos usualmente no tienen espines desapareados ya que encuentran su par en los átomos acoplados mutuamente. Existen algunas moléculas peculiares como el oxígeno que tienen un número de espines par pero aun tienen momentos magnéticos permanentes. Los radicales libres también tienen momentos magnéticos en muchos

casos. La tabla 2.3 muestra algunos ejemplos de materiales paramagnéticos y sus susceptibilidades magnéticas [1].

Tabla 2.3. Susceptibilidad magnética ($X_m = \mu_r - 1$) de materiales diamagnéticos y paramagnéticos

Diamagnético		Paramagnético	
Material	Susceptibilidad magnética ($\times 10^{-5}$)	Material	Susceptibilidad magnética ($\times 10^{-5}$)
Bismuto	-17	Hierro aluminio alumbre	66
Plata	-2.6	Uranio	40
Carbón (diamante)	-2.1	Platino	26
Plomo	-1.8	Aluminio	2.2
Cloruro de sodio	-1.4	Sodio	0.72
Cobre	-0.97	Gas oxígeno	0.19
Agua	-0.9	Aire	0.024

d) Propiedades magnéticas de materiales y tejidos

Los materiales magnéticos raramente están contenidos en células y tejidos biológicos, por lo tanto las propiedades magnéticas del cuerpo humano están muy cerca a aquellas del vacío a escala macroscópica. Sin embargo, los fenómenos magnéticos deberían ser tomados en cuenta considerando la interacción a escala microscópica.

El oxígeno es un material paramagnético con una gran susceptibilidad magnética, mucho mayor que la de otros gases. Los radicales libres están envueltos en muchas reacciones bioquímicas, Ellos frecuentemente exhiben el paramagnetismo por que tienen un número impar de electrones de valencia. Existen algunos materiales que cambian sus propiedades magnéticas con la reacción química. Por ejemplo la propiedad magnética de la hemoglobina cambia dependiendo del vínculo con el oxígeno; es así que la oxihemoglobina es diamagnética mientras que la de deoxihemoglobina es paramagnética.

La magnetización es proporcional al volumen del material y debido al pequeño volumen de las partículas magnéticas el efecto no necesariamente es significativo aunque la permeabilidad relativa de la magnetita es grande.

2.2.3. Interacción con la materia

a) Campo eléctrico variable en el tiempo (1 Hz a 100 Hz)

Los campos eléctricos ejercen fuerzas sobre las cargas eléctricas, de esta manera las partículas cargadas como los iones son atraídas o repelidas a lo largo de la dirección del vector de campo eléctrico. Los campos eléctricos imponen torques sobre los dipolos eléctricos en materiales dieléctricos. Cuando los campos eléctricos tienen gradientes espaciales también ejercen fuerzas de translación sobre los dipolos eléctricos o moléculas polarizadas. La dirección de las fuerzas sobre los materiales dieléctricos no cambia si el campo es alterno.

La interacción del campo eléctrico con la materia es dependiente de la frecuencia. La permitividad relativa del tejido es fuertemente dependiente de la frecuencia. En frecuencia por debajo de 100 Hz la permitividad relativa de los tejidos del cuerpo puede ser más de 10^6 . En esta región los iones al igual que la estructura intracelular contribuyen al alto valor de la permitividad relativa. Conforme las frecuencias aumentan la permitividad relativa disminuye.

b) Campo magnético variable en el tiempo (1 Hz a 100 Hz)

Los campos magnéticos interactúan directamente con los materiales magnéticos al igual que con las cargas en movimiento (corrientes). También interactúan con los materiales no magnéticos (diamagnéticos o paramagnéticos) pero las intensidades de la interacción son pequeñas y los efectos solamente son significativos a niveles de intensidad de campo mucho más altos que aquellos encontrados en la vida diaria de las personas.

Un campo magnético variable en el tiempo induce un campo eléctrico tal como se describe en la ley de Faraday.

2.3. Fuentes naturales y artificiales

Las fuentes esencialmente están divididas en aquellas de origen natural y artificial. Los campos que ocurren naturalmente surgen de procesos eléctricos asociados con la Tierra y la atmósfera. Las exposiciones artificiales provienen de la extensa variedad de fuentes que usan energía eléctrica en varias frecuencias y las intensidades de los campos generados usualmente sobrepasan ampliamente a aquellas de las fuentes naturales.

2.3.1. Fuentes naturales de campos estáticos y variables en el tiempo

a) Campos estáticos

El campo eléctrico natural encontrado por encima de la superficie de la Tierra varía ampliamente con el tiempo y la localización. La causa principal del campo es la separación de cargas que ocurre entre la Tierra y la ionósfera las cuales actúan como conductores perfectos separados por el aire de conductividad despreciable [1]. El campo cercano a la superficie para buen clima tiene una intensidad típica de alrededor de 130 V/m. La intensidad depende generalmente de la altura, temperatura local, humedad y la presencia de iones en la atmósfera.

Generalmente el rango de frecuencias y las intensidades de los campos varían ampliamente con la localización geográfica, el tiempo de día y la estación. Las intensidades de los campos variables en el tiempo relacionados a los armónicos atmosféricos entre 5 Hz y 1 kHz típicamente son menores de 0.5 V/m y las amplitudes generalmente disminuyen con el aumento de la frecuencia. La intensidad del campo

eléctrico natural en las frecuencias de red de 60 Hz es alrededor de 10^{-4} V/m. Las características del campo eléctrico de la tierra en el rango de ELF son resumidas en la tabla 2.4.

Tabla 2.4. Características del campo eléctrico terrestre en el rango de ELF [1]

Rango de frecuencia (Hz)	Intensidad campo eléctrico (V/m)	Comentario
0.001 - 5	$0.2 - 10^3$	Pulsos de corta duración de origen magnetohidrodinámico
7.5 - 8.4 y 26 - 27	$0.15 - 0.6 \cdot 10^{-6}$	Pulsos cuasi-sinusoidales de origen indeterminado
5 - 1000	$10^{-4} - 0.5$	Relacionados a los cambios atmosféricos (parásitos atmosféricos)

b) Campos magnéticos

El campo magnético de la Tierra cambia continuamente en periodos que van de unos pocos milisegundos hasta 10^{12} años. El amplio espectro de variación esta resumido en la tabla 2.5.

Tabla 2.5. El espectro amplio de la variación en el campo magnético de la Tierra [1]

Tipo	Periodo (Segundos)	Amplitudes típicas	Origen	comentario
Reversiones	$\sim 10^{12}$	100 μ T	Interno	Sistema de corrientes en la tierra
Cambio secular	$10^9 - 10^{10}$	10 μ T		
Tormentas magnéticas	$10^8 - 10^9$	Cientos nT	Externo	Periodo de 11 años máximo
Actividad de manchas solares	10^{+6}			Periodo de 27 días
Repetición de tormentas				
Diurno	10^{+5}	Decenas nT		Periodo de 24 horas
Lunar	10^{+5}			Periodo de 25 horas
Pulsaciones	$10^{-1} - 10^2$	0.02 - 100 nT		Interacción solar
Resonancias de cavidad	$10^{-2} - 10^{-1}$	10-2 nT		terrestre
Parásitos atmosféricos	$10^{-6} - 10^0$	10-2 nT (ELF)		Descargas de rayos

Las características principales del campo magnético de la Tierra a través del rango ELF y VLF del espectro están resumidas en la tabla 2.6.

Los campos electromagnéticos que surgen de las descargas de rayos, comúnmente conocidos como atmosféricos, tienen un rango muy amplio de frecuencia con componentes espectrales por debajo de 1 Hz hasta unos pocos MHz. En el rango de ELF la intensidad pico de las descargas de los rayos ocurren típicamente en el rango 100-200 Hz. Las resonancias de Schumann son una fuente de campos magnéticos de ELF en el orden de 10^{-2} nT en frecuencias de hasta unas pocas decenas de Hertz [1]. La medición de señales naturales con frecuencias por debajo de 100 Hz es extremadamente difícil por

causa de la interferencia de las señales artificiales. A 50 Hz ó 60 Hz el campo magnético natural esta típicamente en el orden de 10^{-6} μ T.

Tabla 2.6. Características del campo magnético de la Tierra en el rango ELF del espectro [1]

Naturaleza y origen	Cambios de amplitud (μ T)	Frecuencia típica (Hz)	Comentarios
Variaciones solares y lunares regulares	0.03 - 0.05 (solar) 0.005 - 0.006 (lunar)	$1 \cdot 10^{-5}$ $1 \cdot 10^{-5}$	Aumento en energía durante el verano y hacia el Ecuador. También aumento en un periodo de 11 años debido a la actividad de las manchas solares
Alteraciones irregulares como las tormentas magnéticas relacionados a la actividad de las manchas solares	0.8 - 2.4	Rango amplio de frecuencias	Repetición después de un periodo de 27 días correspondiente al tiempo de rotación del Sol sobre su eje
Pulsaciones geomagnéticas (micropulsaciones) relacionadas a los cambios en la magnetósfera	$2 \cdot 10^{-5}$ - $8 \cdot 10^{-2}$	0.002 - 5	Amplitudes limitadas por la actividad moderada en latitudes a medias
Resonancia de cavidades	$2 \cdot 10^{-5}$ - $5 \cdot 10^{-5}$	5 - 50Hz	Oscilaciones por resonancia de Schumann excitadas por las descargas de rayos de banda ancha
Parásitos atmosféricos relacionados a las descargas de rayos	$5 \cdot 10^{-5}$	<1 - 2kHz	Energía pico a 100-200Hz. Algunos componentes espectrales <1 Hz y componentes de VLF en el rango de 1-30 kHz

2.3.2. Fuentes artificiales de campos variables en el tiempo

En la mayoría de situaciones de exposición, las fuentes artificiales de campos electromagnéticos variables en el tiempo tienen intensidades mucho mayores que las de los campos naturales. La exposición dominante normalmente esta asociada con la generación, transmisión y uso de electricidad en frecuencias de red de 60 Hz. Las fuentes comunes son los varios electrodomésticos y herramientas utilizadas en la industria y el hogar, la transmisión de la electricidad, los sistemas de transmisión y distribución de electricidad, el equipamiento y circuitos de alimentación asociados.

a) Campos eléctricos variables en el tiempo

Las líneas de energía aéreas, específicamente los conductores descubiertos son importantes fuentes de los campos eléctricos ambientales en frecuencias de red. En los sistemas de tres fases con un conductor por fase que son ampliamente utilizados, típicamente se utilizan voltajes de alrededor de 60 kV, 66 kV, 138 kV y 220 kV para

transferir energía a grande distancias. La intensidad de campo eléctrico depende principalmente del voltaje de operación, aumentando conforme el voltaje aumenta. También depende de la distancia a la línea y de la configuración, espaciamiento entre conductores de fase, calibre y el número de los conductores por fase. Intensidades de campo máximas de hasta varios kilovoltios por metro podrían ser encontrados a nivel del suelo justo debajo de las líneas de energía que operan a mas de 100 kV (tabla 2.7) [1]. Los campos decaen rápidamente con la distancia a la línea de energía.

El nivel de fondo doméstico lejos de los artefactos y el cableado eléctrico normalmente no es mayor que unas decenas de voltios por metro (tabla 2.7), Sin embargo; los niveles encontrados en los hogares pueden ser muy variables por que los campos eléctricos son fácilmente perturbados por los objetos conductores, incluyendo los materiales de la edificación y las personas.

Aunque las líneas de transmisión de AT son fuentes potencialmente importantes de la exposición al campo eléctrico, los campos no perturbados son fuertemente atenuados dentro de los edificios cerca de las líneas, usualmente por un factor entre 10 a 10000 dependiendo del diseño del edificio y los tipos de materiales de su estructura.

Tabla 2.7. Intensidades de campo eléctrico de fuentes de 50/60 Hz [1]

Fuente	Intensidad de campo eléctrico (kV/m)
Tierra	$1 \cdot 10^{-7}$
Líneas de transmisión aérea en Perú 33 kV	Nivel típico a 1 m por encima del suelo debajo de la línea 0.2628
Líneas de transmisión aérea en el R.U. 400 kV 275 kV	Niveles máximos a nivel del suelo debajo de la línea (25 m de desplazamiento lateral) 11 (1) 6 (0.2)
Circuitos de distribución aéreos en el R.U. 132 kV	2 (0.05)
Líneas de transmisión aérea en EE.UU. 500 kV 230 kV 115 kV	Nivel típico a 1 m por encima del suelo debajo de la línea (30 m de desplazamiento lateral) 7 (1) 2 (0.3) 1 (0.07)
Nivel de fondo residencial (R.U)	0 - 0.02

(NRPB 2001; NIEHS 1995).

b) Campos magnéticos variables en el tiempo

Los campos magnéticos en la frecuencia de red son consecuencia del flujo de corriente (y no de la tensión de alimentación). Las líneas de energía y las subestaciones son fuentes de exposición potencialmente importantes si se toma en cuenta la intensidad de campo y la duración de la exposición. La intensidad de campo magnético de una línea de transmisión depende principalmente de la intensidad de corriente de carga, la distancia a la línea y de la configuración y el espaciamiento entre los conductores de fase. Las Líneas de transmisión pueden producir densidades máximas de flujo magnético de hasta unas pocas decenas de microteslas durante picos de la demanda; sin embargo, los niveles promedio usualmente no son mayores a unos pocos microteslas, algunos ejemplos son listados en la tabla 2.8 [1].

Tabla 2.8. Densidades de flujo magnético de 50/60 Hz (Perú, R.U., EE.UU.) [1]

Fuente	Densidades de flujo magnético(μ T)
Líneas de transmisión aéreas en Perú 33 kV	Nivel típico a 1 m por encima del suelo debajo de la línea 0.5021
Líneas de transmisión aéreas en el R.U.* 400 kV (2 kA) 275 kV (1 kA)	Niveles máximos a nivel del suelo debajo de la línea (25 m de desplazamiento lateral) 40 (8) 22 (4)
Líneas de transmisión aéreas en EE.UU.** 500 kV 230 kV 115 kV	Nivel típico a 1 m por encima del suelo debajo de la línea (30 m de desplazamiento lateral) 9 (3) 6 (2) 3 (0.7)
Líneas de distribución aéreas en el R.U.*** 132 kV 33 kV 11 kV 415 V	Máximo 7 7 7 1
Cable subterráneo de 400 kV	200 (nivel del suelo) 10 (5 m de desplazamiento lateral)
Nivel de fondo residencial **** EE.UU. R.U.	Media geométrica 0.06 - 0.07 0.036 - 0.039

Fuentes: * NRPB 2001; ** NIEHS 1995; *** UK Electricity Association 1995;

**** Swanson y Kaune 1999.

Densidades de flujo máximas de unos pocos microteslas ocurren en subestaciones residenciales típicas, aunque los niveles caen rápidamente hasta llegar a ser indistinguibles de los campos de fondo domésticos normalmente dentro de los pocos metros. Los niveles máximos de campo están asociados con los terminales de baja tensión, el transformador y los aparatos de conexión a lo largo de los cables y líneas de energía que conectan.

El campo ambiental que ocurre alejado de los artefactos en edificios es llamado "campo de fondo" y ha sido atribuido a corrientes netas en el suministro local, los circuitos de distribución y la tierra. Los diferentes países tienen diferentes prácticas de cableado, resultando en diferentes corrientes netas y campos de fondo.

2.3.3. Fuentes de exposición en el lugar de trabajo

La exposición a campos eléctricos y magnéticos en la frecuencia de red ocurre en todos los ambientes de trabajo que usan electricidad; ya sea directamente a través del uso de equipos eléctricos y artefactos o indirectamente a través de sistemas de calefacción y suministros de energía.

En los procesos industriales que involucran grandes corrientes se generan fuertes campos magnéticos. Las exposiciones podrían darse incidentalmente, por ejemplo asociadas con los requerimientos de energía o podría ser generada deliberadamente como parte de un proceso de producción. Las industriales más comúnmente asociadas con exposición potencialmente alta de campo magnético son las instalaciones de servicios eléctricos, los sistemas de transporte energizados eléctricamente y aquellos donde los campos magnéticos son producidos directamente como parte de un proceso industrial como las industrias de soldadura y calefacción por inducción.

a) Generación y distribución de energía eléctrica

Las fuentes artificiales más importantes de campos eléctricos y magnéticos a 60 Hz son las que intervienen en la generación, distribución y utilización de energía eléctrica así como cualquier equipo que utilice corriente eléctrica.

Las líneas de transmisión de alta tensión (AT) y las subestaciones (aquellas que no cuentan con apantallamiento) producen los campos eléctricos más intensos a que pueden estar expuestos los trabajadores de forma habitual. Los factores más importantes a tener en cuenta en relación con la máxima intensidad de campo eléctrico a nivel del suelo son principalmente la altura de los conductores, la configuración geométrica, la distancia lateral a la línea de transmisión y el voltaje de ésta.

Por lo general, las intensidades de los campos magnéticos producidos por las líneas aéreas de transmisión de energía eléctrica son relativamente bajos en comparación con las aplicaciones industriales en las que intervienen corrientes de alta intensidad. El

personal técnico que trabaja en subestaciones o en el mantenimiento de líneas de transmisión activas está expuesto a campos intensos (de 5 mT incluso más en algunos casos). En ausencia de materiales ferromagnéticos, las líneas del campo magnético forman círculos concéntricos alrededor del conductor. Aparte de la geometría del conductor de energía eléctrica, lo único que determina la densidad del flujo magnético es la magnitud de la corriente. La dirección del campo magnético debajo de las líneas de transmisión de AT es principalmente transversal al eje longitudinal de la línea. La máxima densidad de flujo a nivel del suelo puede estar debajo del centro de la línea o de los conductores exteriores, dependiendo de la configuración y relación de fase entre conductores.

2.4. Dosimetría

Para comprender los efectos biológicos de los campos eléctricos y magnéticos es importante considerar como los campos interactúan con el cuerpo y sus tejidos. Una cantidad física biológicamente efectiva (cantidad dosimétrica) puede ser definida con una función apropiada de los campos eléctricos y magnéticos en el punto de interacción. El objetivo principal de la dosimetría es el establecimiento de una relación entre los campos externos no perturbados y las cantidades dosimétricas. La dosimetría microscópica es el estudio cuantitativo del ambiente eléctrico inducido en escalas de tamaño comparable o más pequeñas que la célula viviente. La dosimetría macroscópica trabaja con cantidades dosimétricas promediadas sobre volúmenes o áreas donde las dimensiones son mayores que las dimensiones de la mayoría de las células individuales [1].

La distorsión de los campos debido a la presencia del cuerpo es característica de la exposición a los campos eléctricos estáticos y variables en el tiempo. En el caso de exposición a campos magnéticos en las frecuencias de ELF y VLF, el cuerpo humano tiene muy poca influencia sobre el campo magnético. También, la longitud de onda es mucho más grande que las dimensiones del cuerpo y el campo magnético secundario inducido por las corrientes del cuerpo puede ser despreciado.

2.4.1. Campos eléctricos

a) Campo eléctrico superficial

Las suposiciones de cuasi estático junto al hecho de que la permitividad compleja relativa del tejido sea mucho más grande que la permitividad del aire permite que los campos superficiales sean considerados separadamente de los campos inducidos dentro del cuerpo [1]. En el caso de los campos eléctricos estáticos solamente necesita considerarse el campo eléctrico superficial ya que los campos eléctricos estáticos no penetran en el cuerpo. La fig. 2.2 muestra diferentes modelos realistas y simplificados de un cuerpo humano de pie dentro de un campo eléctrico vertical homogéneo.

Las conductividades de los tejidos son tan altas que para los efectos del cuerpo sobre el campo eléctrico externo, este puede ser simulado con un maniquí con forma humana cubierto por una lámina conductora. Ya que para cualquier cuerpo eléctricamente conductor, los vectores de campo eléctrico son perpendiculares a la superficie del cuerpo humano. Entonces la intensidad del campo eléctrico en la superficie del cuerpo E_s puede ser evaluada utilizando la teoría electromagnética pudiendo asumirse que el cuerpo entero se encuentra al mismo potencial (voltaje).

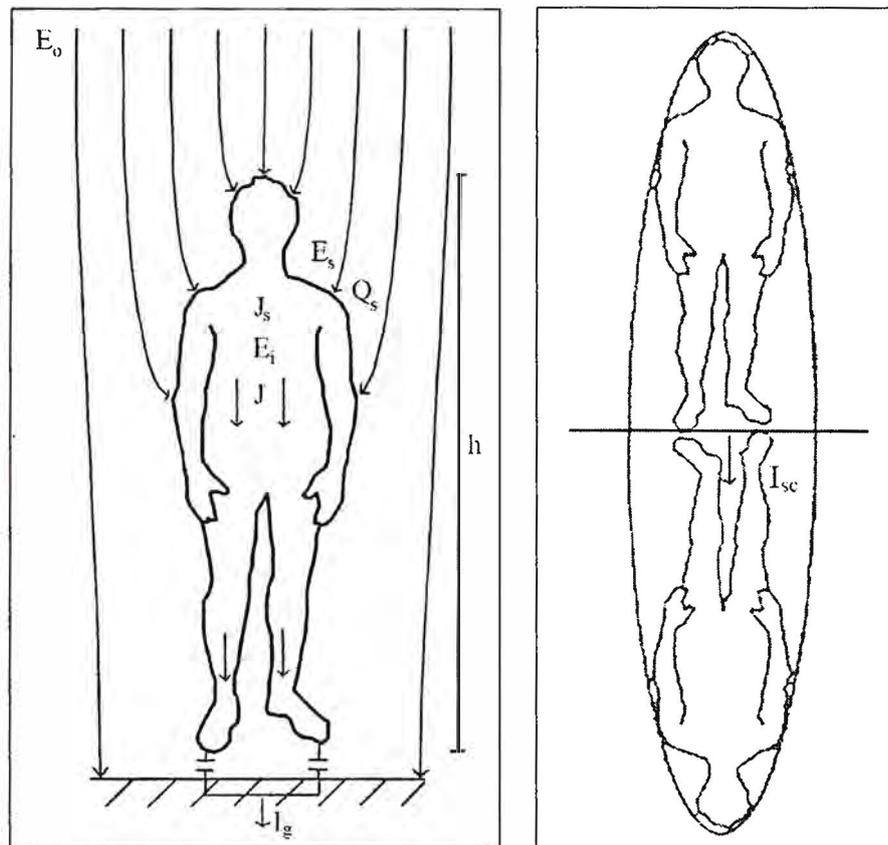


Fig. 2.2. Cuerpos biológicos en un campo eléctrico vertical homogéneo.

Izquierda.- Forma humana real parcialmente acoplada a la tierra a través de los pies.

Derecha.- Esferoide prolato cortocircuitado a tierra. Notar que la tierra es lo suficientemente conductora para ser reemplazada por una imagen del cuerpo.

Los campos eléctricos estáticos y variables en el tiempo externo al cuerpo inducen cargas superficiales en la piel donde la densidad de carga sigue la distribución de los campos superficiales de acuerdo a la ecuación:

$$Q = \epsilon_0 E_s \quad (2.12)$$

Donde: Q es la carga superficial, E_s es el campo eléctrico superficial y $\epsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12}$ F/m es la permitividad del espacio libre.

b) Densidad de corriente inducida eléctricamente

En los campos variables en el tiempo la carga oscila de acuerdo a las variaciones del campo. La carga oscilante corresponde a una pequeña corriente en el cuerpo. En el caso

de un campo sinusoidal el componente de la corriente perpendicular a la superficie es dada por:

$$J_s = 2\pi f \epsilon_0 k_{en} E_0 \quad (2.13)$$

Donde: E_0 es el campo eléctrico no perturbado aplicado, k_{en} es el factor de incremento del campo y f es la frecuencia.

Puede considerarse que el campo eléctrico externo variable en el tiempo inyecta corrientes de desplazamiento capacitivas sobre la superficie del cuerpo. Al interior del cuerpo la corriente se transforma en corriente de conducción J_s por las cargas libres abundantemente disponibles en los materiales biológicos relativamente buenos conductores. Cuando la intensidad del campo eléctrico inducido E_i (V/m) es conocida, la densidad de corriente local (A/m^2) simplemente está dada por la ecuación 2.7. Debido a la heterogeneidad eléctrica de los tejidos, la densidad de la corriente muestra variaciones locales altas.

c) Corriente inducida

La integración de la densidad de corriente axial sobre una sección del cuerpo da una corriente total fluyendo a través de la sección. Para una persona de pie sobre un plano de tierra eléctricamente conductivo, la corriente crece de cero en la cabeza al máximo en los pies. En los pies esta corriente es la corriente de cortocircuito I_{sc} que es igual a la corriente de desplazamiento integrada sobre el cuerpo entero. Una relación simple basada en mediciones y consideraciones teóricas está dada por

$$I_{sc} = K_0 h^2 f E_0 \quad (2.14)$$

Donde: h es la altura de la persona y K_0 es el factor de corriente. La distribución de las corrientes inducidas en el cuerpo, depende de las condiciones de exposición, del tamaño y forma del cuerpo, y de la posición del cuerpo frente al campo.

La Fig. 2.3. Muestra la corriente vertical calculada por computador en los modelos de un adulto y un niño expuesto al campo eléctrico vertical homogéneo en el espacio libre y en contacto con una tierra perfecta (alta conductividad) [2].

2.4.2. Campos magnéticos

a) Densidad de corriente inducida magnéticamente

De acuerdo a la Ley de Faraday un campo magnético variable en el tiempo induce campos eléctricos y circulación de corrientes alrededor del cuerpo. Debido a la naturaleza casi estática de los campos eléctricos y magnéticos en las frecuencias ELF, el campo eléctrico inducido E_i puede ser aproximado por:

$$E_i = b \frac{dB}{dt} \quad (2.15)$$

Donde: dB/dt es la tasa de cambio de la densidad de flujo magnético B y b es una constante que depende de la distribución del campo, la dirección del campo, la geometría del cuerpo y las características eléctricas de los tejidos [1].

En el caso de E_i sinusoidal está dado por:

$$E_i = 2\pi f b B \text{sen}(2\pi f t) \quad (2.16)$$

Donde f es la frecuencia, t es el tiempo y B es la amplitud del campo magnético. El campo eléctrico inducido es máximo en la superficie del cuerpo y disminuye hacia el centro. El acoplamiento es maximizado cuando el campo magnético es uniforme y perpendicular a la sección frontal del cuerpo. Para el caso sinusoidal la densidad de corriente está dada por

$$J = 2\pi \sigma f b B \text{sen}(2\pi f t) \quad (2.17)$$

Donde: σ es la conductividad local que depende del tipo de tejido y la frecuencia. La conductividad promedio es aproximadamente 0.2 S/m por debajo de 10 kHz y aumenta hasta aproximadamente 0.3 S/m a 100 kHz.

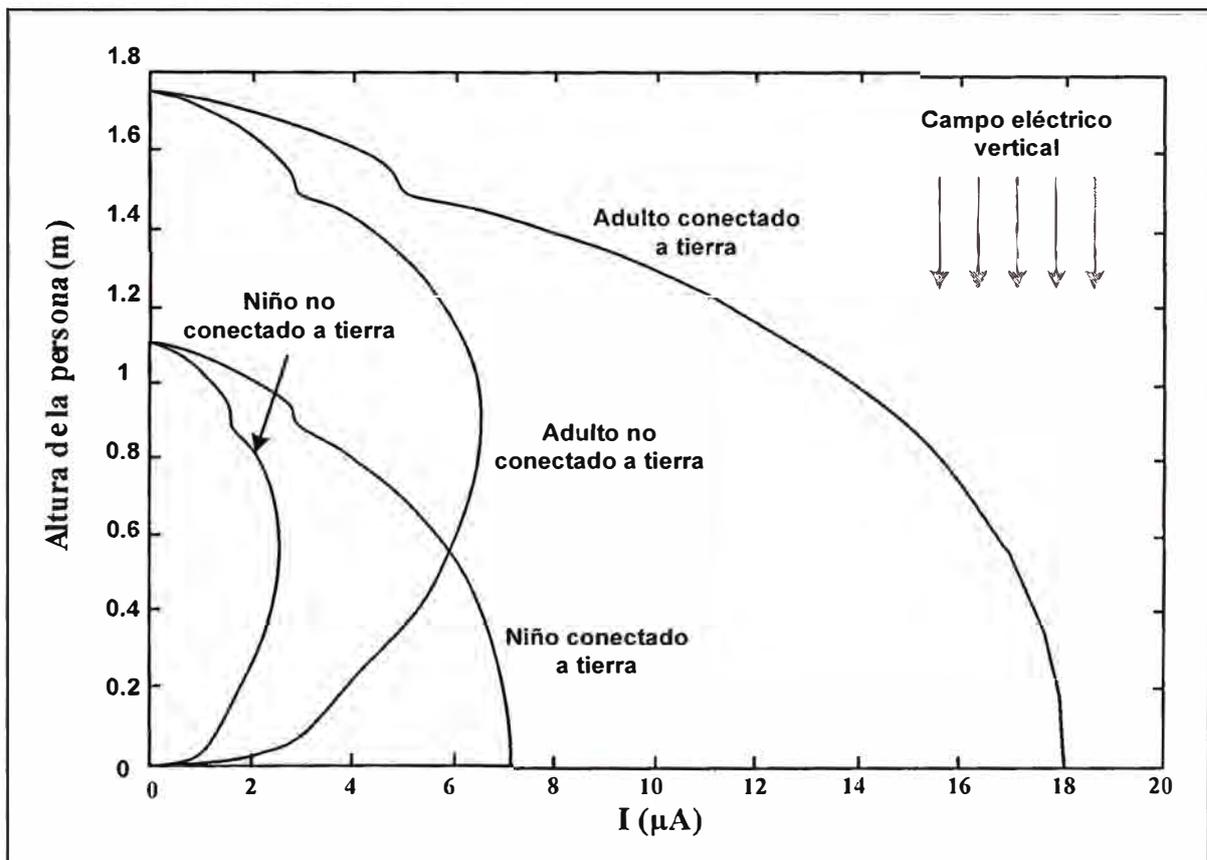


Fig. 2.3. Distribución de corriente inducida calculado para un modelo de cuerpo humano en contacto con una tierra perfecta con 1 kV/m y 60 Hz (Hirata et al., 2001) [1].

Cuando el tamaño del cuerpo aumenta, el campo eléctrico inducido magnéticamente aumenta linealmente como una función del parámetro b (ecuación 2.15 y 2.16) mientras

que el campo eléctrico inducido eléctricamente no cambia. Cuando la frecuencia aumenta, el campo eléctrico inducido magnéticamente y la densidad de la corriente inducida eléctricamente aumentan linealmente como una función de la frecuencia.

La Fig. 2.4. Muestra la distribución de campo eléctrico y densidad de corriente calculada por computador expuesto a un campo magnético uniforme y perpendicular a la sección frontal del cuerpo [2].

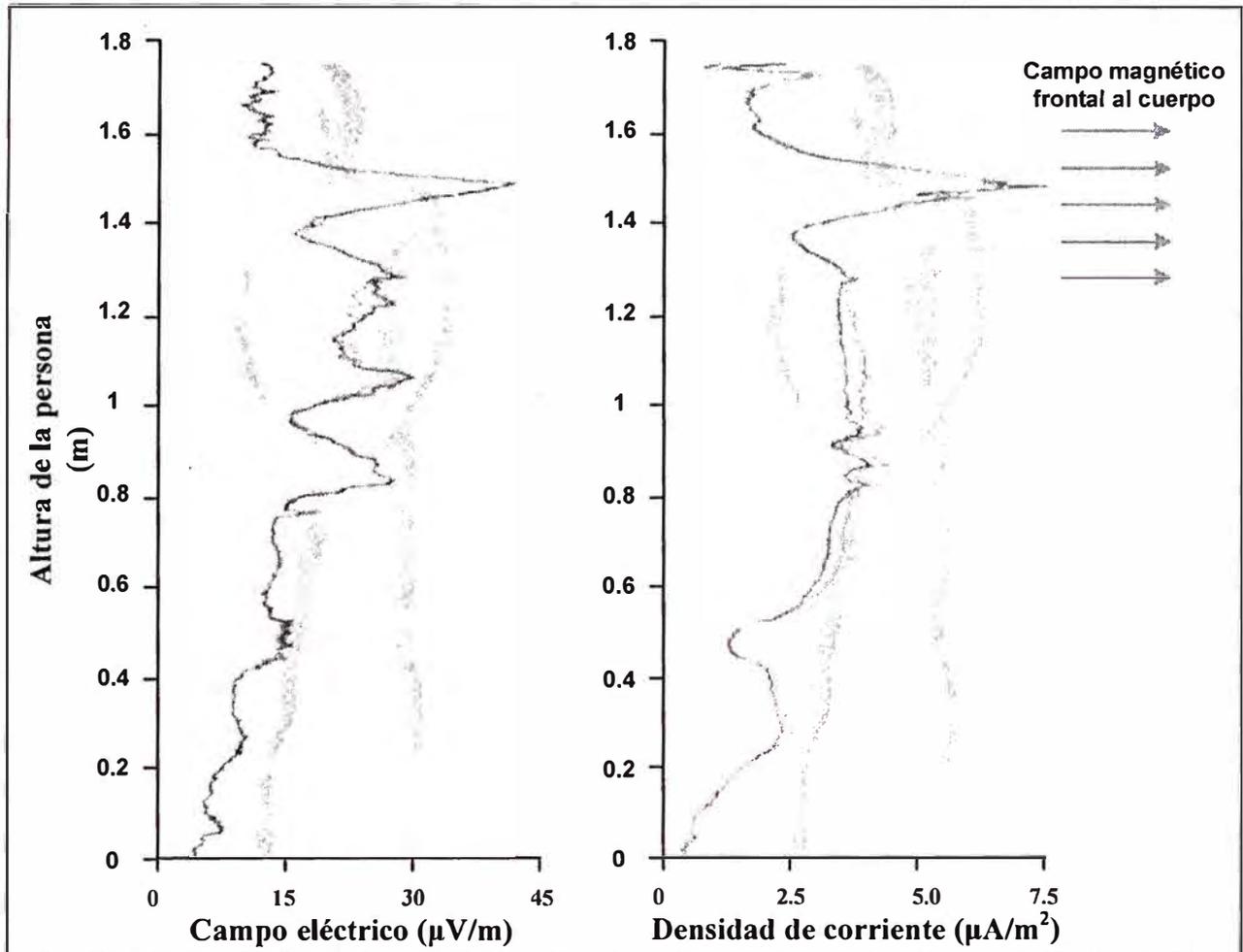


Fig. 2.4. Distribución de la magnitud del campo eléctrico ($\mu\text{V}/\text{m}$) y densidad de corriente ($\mu\text{A}/\text{m}^2$) en el cuerpo humano por la exposición a una densidad de flujo magnético uniforme de 1 μT a 60 Hz (Dawson y Stuchly, 1998) [2].

La densidad de corriente es la más alta donde la conductividad es máxima tales como en los grandes vasos sanguíneos, el corazón lleno de sangre, el fluido cerebroespinal y la orina. Se consideran los factores geométricos. En las axilas y en la parte alta de las piernas existe una clara concentración de corrientes. Las densidades de corriente pico local son mucho más altas que las densidades de corriente promedio. En un campo uniforme de 500 μT la densidad de corriente pico local puede exceder considerablemente los 10 mA/m^2 . En algunas partes del cuerpo son posibles picos muy localizados hasta 40 mA/m^2 .

2.4.3. Absorción de energía por exposición a los campos

La exposición a campos eléctricos y magnéticos a frecuencias de uso en líneas de energía eléctrica produce una absorción de energía insignificante y un incremento no mensurable de la temperatura en el cuerpo, esto es aplicable a campos hasta frecuencias por debajo de 100 kHz.

a) Efecto térmico

La absorción de energía electromagnética por los tejidos y su conversión en calor produce incrementos de temperatura en el interior del cuerpo. El calentamiento de un cuerpo como resultado de la exposición a niveles típicos de campos de ELF es completamente despreciable. Por ejemplo, un campo eléctrico de 10 kV/m tiene una densidad de energía de $4.42 \times 10^{-4} \text{ J/m}^3$ produciendo una densidad de potencia promedio en el cuerpo humano de alrededor de $10 \text{ } \mu\text{W/m}^3$, que es alrededor de 10^{-8} veces la tasa metabólica.

b) Efecto no térmico

Algunos trastornos del organismo expuesto a RNI, que no están acompañados por pequeños incrementos de temperatura, reciben el nombre de efectos no térmicos. Estudios realizados hasta la fecha no demuestran algún cambio, alteración o efecto en humanos, como: transformaciones celulares, cromosómicas y genéticas, efectos sobre el sistema hematopoyético, cambios en el ritmo cardíaco y de la tensión arterial, alteraciones endocrinas y neuro-endocrinas, efectos sobre la audición, variaciones en el comportamiento y alteraciones electroencefalográficas.

CAPÍTULO III

EFFECTOS CAUSADOS POR LOS CAMPOS ELÉCTRICOS Y MAGNÉTICOS (RNI) DE ELF SOBRE LA SALUD HUMANA Y EL MEDIO AMBIENTE

El campo eléctrico inducido en el cuerpo aumenta con la frecuencia del campo externo y el tamaño del cuerpo expuesto. Por encima de un determinado umbral, estos campos eléctricos y corrientes inducidas provocar una reacción de algunas células específicas. Este umbral es muy superior a los niveles típicos de exposición humana.

La exposición típica de los campos en los hogares resulta en muy pequeños campos eléctricos inducidos, mientras que la exposición en el trabajo y la exposición directa bajo las líneas eléctricas de alta tensión puede ser mayor, generando campos eléctricos inducidos de aproximadamente 1 mV / m en algunos tejidos.

Las personas pueden percibir los efectos de la carga superficial oscilante inducida en sus cuerpos por los campos eléctricos de ELF (pero no por los campos magnéticos); estos efectos se vuelven molestos si son lo bastante intensos. La Tabla 3.1 ofrece un resumen de los efectos de las corrientes que atraviesan el cuerpo humano (umbrales de percepción, y de no soltar o tetanización).

La consideración de estas respuestas y de los resultados de los estudios neurofisiológicos señala que densidades de corriente superiores a 10 mA/m² pueden afectar a delicadas funciones del sistema nervioso central, tales como el razonamiento o la memoria. Los valores umbral suelen mantenerse constantes hasta 1 kHz aproximadamente pero a partir de ahí aumentan cuando lo hace la frecuencia.

3.1. Efectos biológicos causados por exposición a campos de ELF

Dada las investigaciones, una variedad de síntomas, a menudo autoinformado, se han sugerido que es causada por exposición a campos ELF: enrojecimiento de la piel, hormigueo y sensación de quemazón, así como fatiga, dolor de cabeza, dificultades de concentración, náuseas y palpitaciones del corazón. El término "hipersensibilidad electromagnética" (EHS) ha llegado a ser de uso común, basada en la experiencia transmitida por los individuos afectados por los campos eléctricos y/o magnéticos de ELF, o cerca de equipos eléctricos activados desencadenando los síntomas. La relación entre la exposición a campos ELF y los síntomas no se ha demostrado en estudios científicos [1, 2].

Tabla 3.1. Efectos de paso de corriente por el cuerpo humano [1]

Efecto	Sujeto	Corriente umbral en mA				
		50/60 Hz	300 Hz	1000 Hz	10 kHz	30 kHz
Percepción	Varones	1.1	1.3	2.2	15	50
	Mujeres	0.7	0.9	1.5	10	35
	Niños	0.55	0.65	1.1	9	30
Umbral de no soltar	Varones	9	11.7	16.2	55	126
	Mujeres	6	7.8	10.8	37	84
	Niños	4.5	5.9	8.1	27	63
Tetanización toracica; fuerte sacudida	Varones	23	30	41	94	320
	Mujeres	15	20	27	63	214
	Niños	12	15	20.5	47	160

Fuente: Bernhardt 1988.

Estudios sobre la hipersensibilidad electromagnética han llegado a centrarse en la identificación de varios factores posibles que influyen en el grupo en estudio que reporta los síntomas. Parece que las personas que informaron de hipersensibilidad electromagnética, entre otras cosas, tienden a tener rasgos específicos de personalidad, ser más ansioso y más susceptibles al estrés, y se quejan más de la salud en comparación con los grupos de referencia.

Entre las posibles áreas de interacción biológica que presentan numerosas implicaciones para la salud y acerca de las cuales tenemos un conocimiento limitado, están las siguientes: posibles cambios en los niveles nocturnos de melatonina y alteraciones de los ritmos circadianos inducidos en animales por exposición a campos eléctricos o magnéticos de ELF, la evidencia de estos efectos se consideró débil y ambigua, e insuficiente para extraer conclusiones sobre posibles riesgos para la salud humana, y posibles efectos de los campos magnéticos de ELF sobre los procesos de desarrollo y carcinogénesis. La Tabla 3.2 recoge los intervalos aproximados de densidades de corriente inducida correspondientes a diversos efectos biológicos en humanos.

No está claro si existe un vínculo entre la exposición a campos de frecuencia extremadamente baja y algunas enfermedades neurodegenerativas como el Alzheimer, pero algunos datos recientes sugieren que podría haber dicho vínculo [1].

Los estudios sobre células y tejidos aislados (estudios in vitro) son más bien escasos en lo que respecta a los campos ELF y su posible papel en enfermedades distintas del cáncer. Los datos disponibles sugieren que la exposición a EMF activa la expresión de ciertas proteínas, pero el significado biológico de estos hallazgos es aún poco claro. Hay una necesidad de hipótesis basadas en estudios in vitro para estudiar enfermedades específicas.

Tabla 3.2. Intervalos aproximados de densidad de corriente correspondientes a diversos efectos biológicos [1]

Efecto	Densidad de corriente (mA/m ²)
Estimulación directa de nervios y músculos	1,000 - 10,000
Modulación de la actividad del sistema nervioso central Cambios del metabolismo celular in vitro	100 - 1,000
Cambios de la función retiniana Cambios probables en el sistema nervioso central Cambios del metabolismo celular in vitro	10 - 100
Densidad de corriente endógena	1 - 10

Fuente: Sienkiewicz y cols. 1991.

Para otros posibles efectos es necesario que se realicen estudios de laboratorio específicos en cultivos celulares para examinar si los campos de frecuencia extremadamente baja actúan sobre los componentes celulares y de qué manera.

3.1.1. Efectos en la reproducción

En su conjunto, los resultados de los estudios en humanos no han demostrado que la exposición a campos ELF perjudica los resultados del embarazo. Muchos experimentos de laboratorio exponiendo los mamíferos y otros animales a fuertes campos magnéticos y eléctricos estáticos ELF, han mostrado ningún efecto nocivo sobre la reproducción y el desarrollo [1, 2].

La exposición del feto a los campos magnéticos de ELF en general, no da lugar a importantes efectos nocivos sobre el desarrollo y la reproducción en mamíferos. 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. Estudios adicionales revelaron ningún exceso de riesgo de aborto espontáneo o de malformación en mujeres embarazadas [1, 2, 10].

3.1.2. Efectos genéticos

Muchos estudios han examinado los campos eléctricos y magnéticos inducidos y efectos en la genética. Investigan si los campos eléctricos y magnéticos son directamente genotóxico (tóxico para el material genético o ADN de las células), o son capaces de potenciar el efecto de los mutágenos conocidos (sustancias, factores o agentes que pueden inducir mutaciones) o tumores [1].

En general, no hay ninguna indicación de la mayoría de los estudios que los campos ELF son genotóxicos. Sin embargo, varios estudios han informado de que los campos magnéticos de ELF pueden aumentar el efecto de los agentes que dañan el ADN y los

cromosomas, es decir, es posible que los campos ELF sean co-mutágenos o co-carcinógenos.

3.1.3. Efectos de leucemia y otros tipos de cáncer

Estudios en animales de laboratorio han mostrado poca evidencia de que la exposición a campos magnéticos de ELF por sí sola podría inducir a cualquier tipo de cáncer o pueda afectar a los tumores existentes. Hay algunas pruebas contradictorias acerca de que los campos magnéticos ELF de alrededor de 100 μT puede mejorar el desarrollo de tumores inducidos por otras sustancias carcinogénicas conocidas, pero en la mayoría de los estudios de evaluación de esos efectos combinados no se ha encontrado algún vínculo [1].

Los estudios de laboratorio sobre las células y tejidos aislados (estudios in vitro) pueden proporcionar información sobre los mecanismos de daño a las células. Se han demostrado numerosos efectos de los campos ELF en un gran número de componentes celulares, procesos celulares, y los sistemas celulares que posiblemente pueden ser afectados por la exposición a campos de ELF [1].

a) Cáncer en los niños

Desde 1979, cuando un estudio sugirió una asociación entre los campos ELF de una línea eléctrica y la leucemia infantil, muchos otros estudios han sido realizados y los estudios no han encontrado una relación consistente entre los tumores cerebrales infantiles u otros cánceres y la exposición a ELF de campos eléctricos y magnéticos en el hogar [1].

b) Cáncer en los adultos

No se ha encontrado asociación entre la exposición a campos ELF residencial y la leucemia o el cáncer del cerebro adulto.

En cuanto a la exposición a campos ELF en el lugar de trabajo (ocupacional), ninguna asociación o un posible aumento del riesgo de leucemia, tumores cerebrales y cáncer de mama masculino se han encontrado [1].

c) Cáncer en los animales

Muchos estudios han investigado el efecto de los campos ELF en el sistema inmunológico, la formación de sangre, la hormona melatonina y los niveles de otras hormonas, el comportamiento y otros parámetros. No se observaron efectos consistentes. En particular, un efecto convincente en los niveles de melatonina se ha visto en monos y sin anomalías de comportamiento a largo plazo se han visto en los roedores [1].

Varios estudios se centraron en diferentes tipos de cáncer como la leucemia, así como la piel, cerebro, hígado y cáncer de mama. La mayoría de estudios no demostraron un efecto cancerígeno. Algunos estudios mostraron un aumento de los cánceres, pero

estos hallazgos no han sido confirmados en estudios similares. Ningún estudio de campos magnéticos de ELF en animales ha indicado un aumento en la leucemia o el linfoma.

3.2. Clasificación de los campos ELF con respecto al cáncer.

En 2002, la Agencia Internacional para la Investigación sobre el Cáncer (IARC) clasificó los campos magnéticos ELF como "posiblemente carcinógenos para los seres humanos". Esto se basó en estudios epidemiológicos y estadísticos que indican que los niños son más propensos a desarrollar leucemia, si su exposición a los campos magnéticos de frecuencia extremadamente baja excede 0.3-0.4 μT , lo que sería relativamente fuerte. Además, la IARC llegó a la conclusión, que no había evidencia de un vínculo entre los campos magnéticos de ELF y de cualquier otro tipo de cáncer en niños y adultos.

En lo que se refiere a los campos eléctricos de ELF, la IARC clasificó como "no clasificable como carcinógeno en seres humanos" debido a la insuficiente o inconsistente información científica.

Tabla 3.3. Clasificación de algunos agentes respecto al cáncer por la IARC.

Clasificación	Ejemplo de agentes
Carcinogénico para los seres humanos (usualmente basado en fuertes evidencias de carcinogenicidad en humanos)	Asbestos Gas de mostaza Tabaco (fumadores pasivos y activos) Radiación Gamma
Probablemente carcinogénico para los seres humanos (Usualmente basados en fuertes evidencias de carcinogenicidad en animales)	Escape de motores diesel Lámparas de sol Radiación UV Formaldehído
Posiblemente carcinogénico para los seres humanos (Usualmente basados en evidencias en seres humanos consideradas como creíbles pero por otras explicaciones no pueden ser excluidas)	Café Estireno Escape de motores gasolineros Humo de soldadura Campos magnéticos ELF

Se clasifica como "posible carcinógeno para los seres humanos" a aquellos agentes cuya carcinogenicidad está escasamente probada en las personas e insuficientemente probada en experimentos con animales. Por tanto, esta clasificación valora la solidez de las pruebas científicas, y no el grado de carcinogenicidad o el riesgo de cáncer vinculado al agente. Así pues, la denominación "posible carcinógeno para los seres humanos" significa que hay escasas pruebas fiables de que la exposición a campos ELF pueda ser causa de cáncer.

Esta clasificación es la más débil de tres categorías ("es carcinógeno para los seres humanos", "probablemente carcinógeno para los seres humanos" y "posiblemente carcinógeno para los seres humanos") para clasificar los agentes carcinógenos potenciales basados en evidencia científica publicada. Algunos ejemplos de agentes bien conocidos, que han sido clasificados por la IARC se enumeran en la tabla 3.3.

3.3. Efectos medioambientales de los campos eléctricos y magnéticos de ELF

Los estudios de campo realizados de forma individual sobre animales y especies de plantas que viven muy cerca de fuentes de campos electromagnéticos aportan información sobre posibles efectos en los ecosistemas [1, 2].

Los posibles efectos de los campos de ELF en la reproducción se han estudiado en aves de rapiña que habitan cerca de líneas eléctricas aéreas, pero los resultados son muy diversos y no es posible extraer conclusiones claras. En un estudio de campo se observó una reducción de la actividad biológica en el terreno que rodeaba un cable de transmisión eléctrica enterrado, pero no se conoce con certeza la importancia medioambiental de este resultado.

Los estudios sobre plantas han mostrado que los campos magnéticos ELF pueden fomentar el crecimiento de ciertas especies de plantas. El daño a los árboles es muy bien conocido que ocurre para intensidades del campo eléctrico muy por encima de los niveles de ICNIRP debido a la descarga de tipo corona en las puntas de las hojas. Tales niveles de campo se encuentran solo cerca de los conductores de las líneas de energía de muy alto voltaje.

Algunas especies, en particular ciertos peces, reptiles, mamíferos y aves migratorias, los cuales dependen del campo magnético estático natural (geomagnético) como uno de los parámetros que se cree que serían usados como señales de orientación y navegación. Algunos investigadores han sugerido que los CEM artificiales provenientes de los cables de energía bajo el mar podrían interferir con el sentido de las presas o las habilidades navegacionales de los animales marinos en la vecindad inmediata de los cables submarinos. Sin embargo, ninguno de los estudios realizados hasta la fecha para evaluar el impacto de los cables submarinos sobre los peces migratorios (ej. salmón y anguilas) y toda la fauna relativamente inamovible que habita el suelo del mar (ej. moluscos), han encontrado algún impacto substancial en el comportamiento o biológico.

CAPÍTULO IV

MARCO NORMATIVO NACIONAL E INTERNACIONAL

La elaboración de recomendaciones para limitar la exposición a los CEM corresponde a diferentes ramas institucionales; sin embargo, establecer los límites máximos permisibles de exposición de RNI es competencia de las autoridades sanitarias (nacionales e internacionales), especialmente de las dedicadas a la aplicación de técnicas vinculadas con la radiofísica y la biocompatibilidad electromagnética. No obstante, la elaboración de las normas nacionales es competencia de entidades especializadas designadas por el Estado para controlar y regular los servicios, y pueden seguir o no las pautas internacionales. Por otro lado es necesario un ente supervisor para el control y supervisión periódica de las normas establecidas.

Por su parte, el establecimiento de los protocolos de medición es tarea tanto de los organismos de control sanitario como de las autoridades y en su elaboración deben participar académicos, científicos y técnicos (tanto nacionales como extranjeros) a fin de garantizar que el sistema de control se base en valores confiables que permitan fiscalizar correctamente la intensidad de los CEM.

4.1. Organizaciones normativas internacionales

Son agencias u organizaciones científicas cuyo objetivo son investigar, proporcionar orientación y recomendaciones sobre los peligros a la salud provenientes de la exposición a RNI para el beneficio de las personas y el medio ambiente. Entre ellas podemos mencionar entre otras:

- La Asociación Internacional para la Protección Radiológica (IRPA).
- El Instituto Nacional de Normativa de Estados Unidos (ANSI).
- La Comisión Internacional para la Protección contra la Radiación no Ionizante (ICNIRP).
- El Consejo Nacional de Protección Radiológica del Reino Unido (NRPB).
- El Consejo Nacional de Protección Radiológica y Medidas de Estados Unidos (NCRP).
- El Comité Europeo de Normalización Electrotécnica (CENELEC).
- La Organización Mundial de la Salud (OMS)
- La Organización Internacional del Trabajo (OIT)

➤ El Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE)

4.2. Normas y límites de exposición a RNI elaborados por organismos internacionales

A nivel internacional, para prevenir los posibles efectos de la exposición a los CEM, los Gobiernos e Instituciones internacionales han publicado “recomendaciones para la protección de los seres humanos” frente a la exposición de las radiaciones de los campos electromagnéticos. En 1998, el ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) ha publicado las Guías para limitar la exposición a campos eléctricos, magnéticos y electromagnéticos variantes en el tiempo. Estas Guías han sido aceptadas como recomendaciones por diversos organismos, como la Organización Mundial de la Salud, la Unión Internacional de Telecomunicaciones, la Unión Europea, etc. y por los diversos Gobiernos alrededor del Mundo.

La ICNIRP es un organismo no gubernamental (ONG) vinculado a la Organización Mundial de la Salud. Esta comisión está formada por expertos científicos independientes, es una organización sin fines de lucro e independiente de la industria, tanto en su personal como en sus fondos de funcionamiento y trabaja en estrecha colaboración con otras organizaciones y agencias internacionales relacionadas con la protección de la salud. Los límites están destinados a prevenir los efectos sanitarios ya conocidos, y respecto de los que pueden producirse en la salud al tocar objetos cargados en un campo eléctrico externo relacionados con la exposición aguda de corto plazo. Esto es debido a que la ICNIRP considera que la información científica sobre carcinogenicidad potencial de los campos ELF es escasa para establecer límites cuantitativos en la exposición.

4.2.1. Exposición ocupacional

La población expuesta ocupacionalmente consiste de adultos que generalmente están expuestos como consecuencia de su ocupación y desempeño, y están completamente conscientes del potencial de exposición y pueden ejercer el control y tomar las protecciones adecuadas. Los límites de exposición ocupacional se aplican en dependencia de la frecuencia y del tiempo de exposición del cuerpo completo.

4.2.2. Exposición poblacional

Se aplica para el público en general de todas las edades y de estados de salud variables, en muchos casos las personas expuestas no están conscientes del potencial de la exposición o no puedan ejercer control sobre dicha exposición a los CEM. Más aún, no se puede esperar que el público, tome 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.

4.2.3. Restricciones básicas

Las restricciones en los efectos de la exposición a campos eléctricos, magnéticos y electromagnéticos variables en el tiempo son basadas en los efectos sobre la salud ya establecidos y son llamadas restricciones básicas. Dependientes de la frecuencia del campo, las cantidades físicas usadas para especificar las restricciones básicas de la exposición a los CEM, son: la densidad de corriente J , la tasa de absorción específica de energía SAR , la densidad de potencia S . La protección contra efectos adversos sobre la salud requiere que estas restricciones básicas no sean excedidas. Solo la densidad de potencia en aire, fuera del cuerpo, puede ser rápidamente medida en individuos expuestos. La tabla 4.1 muestra las restricciones básicas para la exposición a campos eléctricos y magnéticos. Efectos sobre la salud de las densidades de corriente inducidas en el cuerpo son mostrados en la fig. 4.1 [6].

Diferentes bases científicas fueron usadas en el desarrollo de las restricciones básicas para varios rangos de frecuencia.

- Entre 1 Hz y 10 MHz, las restricciones básicas están dadas en términos de la densidad de corriente J , para prevenir daños funcionales en el sistema nervioso.
- Entre 100 kHz y 10 GHz, las restricciones básicas son proveídas en términos del SAR para prevenir el estrés térmico de todo el cuerpo y un calentamiento localizado excesivo en los tejidos. En el rango de 100 kHz – 100 MHz, las restricciones son proveídas en términos de la densidad de corriente J y del SAR .
- Entre 10 y 300 GHz, son proveídas en términos de la densidad de potencia S para prevenir el calentamiento excesivo en los tejidos o cerca de la superficie del cuerpo.

Tabla 4.1. Restricciones básicas para la exposición a campos eléctricos y magnéticos para frecuencias hasta 10GHz [6]

Características de la exposición	Rango de frecuencia	Densidad de corriente para cabeza y tronco (mA/m^2) (rms)	SAR promedio en todo el cuerpo (W/kg)	SAR localizado cabeza y tronco (W/kg)	SAR localizado (extremidades) (W/kg)
Exposición ocupacional	hasta 1 Hz	40	-	-	-
	1 - 4 Hz	$40/f$	-	-	-
	4 Hz - 1 kHz	10	-	-	-
	1 - 100 kHz	$f/100$	-	-	-
	100 kHz - 10 MHz	$f/100$	0,4	10	20
	10 MHz - 10 GHz	-	0,4	10	20
Exposición poblacional	hasta 1 Hz	8	-	-	-
	1 - 4 Hz	$8/f$	-	-	-
	4 Hz - 1 kHz	2	-	-	-
	1 - 100 kHz	$f/500$	-	-	-
	100 kHz - 10 MHz	$f/500$	0,08	2	4
	10 MHz - 10 GHz	-	0,08	2	4

Nota: f es la frecuencia en Hz

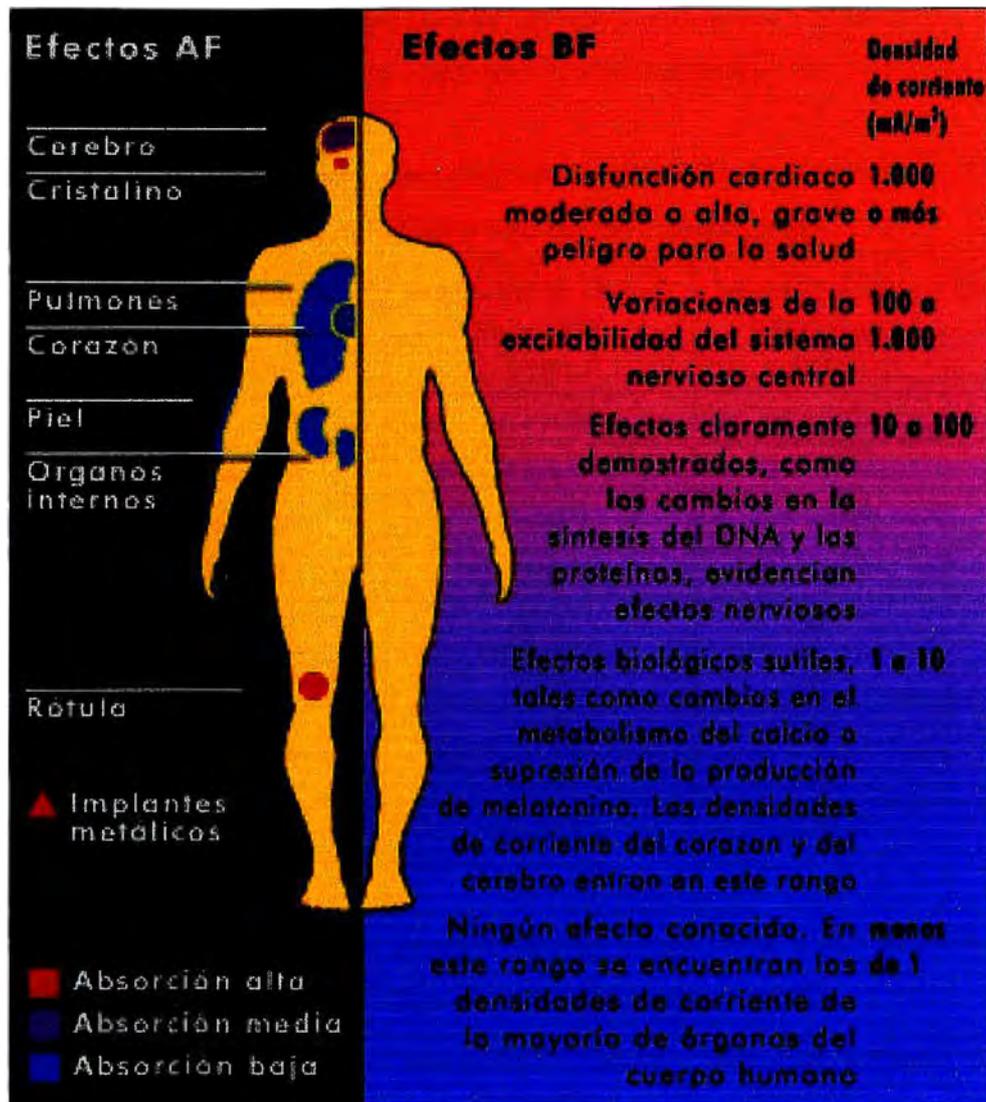


Fig. 4.1. Restricciones básicas basadas en los efectos sobre la salud

4.2.4. Niveles de referencia

Estos niveles son proporcionados para propósitos de evaluar en forma práctica las exposiciones para determinar si es probable que las restricciones básicas sean excedidas. Los niveles de referencia son obtenidos, a partir de las restricciones básicas mediante el uso de modelos matemáticos y por extrapolación de los resultados de las investigaciones de laboratorio en frecuencias específicas. Para el caso de campos de baja frecuencia, se desarrollaron diversos modelos de medición y de cómputo para derivar los niveles de referencia de intensidad de campo a partir de las restricciones básicas.

El cumplimiento con todos los niveles de referencia dados en estas recomendaciones asegurara el cumplimiento de las restricciones básicas. Si los valores medidos son más altos que los niveles de referencia, no necesariamente implica que las restricciones básicas son excedidas, pero si es necesario un análisis más detallado para evaluar el cumplimiento de las restricciones básicas.

Las tablas 4.1 y 4.2 muestran los niveles de referencia para exposición ocupacional y poblacional a campos eléctricos y magnéticos respectivamente, los valores de los campos son rms no perturbados [6].

Tabla 4.2. Niveles de referencia para exposición ocupacional a campos eléctricos y magnéticos (valores rms no perturbados) [6]

Rango de frecuencia	Intensidad de Campo Eléctrico (V/m)	Intensidad de Campo Magnético (A/m)	Densidad de Flujo Magnético (μT)	Densidad de Potencia (W/m^2)
hasta 1 Hz	-	$1,63 \times 10^5$	2×10^5	-
1 - 8 Hz	20 000	$1,63 \times 10^5/f^2$	$2 \times 10^5/f^2$	-
8 - 25 Hz	20 000	$2 \times 10^4/f$	$2,5 \times 10^4/f$	-
0,025 - 0,82 kHz	$500/f$	$20/f$	$25/f$	-
0,82 - 65 KHz	610	24,4	30,7	-
0,065 - 1 MHz	610	$1,6/f$	$2/f$	-
1 - 10 MHz	$610/f$	$1,6/f$	$2/f$	-
10 - 400 MHz	61	0,16	0,2	10
400 - 2000 MHz	$3f^{0,5}$	$0,008f^{0,5}$	$0,01f^{0,5}$	$f/40$
2 - 300 GHz	137	0,36	0,45	50

Tabla 4.3. Niveles de referencia para exposición poblacional a campos eléctricos y magnéticos (valores rms no perturbados) [6]

Rango de frecuencia	Intensidad de Campo Eléctrico (V/m)	Intensidad de Campo Magnético (A/m)	Densidad de Flujo Magnético (μT)	Densidad de Potencia (W/m^2)
hasta 1 Hz	-	$3,2 \times 10^4$	4×10^4	-
1 - 8 Hz	10 000	$3,2 \times 10^4/f^2$	$4 \times 10^4/f^2$	-
8 - 25 Hz	10 000	$4000/f$	$5000/f$	-
0,025 - 0,8 kHz	$250/f$	$4/f$	$5/f$	-
0,8 - 3 KHz	$250/f$	5	6,25	-
3 - 150 kHz	87	5	6,25	-
0,15 - 1 MHz	87	$0,73/f$	$0,92/f$	-
1 - 10 MHz	$87/f^{0,5}$	$0,73/f$	$0,92/f$	-
10 - 400 MHz	28	0,073	0,092	2
400 - 2000 MHz	$1,375f^{0,5}$	$0,0037f^{0,5}$	$0,0046f^{0,5}$	$f/200$
2 - 300 GHz	61	0,16	0,20	10

4.3. Normativa nacional de exposición a Radiaciones No Ionizantes (RNI)

Toda persona tiene derecho a gozar de un ambiente equilibrado, de modo que no ponga en peligro la salud o continuidad de la vida y de las condiciones naturales que lo

permiten, lo que exige desarrollar en todas las actividades de servicios el concepto de desarrollo sostenible. Tal afirmación es establecida en el inciso 22 del Artículo 2° de la Constitución Política del Perú.

Existen otras normas relacionadas a la protección del medio ambiente en general tales como:

- Ley Marco del Sistema Nacional de Gestión Ambiental (Ley N° 28245)
- Ley General del Ambiente, (Ley N° 28611)
- Ley del Sistema Nacional de Evaluación del Impacto Ambiental (Ley N°27446)
- Código de Medio Ambiente y de los Recursos Naturales (Decreto Legislativo N° 613)
- Ley Marco para el Crecimiento de la Inversión Privada (Decreto Legislativo N°757)
- Ley de Evaluación de Impacto Ambiental para Obras y Actividades (Ley N° 26786)
- Ley Orgánica de Municipalidades (Ley N° 27972)
- Ley de estudio de impacto ambiental en los casos de actividad de generación termoeléctrica cuya potencia instalada supere los 10 MW (Ley N° 26896)

En lo referente a radiaciones no ionizantes para la frecuencia en uso en red eléctrica en el Perú, tenemos lo siguiente:

- Según el artículo 8 ° del Decreto Supremo N° 29-94-EM del Reglamento de Protección Ambiental en las Actividades Eléctricas, y el artículo 108° de la Resolución Ministerial N° 263-2001-EM/VME – Reglamento de Seguridad e Higiene Ocupacional del Subsector Electricidad; los campos electromagnéticos, fundamentalmente en las áreas habitadas, requieren un control periódico.
- Los Estándares de Calidad Ambiental (ECA's) para Radiaciones No Ionizantes fueron aprobados el 02 de Febrero de 2005, mediante el Decreto Supremo N° 010–2005-PCM acogiendo las Recomendaciones de la Comisión Internacional para la Protección contra las Radiaciones no Ionizantes (ICNIRP) para exposición poblacional en el rango de frecuencia de 0 a 300 GHz.

Los ECA son instrumentos de gestión ambiental prioritarios para prevenir y planificar el control de la contaminación por radiaciones no ionizantes sobre la base de una estrategia destinada a proteger la salud, mejorar la competitividad del país y promover el desarrollo sostenible.

Los Estándares de Calidad Ambiental para Radiaciones No Ionizantes establecen los niveles máximos de las intensidades de campo de las radiaciones no ionizantes, cuya presencia en el ambiente en su calidad de cuerpo receptor es recomendable no exceder para evitar el riesgo a la salud humana y el ambiente. Estos estándares se consideran primarios por estar destinados a la protección de la salud humana.

En base a los ECA para las Radiaciones No Ionizantes deben establecerse los Límites Máximos Permisibles para Radiaciones No Ionizantes producidas por el subsector electricidad.

- Mediante R.M. N° 037-2006-MEM/DM, el Ministerio de Energía y Minas aprobó el Nuevo Código Nacional de Electricidad – Utilización. Este código incluye la “Protección Ambiental” que contiene las prescripciones generales del ambiente durante la construcción, operación y mantenimiento de instalaciones para la utilización de energía eléctrica; con el propósito de proveer un resumen de directivas ambientales específicas al sector eléctrico, en tanto las regulaciones ambientales generales del país se encuentren totalmente desarrolladas. Para Radiaciones No Ionizantes se establecen los “Valores Máximos de Exposición a Campos Eléctricos y Magnéticos a 60Hz”, adoptando las Recomendaciones del ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection).

4.4. Valores máximos de exposición a campos eléctricos y magnéticos a 60 Hz en el Perú

El Código Nacional de Electricidad – Utilización 2006 establece los valores máximos de Exposición a Campos Eléctricos y Magnéticos a 60 Hz (Intensidad de Campo Eléctrico y Densidad de Flujo Magnético), basados en las Recomendaciones de la ICNIRP (International Comision on Non - Ionizing Radiation Protección) y del IARC (International Agency for Research on Cancer) para exposición en zonas de trabajo (exposición ocupacional), así como en lugares públicos (exposición poblacional), no se deben superar los valores dados en la Tabla 4.4 [7].

Tabla 4.4. Valores máximos de exposición a campos eléctricos y magnéticos a 60 Hz [7]

Tipo de Exposición para 60Hz	E (KV/m)	H (A/m)	B (μT)
Exposición ocupacional	8,3	336	416,7
Exposición del público en general (Poblacional)	4,2	66,4	83,3

Nota: La medición de estos valores se debe realizar a un metro de altura sobre el nivel del piso, en sentido transversal al eje de la línea hasta el límite de la zona de servidumbre.

Donde:

- E: Intensidad de Campo Eléctrico, medida en kVoltios/metro (KV/m)
- H: Intensidad de Campo Magnético, medido en Amperio/metro (A/m)
- B: Densidad de Flujo Magnético o Inducción Magnética (μT)

4.5. Reglas de seguridad en las líneas eléctricas de AT

El Código Nacional de Electricidad – Suministro 2001 establece como objetivo el salvaguardar los derechos y la seguridad de las personas y de la propiedad pública y privada durante la instalación, operación o mantenimiento de las líneas aéreas de

suministro y comunicaciones aéreas y equipos asociados, sin afectar el medio ambiente, ni el Patrimonio Cultural de la Nación.

4.5.1. Faja de servidumbre

La faja de servidumbre es la proyección sobre el suelo de la faja ocupada por los conductores más la distancia de seguridad (indicadas en este Código), la que deberá verificarse para cada vano donde existan predios de terceros, considerando los respectivos límites de la construcción, a que tiene derecho el predio colindante a la traza de la línea [8].

Tabla 4.5. Anchos mínimos de fajas de servidumbre [8]

Tensión nominal de la línea (kV)	Ancho (m)
10 - 15	6
20 - 36	11
60 - 70	16
115 - 145	20
Hasta 220	25

NOTA: Evitar pasar la línea aérea sobre ambientes donde pueda haber actos o presencia masiva de público como son parques, zoológicos, plazas, cementerios, campos deportivos, entre otros.

4.5.2. Distancias verticales de seguridad

El Código Nacional de Electricidad – Suministro 2001, establece distancias de seguridad, incluyendo los espacios de escalamiento, referidas a las líneas aéreas de suministro y comunicación implicadas.

Toda línea aérea nueva o ampliación (de titular o de tercero) deberá cumplir con el ancho mínimo de la faja de servidumbre y lo indicado en esta Sección (Tabla 4.6.) [8].

Tabla 4.6. Distancias verticales de seguridad [8]

Descripción	Línea de 60 kV	Línea de 220 kV
Al cruce de carreteras y avenidas	7,6 m	8,5 m
Al cruce de calles	7,6 m	8,5 m
Al cruce de vías de ferrocarril al canto superior del riel	9,4 m	11 m
A lo largo de carreteras y avenidas	7 m	8,5 m
A lo largo de calles	7 m	8,5 m
A áreas no transitadas	5,5 m	7 m
Sobre el nivel más alto de río no navegable	7 m	8 m

Nota: Válida hasta 3000 m.s.n.m.

CAPÍTULO V

CÁLCULO DE LOS CAMPOS ELÉCTRICO Y MAGNÉTICO EN LAS LÍNEAS DE TRANSMISIÓN Y DISTRIBUCION DE ALTA TENSION

La frecuencia de operación de nuestra red eléctrica es de 60 Hz, y a esta frecuencia los Campos Eléctrico y Magnético se consideran campos cuasi-estáticos, debido a que ambos campos están confinados a las inmediaciones de las fuentes, es decir a distancias mucho menor a la longitud de onda (5000 km) y no se propagan como una onda electromagnética, a esta baja frecuencia estos campos no tienen comportamiento de onda plana, y no están relacionados entre si.

5.1. Método de las imágenes y condiciones de frontera

La tierra es un conductor eléctrico. Por lo tanto un conductor aislado y tierra se comportan como un capacitor formado por dos electrodos: uno, un cilindro y el otro un plano paralelo equipotencial.

Si en el conductor existe una carga "+q" se tendrá en tierra una carga "-q" distribuida (figura 5.1). Se puede suponer a la misma concentrada en un conductor que denominamos conductor imagen, ubicado a una profundidad "h" del nivel del suelo y que produce el mismo campo eléctrico. El modelo equivalente es el mostrado en la fig. 5.1.

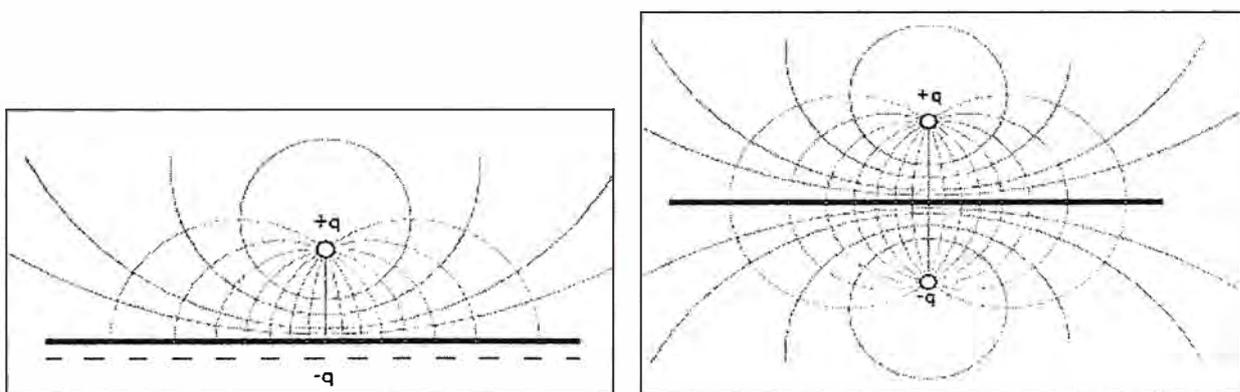


Fig. 5.1. Izquierda. Conductor con carga "+q" y plano de tierra con carga "-q". Derecha. Conductor imagen a la misma distancia con respecto al plano de la tierra.

5.2. Efecto de la tierra en el campo magnético creado por una línea eléctrica aérea

Un hilo conductor situado sobre un medio continuo también conductor induce corrientes en el interior del medio. Esto es lo que ocurre al circular una corriente por los

conductores de las líneas eléctricas aéreas situadas a cierta altura sobre la tierra en (x_1, y_1) . Se considera el efecto de la tierra equivalente al de un conductor imagen, de igual radio, por el que circula la misma intensidad que el real, y situado en $(x_1, -y_1 - \alpha)$, [3] siendo:

$$\alpha = \sqrt{2} \delta e^{-j\frac{\pi}{4}} \quad (5.1)$$

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\sigma \mu_0 \omega}} \quad (5.2)$$

Donde σ es la conductividad de la tierra en S/m.

Esta aproximación es válida para distancias a las líneas menores de 150 m, y resistividad del terreno superior a $3 \Omega\text{m}$. Debido a que la frecuencia es 60 Hz, la profundidad del conductor imagen es mucho mayor que la altura del conductor real, fig. 5.2. [3].

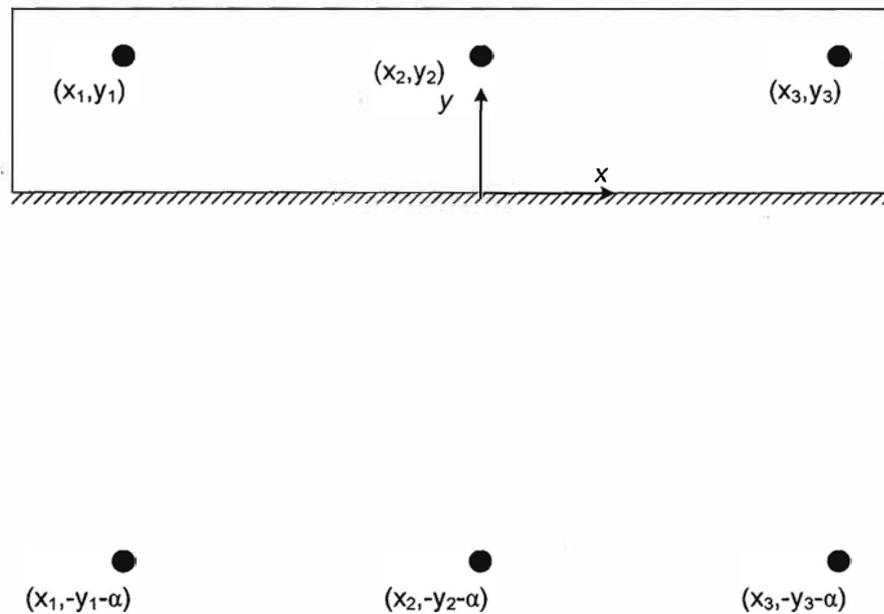


Fig. 5.2. Profundidad del conductor imagen de la línea eléctrica considerando el efecto de la tierra

5.3. Modelo de la catenaria para las líneas eléctricas aéreas

Hasta ahora se ha considerado que los conductores son rectilíneos. Sin embargo, los conductores describen una catenaria entre dos puntos de suspensión. La línea eléctrica se compondrá por tanto de sucesivas catenarias.

Si se considera la catenaria contenida en el plano $x = d$ (figura 5.3) la ecuación de la curva será:

$$y_i = a \cosh\left(\frac{z}{a}\right) - y_d \quad (5.3)$$

$$a = \frac{T_H}{\lambda} \quad (5.4)$$

Donde:

α : Depende de la tensión horizontal que aparecerá en los extremos del cable y del peso por unidad de longitud del cable eléctrico.

L : Longitud del vano de la línea eléctrica

z : Distancia longitudinal en la dirección del vano, $|z| \leq L/2$

5.4. Campo eléctrico creado por las líneas eléctricas de alta tensión

Los campos eléctricos tiene su origen en diferencias de voltaje, cualquier objeto con una carga eléctrica tiene un voltaje en su superficie, el voltaje no solo existe en la superficie del objeto sino también en el espacio que lo rodea al objeto con intensidad decreciente. De acuerdo con la Ley de Coulomb y de la Ecuación de Laplace obtenemos el campo y el potencial eléctrico, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$d\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{dq}{r^2} \hat{r} \quad (5.5)$$

$$dV = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{dq}{r} \quad (5.6)$$

Donde:

dq : Carga del conductor en coulomb (C).

r : Distancia en metros desde el conductor hasta el punto donde se calcula el campo eléctrico.

ϵ_0 : Permitividad eléctrica en el vacío, su valor es $8,85 \times 10^{-12}$ F/m.

5.4.1. Calculo del potencial eléctrico en una línea eléctrica aérea de AT de un sistema trifásico con un conductor por fase.

El potencial eléctrico para una distribución de carga lineal uniforme dq , se calcula con la ecuación 5.6. Para simplificar los cálculos pero guardando una buena precisión se empleara el modelo de conductor rectilíneo de longitud infinita con altura variable, es decir cuya altura coincide con la de la catenaria en la coordenada z , [4].

Para determinar el potencial eléctrico V_T , debido a un conductor (fase T) y su imagen que se crea en el punto arbitrario (x_0, y_0, z_0) por una distribución de carga de tamaño finito, se debe sumar las contribuciones de todos los elementos de carga dq que forman el vano del conductor, de la fig. 5.3:

$$dq = \lambda_T dl \quad \text{y} \quad dq' = -\lambda_T dl' \quad (5.7)$$

El punto de referencia donde el potencial es cero, es la superficie del suelo, de acuerdo con el método de imágenes tenemos $r_{01} = r'_{01}$, por consiguiente en la ecuación (5.9):

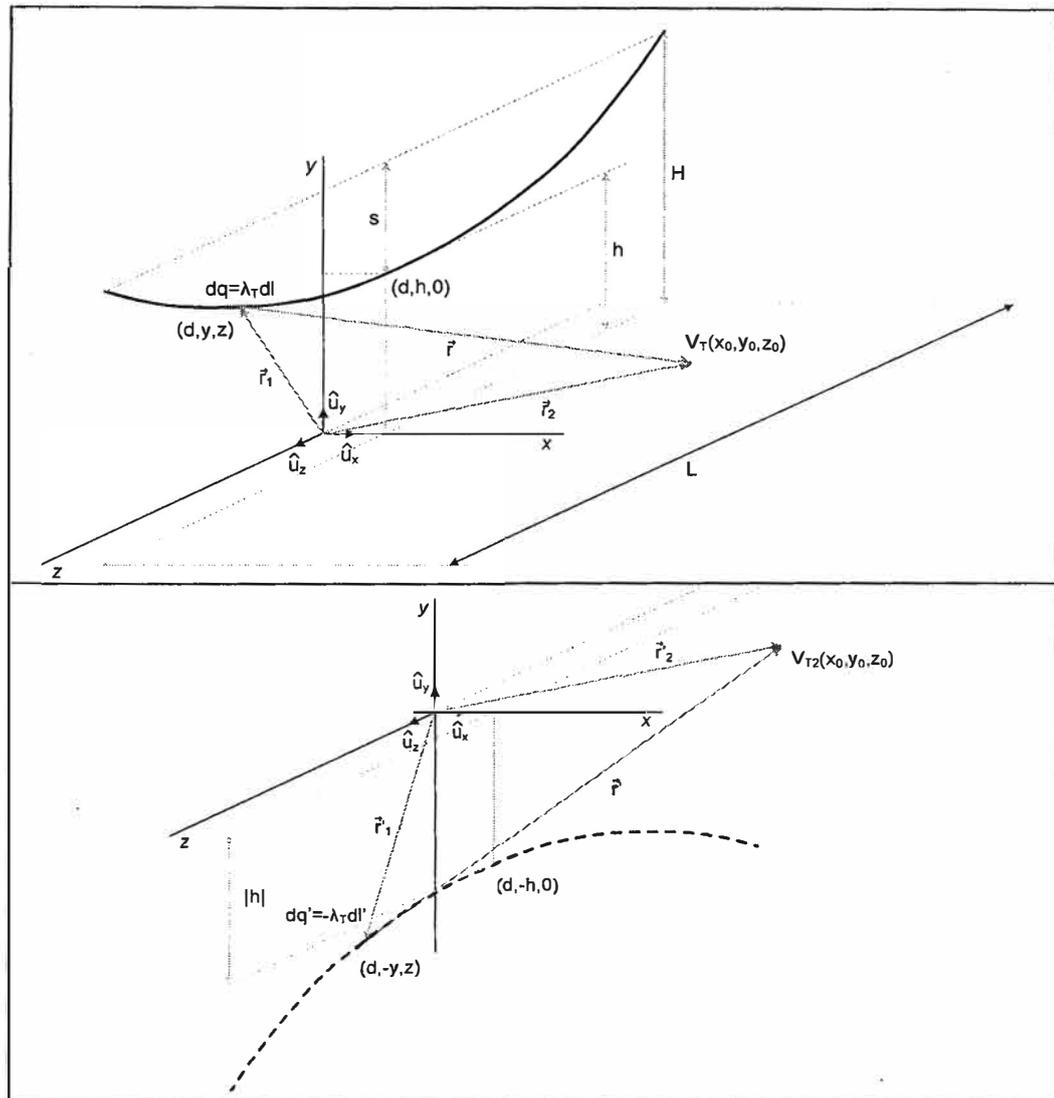


Fig. 5.3. Potencial eléctrico creado por un conductor y su imagen, vano de una línea eléctrica y dimensiones principales.

$$V_T = \frac{\lambda_T}{2\pi\epsilon_0} \left[\text{Ln} \frac{r_{01}}{\left((x_0 - d)^2 + \left(y_0 - a \cosh \frac{z}{a} + y_d \right)^2 \right)^{1/2}} - \text{Ln} \frac{r'_{01}}{\left((x_0 - d)^2 + \left(y_0 + a \cosh \frac{z}{a} - y_d \right)^2 \right)^{1/2}} \right] \quad (5.8)$$

$$V_T = \frac{\lambda_T}{2\pi\epsilon_0} \text{Ln} \frac{\left((x_0 - d)^2 + \left(y_0 + a \cosh \frac{z}{a} - y_d \right)^2 \right)^{1/2}}{\left((x_0 - d)^2 + \left(y_0 - a \cosh \frac{z}{a} + y_d \right)^2 \right)^{1/2}} \quad (5.9)$$

El potencial eléctrico total para una configuración horizontal de un sistema trifásico para una línea eléctrica aérea de AT con un conductor por fase será la suma del potencial creado por cada uno de los conductores de la línea eléctrica.

$$V_{total} = V_R + V_S + V_T \quad (5.10)$$

$$V_{total} = \sum_{i=1}^3 \frac{\lambda_i}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{\left((x_0 - d_i)^2 + \left(y_0 + a_i \cosh \frac{z}{a_i} - y_{di} \right)^2 \right)^{1/2}}{\left((x_0 - d_i)^2 + \left(y_0 - a_i \cosh \frac{z}{a_i} + y_{di} \right)^2 \right)^{1/2}} \quad (5.11)$$

Donde:

λ_i : Densidad de carga lineal del conductor i en culombios por metro (C/m).

El subíndice i denota el i -ésimo conductor del sistema trifásico de la línea eléctrica. Se puede asumir para una configuración horizontal que los parámetros i -ésimos de la catenaria de una línea eléctrica son constantes (considerando la rigidez flexional nula y que la tensión horizontal y la longitud en cada tramo de la misma no varíen a pesar de estar sometido a fuerzas). Para una configuración horizontal de un sistema trifásico para una línea eléctrica aérea de AT con un conductor por fase, tenemos:

$$a_1 = a_2 = a_3 = a \wedge y_{d1} = y_{d2} = y_{d3} = y_d \Rightarrow h_1 = h_2 = h_3 = h \quad (5.12)$$

$$d_1 = -d, \quad d_2 = 0, \quad d_3 = d \quad (5.13)$$

Ordenando la ecuación (5.11) se obtiene una matriz $[P]$ en este caso de orden 3×3 , llamada matriz de Coeficientes de potencial.

$$V = [P]\lambda \quad (5.14)$$

Donde los coeficientes de la matriz dependen de la configuración de los conductores, despejando λ , tenemos:

$$\lambda = [P]^{-1}V \quad (5.15)$$

Donde V es el vector columna de las tensiones de fase de la línea eléctrica, dado por las siguientes ecuaciones:

$$V_R = V_{\max} \text{sen}(\omega t) \quad (5.16)$$

$$V_S = V_{\max} \text{sen}(\omega t - 120^\circ) \quad (5.17)$$

$$V_T = V_{\max} \text{sen}(\omega t + 120^\circ) \quad (5.18)$$

5.4.2. Cálculo del campo eléctrico en una línea eléctrica aérea de AT de un sistema trifásico con un conductor por fase.

El campo eléctrico $d\vec{E}_r$ en un punto (x_0, y_0, z_0) debido a una distribución de carga continua dq en un elemento de longitud $d\vec{l}$ de un vano del conductor, se calcula con la Ley de Coulomb y se emplea el modelo de conductor rectilíneo de longitud infinita

con altura variable, es decir cuya altura coincide con la de la catenaria en la coordenada z , [4].

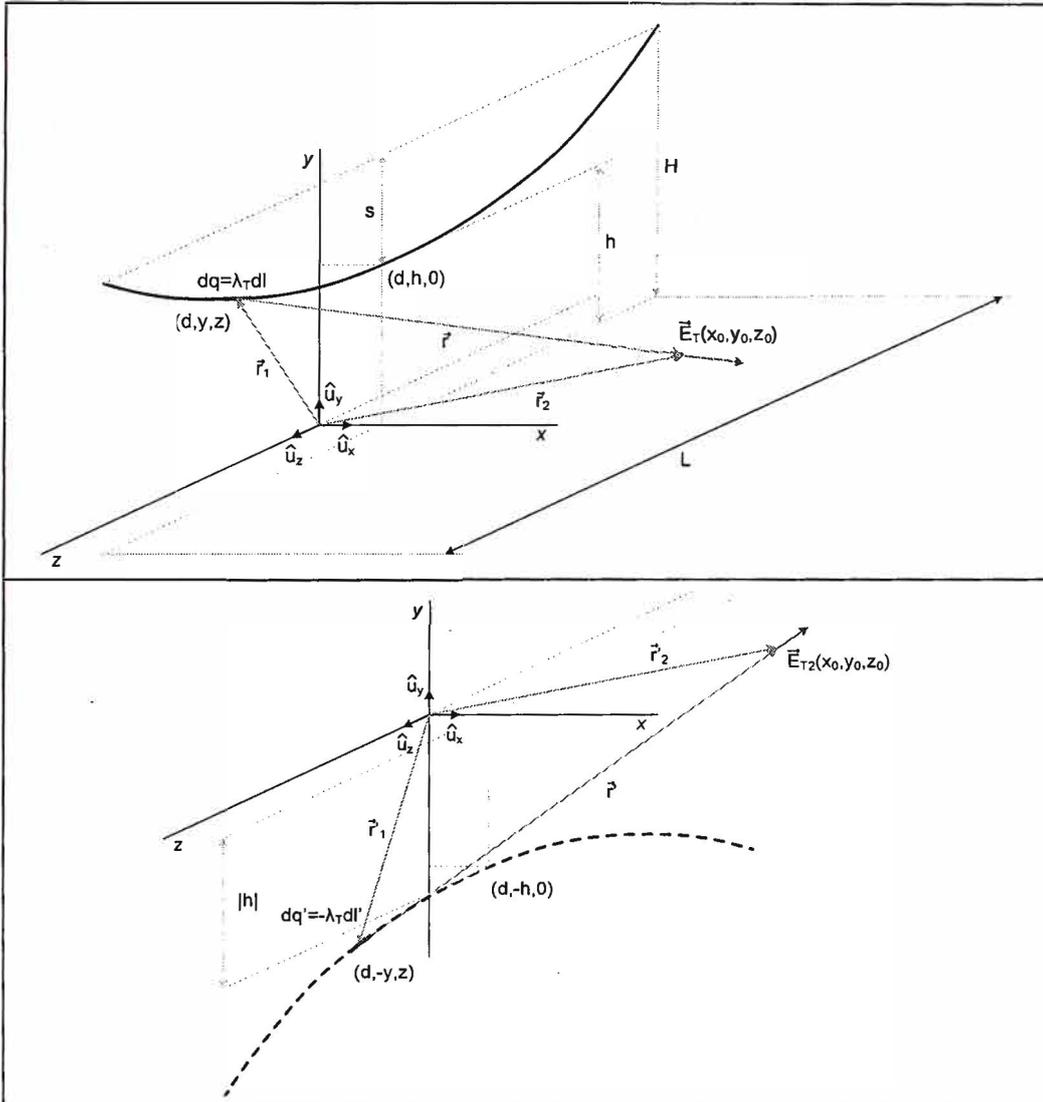


Fig. 5.4. Campo eléctrico creado por un conductor eléctrico y su imagen.

$$d\vec{E}_{r1} = \frac{\lambda_T}{4\pi\epsilon_0} \frac{dl}{r^2} \hat{r} = \frac{\lambda_T}{4\pi\epsilon_0} \frac{dl(\vec{r}_2 - \vec{r}_1)}{r^3} \quad (5.19)$$

donde: \vec{r} es la distancia entre el elemento de dq al punto (x_0, y_0, z_0) y \hat{r} es el vector unitario que apunta del dq al punto (x_0, y_0, z_0) .

Para determinar el campo eléctrico \vec{E}_T debido a un conductor (fase T) y su imagen que se crea en el punto (x_0, y_0, z_0) del vano del conductor, de la fig. 5.4, se debe sumar las contribuciones de todos los elementos de carga (aplicando el principio de superposición) en el vano del conductor.

El campo eléctrico total para una configuración horizontal de un sistema trifásico para una línea eléctrica aérea de AT con un conductor por fase será la suma de la contribución de campo creado por cada uno de los conductores de la línea eléctrica, ecuación (5.21)

$$\vec{E}_T = \frac{\lambda_T}{2\pi\epsilon_0} \left(\frac{\left[(x_0 - d)\hat{u}_x - \left(a \cosh \frac{z}{a} - y_0 - y_d \right) \hat{u}_y \right]}{\left| (x_0 - d)^2 + \left(a \cosh \frac{z}{a} - y_0 - y_d \right)^2 \right|^{1/2}} - \frac{\left[(x_0 - d)\hat{u}_x + \left(a \cosh \frac{z}{a} + y_0 - y_d \right) \hat{u}_y \right]}{\left| (x_0 - d)^2 + \left(a \cosh \frac{z}{a} + y_0 - y_d \right)^2 \right|^{1/2}} \right) \quad (5.20)$$

$$\vec{E} = \vec{E}_R + \vec{E}_S + \vec{E}_T \quad (5.21)$$

$$\vec{E} = \sum_{i=1}^3 \frac{\lambda_i}{2\pi\epsilon_0} \left(\frac{\left[(x_0 - d_i)\hat{u}_x - \left(a_i \cosh \frac{z}{a_i} - y_0 - y_{di} \right) \hat{u}_y \right]}{\left| (x_0 - d_i)^2 + \left(a_i \cosh \frac{z}{a_i} - y_0 - y_{di} \right)^2 \right|^{1/2}} - \frac{\left[(x_0 - d_i)\hat{u}_x + \left(a_i \cosh \frac{z}{a_i} + y_0 - y_{di} \right) \hat{u}_y \right]}{\left| (x_0 - d_i)^2 + \left(a_i \cosh \frac{z}{a_i} + y_0 - y_{di} \right)^2 \right|^{1/2}} \right) \quad (5.22)$$

El subíndice i denota el i -ésimo conductor del sistema trifásico de la línea eléctrica. Se puede asumir para una configuración horizontal que los parámetros i -ésimos de la catenaria de una línea eléctrica son constantes (considerando la rigidez flexional nula y que la tensión horizontal y la longitud en cada tramo de la misma no varían a pesar de estar sometido a fuerzas). Para una configuración horizontal de un sistema trifásico para una línea eléctrica aérea de AT con un conductor por fase, tenemos:

$$a_1 = a_2 = a_3 = a \wedge y_{d1} = y_{d2} = y_{d3} = y_d \Rightarrow h_1 = h_2 = h_3 = h \quad (5.23)$$

$$d_1 = -d, \quad d_2 = 0, \quad d_3 = d \quad (5.24)$$

5.5. Cálculo del campo magnético creado por líneas eléctricas aérea de AT de un sistema trifásico con un conductor por fase

Para el cálculo del campo magnético en líneas eléctricas, debido a la baja frecuencia de la corriente, no se utilizan las ecuaciones de Maxwell (no son ondas planas), de manera que se tiene que aplicar la ley de Biot-Savart a la curva de la catenaria que describe la línea eléctrica que compone a un vano del conductor. La ley de Biot-Savart considera los conductores reducidos a hilos de sección transversal nula, hipótesis válida para distancias alejadas de los mismos, incluso cuando existe más de un conductor por fase. Este es el caso habitual, ya que el interés se centra en determinar el campo cercano al suelo, donde existe una mayor exposición, [5].

El campo magnético $d\vec{B}_T$ en un punto (x_0, y_0, z_0) asociado con un elemento de longitud $d\vec{l}$ de un conductor por el que pasa una corriente estable $I_T(t)$, es perpendicular tanto a $d\vec{l}$ como al vector unitario \hat{r} , dirigido desde $d\vec{l}$ hasta (x_0, y_0, z_0) y es calculada con la expresión matemática:

$$d\vec{B}_{r1} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I_T d\vec{l} \times \hat{r}}{r^2} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I_T d\vec{l} \times (\vec{r}_2 - \vec{r}_1)}{r^3} \quad (5.25)$$

Donde: μ_0 es una constante llamada permeabilidad magnética del vacío ($4\pi \times 10^{-7}$ Tm/A), \vec{r} es el vector posición del punto donde se calcula el campo.

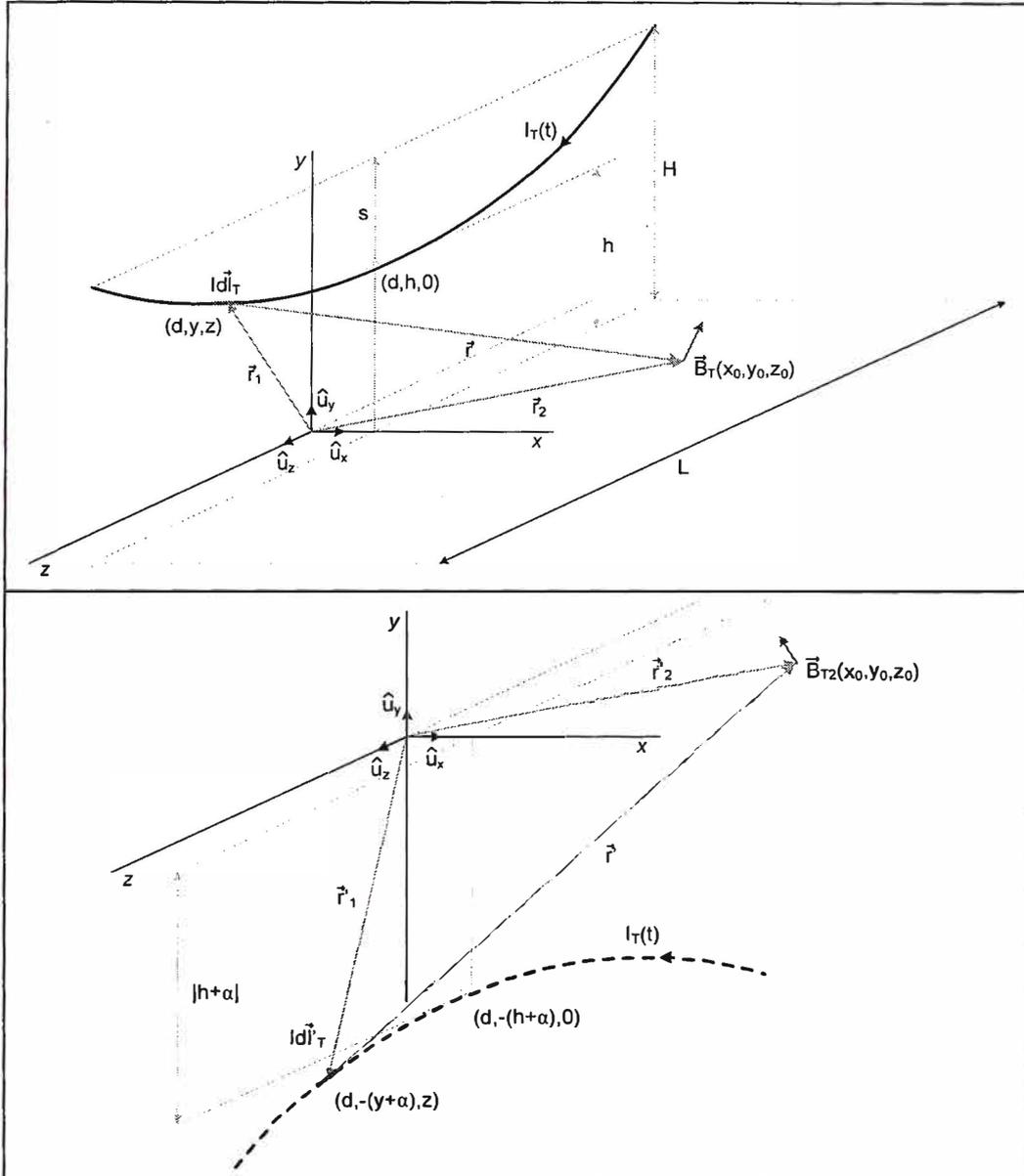


Fig. 5.5. Campo magnético creado por un conductor eléctrico y su imagen.

Para determinar el campo magnético \vec{B}_T debido a un conductor (fase T) y su imagen que se crea en el punto (x_0, y_0, z_0) por una corriente de tamaño finito, debe sumar las contribuciones de todos los elementos de corriente $I_T d\vec{l}$ que forman la corriente en el vano del conductor. Para simplificar los cálculos pero guardando una buena precisión se empleara el modelo de conductor rectilíneo de longitud infinita con altura variable, es decir cuya altura coincide con la de la catenaria en la coordenada z, [4]. De la figura 5.5, tenemos:

$$\vec{B}_T = \frac{\mu_0 I_T}{2\pi} \left(\frac{\left(a \cosh \frac{z}{a} - y_0 - y_d \right) \hat{u}_x + (x_0 - d) \hat{u}_y}{\left| (x_0 - d)^2 + \left(a \cosh \frac{z}{a} - y_0 - y_d \right)^2 \right|} - \frac{\left(a \cosh \frac{z}{a} + y_0 + \alpha - y_d \right) \hat{u}_x - (x_0 - d) \hat{u}_y}{\left| (x_0 - d)^2 + \left(a \cosh \frac{z}{a} + y_0 + \alpha - y_d \right)^2 \right|} \right) \quad (5.26)$$

El campo magnético total para una configuración horizontal de un sistema trifásico para una línea eléctrica aérea de AT con un conductor por fase será la suma de la contribución de campo creado por cada uno de los conductores de la línea eléctrica.

$$\vec{B} = \vec{B}_R + \vec{B}_S + \vec{B}_T \quad (5.27)$$

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{2\pi} \sum_{i=1}^3 I_i \left(\frac{\left(a_i \cosh \frac{z}{a_i} - y_0 - y_{di} \right) \hat{u}_x + (x_0 - d_i) \hat{u}_y}{\left| (x_0 - d_i)^2 + \left(a_i \cosh \frac{z}{a_i} - y_0 - y_{di} \right)^2 \right|} - \frac{\left(a_i \cosh \frac{z}{a_i} + y_0 + \alpha - y_{di} \right) \hat{u}_x - (x_0 - d_i) \hat{u}_y}{\left| (x_0 - d_i)^2 + \left(a_i \cosh \frac{z}{a_i} + y_0 + \alpha - y_{di} \right)^2 \right|} \right) \quad (5.28)$$

El subíndice i denota el i -ésimo conductor del sistema trifásico de la línea eléctrica. Se puede asumir para una configuración horizontal que los parámetros i -ésimos de la catenaria de una línea eléctrica son constantes (considerando la rigidez flexional nula y que la tensión horizontal y la longitud en cada tramo de la misma no varíen a pesar de estar sometido a fuerzas). Para una configuración horizontal de un sistema trifásico para una línea eléctrica aérea de AT con un conductor por fase, tenemos:

$$a_1 = a_2 = a_3 = a \wedge y_{d1} = y_{d2} = y_{d3} = y_d \Rightarrow h_1 = h_2 = h_3 = h \quad (5.29)$$

$$d_1 = -d, \quad d_2 = 0, \quad d_3 = d \quad (5.30)$$

CAPÍTULO VI

PROPUESTA DE CÁLCULO PREDICTIVO PARA EL CONTROL DE LA EXPOSICIÓN A RNI EN LAS LÍNEAS DE ALTA TENSIÓN

El cálculo analítico de estos campos sólo es posible en ciertas configuraciones relativamente simples o muy idealizadas. Para la representación de estructuras complejas, se han desarrollado diversas metodologías de cálculo del campo eléctrico y magnético mediante aplicaciones computacionales: métodos de diferencias finitas, de elementos finitos, método de Monte Carlo, método de elementos de contorno, método de simulación de cargas, método analítico numérico generalizado, etc. En este informe se presentarán cálculos analíticos por el método del conductor rectilíneo de longitud infinita con altura variable, es decir, cuya altura coincide con la de la catenaria en la coordenada z donde se desea calcular los campos máximos.

6.1. Protocolo de cálculo predictivo de Campos Eléctricos y Magnéticos en líneas eléctricas aéreas

Se debe de considerar la dependencia de la intensidad de campo eléctrico con el voltaje de operación, aumentando conforme el voltaje aumenta. También depende de la distancia a la línea, de la configuración de los conductores, espaciamiento entre conductores de fase, calibre y el número de los conductores por fase. La intensidad de campo magnético de una línea eléctrica depende principalmente de la intensidad de corriente de carga, la distancia a la línea, de la configuración y el espaciamiento entre los conductores de fase. Los campos decaen rápidamente con la distancia a la línea.

6.1.1. Inspección de campo en las líneas eléctricas

a) Datos de los parámetros de las líneas eléctricas

Para el cálculo predictivo, se van a requerir datos de los siguientes parámetros que son medibles con una visita de inspección de campo en las líneas de energía o pueden ser proporcionados por las empresas eléctricas:

- Voltaje de operación, el valor del voltaje se encuentra rotulado en cada estructura de soporte.
- Configuración de los conductores de la línea eléctrica, las configuraciones más empleadas son: vertical, horizontal, triangular y delta.

- Disposición de las fases, pudiéndose emplear la configuración de baja reactancia (RST - TSR) o la de superhaz (RST - RST).
- Espaciamiento entre conductores de fase, es la separación entre conductores de distinta fase.
- Número de los conductores por fase.
- Altura máxima del conductor de fase i en la estructura de soporte con respecto al suelo.
- Altura mínima del conductor de fase calculado en la parte media del vano con respecto al suelo.
- Medida de las longitudes del vano, se realizará entre cada estructura de soporte.
- Faja de servidumbre, verificar el cumplimiento de la faja de servidumbre a ambos lados de la línea eléctrica para la tensión nominal descrita en la tabla 4.5.
- Distancias verticales de seguridad, verificar la altura mínima correspondiente descrita en la tabla 4.6.

Los cálculos teóricos son realizados a una altura de un metro sobre el suelo. Se considerarán mediciones en otras alturas cuando sea necesario.

Las intensidades de corriente picos e intensidades de corriente promedio, en lo posible se deben solicitar a las empresas eléctricas, así como el calibre de los conductores.

Para el registro de los datos se deben utilizar los siguientes equipos:

- Odómetro (wincha)
- Altimetro
- GPS
- Cámara fotográfica digital
- Medidor de Altura de línea (teodolito)
- Cartografía de la zona y planos de las líneas eléctricas

6.1.2. Perturbación del campo

La proximidad a zonas de influencia del campo eléctrico, como cercos, edificaciones de estructura metálica, líneas férreas, los transmisores de radio de baja frecuencia, medios de transporte u objetos conductores puede perturbar el campo significativamente, por tal se requiere evaluar las zonas colindantes a las líneas eléctricas.

6.1.3. Seguridad de las personas propiedad pública y privada y medio ambiente

Identificar la proximidad de las líneas eléctricas sobre ambientes donde pueda haber actos o presencia masiva de público como son parques, zoológicos, plazas, cementerios, campos deportivos, ciclo vías, edificios residenciales, oficinas, comercio, entre otros, como también de reservas y diversidad biológica.

6.1.4. Fuentes de Campo Eléctrico y Magnético

Prever sobre la existencia de otras fuentes de campo eléctrico y magnético en la proximidad de las líneas eléctricas. Esas otras fuentes pueden ser equipos de procesos industriales y equipos de baja frecuencia diferente de 60 Hz, así como armónicos.

6.2. Cálculo predictivo de Campos Eléctrico y Magnético

Para la realización del cálculo predictivo se modelara por medio de un software una línea de transmisión de 220 kV, dispuesto en una configuración vertical de una sola terna sin cable de guarda, como se muestra en la fig. 6.1.

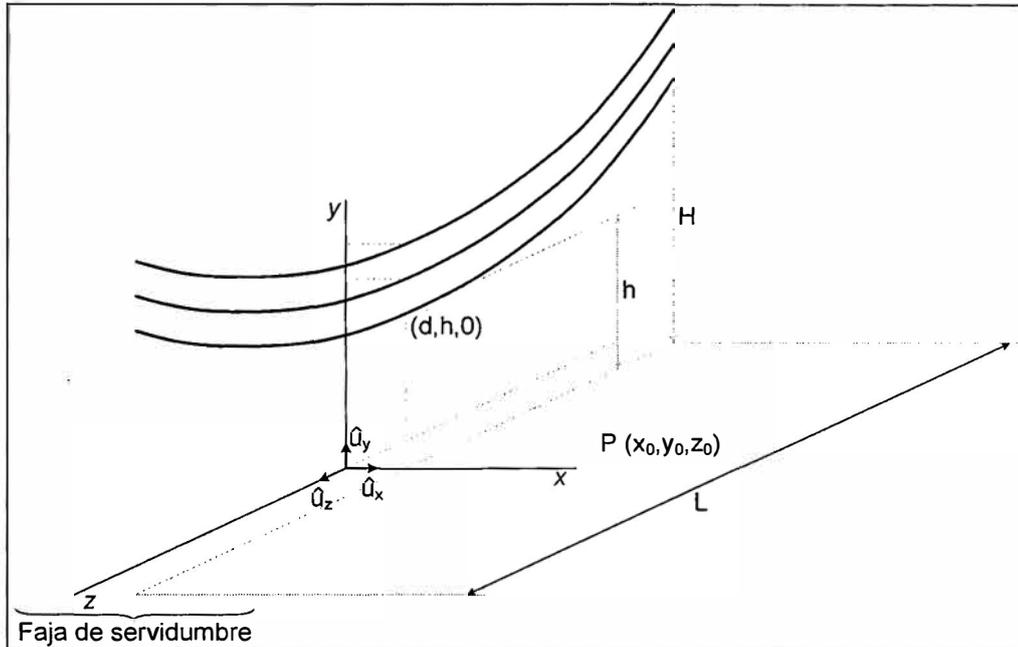


Fig. 6.1. Línea de transmisión en configuración vertical de una sola terna sin cable de guarda.

6.2.1. Cálculo de los parámetros de la catenaria

El cálculo de los parámetros de la catenaria a y y_d , se realiza con las ecuaciones 5.3 y 5.4, para tal se requieren el valor de la longitud del vano L y la diferencia de alturas máxima y mínima. La tabla 6.1 muestra los valores del parámetro a para diferentes valores de la longitud del vano y de la diferencia de alturas de las líneas eléctricas.

Tabla 6.1. Valores del parámetro a para diferentes longitudes del vano y de la diferencia de alturas.

$H_{\max} - h_{\min}$	L (longitud del vano)			$a = \frac{T_H}{\lambda}$
	300	400	500	
8	1407.58132	2501.3322	3907.58261	
10	1126.66273	2001.66444	3126.66524	
12	939.493214	1668.66284	2606.16422	
15	752.486794	1335.82587	2085.82855	

6.2.2. Cálculo de la altura del conductor imagen

Para realizar cierta precisión en los cálculos teóricos es necesario también realizar estudios de la resistividad del suelo por donde pasan las líneas eléctricas. Para nuestro

caso se eligió una resistividad de $100 \Omega\text{m}$. Empleando las ecuaciones 5.1 y 5.2 se determina el valor de la profundidad adicional que tendrán los conductores imagen, al considerar el efecto de la tierra. Para el presente caso la profundidad adicional es 918,88 m, muy superior a la altura de la línea eléctrica.

6.2.3. Software de simulación para los Campos Eléctrico y Magnético

a) Datos para el cálculo de los Campos Eléctrico y Magnético

Para la simulación de los campos eléctricos y magnéticos, se emplearán las ecuaciones 5.11, 5.15, 5.22 y 5.28 y los datos de la línea eléctrica como tensión eficaz, corriente eficaz y frecuencia de la línea (tabla 6.2). Además es necesario contar con datos de los conductores (tabla 6.3).

Tabla 6.2. Datos de la línea eléctrica de una configuración vertical de una terna

V=220000/sqrt(3);	% Tensión eficaz en voltios
I=370;	% Corriente eficaz en amperios
f=60;	% Frecuencia de la red eléctrica

Tabla 6.3. Datos de los conductores eléctricos de una configuración vertical de una terna

```
clear; clc;
% Cálculo de los campos eléctrico y magnético en una línea de transmisión de 220 kV en
% configuración vertical de una sola terna sin cable de guarda
H=22; % Altura mas bajo del conductor en la estructura de soporte
L=400; % Distancia del vano
hf=4; % Altura de separación entre fases
a=1668.66284; % Parámetro de la catenaria
ro=100; % Resistividad del terreno
alfa=sqrt((2*ro)/(pi*f*permeabi_mag)); % Profundidad del conductor imagen
fs=25; % Faja de servidumbre según CNE-S para L.T. de 220 kV
fsd=21.5; % Semi faja de servidumbre medido en el lado derecho de la L.T.
fsi=24; % Semi faja de servidumbre medido en el lado izquierdo de la L.T.
d1=5; % Fase R
d2=5; % Fase S
d3=5; % Fase T
h1=a*cosh(z/a)-yd+2*hf; % Fase R
h2=a*cosh(z/a)-yd+hf; % Fase S
h3=a*cosh(z/a)-yd; % Fase T
h1i=a*cosh(z/a)-yd+alfa+2*hf; % Fase R imagen
h2i=a*cosh(z/a)-yd+alfa+hf; % Fase S imagen
h3i=a*cosh(z/a)-yd+alfa; % Fase T imagen
ra=27.36/2000; % Radio de los conductores
```

b) Resultados numéricos de los campos eléctrico y magnético

En las siguientes tablas 6.4 y 6.5, se muestran los resultados de la simulación para una línea de transmisión de 220 kV en configuración vertical de una terna sin cable de guarda, calculado a una distancia longitudinal de 0 m del centro del vano para obtener los campos eléctrico y magnético máximos, los porcentajes de cumplimiento del campo eléctrico y magnético con respecto a la recomendaciones de la ICNIRP, el índice de compatibilidad con respecto al límite de la faja de servidumbre para el valor de tensión dado, la altura del conductor con respecto al suelo en el punto mas bajo de la línea y las semi-fajas de servidumbre para ambos lados de las líneas eléctricas. En la fig 6.2, se muestran los resultados numéricos de la simulación.

Tabla 6.4. Cálculo teórico de exposición a la intensidad de campo eléctrico para 60 Hz

$E_{rms\ max}$ (kV/m): 60 Hz	% $E_{ocupa\ ICNIRP}$: 60 Hz	% $E_{pobla\ ICNIRP}$: 60 Hz	IC E_{max-fs}	h_{min} (m)
1.8708	22.5398	44.5429	2.4462	10

Tabla 6.5. Cálculo teórico de exposición a la densidad de flujo magnético para 60 Hz

$B_{rms\ max}$ (μ T): 60 Hz	% $B_{ocupa\ ICNIRP}$: 60 Hz	% $B_{pobla\ ICNIRP}$: 60 Hz	IC B_{max-fs}	$fs_{d\ LT}$ (m)	$fs_{i\ LT}$ (m)
3.4027	0.8166	4.0849	1.433	21,5	24

```

MATLAB 7.10.0 (R2010a)
File Edit Debug Parallel Desktop Window Help
Current Folder: C:\Users\jgegar\Documents\MATLAB
Shortcuts: How to Add What's New
Current Folder
L.T. de 220 kV de una Terna en configuracion Vertical sin cable de
guarda calculado a una distancia longitudinal de 0 m del centro del vano
Erms maximo: 1.8708 kV/m
% E_poblacional_icnirp: 44.5434 %
% E_occupacional_icnirp: 22.54 %
IC: 14.3327
Brms maximo: 3.4027 uT
% B_poblacional_icnirp: 4.0849 %
% B_occupacional_icnirp: 0.8166 %
IC: 3.8145
x(metros) 'Erms (kV/m)' 'Brms (uT)
-50 0.0645336 0.160274
-49 0.0664036 0.165995
-48 0.0683434 0.171811
-47 0.0703552 0.178044
-46 0.0724414 0.184616
-45 0.0746034 0.191551
Command History
Start
  
```

Fig. 6.2. Resultados numéricos de la simulación del cálculo predictivo de los campos eléctrico y magnético.

c) Resultados gráficos de los campos eléctrico y magnético

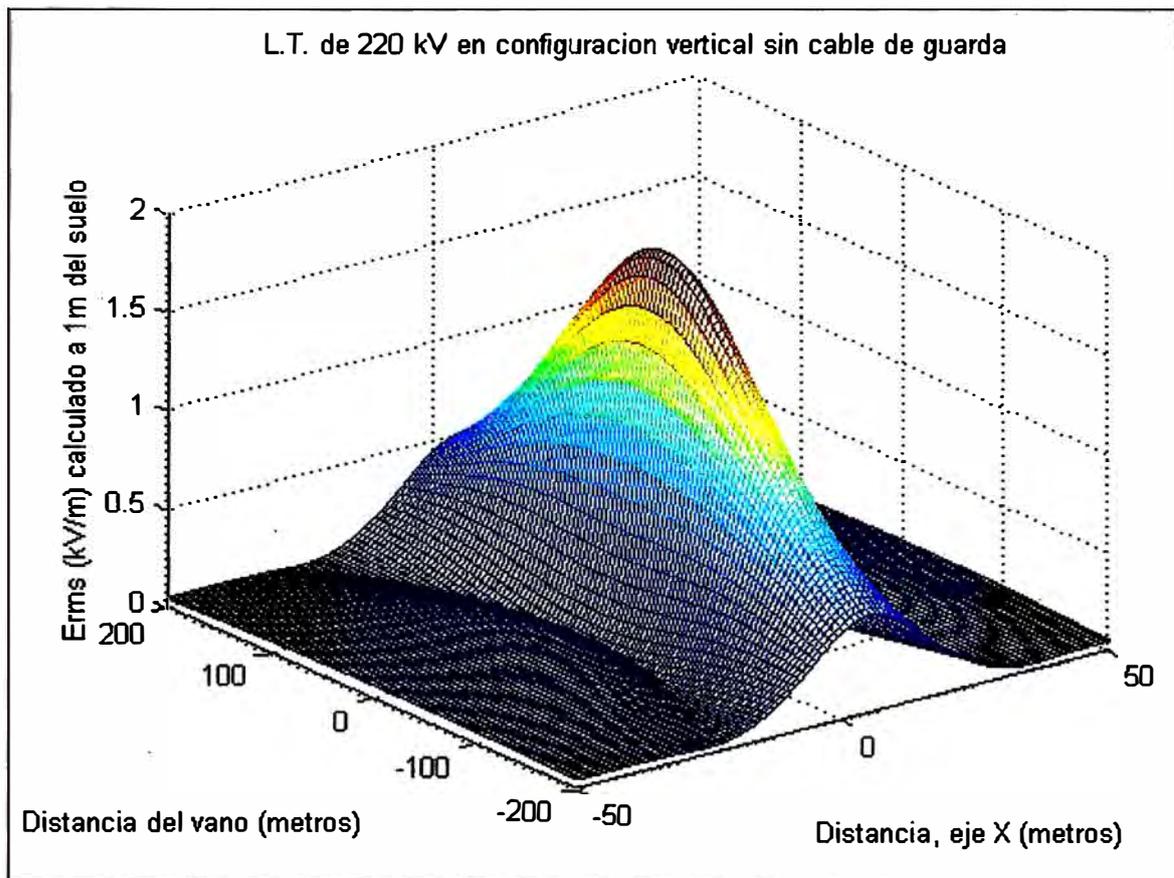


Fig. 6.3. Distribución de campo eléctrico medido a 1m del suelo bajo la línea de AT.

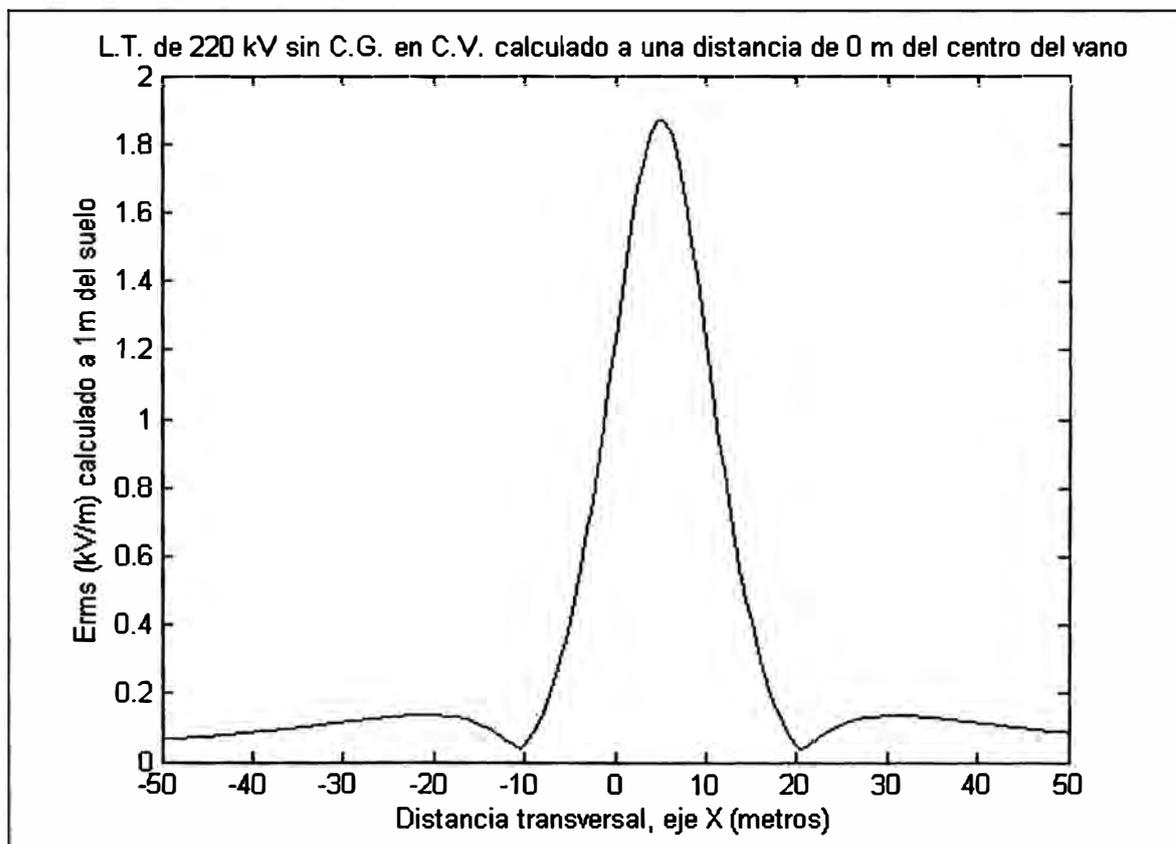


Fig. 6.4. Distribución transversal del campo eléctrico máximo en el centro del vano.

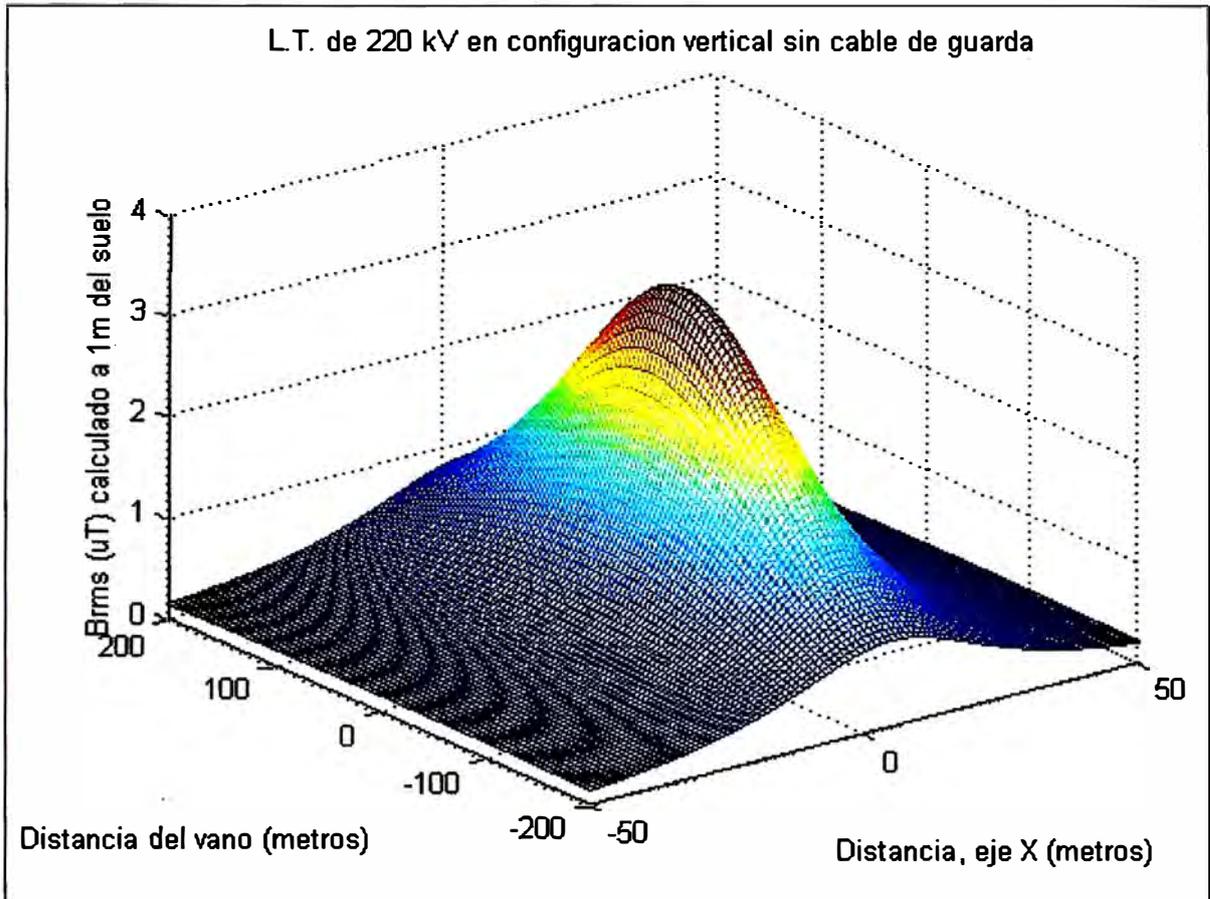


Fig. 6.5. Distribución de campo magnético medido a 1m del suelo bajo la línea de AT.

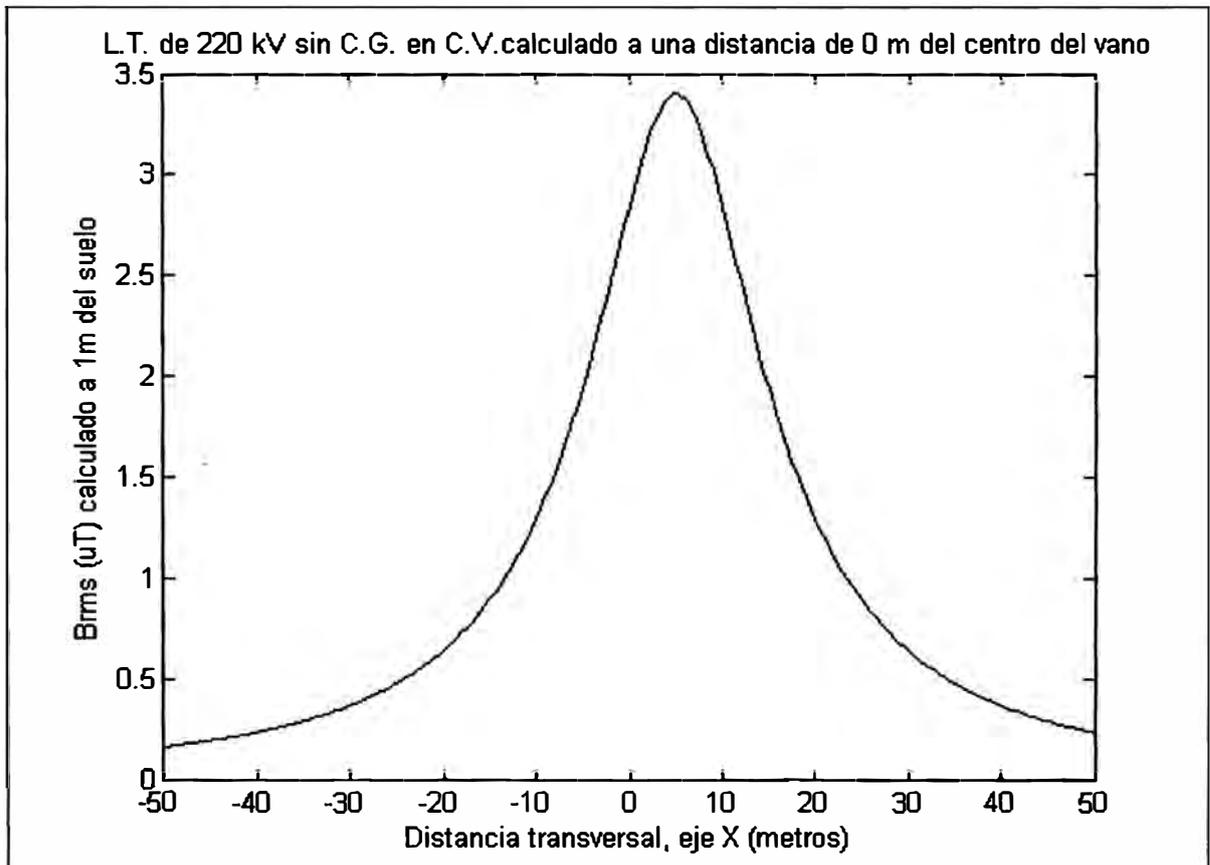


Fig. 6.6. Distribución transversal del campo magnético en el centro del vano.

CAPÍTULO VII

EVALUACIÓN PARA EL CUMPLIMIENTO DE LAS NORMAS

7.1. Evaluación de los resultados con respecto a las Recomendaciones ICNIRP

La evaluación consiste en comparar los resultados teóricos con los valores máximos (LMP: Limite Máximo Permissible) de Exposición a Campos Eléctricos y Magnéticos a 60 Hz establecidos en el Perú, de acuerdo con la tabla 4.4 del presente informe.

7.1.1. Evaluación de la Intensidad de Campo Eléctrico

Para realizar la evaluación del campo eléctrico utilizamos el valor eficaz en 60 Hz obtenido teóricamente y lo dividimos entre el valor máximo (LMP: Limite Máximo Permissible) de exposición ocupacional y poblacional para 60 Hz:

$$\text{Exposición al Campo Eléctrico}_{60\text{Hz}} (\%) = \frac{E_{\text{medido } 60\text{Hz}}}{E_{\text{límite } 60\text{Hz}}} \times 100\% \quad (7.1)$$

$$E_{\text{límite } 60\text{Hz}} \text{ ocupacional} = 8,3 \text{ kV/m} \quad (7.2)$$

$$E_{\text{límite } 60\text{Hz}} \text{ poblacional} = 4,2 \text{ kV/m}$$

Esta operación se repite para todos los puntos de medición. En la tabla 7.1, se presenta la evaluación de la Intensidad de Campo Eléctrico de los resultados de la tabla 6.4.

7.1.2. Evaluación del Campo Magnético (densidad de flujo magnético)

Para realizar la evaluación del campo magnético utilizamos el valor eficaz en 60 Hz obtenido teóricamente y lo dividimos entre el valor máximo (LMP: Limite Máximo Permissible) de exposición ocupacional y poblacional para 60 Hz:

$$\text{Exposición al Campo Magnético}_{60\text{Hz}} (\%) = \frac{B_{\text{medido } 60\text{Hz}}}{B_{\text{límite } 60\text{Hz}}} \times 100\% \quad (7.3)$$

$$B_{\text{límite } 60\text{Hz}} \text{ ocupacional} = 416,7 \mu\text{T} \quad (7.4)$$

$$B_{\text{límite } 60\text{Hz}} \text{ poblacional} = 83,3 \mu\text{T}$$

Esta operación se repite para todos los puntos de medición. En la tabla 7.2, se presenta la evaluación de la densidad de flujo magnético de los resultados de la tabla 6.5.

Tabla 7.1. Evaluación de la exposición a la intensidad de campo eléctrico para 60 Hz

$E_{\text{rms max}}$ (kV/m)	% E_{ocupa} ICNIRP	% E_{pobla} ICNIRP	Evaluación
1.8708	22.5398	44.5429	No supera los LMP de exposición ocupacional
			No supera los LMP de exposición poblacional

$E_{rms\ max}$ (kV/m): 60 Hz	Valor máximo eficaz teórico de la intensidad de campo eléctrico medido a 60 Hz.
$\%E_{ocupa\ ICNIRP}$: 60 Hz	Relación entre el valor teórico y el valor máximo de exposición ocupacional para 60 Hz de la de la intensidad de campo eléctrico.
$\%E_{pobla\ ICNIRP}$: 60 Hz	Relación entre el valor teórico y el valor máximo de exposición poblacional para 60 Hz de la de la intensidad de campo eléctrico.

Tabla 7.2. Evaluación de la exposición a la densidad de flujo magnético para 60 Hz

$B_{rms\ max}$ (μ T)	$\%B_{ocupa\ ICNIRP}$	$\%B_{pobla\ ICNIRP}$	Evaluación
3.4027	0.8166	4.0849	No supera los LMP de exposición ocupacional
			No supera los LMP de exposición poblacional

$B_{rms\ max}$ (μ T): 60 Hz	Valor máximo eficaz teórico de la densidad de flujo magnético medido a 60 Hz.
$\%B_{ocupa\ ICNIRP}$: 60 Hz	Relación entre el valor teórico y el valor máximo de exposición ocupacional para 60 Hz de la de la densidad de flujo magnético.
$\%B_{pobla\ ICNIRP}$: 60 Hz	Relación entre el valor teórico y el valor máximo de exposición poblacional para 60 Hz de la de la densidad de flujo magnético.

7.2. Evaluación de los resultados con respecto a las Reglas de Seguridad

La evaluación consiste en comparar los resultados medidos con los valores mínimos de seguridad referidos a las líneas eléctricas aéreas, establecidos en la Código Nacional de Electricidad – Suministro 2001.

7.2.1. Evaluación de la faja de servidumbre

Para realizar la evaluación de la faja de servidumbre utilizamos el menor valor medido en la longitud de la línea eléctrica y lo comparamos con lo establecido en la tabla 4.5. Anchos mínimos para fajas de servidumbre. Esta operación se realiza a ambos lados de la línea eléctrica. En la tabla 7.3, se presenta la evaluación del cumplimiento de la faja de servidumbre de los resultados de la tabla 6.5.

Tabla 7.3. Evaluación de la faja de servidumbre para una tensión de 220 kV rms

$fs_{d\ LT}$ (m)	$fs_{i\ LT}$ (m)	$fs_{d\ CNE-S}$ (m): 220 kV	$fs_{i\ CNE-S}$ (m): 220 kV	Evaluación
21,5	24	12,5	12,5	Supera la faja de servidumbre

$fs_{d\ LT}$ (m)	Valor mínimo medido al lado derecho en la longitud de la línea eléctrica.
$fs_{i\ LT}$ (m)	Valor mínimo medido al lado izquierdo en la longitud de la línea eléctrica.
$fs_{d\ CNE-S}$ (m): 220 kV	50 % de la faja de servidumbre al lado derecho de la línea eléctrica para 220 kV de tensión.
$fs_{i\ CNE-S}$ (m): 220 kV	50 % de la faja de servidumbre al lado izquierdo de la línea eléctrica

para 220 kV de tensión.

7.2.2. Evaluación de la distancia vertical de seguridad

Para realizar la evaluación de la distancia vertical de seguridad utilizamos el menor valor medido en los puntos más bajo de los vanos de la línea eléctrica y lo comparamos con lo establecido en la tabla 4.6. Distancias verticales de seguridad. En la tabla 7.4, se presenta la evaluación del cumplimiento de la distancia vertical de seguridad de los resultados de la tabla 6.4.

Tabla 7.4. Evaluación de la distancia vertical de seguridad

$h_{\min \text{ LT}} \text{ (m)}$	$h_{\min \text{ CNE-S}} \text{ (m)}$	Evaluación
10	8,5	Supera la distancia vertical de seguridad

$h_{\min \text{ LT}} \text{ (m)}$ Valor mínimo medido en el punto mas bajo del vano de la línea eléctrica.
 $h_{\min \text{ CNE-S}} \text{ (m)}$ Valor mínimo de la distancia vertical de seguridad para el cruce de carreteras y avenidas en una línea eléctrica de 220 kV de tensión.

7.2.3. Evaluación del índice de compacidad

El índice de compacidad es un factor que tiene en cuenta la rápida reducción de los campos eléctrico y magnético, conforme crece la distancia a la misma. Para ello se define como:

$$IC_{E_{rms}} = \frac{E_{\text{máximo}}}{\max [E(x_{t1}), E(x_{t2})]} \quad (7.5)$$

$$IC_{B_{rms}} = \frac{B_{\text{máximo}}}{\max [B(x_{t1}), B(x_{t2})]} \quad (7.6)$$

Donde: x_t es la coordenada (x_{t1} o x_{t2}) que maximiza el campo en el límite de la faja de servidumbre. $IC > 1$, cuanto mayor sea IC , mas importante será la reducción con la distancia. En la tabla 7.5, se presenta la evaluación del índice de compacidad de los resultados de las tablas 6.4 y 6.5.

Tabla 7.5. Evaluación del índice de compacidad

$IC_{E_{\max\text{-fs}}}$	$IC_{B_{\max\text{-fs}}}$	Evaluación
2.4462	1.433	La configuración de la línea es compacta

$IC_{E_{\max\text{-fs}}}$ Índice de compacidad de la reducción de la intensidad del campo eléctrico en el límite de servidumbre.
 $IC_{B_{\max\text{-fs}}}$ Índice de compacidad de la reducción de la densidad de flujo magnético en el límite de servidumbre.

RESUMEN GENERAL

1. Las líneas de transmisión aérea de alta tensión (AT) y las subestaciones producen intensidades de campo eléctrico muy intensos a que pueden estar expuestos las personas y los trabajadores de forma habitual.
2. Las intensidades de los campos magnéticos producidos por las líneas aéreas de transmisión de energía eléctrica son relativamente bajos en comparación con las aplicaciones industriales en las que intervienen corrientes de alta intensidad.
3. Los campos eléctricos variables en el tiempo, inducen cargas superficiales sobre un cuerpo expuesto que da como resultado corrientes inducidas dentro del cuerpo, las magnitudes están relacionadas con la densidad de carga superficial. Dicha densidad de carga superficial puede variar considerablemente, dependiendo de las condiciones de exposición y del tamaño, forma y posición del cuerpo expuesto en el campo, ocasionando una distribución variable y no uniforme de corrientes en el interior del cuerpo. Los campos magnéticos también actúan sobre los cuerpos induciendo campos y corrientes eléctricos en el interior del cuerpo.
4. El campo eléctrico inducido en el cuerpo aumenta con la frecuencia del campo externo y el tamaño del cuerpo expuesto. Por encima de un determinado umbral, estos campos eléctricos y corrientes inducidos pueden provocar una reacción en algunas células específicas. Este umbral es muy superior a los niveles típicos de exposición humana (exposición poblacional y ocupacional).
5. Muchos estudios han examinado a los campos eléctricos y magnéticos inducidos y los efectos provocados en la genética (ADN y cromosomas). Se siguen investigando si los campos eléctricos y magnéticos son directamente genotóxico (tóxico para el material genético o ADN de las células), o son capaces de potenciar el efecto de los mutágenos conocidos (sustancias, factores o agentes que pueden inducir mutaciones) o tumores, es decir, es posible que los campos ELF sean co-mutágenos o co- carcinógenos.
6. Las investigaciones sobre el riesgo de cáncer asociado a la exposición a los campos de ELF entre la población que viven cerca de las líneas eléctricas son al parecer consistentes en indicar un riesgo levemente más alto de leucemia en niños.

7. 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 mA/m². Además estudios neurofisiológicos señalan que densidades de corriente superiores a 10 mA/m² pueden afectar a delicadas funciones del sistema nervioso central, tales como el razonamiento o la memoria.
8. Las recomendaciones para limitar la exposición a campos eléctricos y magnéticos, han sido desarrolladas siguiendo una revisión exhaustiva de toda la investigación científica publicada. Los criterios aplicados para evaluar la credibilidad de los diversos hallazgos reportados (Repacholi y Stolwijk 1991; Repacholi y Cardis 1997); como sólo efectos establecidos en la salud, fueron usados como la base para restricciones de la exposición.
9. Las recomendaciones están basadas en efectos inmediatos a la salud proveniente de exposiciones de corto plazo, tales como la estimulación en los nervios periféricos y músculos, choques eléctricos y quemaduras causadas por tocar objetos conductores, y la generación de temperaturas elevadas en los tejidos resultante de la absorción de energía durante la exposición a campos eléctricos y magnéticos.
10. En el caso de efectos potenciales de largo plazo por la exposición, tales como un incremento en el riesgo de cáncer, ICNIRP concluye que la información disponible de efectos establecidos es insuficiente para proporcionar una base para el establecimiento de restricciones a la exposición de niveles de densidad de flujo magnético de 50/60Hz sustancialmente más bajos que los recomendados por ICNIRP.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. Se ha analizado la formulación basada en considerar el modelo de conductor rectilíneo de longitud infinita con altura variable, obteniéndose algunas aportaciones y mejoras en la formulación matemática desarrollada con respecto al método rectilíneo indefinido (RI). En el método RI los niveles de campo son constantes en toda la longitud del vano (eje z) y no varían con la altura. Por ejemplo, el error que se comete en promedio en el cálculo de los campos máximos obtenidas al sustituir por un conductor recto cuya altura es 10 m (altura mínima en la catenaria) en $z=0$ (punto medio del vano), es del 0 % para los campos eléctrico y magnético, pero para $z=L/2$ (extremos del vano), es del 90 % para el campo eléctrico y del 70 % para el campo magnético (los valores de error dependen de los factores como configuración de los conductores y espaciamiento entre conductores de fase).
2. El empleo del efecto de la tierra en los conductores imagen con respecto al conductor real es muy significativo e importante para el campo eléctrico, debido a que la profundidad del conductor imagen esta a la misma altura del conductor real y están próximos al suelo (distancias de 10 a 30 metros, con una variación máxima menor a 50 % dentro de la zona de servidumbre), pero no para el campo magnético pudiendo ser despreciable (variación máxima menor a 0.5 % dentro de la zona de servidumbre), debido a que la profundidad del conductor imagen es mucho mayor que la altura del conductor real (altura mínima adicional del conductor imagen mayor a 200 m y depende de la resistividad del terreno, grafica en Anexo C para una frecuencia de 60 Hz).
3. Los conductores describen una catenaria ente dos puntos de suspensión, por lo tanto la línea eléctrica se compondrá de sucesivas catenarias. La curvatura de la catenaria depende básicamente del parámetro a , de la longitud L del vano y de la diferencia de alturas (flecha s), el valor del parámetro a no es lineal, aumenta cuando aumenta la longitud del vano y disminuye cuando aumenta la flecha, se muestra una grafica en Anexo B. Para los ejemplos se consideran vanos de distancia $L = 400$ m, flecha $s = 12$ m y la altura mínima del suelo es 10 m, donde se obtiene $a = 1668.66$. Se muestran en la tabla 6.1 valores del parámetro a .

4. La variación del campo magnético con respecto a la resistividad del terreno es muy ligera, para valores de resistividad menores a 100 ohm.m el porcentaje de variación es menor de 0.5 %, siendo máximo para valores de 5 ohm.m (terrenos de alta conductividad), para valores de resistividad mayores a 150 ohm.m el porcentaje de variación es del tercer orden decimal (insignificante).
5. Actualmente se utilizan voltajes de operación en las líneas de transmisión de 60 kV, 66 kV, 138 kV y 220 kV. Para la evaluación se compararon los resultados teóricos con los valores máximos (LMP: Limite Máximo Permisible) de Exposición a Campos Eléctricos y Magnéticos a 60 Hz establecidos en el Perú, de acuerdo con la tabla 4.4 del presente informe. Todos los resultados se calcularon con una altura mínima de 10 m. al suelo, tensión de la línea de 220 kV e intensidad de corriente de 370 A. En la evaluación del porcentaje a la exposición de la intensidad de campo eléctrico poblacional, el promedio de exposición es de un 60 % y para una configuración vertical de doble terna con cable de guarda es de 65 %. Para la evaluación del porcentaje a la exposición de la densidad de flujo magnético poblacional, el promedio de exposición es de un 5 % y para una configuración triangular de simple terna sin cable de guarda es de 6 %.
6. El Ministerio de Energía y Minas ya tiene proyectado instalar líneas de transmisión de 500 kV, y realizando un calculo predictivo para la evaluación del porcentaje a la exposición de la intensidad de campo eléctrico poblacional, el promedio de exposición sobrepasa los valores máximos, resultando de un 140 % para una altura mínima de 10 m. y en una configuración vertical de doble terna, valores cercanos resulta para otras configuraciones.
7. Para conseguir las mejores estimaciones de los campos eléctricos y las densidades de las corrientes inducidas en el cuerpo, se necesita modelos anatómicamente y eléctricamente más reales (fantomas), como también para la dosimetría de los campos eléctrico y magnético.
8. Se debe realizar un estricto control y supervisión de los niveles de campo eléctrico y magnético para que no afecte a la salud de las personas, a la vez salvaguardar los derechos y la seguridad de las personas y de la propiedad pública y privada durante la instalación, operación o mantenimiento de las líneas aéreas y equipos asociados, sin afectar el medio ambiente; que su diseño, construcción, operación y mantenimiento sea amigable con el medio ambiente.
9. Se deben de evaluar las zonas posibles donde no se cumplan las reglas de seguridad ya sea para la faja de servidumbre o para la distancia vertical de seguridad o ambas e

implantación de un programa de cumplimiento.

10. Se deben desarrollar normas que definan zonas de acceso limitado alrededor de las fuentes generadoras de campos eléctricos y magnéticos intensos como protección frente a la interferencia electromagnética (por ejemplo para marcapasos y otros dispositivos implantados).
11. Es necesario desarrollar procedimientos de medida y métodos teóricos de cálculo predictivo normalizados.
12. Es necesario establecer requisitos para la instrucción de los trabajadores en relación con los efectos de la exposición a campos eléctricos y magnéticos de ELF y las medidas y reglas destinadas a protegerlos.
13. Se deben elaborar guías o códigos de prácticas para la seguridad de los trabajadores expuestos a campos eléctricos y magnéticos de ELF. La OIT (1993) ofrece excelentes orientaciones para la confección de este tipo de códigos.

ANEXO A
NORMATIVA COMPLEMENTARIA – CÓDIGO NACIONAL DE ELECTRICIDAD
SUMINISTRO 2009 (EN PRE-PUBLICACIÓN)

Sección 21

Requerimientos Generales

210. Secciones de referencia

La Introducción (Sección 1), Terminología Básica (Sección 2) y los Métodos de Puesta a Tierra (Sección 3) se aplicarán a los requerimientos de la Parte 2.

211. Protección del medio ambiente y buen uso

La buena práctica del uso de líneas aéreas deberá evitar ocasionar mayor impacto en el medio ambiente; tener presente la necesidad de controlar la influencia del campo eléctrico y magnético señalados en la Regla 212, que no afecte a la salud de las personas y medio ambiente; que su diseño, construcción, operación y mantenimiento sea amigable con el medio ambiente, con un uso racional que no afecte mayormente el ornato del lugar.

Asimismo, deberá tenerse presente la influencia -en la integridad de la línea- que puedan ejercer los hábitos y costumbres de los habitantes cercanos a ellas; por ejemplo en caso de cultivos: la quema de caña de azúcar.

212. Tensiones inducidas – Campos Eléctricos y Magnéticos

En esta regla se establecen los valores máximos de radiaciones no ionizantes referidas a campos eléctricos y magnéticos (Intensidad de Campo Eléctrico y Densidad de Flujo Magnético), los cuales se han adoptado de las recomendaciones del ICNIRP (International Comision on Non - Ionizing Radiation Protección) y del IARC (International Agency for Research on Cancer) para exposición ocupacional de día completo o exposición de público.

En zonas de trabajo (exposición ocupacional), así como en lugares públicos (exposición poblacional), no se deben superar los Valores Máximos de Exposición a Campos Eléctricos y Magnéticos a 60 Hz dados en la siguiente tabla:

Tipo de Exposición	Intensidad de Campo Eléctrico (kV/m)	Densidad de Flujo Magnético (μ T)
- Poblacional	4,2	83,3
- Ocupacional	8,3	416,7

En el caso de Exposición Ocupacional, la medición bajo las líneas

NOTA: El crecimiento normal de un árbol, el movimiento combinado de los árboles y los conductores que se encuentren en condiciones climáticas adversas, tensión mecánica y flecha de conductores a temperaturas elevadas y distancias de seguridad son algunos de los factores que determinan el punto necesario hasta el cual se va a realizar la poda. En casos de litigios debe primar las condiciones de seguridad contra riesgo eléctrico.

- 218.A.2.** Donde la poda o retiro no resulte práctico, se deberá separar el conductor de los árboles con materiales o dispositivos adecuados a fin de evitar que el conductor se dañe debido a la abrasión y puesta a tierra del circuito a través de los árboles.

218.B. En el recorrido de líneas

En el recorrido de la línea deberá mantenerse libre de ramas o árboles inclinados o volcados que de alguna otra forma podrían caer en las líneas.

219. Planeamiento de nuevas instalaciones

219.A. Traza y distancias de seguridad entre la línea y otras instalaciones especiales

- 219.A.1.** Cuando se proyecte la construcción de nuevas líneas, la traza y las distancias mínimas de aproximación desde otras instalaciones establecidas tales como aeropuertos, sistemas de microondas, antenas de radio y televisión, se deberá establecer las consultas y acuerdos con las autoridades que tienen jurisdicción sobre dichas instalaciones.

En el caso especial de la transmisión, dependiendo del nivel de tensión, deberá evaluarse, y verificarse que no existan perjuicios a las instalaciones colindantes, como es el caso especial de equipos de comunicación de bases militares, equipos de hospitales sensibles a estos campos; por lo que es necesario coordinar oportunamente con las autoridades involucradas en el tema y del lugar.

- 219.A.2.** Cuando se tenga que cruzar predios de terceros, preferentemente se escogerá la ruta por los linderos o extremos sin afectar mayormente al predio.

- 219.A.3.** Cuando se tenga que instalar líneas aéreas en el frente de los predios de los establecimientos de venta de combustibles, gasocentros, grifos o consumidores directos, y no es posible cumplir con las distancias horizontales mínimas indicadas en la Tabla 127-1 de la Regla 127.A, estas líneas aéreas deberán ser sustituidas por líneas subterráneas (cables subterráneos), para cumplir con las tales distancias de seguridad.

NOTA: Siempre deberá preverse la posibilidad de cambio de ubicación de los puntos de emanación de gases, tanques, etc.

219.B. Requerimientos de la faja de servidumbre

Las fajas de servidumbre para líneas aéreas se establecen con el propósito de brindar las facilidades para la instalación, operación y

CÓDIGO NACIONAL DE ELECTRICIDAD SUMINISTRO
PARTE 2 REGLAS DE SEGURIDAD PARA LA INSTALACIÓN Y MANTENIMIENTO
DE LINEAS AÉREAS DE SUMINISTRO ELÉCTRICO Y COMUNICACIONES

mantenimiento de las instalaciones eléctricas de las empresas concesionarias, así como también para salvaguardar la seguridad pública, es decir, la integridad física de las personas y bienes, frente a situaciones de riesgo eléctrico-mecánico.

Los gobiernos locales, regionales y central, así como otras entidades encargadas de la aprobación de proyectos de habilitaciones urbanas, de edificaciones en general, de transporte y otros similares, deberán observar, cumplir y hacer cumplir los criterios técnicos de seguridad eléctrica y mecánica, y de servidumbres, establecidos en la Ley de Concesiones Eléctricas, su Reglamento y el presente Código.

219.B.1. Lo indicado a continuación es un complemento de lo expresado en la Ley de Concesiones Eléctricas y su Reglamento y modificatorias respectivas. Estas reglas deberán también ser complementadas con las indicaciones de la Norma DGE respectiva.

219.B.2. El ancho mínimo de la faja de servidumbre de la línea aérea de suministro ubicada centralmente en dicha faja, será la indicada en la Tabla 219. Véase la Figura 219-1.

Para el caso especial de la transmisión, el estudio de ingeniería -según el avance del conocimiento y la normativa- deberá considerar la posible influencia de los campos eléctricos y magnéticos para exposiciones permanentes, que pueden influir en el ancho de faja de servidumbre, de acuerdo con la Regla 212 Tensiones inducidas – Campos Eléctricos y Magnéticos.

219.B.3. La faja de servidumbre es la proyección sobre el suelo de la faja ocupada por los conductores más la distancia de seguridad (indicadas en este Código), la que deberá verificarse para cada vano donde existan predios de terceros, considerando los respectivos límites de la construcción, a que tiene derecho el predio colindante a la traza de la línea.

219.B.4. Esta faja de servidumbre debe ser verificada, a las condiciones de balanceo de máximo desplazamiento del conductor por efecto del viento de acuerdo a la Regla 234.A.2, más la distancia mínima de seguridad. Asimismo, verificar el efecto de galope del conductor (oscilación mecánica del conductor producida por efecto del viento o hielo). Si la distancia resultase mayor a lo indicado en Tabla 219, deberá emplearse el mayor valor.

219.B.5. No podrá establecerse la servidumbre de líneas aéreas que pasen sobre predios, construcciones, edificaciones, patios, jardines (de viviendas), parques, mercados, o similares; salvo los casos indicados en las Reglas 219.B.6, 219.B.7 y 219.B.8.

219.B.6. EXCEPCIÓN 1: Edificaciones o construcciones dentro de la Faja de Servidumbre pero Fuera de su Zona de Influencia

219.B.6.a Líneas aéreas existentes

Las líneas aéreas existentes que no pueden cumplir con el ancho mínimo de la faja de servidumbre establecido en la Tabla 219, debido a que en cuyas proximidades existen edificaciones o construcciones, en las que:

- No existe presencia de personas de manera permanente, tales como: tanques de almacenamiento de agua, graneros, almacenes, o construcciones similares;
- Eventualmente existe presencia de personas y/o animales, sin concurrencia pública, tales como: establos, galpones, corrales, o similares;
- No existe operación o manipulación de maquinarias que puedan vulnerar las distancias de seguridad de la línea aérea, tales como edificaciones de industria o similares;
- Sean edificaciones de vivienda u otros similares.

Se podrá establecer la servidumbre de acuerdo al ancho mínimo de la faja de servidumbre señalado en la Tabla 219, cumpliendo los procedimientos correspondientes, previo informe técnico de OSINERGMIN, y siempre que:

- La construcción o edificación se encuentre fuera de la zona de influencia de la línea (zona en la que se cumple la distancia horizontal de seguridad considerando el efecto del viento). Véase la Figura 219.B-1.a y 219.B-1.b.
- No exista influencia de los campos eléctricos y magnéticos para exposiciones permanentes, referida en la Regla 219.B.2.
- En el caso de edificaciones de vivienda, industria o similares, semestralmente, el concesionario de la línea aérea recuerde -por comunicación escrita- al propietario o al responsable de los ocupantes del predio, los cuidados y limitaciones que deben tener para evitar riesgo eléctrico o accidente.
- Queden precisados en el documento de establecimiento de la servidumbre, cada uno de los casos en los vanos correspondientes.

Cada uno de los casos deberá ser analizado de manera independiente, con la correspondiente justificación técnica en la que se incluyan los cálculos justificativos, planos, gráficos, y se detallen las distancias de seguridad de acuerdo a la Regla 219.B.4.

Para los casos de líneas aéreas con servidumbres establecidas, la justificación técnica será presentada a OSINERGMIN.

Para los casos de líneas aéreas sin servidumbre o con tramos exceptuados la justificación técnica será presentada a la DGE.

Como una alternativa opcional, en estos casos el concesionario podrá solicitar el establecimiento de la faja de servidumbre reduciendo el ancho indicado en la Tabla 219 en los vanos correspondientes, sin afectar la zona de influencia de la línea.

(Véanse las Figuras 219.B-1a y 219.B-1b)

219.B.6.b Líneas aéreas nuevas o repotenciadas

Para el establecimiento de la servidumbre de líneas aéreas repotenciadas a un nivel de tensión superior o líneas aéreas nuevas, que no puedan cumplir con el ancho mínimo de la faja de servidumbre establecido en la Tabla 219, debido a que en cuyas proximidades existen edificaciones o construcciones, se pueden aplicar los mismos criterios señalados en la Regla 219.B.6.a, salvo los casos de:

- Edificaciones de industria o similares; o

- Edificaciones de vivienda.

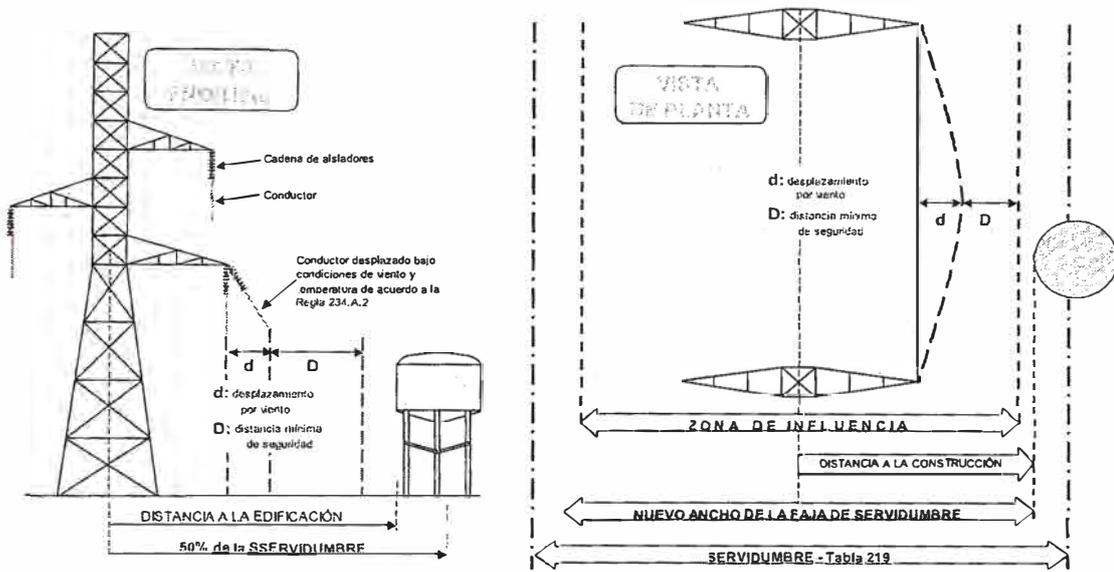


Figura 219.B-1a Construcción en la que no hay presencia permanente de personas – Tanque de almacenamiento de agua

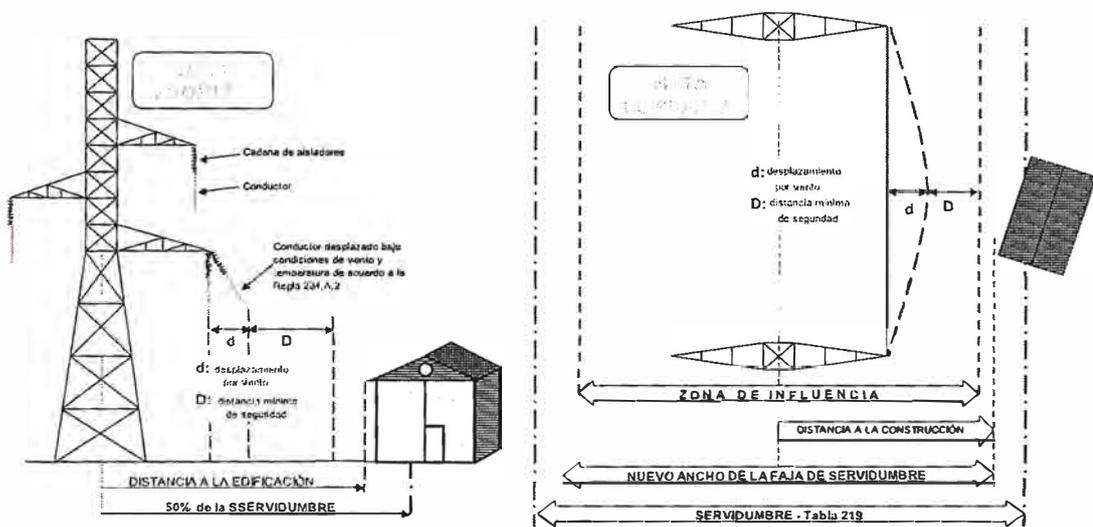


Figura 219.B-1b - Edificación en la que hay presencia de personas y/o animales – Galpón para la crianza de aves

NOTA 1: De ser necesario, podrá considerarse como zona de influencia debajo de la línea, la zona paralela al conductor con la deflexión por efecto del viento, tal como se muestra en la siguiente Figura 219.B-1c.

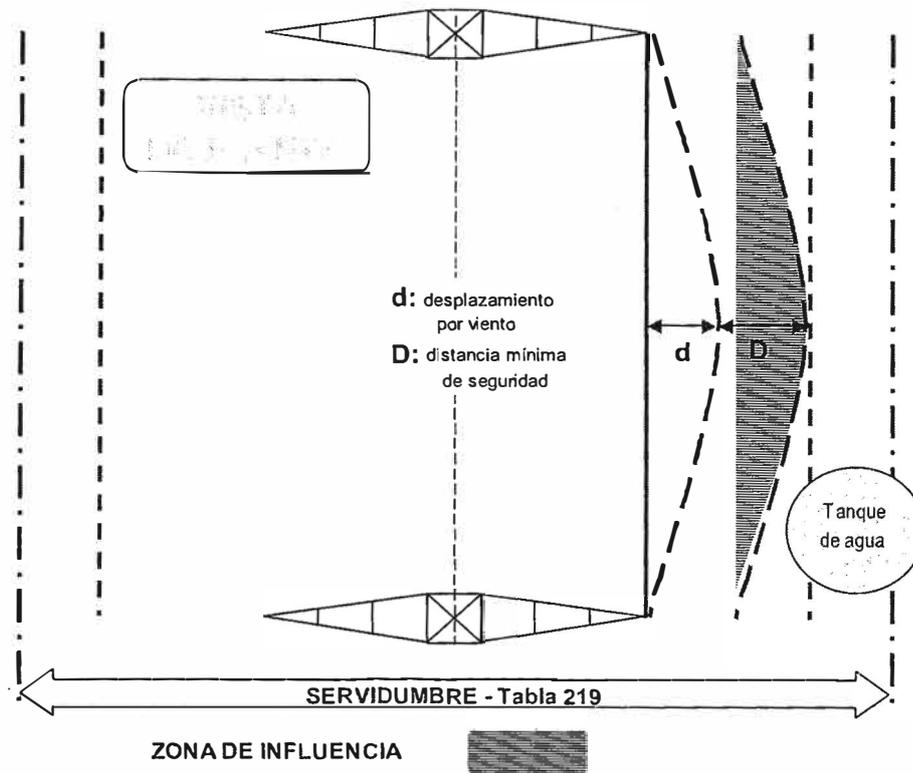


Figura 219.B-1c – Mayor precisión de la Zona de Influencia

219.B.7 EXCEPCIÓN 2: Servidumbres en líneas aéreas existentes de 30 kV o más, que pasan sobre, edificaciones o construcciones en las que no hay Concurrencia de Público

En las líneas aéreas existentes de 30 kV o más, que pasan sobre parques, edificaciones o construcciones, en las que no haya concurrencia de público, tales como:

- Corrales, viveros, galpones, o similares;
- Áreas sin construcción de los cementerios, clubes, o similares;
- Infraestructura civil sin fines de vivienda, industria o similares, tales como: tanques o reservorios de agua, canales de irrigación, letrinas, silos, casetas de seguridad, etc.
- Lozas deportivas; u
- Otras construcciones similares.

Se podrá establecer la servidumbre cumpliendo los procedimientos correspondientes establecidos, previo informe técnico de OSINERGMIN, y siempre que:

- Se cumplan las distancias verticales de seguridad establecidas en el Código;
- Se establezcan medidas orientadas a la seguridad de las estructuras y conductores en el vano en cuestión, así como la adecuada protección eléctrica;
- No exista influencia de los campos eléctricos y magnéticos para exposiciones permanentes, referida en la Regla 219.B.2;

- Semestralmente, el concesionario de la línea aérea recuerde -por comunicación escrita- al propietario o al responsable de los ocupantes del predio, los cuidados y limitaciones que deben tener para evitar riesgo eléctrico o accidente; y
- Queden precisados en el documento de establecimiento de la servidumbre, cada uno de los casos en los vanos correspondientes.

El propietario o el residente del predio afectado, luego del acuerdo y compensación correspondiente no podrán incrementar la altura de la edificación o realizar alguna acción que transgreda esta distancia de seguridad.

Cada uno de los casos deberá ser analizado de manera independiente, con la correspondiente justificación técnica, en la que se incluyan los cálculos justificativos, planos, gráficos y se detallen las distancias de seguridad de acuerdo a la Regla 219.B.4.

219.B.8. EXCEPCIÓN 3: Servidumbres en líneas aéreas existentes de 30 kV o más, que pasan sobre múltiples edificaciones o construcciones en las que hay presencia de personas

En las líneas aéreas existentes de 30 kV o más, que pasan sobre múltiples edificaciones o construcciones en las que hay presencia de personas, la solicitud de excepción para el establecimiento o regularización de la servidumbre deberán ser presentadas a la Dirección General de Electricidad, para su correspondiente evaluación, y de ser el caso, para su aprobación.

En este caso se podrá establecer o regularizar la servidumbre cumpliendo los procedimientos correspondientes, previo informe técnico de OSINERGMIN, y siempre que:

- Se cumplan las distancias verticales de seguridad establecidas en el Código;
- Se establezcan medidas orientadas a la seguridad de las estructuras y conductores en el vano en cuestión, así como la adecuada protección eléctrica;
- No exista influencia de los campos eléctricos y magnéticos para exposiciones permanentes, referida en la Regla 219.B.2; y
- Semestralmente, el concesionario de la línea aérea recuerde -por comunicación escrita- al propietario o al responsable de los ocupantes del predio, los cuidados y limitaciones que deben tener para evitar riesgo eléctrico o accidente.
- Queden precisados en el documento de establecimiento de la servidumbre, cada uno de los casos en los vanos correspondientes.

El propietario o el residente del predio afectado, luego del acuerdo y compensación correspondiente no podrán incrementar la altura de la edificación o realizar alguna acción que viole esta distancia de seguridad.

Cada uno de los casos deberá ser analizados de manera independiente, con la correspondiente justificación técnica en la que se incluyan los

cálculos justificativos, planos, gráficos, y se detallen las distancias de seguridad de acuerdo a la Regla 219.B.4.

- 219.B.9.** Para el caso de avisos publicitarios, letreros giratorios, u otros similares, el propietario de éstos deberá coordinar previamente a la elaboración del proyecto, durante la construcción y el mantenimiento, con el titular de la línea involucrada, las distancias mínimas de seguridad incluyendo los espacios de trabajo requeridos para su instalación, operación y mantenimiento, según corresponda. Las distancias de seguridad están señaladas en la Regla 234.C.

Tabla 219
Anchos mínimos de fajas de servidumbres

Tensión nominal de la línea kV	Ancho m
10 – 15	6
20 – 36	11
50 – 70	16
115 – 145	20
220	25
500	64

NOTA 1: Evitar pasar la línea aérea sobre ambientes donde pueda haber actos o presencia masiva de público como son parques, zoológicos, plazas, cementerios, campos deportivos, entre otros.

NOTA 2: En todo momento, prever que por seguridad, las instalaciones eléctricas de suministro deben disponer del sistema de protección adecuado que elimine la situación de riesgo eléctrico.

NOTA 3: Desde la etapa de proyecto, el titular de la línea aérea deberá realizar las coordinaciones y aseguramiento necesario para evitar contratiempos en la obtención de la imposición de la servidumbre.

NOTA 4: El tener el derecho de servidumbre no exime al titular de la responsabilidad frente a terceros.

NOTA 5: Para el caso de líneas de 10 kV a 22,9 kV muy cercanas a edificaciones, donde exista estrechez de las vías públicas, y donde no se requiera solicitar expresamente el otorgamiento de la faja de servidumbre, y no presenten riesgos para la instalación, operación, mantenimiento o algún otro tipo de trabajo en la línea, así como a terceros; el ancho de la faja de servidumbre se limitará a emplear las distancias de seguridad indicadas en la Sección 23.

NOTA 6: En el caso especial de zonas no urbanas, donde existan árboles de gran tamaño o muy frondosos (ejemplo zona de selva), la faja de servidumbre podrá ser incrementada según previo acuerdo con las entidades gubernamentales respectivas e involucradas con el tema.

NOTA 7: En el caso de soportes con una o más ternas definitivas, los conductores deberán estar hacia el lado de la calzada y se tomará la mitad de los anchos indicados en la Tabla 219, verificando –que según las limitaciones del lugar- si las distancias de seguridad resulten suficientes para evitar riesgos a otras instalaciones o edificaciones. Véase la Figura 219-2.

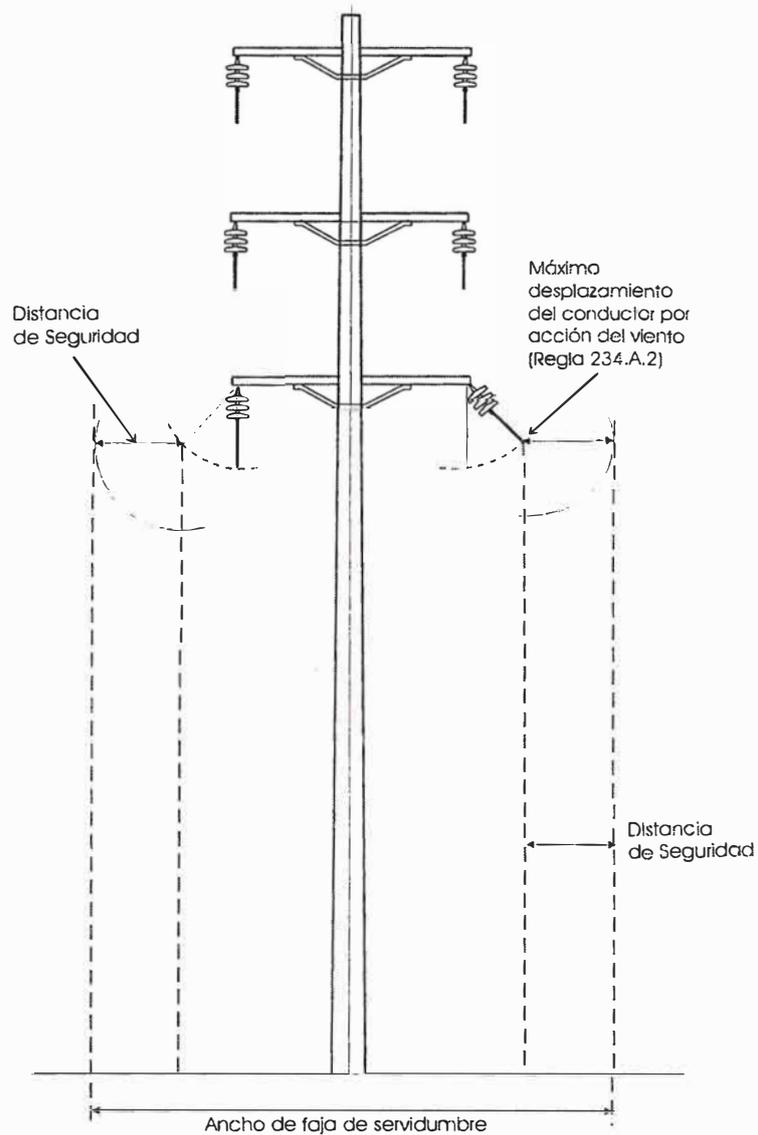
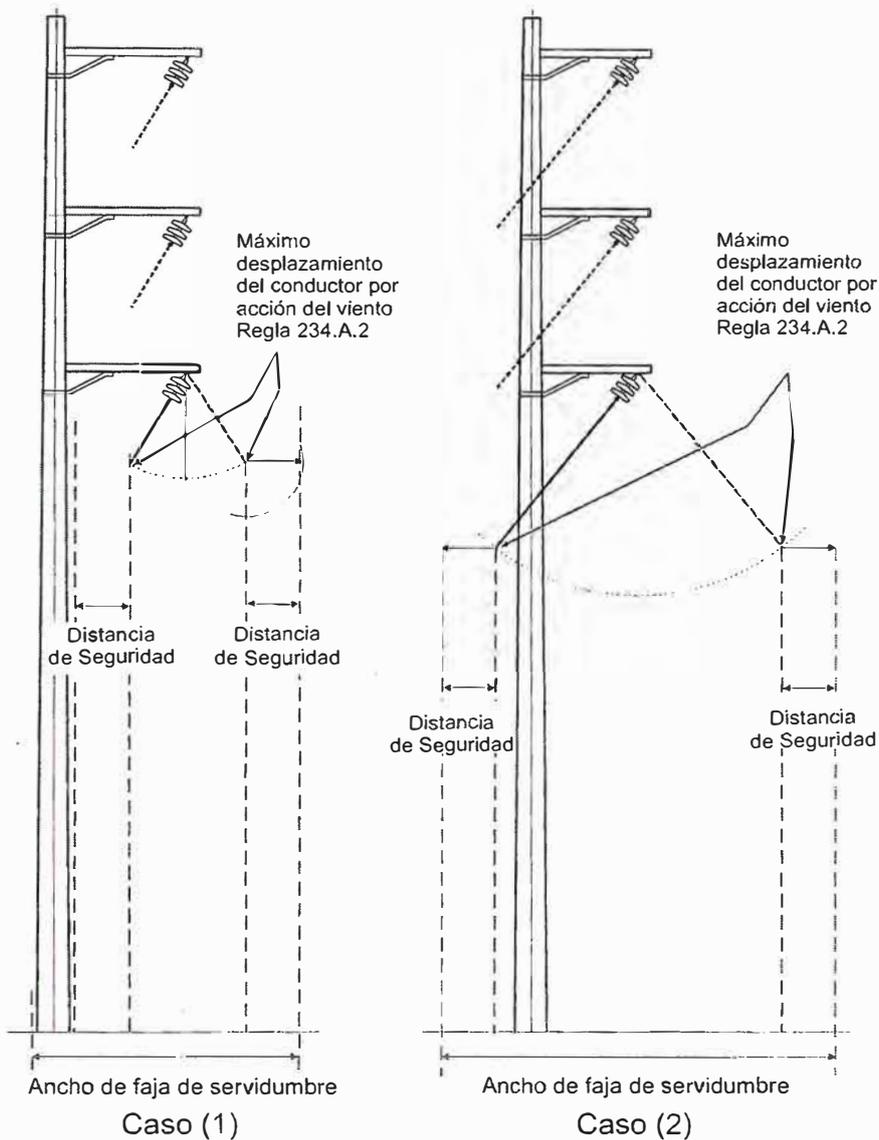


Figura 219-1
FAJA DE SERVIDUMBRE –
LÍNEA CON TERNAS A AMBOS LADOS DE LA ESTRUCTURA



NOTA: En ambos casos el ancho de faja de servidumbre mínimo será la mitad del valor indicado en la Tabla 219. (Véase la NOTA 7 de la Tabla 219).

Figura 219-2
FAJA DE SERVIDUMBRE - LÍNEA CON TERNAS
A UN SOLO LADO DE LA ESTRUCTURA

Tabla 232-1a
Distancias verticales de seguridad de alambres, conductores y cables
sobre el nivel del piso, camino, riel o superficie de agua
(en metros)

Naturaleza de la superficie que se encuentra debajo de los alambres, conductores o cables	1 000 m.s.n.m.	3 000 m.s.n.m.	4 000 m.s.n.m.	4 500 m.s.n.m.	1 000 m.s.n.m.	3 000 m.s.n.m.	4 000 m.s.n.m.	4 500 m.s.n.m.
	60 kV				138 kV			
Cuando los alambres, conductores o cables cruzan o sobresalen								
1. Vías Férreas de ferrocarriles (excepto ferrovías electrificadas que utilizan conductores de trole aéreos)	8,90	9,00	9,10	9,10	9,70	10,00	10,10	10,15
2.a. Carreteras y avenidas sujetas al tráfico de camiones ²³	7,50	7,60	7,70	7,70	7,80	8,10	8,20	8,25
2.b. Caminos, calles y otras áreas sujetas al tráfico de camiones ²³	7,50	7,60	7,70	7,70	7,80	8,10	8,20	8,25
3. Calzadas, zonas de parqueo, y callejones	7,50	7,60	7,70	7,70	7,80	8,10	8,20	8,25
4. Otros terrenos recorridos por vehículos, tales como cultivos, pastos, bosques, huertos, etc.	7,50	7,60	7,70	7,70	7,80	8,10	8,20	8,25
5.a. Espacios y vías peatonales o áreas no transitables por vehículos	5,45	5,50	5,60	5,60	6,30	6,55	6,70	6,75
5.b. Calles y caminos en zonas rurales	7,50	7,60	7,70	7,70	7,80	8,10	8,20	8,25
6. Áreas de agua no adecuadas para barcos de vela o donde su navegación está prohibida	7,45	7,50	7,55	7,60	8,30	8,55	8,70	8,75
7. Áreas de agua para barcos de vela incluyendo lagos, charcas, represas, aguas de marea, ríos, corrientes y canales con un área superficial no obstruida de:								
a. Menos de 8 hectáreas	7,95	8,00	8,05	8,10	8,80	9,05	9,15	9,25
b. Más de 8 a 80 hectáreas	9,45	9,50	9,55	9,60	10,30	10,55	10,65	10,75
c. Más de 80 a 800 hectáreas	11,45	11,50	11,55	11,60	12,30	12,55	12,70	12,75
d. Más de 800 hectáreas	12,95	13,00	13,05	13,10	13,80	14,05	14,20	14,25
8. Rampas para barcos y áreas asociadas para aparejar; áreas destinadas para aparejar o botar barcos de vela	La distancia de seguridad sobre el nivel del piso será de 1,5 m mayor que en 7 anteriormente indicado, para el tipo de áreas de agua servidas por sitios de botadura							
Cuando los alambres o cables recorren a lo largo y dentro de los límites de las carreteras u otras fajas de servidumbre de caminos pero que no sobresalen del camino								
9.a. Carreteras y avenidas	6,95	7,00	7,10	7,15	7,80	8,10	8,20	8,25
9.b. Caminos, calles o callejones	6,95	7,00	7,10	7,15	7,80	8,10	8,20	8,25
9.c. Espacios y vías peatonales o áreas no transitables por vehículo	5,45	5,50	5,60	5,60	6,30	6,55	6,70	6,75
10.a. Calles y caminos en zonas rurales	6,45	6,50	6,55	6,60	7,30	7,55	7,70	7,75
10.b. Caminos no carrozables en zonas rurales	5,45	5,50	5,60	5,60	6,30	6,55	6,70	6,75

Tabla 232-1a
 (Continuación)
Distancias verticales de seguridad de alambres, conductores y cables
sobre el nivel del piso, camino, riel o superficie de agua
 (en metros)

Naturaleza de la superficie que se encuentra debajo de los alambres, conductores o cables	1 000 m.s.n.m.	3 000 m.s.n.m.	4 000 m.s.n.m.	4 500 m.s.n.m.	1 000 m.s.n.m.	3 000 m.s.n.m.	4 000 m.s.n.m.	4 500 m.s.n.m.
	220 kV				500 kV (*)			
Cuando los alambres, conductores o cables cruzan o sobresalen								
1. Vías Férreas de ferrocarriles (excepto ferrovías electrificadas que utilizan conductores de trole aéreos)	10,20	10,50	10,70	11,10	11,75	12,65	13,10	13,30
2.a. Carreteras y avenidas sujetas al tráfico de camiones ²³	8,25	8,50	8,65	8,7	9,25	10,15	10,60	10,80
2.b. Caminos, calles y otras áreas sujetas al tráfico de camiones ²³	8,25	8,50	8,65	8,7	9,25	10,15	10,60	10,80
3. Calzadas, zonas de parqueo, y callejones	8,25	8,50	8,65	8,7	9,25	10,15	10,60	10,80
4. Otros terrenos recorridos por vehículos, tales como cultivos, pastos, bosques, huertos, etc.	8,25	8,50	8,65	8,7	9,25	10,15	10,60	10,80
5.a. Espacios y vías peatonales o áreas no transitables por vehículos	6,80	7,0	7,15	7,20	7,75	8,65	9,10	9,35
5.b. Calles y caminos en zonas rurales	8,25	8,5	8,65	8,7	9,25	10,15	10,60	10,8
6. Áreas de agua no adecuadas para barcos de vela o donde su navegación está prohibida	8,65	9,0	9,15	9,20	8,75	9,65	10,10	10,35
7. Áreas de agua para barcos de vela incluyendo lagos, charcas, represas, aguas de marea, ríos, corrientes y canales con un área superficial no obstruida de:								
a. Menos de 8 hectáreas	9,15	9,50	9,65	9,70	9,75	10,65	11,10	11,35
b. Más de 8 a 80 hectáreas	10,65	11,00	11,15	11,20	12,25	13,15	13,60	13,85
c. Más de 80 a 800 hectáreas	12,65	13,0	13,15	13,2	13,75	14,65	15,10	15,35
d. Más de 800 hectáreas	14,15	14,50	14,65	14,70	15,75	16,65	17,10	17,35
8. Rampas para barcos y áreas asociadas para aparejar; áreas destinadas para aparejar o botar barcos de vela	La distancia de seguridad sobre el nivel del piso será de 1,5 m mayor que en 7 anteriormente indicado, para el tipo de áreas de agua servidas por sitios de botadura							
Cuando los alambres o cables recorren a lo largo y dentro de los límites de las carreteras u otras fajas de servidumbre de caminos pero que no sobresalen del camino								
9,a, Carreteras y avenidas	8,25	8,50	8,65	8,70	9,25	10,15	10,60	10,85
9,b, Caminos, calles o callejones	8,25	8,50	8,65	8,70	9,25	10,15	10,60	10,85
9,c, Espacios y vías peatonales o áreas no transitables por vehículo	6,80	7,0	7,15	7,20	7,75	8,65	9,10	9,35
10,a, Calles y caminos en zonas rurales	7,65	8,0	8,15	8,20	9,25	10,15	10,60	10,85
10,b, Caminos no carrozables en zonas rurales	6,80	7,0	7,15	7,20	7,75	8,65	9,10	9,35

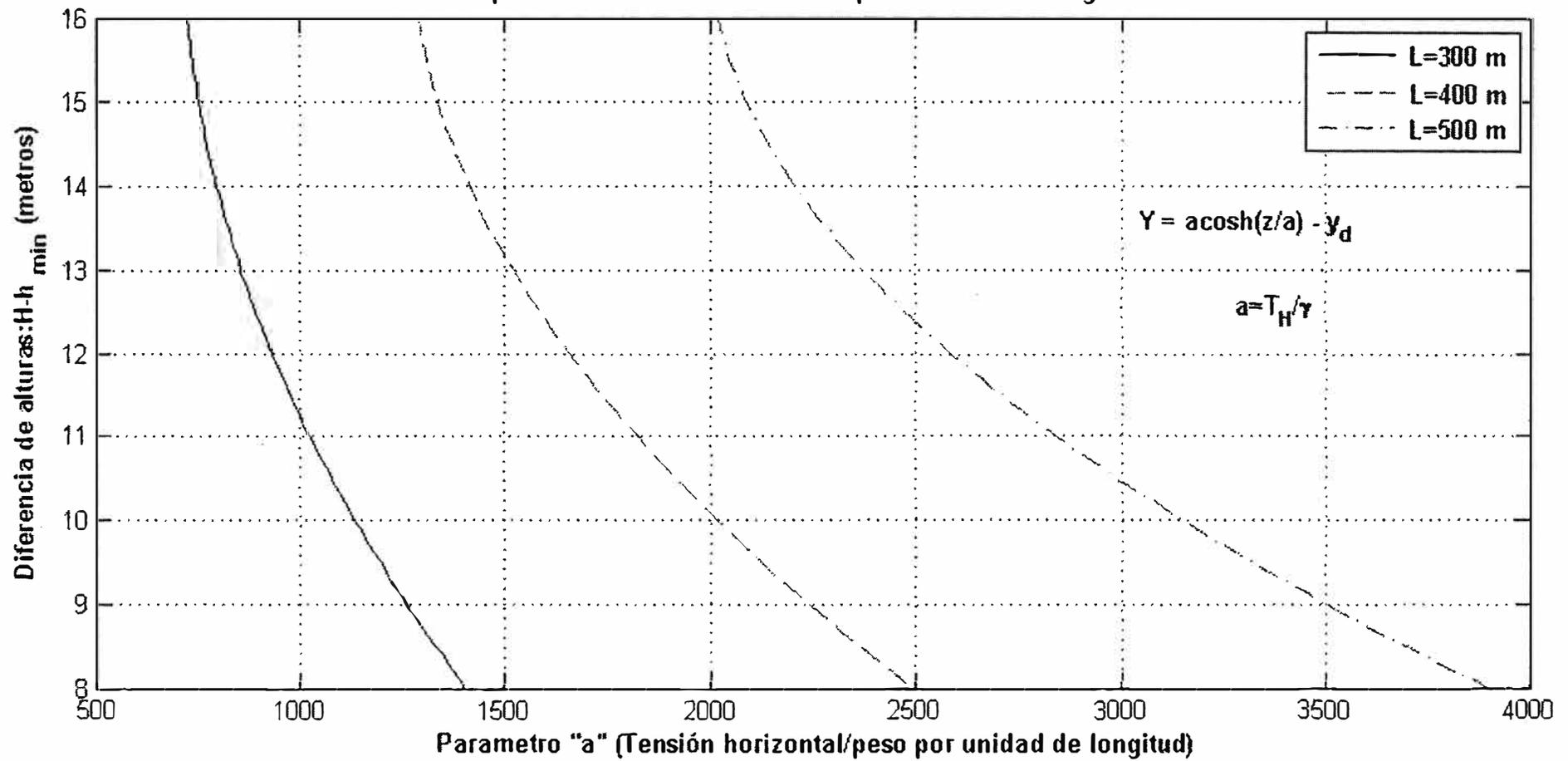
²³ A efectos de esta regla, los camiones se definen como cualquier vehículo que sobrepase de 2,45 m de altura, Las áreas no sujetas al tráfico de camiones son áreas por donde generalmente no se encuentra el tráfico de camiones ni se espera de manera razonable,

(*) Los valores para 500 kV han sido calculados considerando un factor de sobretensión transitoria de conmutación en por unidad (P.U.) igual a 2,4. Para valores superiores de dicho factor de sobretensión deberán efectuarse los cálculos correspondientes,

ANEXO B

**VALORES DEL PARÁMETRO “a” DE LA CATENARIA PARA DIFERENTES
LONGITUDES DEL VANO CON RESPECTO A LA DIFERENCIA DE LAS ALTURAS
EN LAS LÍNEAS ELÉCTRICAS**

Calculo del parametro "a" de la catenaria para diferentes longitudes del vano



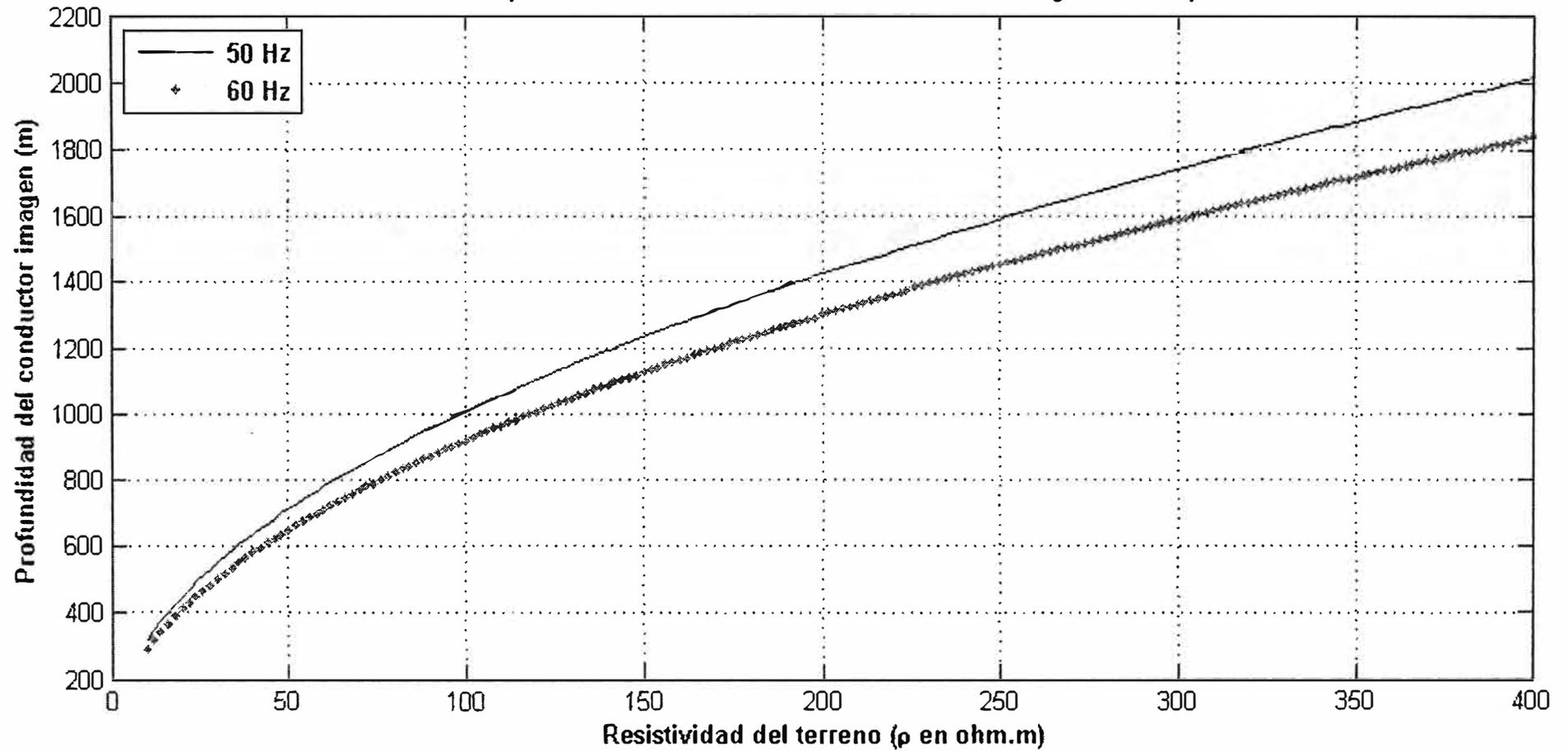
ANEXO C

VALORES DE LA PROFUNDIDAD ADICIONAL DEL CONDUCTOR IMAGEN POR EFECTO DE LA TIERRA PARA 60 Hz CON RESPECTO A LA RESISTIVIDAD DEL SUELO PARA EL CÁLCULO DEL CAMPO MAGNÉTICO

Valores de profundidad adicional del conductor imagen por efecto de la tierra

f = 60 Hz		f = 50 Hz	
ρ ($\Omega.m$)	α (m)	ρ ($\Omega.m$)	α (m)
10	290.58	10	318.31
20	410.94	20	450.16
30	503.29	30	551.33
40	581.15	40	636.62
50	649.75	50	711.76
60	711.76	60	779.70
70	768.79	70	842.17
80	821.87	80	900.32
90	871.73	90	954.93
100	918.88	100	1006.58
110	963.73	110	1055.71
120	1006.58	120	1102.66
130	1047.69	130	1147.68
140	1087.24	140	1191.01
150	1125.40	150	1232.81
160	1162.30	160	1273.24
170	1198.07	170	1312.43
180	1232.81	180	1350.47
190	1266.59	190	1387.48
200	1299.49	200	1423.53
210	1331.59	210	1458.68
220	1362.92	220	1493.01
230	1393.55	230	1526.56
240	1423.53	240	1559.39
250	1452.88	250	1591.55
260	1481.65	260	1623.07
270	1509.88	270	1653.99
280	1537.58	280	1684.34
290	1564.80	290	1714.15
300	1591.55	300	1743.46

Gráfica de la profundidad adicional de los conductores imagen con respecto a ρ



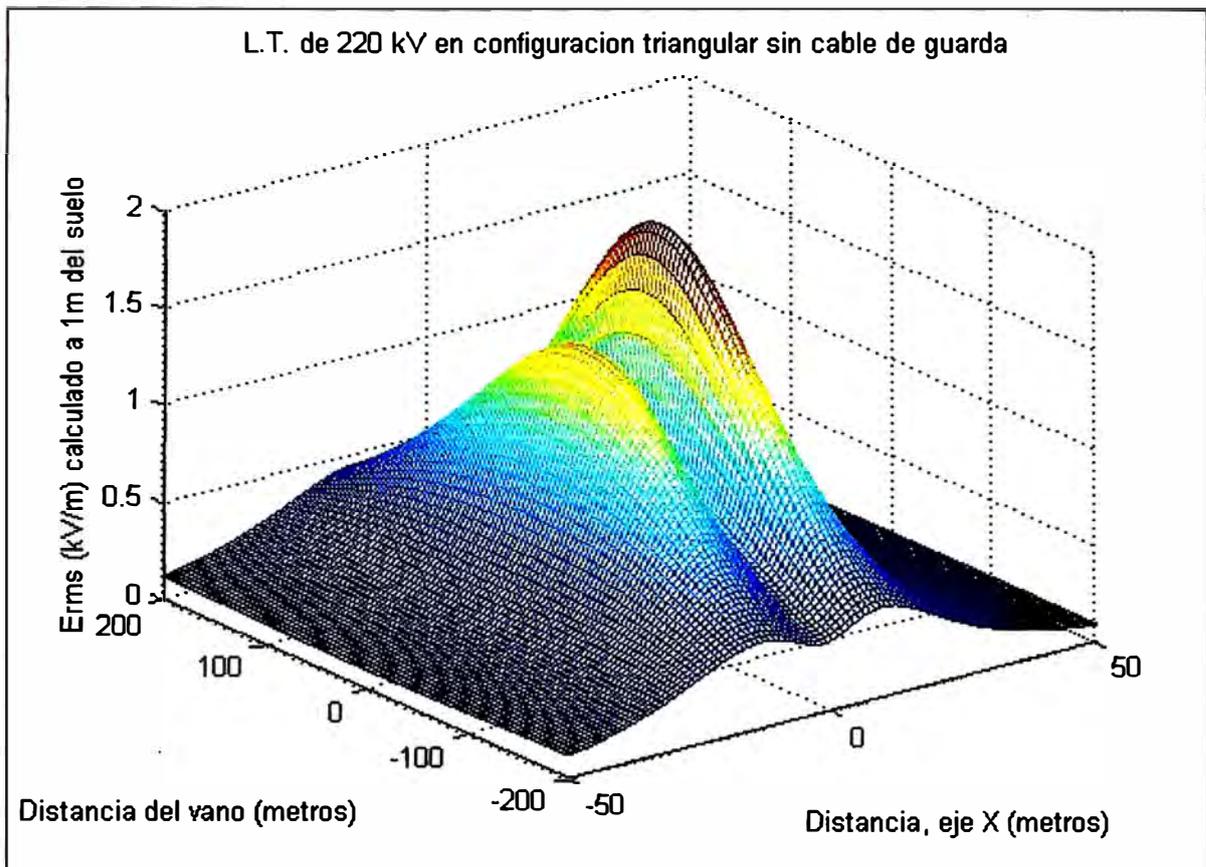
ANEXO D
GRÁFICA DE LONGITUDES REALES DE VANOS DE LÍNEAS ELECTRICAS DE AT
PARA 220 kV Y DE FAJAS DE SERVIDUMBRE



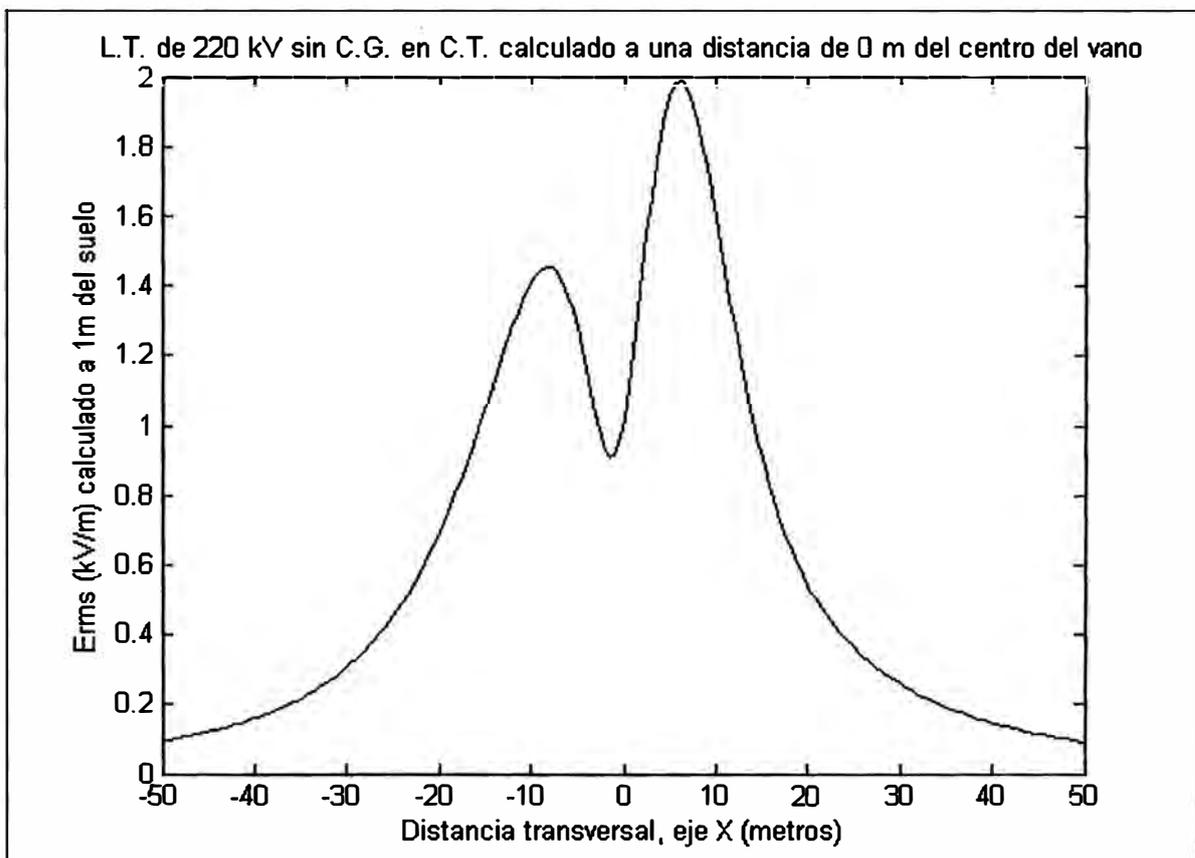
Líneas de transmisión de 220 kV, longitud de vanos y faja de servidumbre.

ANEXO E
EVALUACIÓN DE CAMPOS ELÉCTRICO Y MAGNÉTICO PARA UNA
CONFIGURACIÓN TRIANGULAR SIN CABLE DE GUARDA DE UNA LÍNEA
DE 220 kV Y 370 A.

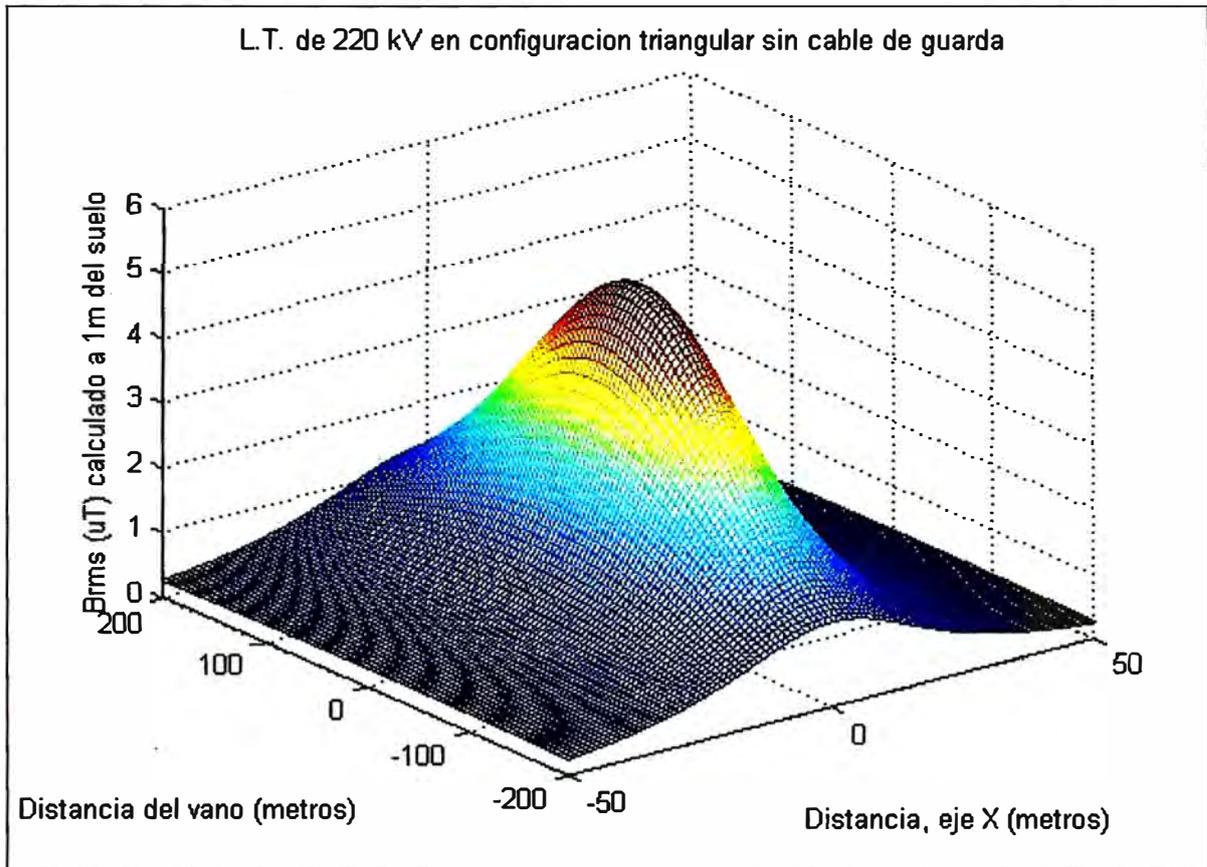
- a) Campo eléctrico de una L. T. 220 kV en configuración triangular de una terna.



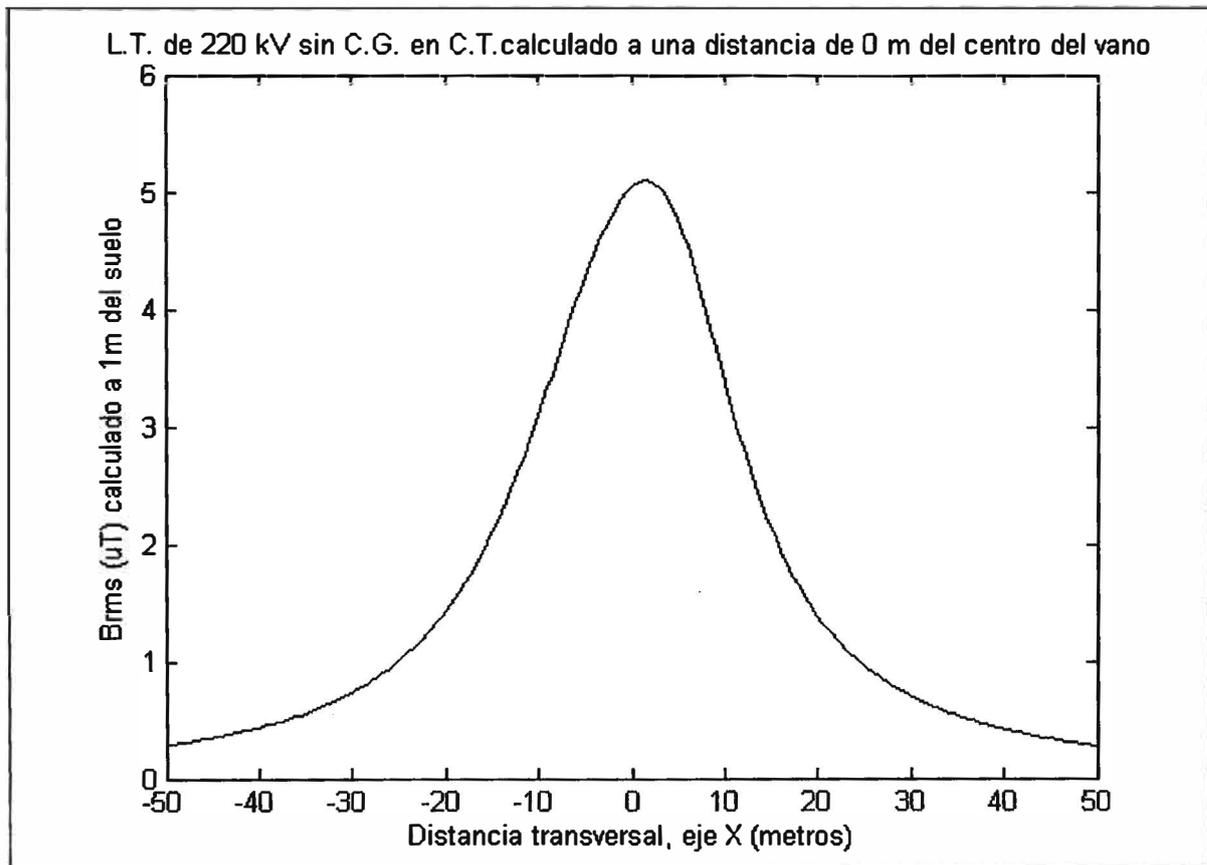
- b) Campo eléctrico máximo en el centro del vano.



- c) Campo magnético de una L. T. 220 kV en configuración triangular de una terna.



- d) Campo magnético máximo en el centro del vano.



e) Resultados y evaluación para el cumplimiento de las normas.

Tabla E.1. Cálculo teórico de exposición a la intensidad de campo eléctrico para 60 Hz

$E_{rms\ max}$ (kV/m): 60 Hz	% E_{ocupa} ICNIRP: 60 Hz	% E_{pobla} ICNIRP: 60 Hz	IC E_{max-fs}	h_{min} (m)
1.9873	23.9434	47.3161	1.5892	10

Tabla E.2. Cálculo teórico de exposición a la densidad de flujo magnético para 60 Hz

$B_{rms\ max}$ (μ T)	% B_{ocupa} ICNIRP: 60 Hz	% B_{pobla} ICNIRP: 60 Hz	IC B_{max-fs}	$fs_{d\ LT}$ (m)	$fs_{i\ LT}$ (m)
5.0905	1.2216	6.1111	1.8917	21,5	24

Tabla E.3 Evaluación de la exposición a la intensidad de campo eléctrico para 60 Hz

$E_{rms\ max}$ (kV/m)	% E_{ocupa} ICNIRP	% E_{pobla} ICNIRP	Evaluación
1.8708	23.9434	47.3161	No supera los LMP de exposición ocupacional
			No supera los LMP de exposición poblacional

Tabla E.4. Evaluación de la exposición a la densidad de flujo magnético para 60 Hz

$B_{rms\ max}$ (μ T)	% B_{ocupa} ICNIRP	% B_{pobla} ICNIRP	Evaluación
5.0905	1.2216	6.1111	No supera los LMP de exposición ocupacional
			No supera los LMP de exposición poblacional

Tabla E.5. Evaluación de la faja de servidumbre para una tensión de 220 kV rms

$fs_{d\ LT}$ (m)	$fs_{i\ LT}$ (m)	$fs_{d\ CNE-S}$ (m): 220 kV	$fs_{i\ CNE-S}$ (m): 220 kV	Evaluación
21,5	24	12,5	12,5	Supera la faja de servidumbre

Tabla E.6. Evaluación de la distancia vertical de seguridad

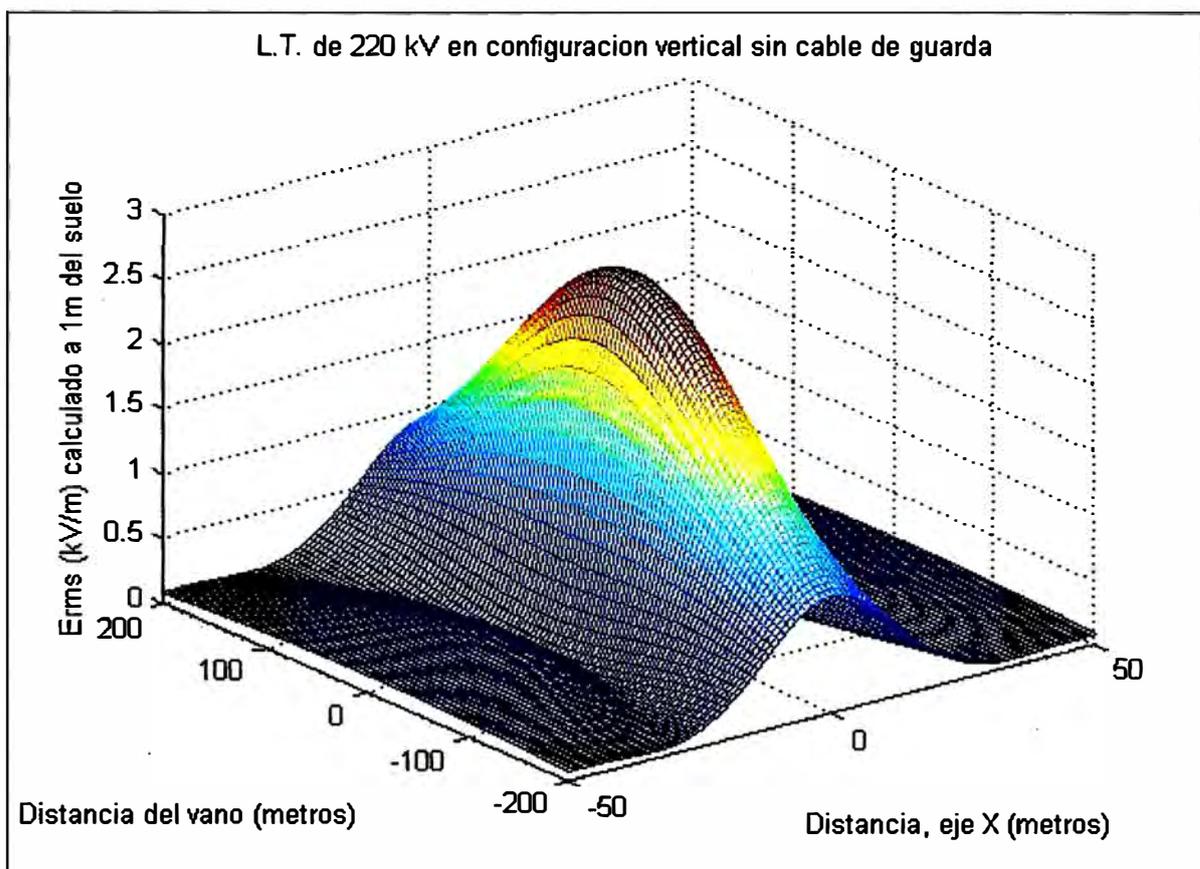
$h_{min\ LT}$ (m)	$h_{min\ CNE-S}$ (m)	Evaluación
10	8,5	Supera la distancia vertical de seguridad

Tabla E.7. Evaluación del índice de compacidad

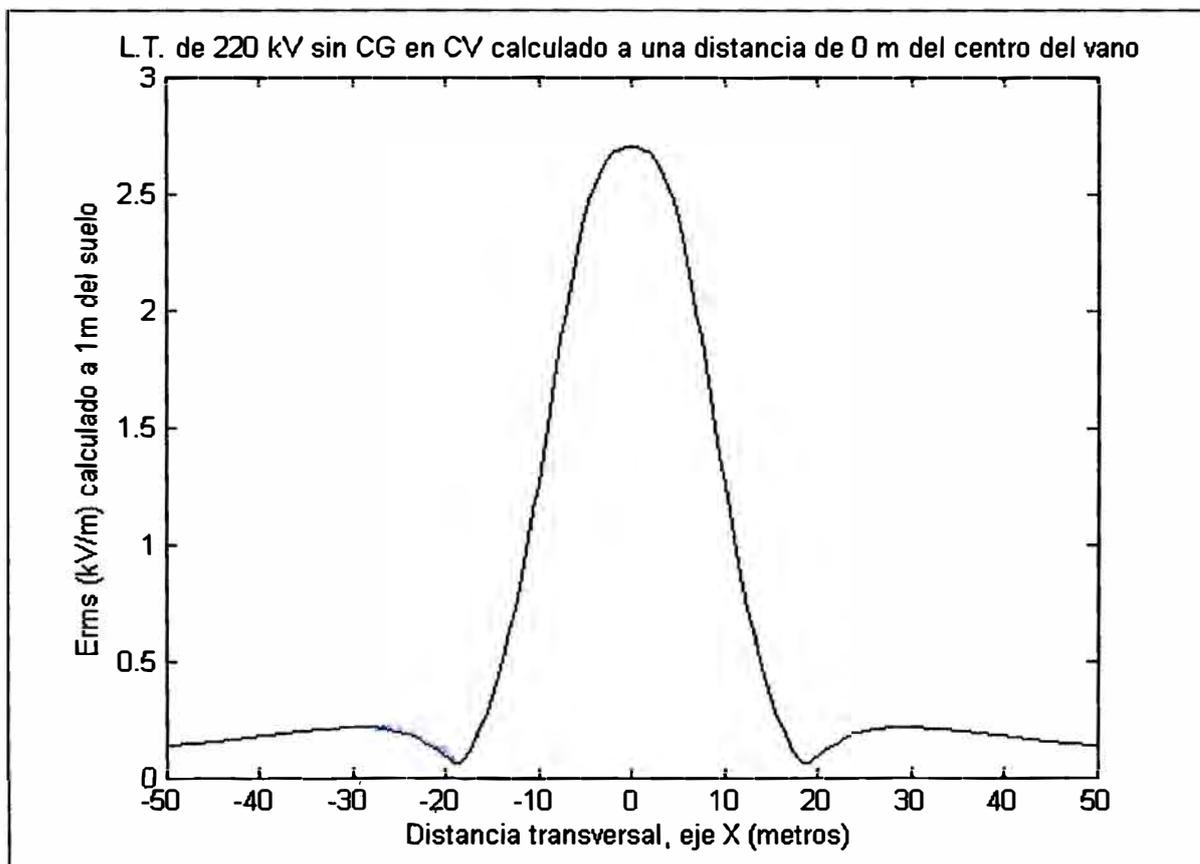
IC E_{max-fs}	IC B_{max-fs}	Evaluación
2.4462	1.433	La configuración de la línea es compacta

ANEXO F
EVALUACIÓN DE CAMPOS ELÉCTRICO Y MAGNÉTICO PARA UNA
CONFIGURACIÓN VERTICAL DE DOBLE TERNA SIN CABLE DE GUARDA
DE UNA LÍNEA DE 220 kV Y 370 A.

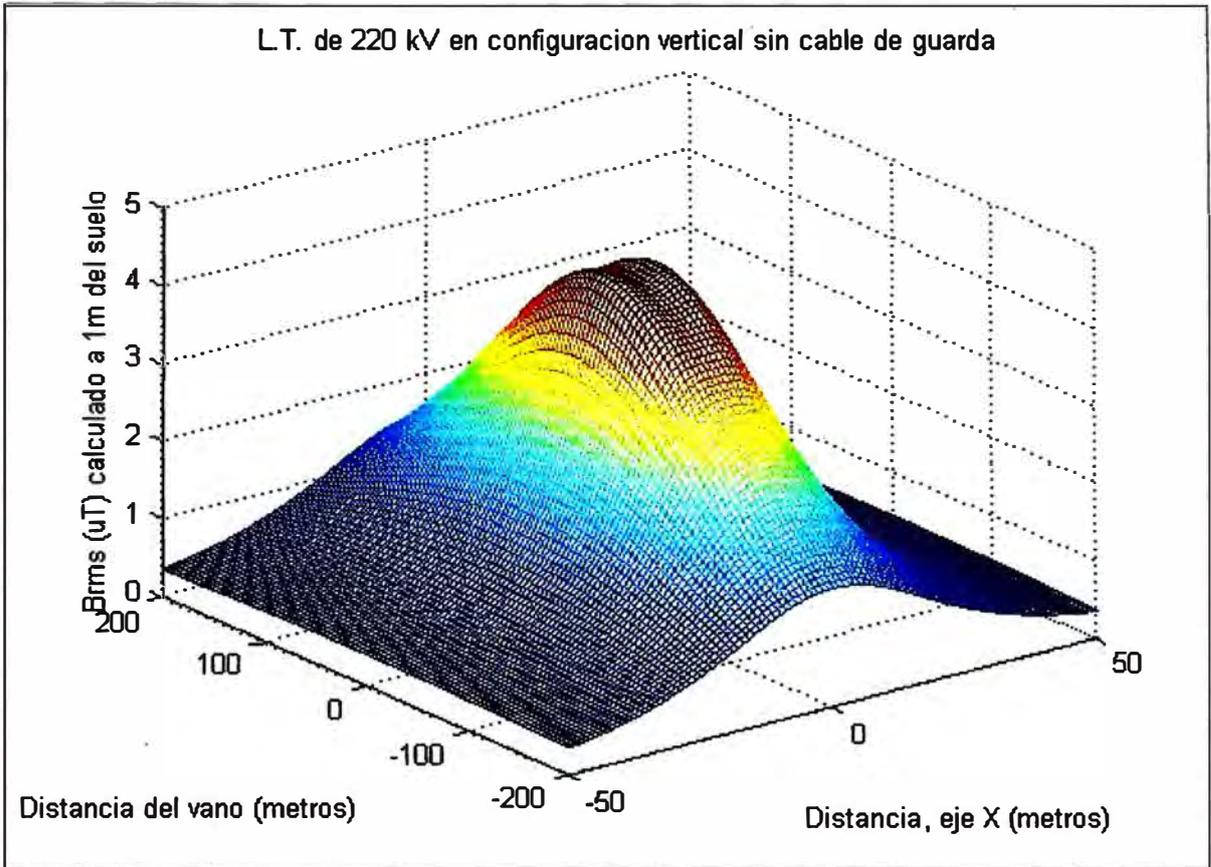
- a) Campo eléctrico de una L. T. 220 kV en configuración vertical de doble terna.



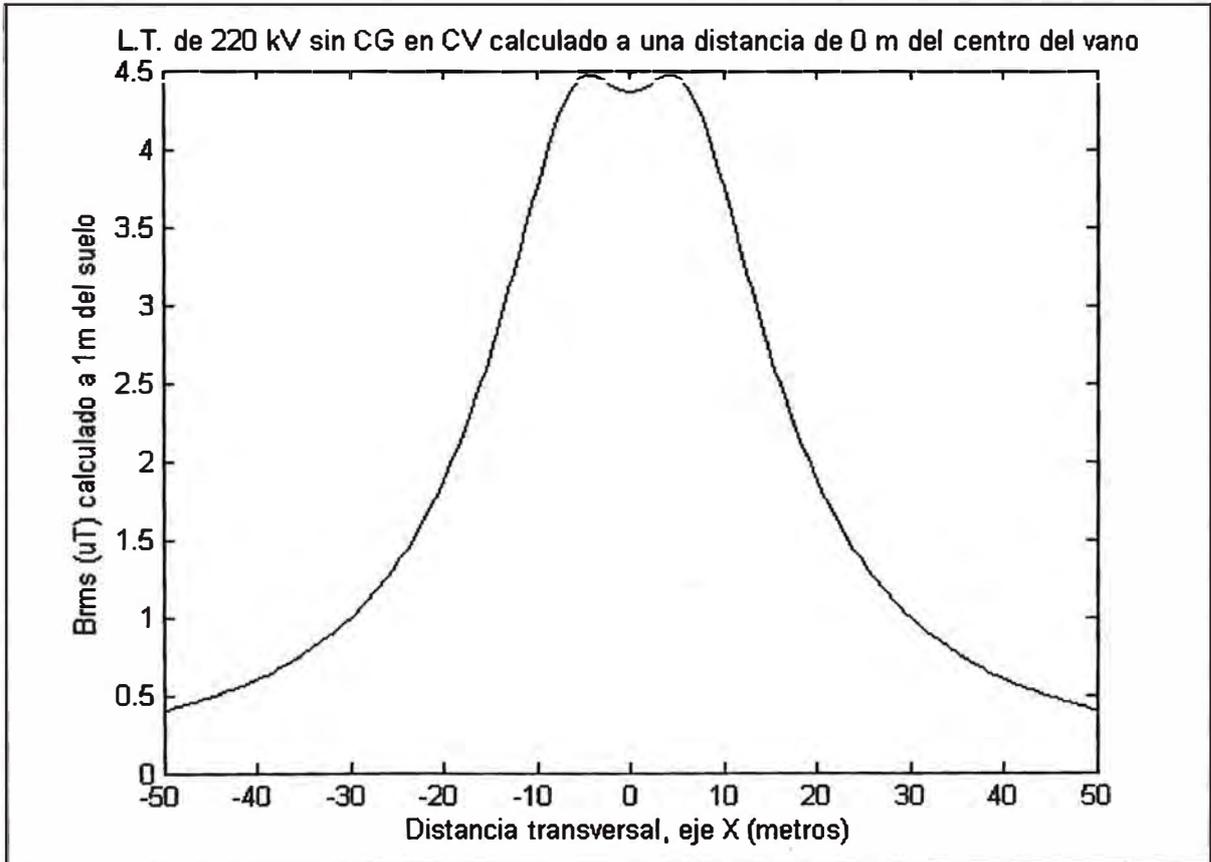
- b) Campo eléctrico máximo en el centro del vano.



c) Campo magnético de una L. T. 220 kV en configuración vertical de doble terna.



d) Campo magnético máximo en el centro del vano.



f) Resultados y evaluación para el cumplimiento de las normas.

Tabla F.1. Cálculo teórico de exposición a la intensidad de campo eléctrico

$E_{rms\ max}$ (kV/m): 60 Hz	% E_{ocupa} ICNIRP: 60 Hz	% E_{pobla} ICNIRP: 60 Hz	IC $_{E_{max-fs}}$	h_{min} (m)
2.6987	32.5145	64.2548	3.7299	10

Tabla F.2. Cálculo teórico de exposición a la densidad de flujo magnético

$B_{rms\ max}$ (μ T)	% B_{ocupa} ICNIRP: 60 Hz	% B_{pobla} ICNIRP: 60 Hz	IC $_{B_{max-fs}}$	$fs_{d\ LT}$ (m)	$fs_{i\ LT}$ (m)
4.4681	1.0723	5.3639	1.3938	21,5	24

Tabla F.3 Evaluación de la exposición a la intensidad de campo eléctrico para 60 Hz

$E_{rms\ max}$ (kV/m)	% E_{ocupa} ICNIRP	% E_{pobla} ICNIRP	Evaluación
2.6987	32.5146	64.2548	No supera los LMP de exposición ocupacional
			No supera los LMP de exposición poblacional

Tabla F.4. Evaluación de la exposición a la densidad de flujo magnético para 60 Hz

$B_{rms\ max}$ (μ T)	% B_{ocupa} ICNIRP	% B_{pobla} ICNIRP	Evaluación
4.4681	1.0723	5.3639	No supera los LMP de exposición ocupacional
			No supera los LMP de exposición poblacional

Tabla F.5. Evaluación de la faja de servidumbre para una tensión de 220 kV rms

$fs_{d\ LT}$ (m)	$fs_{i\ LT}$ (m)	$fs_{d\ CNE-S}$ (m): 220 kV	$fs_{i\ CNE-S}$ (m): 220 kV	Evaluación
21,5	24	12,5	12,5	Supera la faja de servidumbre

Tabla F.6. Evaluación de la distancia vertical de seguridad

$h_{min\ LT}$ (m)	$h_{min\ CNE-S}$ (m)	Evaluación
10	8,5	Supera la distancia vertical de seguridad

Tabla F.7. Evaluación del índice de compacidad

IC $_{E_{max-fs}}$	IC $_{B_{max-fs}}$	Evaluación
3.7299	1.3938	La configuración de la línea es compacta

ANEXO G
PROGRAMA DE SIMULACIÓN PARA EL CÁLCULO Y EVALUACIÓN DE LOS
CAMPOS PARA UNA CONFIGURACIÓN TRIANGULAR SIN CABLE DE GUARDA DE
UNA LÍNEA DE 220 kV Y 370 A.

```

% Constantes
permiti_elec=8.85*10^-12;
permeabi_mag=4*pi*10^-7;
% Datos de la linea eléctrica
V=220000/sqrt(3); % Tensión eficaz en voltios
I=370; % Corriente eficaz en amperios
f=60; % Frecuencia de la red eléctrica
% Datos de los conductores
h=22; % Altura mas bajo del conductor en el soporte de la torre
L=400; % Distancia del vano
z=0; % Se calculan los campos máximos a una distancia z (z>=-200 y z<=200)
hf=3; % Altura de separación entre fases
a=1668.66284; % Constante de la catenaria
yd=a*cosh(L/(2*a))-h;
ro=100; % Resistividad del terreno
alfa=sqrt((2*ro)/(pi*f*permeabi_mag)); % Profundidad del conductor imagen
fs=25; % Faja de servidumbre para L.T. de 220 kV
d1=5; % Fase R
d2=-5; % Fase S
d3=5; % Fase T
h1=a*cosh(z/a)-yd+2*hf; % Fase R
h2=a*cosh(z/a)-yd+hf; % Fase S
h3=a*cosh(z/a)-yd; % Fase T
h1i=a*cosh(z/a)-yd+alfa+2*hf; % Fase R imagen
h2i=a*cosh(z/a)-yd+alfa+hf; % Fase S imagen
h3i=a*cosh(z/a)-yd+alfa; % Fase T imagen
ra=27.36/2000; % Radio de los conductores
x=-50:0.5:50; % Resolución de 0.5
n=size(x);
y=1*ones(n);
xt1=ceil(length(x)/2-fs);
xt2=ceil(length(x)/2+fs);
%coordenadas de los conductores
x1r=d1; y1r=h1; % Fase R
x2s=d2; y2s=h2; % Fase S
x3t=d3; y3t=h3; % Fase T
x1rf=d1; y1rf=-h1; % Fase R ficticio CE
x2sf=d2; y2sf=-h2; % Fase S ficticio CE
x3tf=d3; y3tf=-h3; % Fase T ficticio CE
x1ri=d1; y1ri=-h1i; % Fase R imagen CM
x2si=d2; y2si=-h2i; % Fase S imagen CM
x3ti=d3; y3ti=-h3i; % Fase T imagen CM
%calculo de la matriz P para el campo eléctrico
p11=((2*pi*permiti_elec)^-1)*log(2*h1/ra);
p12=((2*pi*permiti_elec)^-1)*0.5*log(((x1r-x2sf)^2+(y1r-y2sf)^2)/((x1r-x2s)^2+(y1r-y2s)^2));
p13=((2*pi*permiti_elec)^-1)*0.5*log(((x1r-x3tf)^2+(y1r-y3tf)^2)/((x1r-x3t)^2+(y1r-y3t)^2));
p21=p12;
p22=((2*pi*permiti_elec)^-1)*log(2*h2/ra);
p23=((2*pi*permiti_elec)^-1)*0.5*log(((x2s-x3tf)^2+(y2s-y3tf)^2)/((x2s-x3t)^2+(y2s-y3t)^2));
p31=p13;
p32=p23;
p33=((2*pi*permiti_elec)^-1)*log(2*h3/ra);
P=[p11 p12 p13; p21 p22 p23; p31 p32 p33];

```

```

t=(0:0.04:1)*(1/f);
m=length(t);
for i=1:length(x)%barrido de perfil
    for j=1:m %tiempo
        v1=V*sqrt(2)*sin(2*pi*f*t(j));
        v2=V*sqrt(2)*sin(2*pi*f*t(j)+2*pi/3);
        v3=V*sqrt(2)*sin(2*pi*f*t(j)-2*pi/3);
        v=[v1; v2; v3];
        lambda=P\|v;
        r1p=sqrt((x(i)-x1r)^2+(y(i)-y1r)^2);
        r2p=sqrt((x(i)-x2s)^2+(y(i)-y2s)^2);
        r3p=sqrt((x(i)-x3t)^2+(y(i)-y3t)^2);
        r1pf=sqrt((x(i)-x1rf)^2+(y(i)-y1rf)^2);
        r2pf=sqrt((x(i)-x2sf)^2+(y(i)-y2sf)^2);
        r3pf=sqrt((x(i)-x3tf)^2+(y(i)-y3tf)^2);
        r1pi=sqrt((x(i)-x1ri)^2+(y(i)-y1ri)^2);
        r2pi=sqrt((x(i)-x2si)^2+(y(i)-y2si)^2);
        r3pi=sqrt((x(i)-x3ti)^2+(y(i)-y3ti)^2);

        E1x=lambda(1)*((2*pi*permiti_elec)^-1)*((x(i)-x1r)/(r1p^2)-(x(i)-x1rf)/(r1pf^2));
        E2x=lambda(2)*((2*pi*permiti_elec)^-1)*((x(i)-x2s)/(r2p^2)-(x(i)-x2sf)/(r2pf^2));
        E3x=lambda(3)*((2*pi*permiti_elec)^-1)*((x(i)-x3t)/(r3p^2)-(x(i)-x3tf)/(r3pf^2));
        Ex=E1x+E2x+E3x;

        E1y=lambda(1)*((2*pi*permiti_elec)^-1)*((y(i)-y1r)/(r1p^2)-(y(i)-y1rf)/(r1pf^2));
        E2y=lambda(2)*((2*pi*permiti_elec)^-1)*((y(i)-y2s)/(r2p^2)-(y(i)-y2sf)/(r2pf^2));
        E3y=lambda(3)*((2*pi*permiti_elec)^-1)*((y(i)-y3t)/(r3p^2)-(y(i)-y3tf)/(r3pf^2));
        Ey=E1y+E2y+E3y;

        E(j)=sqrt((Ex)^2+(Ey)^2); % Resultante

        i1=l*sqrt(2)*sin(2*pi*f*t(j));
        i2=l*sqrt(2)*sin(2*pi*f*t(j)+2*pi/3);
        i3=l*sqrt(2)*sin(2*pi*f*t(j)-2*pi/3);

        B1x=permeabi_mag*i1*((2*pi)^-1)*(-(y(i)-y1r)/(r1p^2)-(y(i)-y1ri)/(r1pi^2));
        B2x=permeabi_mag*i2*((2*pi)^-1)*(-(y(i)-y2s)/(r2p^2)-(y(i)-y2si)/(r2pi^2));
        B3x=permeabi_mag*i3*((2*pi)^-1)*(-(y(i)-y3t)/(r3p^2)-(y(i)-y3ti)/(r3pi^2));
        Bx=B1x+B2x+B3x;

        B1y=permeabi_mag*i1*((2*pi)^-1)*((x(i)-x1r)/(r1p^2)+(x(i)-x1ri)/(r1pi^2));
        B2y=permeabi_mag*i2*((2*pi)^-1)*((x(i)-x2s)/(r2p^2)+(x(i)-x2si)/(r2pi^2));
        B3y=permeabi_mag*i3*((2*pi)^-1)*((x(i)-x3t)/(r3p^2)+(x(i)-x3ti)/(r3pi^2));
        By=B1y+B2y+B3y;

        B(j)=sqrt((Bx)^2+(By)^2); % Resultante
    end
    Erms(i)=max(E)/sqrt(2);
    Brms(i)=max(B)/sqrt(2);
end
disp(['L.T. de ' num2str(V*sqrt(3)/1000) ' kV de una Terna en configuración triangular sin
cable de'])
disp(['guarda calculado a una distancia longitudinal de ' num2str(z) ' m del centro del
vano'])

```

```

disp(' ')
figure(1)
plot(x,Erms/1000);
title(['L.T. de ' num2str(V*sqrt(3)/1000) ' kV sin C.G. en C.T.',...
      'calculado a una distancia de ' num2str(z) ' m del centro del vano'])
xlabel('Distancia transversal, eje X (metros)')
ylabel('Erms (kV/m) calculado a 1m del suelo')
disp(['Erms maximo: ' num2str(max(Erms)/1000) ' kV/m'])
disp(['% E_poblacional_licirp: ' num2str(max(Erms)/10/4.2) ' %'])
disp(['% E_ocupacional_licirp: ' num2str(max(Erms)/10/8.3) ' %'])
disp(['!C: ' num2str(max(Erms)/max([Erms(xt1) Erms(xt2)]))'])
disp(' ')
figure(2)
plot(x,Brms*1000000);
title(['L.T. de ' num2str(V*sqrt(3)/1000) ' kV sin C.G. en C.T.',...
      'calculado a una distancia de ' num2str(z) ' m del centro del vano'])
xlabel('Distancia transversal, eje X (metros)')
ylabel('Brms (uT) calculado a 1m del suelo')
disp(['Brms maximo: ' num2str(max(Brms)*1000000) ' uT'])
disp(['% B_poblacional_licirp: ' num2str(max(Brms)*100000000/83.3) ' %'])
disp(['% B_ocupacional_licirp: ' num2str(max(Brms)*100000000/416.7) ' %'])
disp(['!C: ' num2str(max(Brms)/max([Brms(xt1) Brms(xt2)]))'])

```

ANEXO H
CÁLCULOS ANALÍTICOS PARA LA SOLUCIÓN EXACTA DE LOS CAMPOS
GENERADOS POR LAS LÍNEAS ELÉCTRICAS EMPLEANDO EL MODELO
DE LA CATENARIA.

a) **Calculo del potencial eléctrico en una línea eléctrica aérea de AT en configuración horizontal de un sistema trifásico con un conductor por fase.**

El potencial eléctrico para una distribución de carga lineal uniforme dq , se calcula con la siguiente ecuación:

$$dV_{T1} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{dq}{r} \quad (\text{H.1})$$

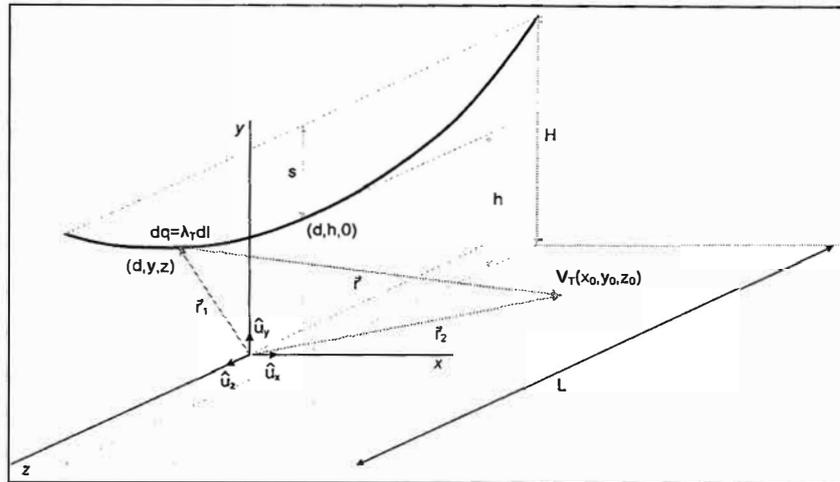


Fig. H.1. Potencial eléctrico creado por un conductor de una línea eléctrica aérea.

donde: \vec{r} es la distancia entre el elemento de dq al punto (x_0, y_0, z_0) , de la fig. H.1:

$$r = |\vec{r}_2 - \vec{r}_1| \quad \text{y} \quad dq = \lambda_r dl \quad (\text{H.2})$$

$$d\vec{l} = dy\hat{u}_y + dz\hat{u}_z = \left(\frac{dy}{dz} dz\hat{u}_y + dz\hat{u}_z \right) = \left(\sinh \frac{z}{a} \hat{u}_y + \hat{u}_z \right) dz \Rightarrow dl = \cosh \frac{z}{a} dz \quad (\text{H.3})$$

$$\vec{r}_1 = d\hat{u}_x + y\hat{u}_y + z\hat{u}_z \quad \text{y} \quad \vec{r}_2 = x_0\hat{u}_x + y_0\hat{u}_y + z_0\hat{u}_z \quad (\text{H.4})$$

$$\vec{r}_2 - \vec{r}_1 = (x_0 - d)\hat{u}_x + (y_0 - y)\hat{u}_y + (z_0 - z)\hat{u}_z \quad \text{y} \quad r = \sqrt{(x_0 - d)^2 + (y_0 - y)^2 + (z_0 - z)^2} \quad (\text{H.5})$$

en (H.1):

$$dV_{T1} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\lambda_r \cosh \frac{z}{a} dz}{\left| (x_0 - d)^2 + \left(a \cosh \frac{z}{a} - (y_0 + y_d) \right)^2 + (z_0 - z)^2 \right|^{1/2}} \quad (\text{H.6})$$

Integrando (H.6) entre $\vec{r}_{1a} = (0, y_T(-L/2), -L/2)$ y $\vec{r}_{1b} = (0, y_T(L/2), L/2)$ de obtiene el potencial eléctrico V_{T1} creado por el conductor T .

$$V_{T1} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{k=-N}^N \int_{-L/2}^{L/2} \frac{\lambda_r \cosh \frac{z}{a}}{\left| (x_0 - d)^2 + \left(a \cosh \frac{z}{a} - (y_0 + y_d) \right)^2 + (z_0 - z + kL)^2 \right|^{1/2}} dz \quad (\text{H.7})$$

El parámetro N en (H.7) representa el número de catenarias adicionales a considerar a la derecha y a la izquierda de la catenaria genérica. Para los cálculos prácticos N por lo general no excede a 4.

Considerando el efecto de la distribución de carga imagen dq' para el conductor T:

$$dV_{T1} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{dq'}{r'} \quad (\text{H.8})$$

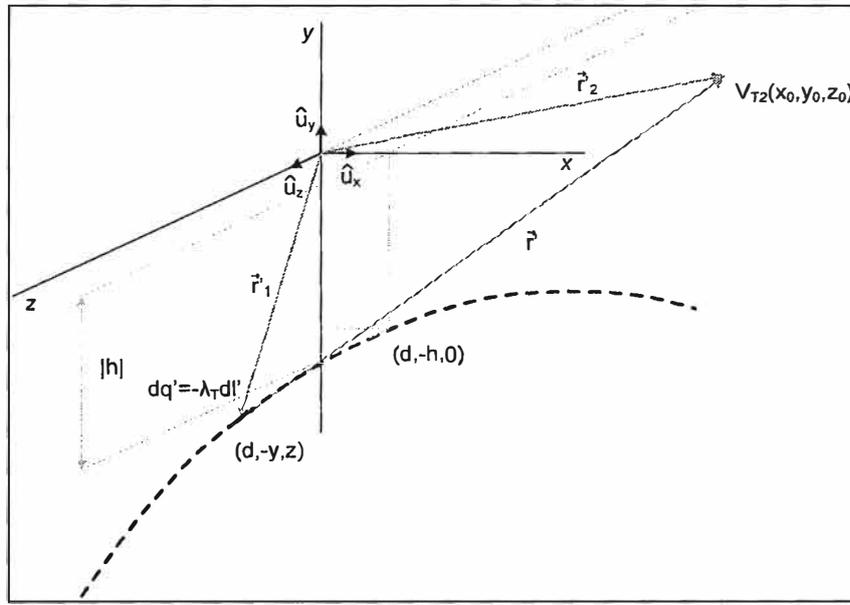


Fig. H.2. Potencial eléctrico creado por un conductor imagen por efecto de la tierra.

$$r' = |\vec{r}'_2 - \vec{r}'_1| \text{ y } dq' = -\lambda_T dl' \quad (\text{H.9})$$

$$d\vec{l}' = -dy\hat{u}_y + dz\hat{u}_z = \left(-\frac{dy}{dz} dz\hat{u}_y + dz\hat{u}_z \right) = \left(-\sinh\frac{z}{a}\hat{u}_y + \hat{u}_z \right) dz \Rightarrow dl' = \cosh\frac{z}{a} dz \quad (\text{H.10})$$

$$\vec{r}'_1 = d\hat{u}_x - y\hat{u}_y + z\hat{u}_z \text{ y } \vec{r}'_2 = x_0\hat{u}_x + y_0\hat{u}_y + z_0\hat{u}_z \quad (\text{H.11})$$

$$\vec{r}'_2 - \vec{r}'_1 = (x_0 - d)\hat{u}_x + (y_0 + y)\hat{u}_y + (z_0 - z)\hat{u}_z, \quad r' = \sqrt{(x_0 - d)^2 + (y_0 + y)^2 + (z_0 - z)^2} \quad (\text{H.12})$$

en (H.8):

$$dV_{T2} = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\lambda_T \cosh\frac{z}{a} dz}{\left[(x_0 - d)^2 + \left(a \cosh\frac{z}{a} + y_0 - y_d \right)^2 + (z_0 - z)^2 \right]^{1/2}} \quad (\text{H.13})$$

Integrando (H.13) entre $\vec{r}_{Ta} = (0, y_T(-L/2), -L/2)$ y $\vec{r}_{Tb} = (0, y_T(L/2), L/2)$ se obtiene el potencial eléctrico imagen V_{T2} creado por el conductor T , ecuación H.14.

El potencial eléctrico V_T para un solo conductor por fase con una distribución de carga uniforme Q_T será: (H.15.)

$$V_{T2} = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{k=-N}^N \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \frac{\lambda_T \cosh \frac{z}{a}}{\left[(x_0 - d)^2 + \left(a \cosh \frac{z}{a} + y_0 - y_d \right)^2 + (z_0 - z + kL)^2 \right]^{1/2}} dz \quad (\text{H.14})$$

$$V_T = V_{T1} + V_{T2} \quad (\text{H.15})$$

$$V_T = \frac{\lambda_T}{4\pi\epsilon_0} \sum_{k=-N}^N \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \left(\frac{\cosh \frac{z}{a}}{r_T} - \frac{\cosh \frac{z}{a}}{r'_T} \right) dz \quad (\text{H.16})$$

donde:

$$r_T = \left[(x_0 - d)^2 + \left(a \cosh \frac{z}{a} - (y_0 + y_d) \right)^2 + (z_0 - z + kL)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{H.17})$$

$$r'_T = \left[(x_0 - d)^2 + \left(a \cosh \frac{z}{a} + y_0 - y_d \right)^2 + (z_0 - z + kL)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{H.18})$$

El potencial eléctrico total será la suma del potencial creado por cada uno de los conductores de la línea eléctrica.

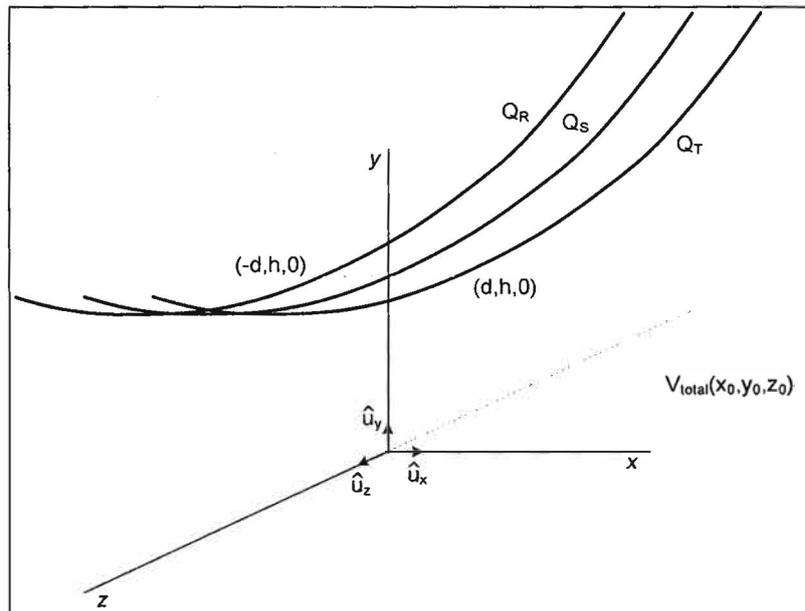


Fig. H.3. Potencial eléctrico total de un sistema trifásico para una línea eléctrica aérea.

$$V_{total} = V_R + V_S + V_T \quad (\text{H.19})$$

$$V_{total} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^3 \sum_{k=-N}^N \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \left(\frac{\lambda_i \cosh \frac{z}{a_i}}{r_i} - \frac{\lambda_i \cosh \frac{z}{a_i}}{r'_i} \right) dz \quad (\text{H.20})$$

Donde:

$$r_i = \left| (x_0 - d_i)^2 + \left(a_i \cosh \frac{z}{a_i} - (y_0 + y_{di}) \right)^2 + (z_0 - z + kL)^2 \right|^{1/2} \quad (\text{H.21})$$

$$r'_i = \left| (x_0 - d_i)^2 + \left(a_i \cosh \frac{z}{a_i} + y_0 - y_{di} \right)^2 + (z_0 - z + kL)^2 \right|^{1/2} \quad (\text{H.22})$$

El subíndice i denota el i -ésimo conductor del sistema trifásico de la línea eléctrica. Se puede asumir tranquilamente que los parámetros i -ésimos de la catenaria de una línea eléctrica son constantes (considerando la rigidez flexional nula y que la tensión horizontal y la longitud en cada tramo de la misma no varíen a pesar de estar sometido a fuerzas).

b) Cálculo del campo eléctrico en una línea eléctrica aérea de AT en configuración horizontal de un sistema trifásico con un conductor por fase.

El campo eléctrico $d\vec{E}_T$ en un punto (x_0, y_0, z_0) debido a una distribución de carga continua dq en un elemento de longitud $d\vec{l}$ de un vano del conductor, se calcula con la Ley de Coulomb.

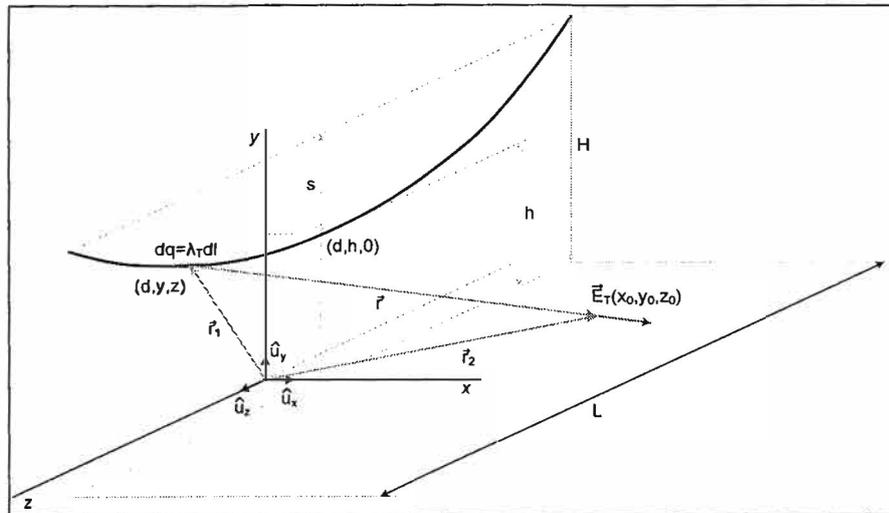


Fig. H.4. Campo eléctrico creado por un conductor de una línea eléctrica aérea.

$$d\vec{E}_{T1} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{dq}{r^2} \hat{r} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{dq(\vec{r}_2 - \vec{r}_1)}{r^3} \quad (\text{H.23})$$

Donde: \vec{r} es la distancia entre el elemento de dq al punto (x_0, y_0, z_0) y \hat{r} es el vector unitario que apunta del dq al punto (x_0, y_0, z_0) , del gráfico:

$$\hat{r} = \frac{(\vec{r}_2 - \vec{r}_1)}{|\vec{r}_2 - \vec{r}_1|}, \quad \vec{r} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1, \quad r = |\vec{r}_2 - \vec{r}_1| \quad \text{y} \quad dq = \lambda_T dl \quad (\text{H.24})$$

$$d\vec{l} = dy\hat{u}_y + dz\hat{u}_z = \left(\frac{dy}{dz} dz\hat{u}_y + dz\hat{u}_z \right) = \left(\sinh \frac{z}{a} \hat{u}_y + \hat{u}_z \right) dz \Rightarrow dl = \cosh \frac{z}{a} dz \quad (\text{H.25})$$

$$\vec{r}_1 = d\hat{u}_x + y\hat{u}_y + z\hat{u}_z, \quad \vec{r}_2 = x_0\hat{u}_x + y_0\hat{u}_y + z_0\hat{u}_z \quad (\text{H.26})$$

$$\vec{r}_2 - \vec{r}_1 = (x_0 - d)\hat{u}_x + (y_0 - y)\hat{u}_y + (z_0 - z)\hat{u}_z, \quad r = \sqrt{(x_0 - d)^2 + (y_0 - y)^2 + (z_0 - z)^2} \quad (\text{H.27})$$

$$\lambda_T dl(\vec{r}_2 - \vec{r}_1) = \lambda_T [(x_0 - d)\hat{u}_x + (y_0 - y)\hat{u}_y + (z_0 - z)\hat{u}_z] \cosh \frac{z}{a} dz \quad (\text{H.28})$$

$$\lambda_T dl(\vec{r}_2 - \vec{r}_1) = \lambda_T \left[(x_0 - d)\hat{u}_x - \left(a \cosh \frac{z}{a} - (y_d + y_0) \right) \hat{u}_y + (z_0 - z)\hat{u}_z \right] \cosh \frac{z}{a} dz \quad (\text{H.29})$$

En (H.23):

$$d\vec{E}_{T1} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\lambda_T \left[(x_0 - d)\hat{u}_x - \left(a \cosh \frac{z}{a} - (y_0 + y_d) \right) \hat{u}_y + (z_0 - z)\hat{u}_z \right] \cosh \frac{z}{a} dz}{\left| (x_0 - d)^2 + \left(a \cosh \frac{z}{a} - (y_0 + y_d) \right)^2 + (z_0 - z)^2 \right|^{3/2}} \quad (\text{H.30})$$

Integrando (H.30) entre $\vec{r}_{T_a} = (0, y_T(-L/2), -L/2)$ y $\vec{r}_{T_b} = (0, y_T(L/2), L/2)$ de obtiene el campo \vec{E}_{T1} creado por el conductor T .

$$\vec{E}_{T1} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{k=-N}^N \int_{-L/2}^{L/2} (\rho_x \hat{u}_x + \rho_y \hat{u}_y + \rho_z \hat{u}_z) dz \quad (\text{H.31})$$

$$\rho_x = \frac{\lambda_T (x_0 - d)}{r_a} \cosh \frac{z}{a} \quad (\text{H.32})$$

$$\rho_y = - \frac{\lambda_T \left(a \cosh \frac{z}{a} - (y_0 + y_d) \right) \cosh \frac{z}{a}}{r_a} \quad (\text{H.33})$$

$$\rho_z = \frac{\lambda_T (z_0 - z + kL) \cosh \frac{z}{a}}{r_a} \quad (\text{H.34})$$

Donde:

$$r_a = \left| (x_0 - d)^2 + \left(a \cosh \frac{z}{a} - (y_0 + y_d) \right)^2 + (z_0 - z + kL)^2 \right|^{3/2} \quad (\text{H.35})$$

El parámetro N en (H.31) representa el número de catenarias adicionales a considerar a la derecha y a la izquierda de la catenaria genérica. Para los cálculos prácticos N por lo general no excede a 4.

Considerando el efecto de la carga imagen para el conductor T :

$$d\vec{E}_{T2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{dq' \hat{r}'}{r'^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{dq' (\vec{r}'_2 - \vec{r}'_1)}{r'^3} \quad (\text{H.36})$$

$$\rho'_y = -\frac{\lambda_T \left(a \cosh \frac{z}{a} + y_0 - y_d \right) \cosh \frac{z}{a}}{r'_a} \quad (\text{H.46})$$

$$\rho'_z = -\frac{\lambda_T (z_0 - z + kL) \cosh \frac{z}{a}}{r'_a} \quad (\text{H.47})$$

Donde

$$r'_a = \left[(x_0 - d)^2 + \left(a \cosh \frac{z}{a} + y_0 - y_d \right)^2 + (z_0 - z + kL)^2 \right]^{3/2} \quad (\text{H.48})$$

El campo eléctrico \vec{E}_T para un solo conductor por fase será:

$$\vec{E}_T = \vec{E}_{T1} + \vec{E}_{T2} \quad (\text{H.49})$$

$$\vec{E}_T = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{k=-N}^N \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} (D_{Tx} \hat{u}_x + D_{Ty} \hat{u}_y + D_{Tz} \hat{u}_z) dz \quad (\text{H.50})$$

$$D_{Tx} = \lambda_T \left(\frac{(x_0 - d)}{r_a} - \frac{(x_0 - d)}{r'_a} \right) \cosh \frac{z}{a} \quad (\text{H.51})$$

$$D_{Ty} = -\lambda_T \left[\frac{\left(a \cosh \frac{z}{a} - (y_0 + y_d) \right)}{r_a} + \frac{\left(a \cosh \frac{z}{a} + y_0 - y_d \right)}{r'_a} \right] \cosh \frac{z}{a} \quad (\text{H.52})$$

$$D_{Tz} = \lambda_T \left(\frac{(z_0 - z + kL)}{r_a} - \frac{(z_0 - z + kL)}{r'_a} \right) \cosh \frac{z}{a} \quad (\text{H.53})$$

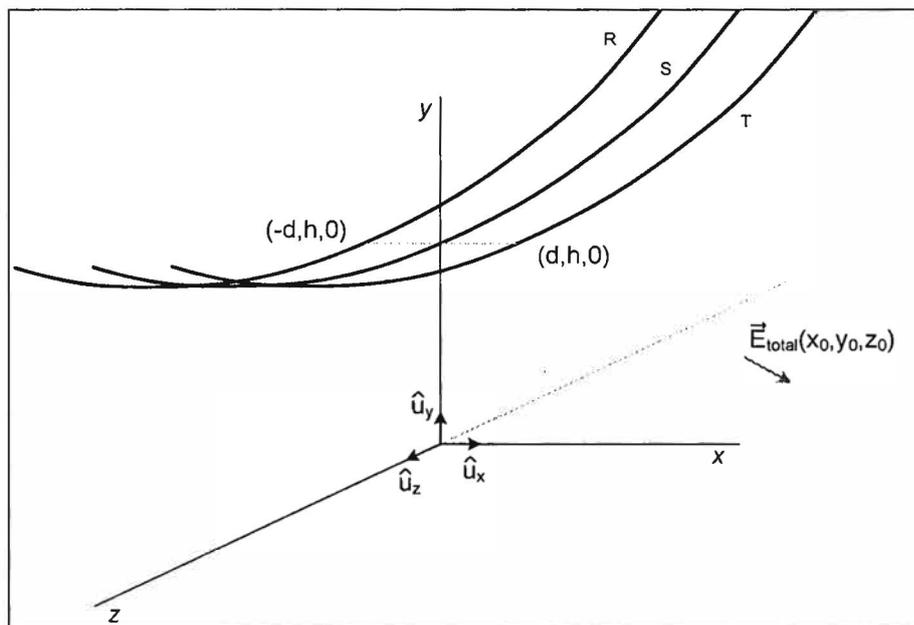


Fig. H.6. Campo eléctrico total de un sistema trifásico para una línea eléctrica aérea.

El campo eléctrico total será la suma de la contribución de campo creado por cada uno de los conductores de la línea eléctrica.

$$\vec{E}_{total} = \vec{E}_R + \vec{E}_S + \vec{E}_T \quad (H.54)$$

$$\vec{E}_{total} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^3 \sum_{k=-N}^N \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} (D_x \hat{u}_x + D_y \hat{u}_y + D_z \hat{u}_z) dz \quad (H.55)$$

$$D_x = \lambda_i \left(\frac{(x_0 - d_i)}{r_{ai}} - \frac{(x_0 - d_i)}{r'_{ai}} \right) \cosh \frac{z}{a_i} \quad (H.56)$$

$$D_y = -\lambda_i \left(\frac{\left(a_i \cosh \frac{z}{a_i} - (y_0 + y_{di}) \right)}{r_{ai}} + \frac{\left(a_i \cosh \frac{z}{a_i} + y_0 - y_{di} \right)}{r'_{ai}} \right) \cosh \frac{z}{a_i} \quad (H.57)$$

$$D_{Tz} = \lambda_i \left(\frac{(z_0 - z + kL)}{r_{ai}} - \frac{(z_0 - z + kL)}{r'_{ai}} \right) \cosh \frac{z}{a_i} \quad (H.58)$$

El subíndice i denota el i -ésimo conductor del sistema trifásico de la línea eléctrica. Se puede asumir tranquilamente que las parámetros i -ésimos de la catenaria de una línea eléctrica son constantes (considerando la rigidez flexional nula y que la tensión horizontal y la longitud en cada tramo de la misma no varíen a pesar de estar sometido a fuerzas).

c) Cálculo del campo magnético en una línea eléctrica aérea de AT en configuración horizontal de un sistema trifásico con un conductor por fase.

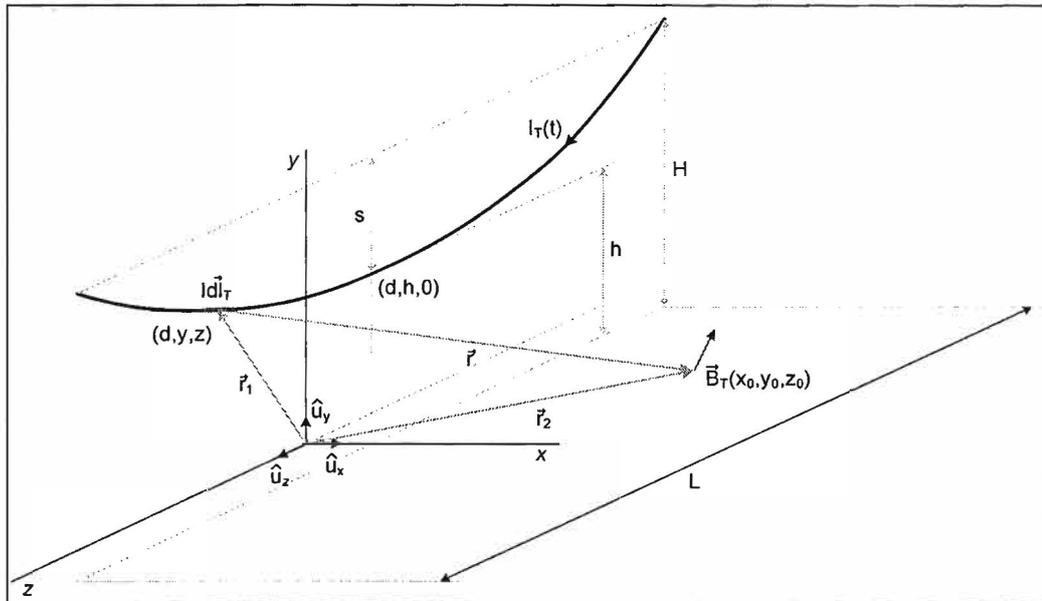


Fig. H.7. Campo magnético creado por un conductor de una línea eléctrica aérea.

El campo magnético $d\vec{B}_T$ en un punto (x_0, y_0, z_0) asociado con un elemento de longitud $d\vec{l}$ de un conductor por el que pasa una corriente estable $I_T(t)$, es

perpendicular tanto a $d\vec{l}$ como al vector unitario \hat{r} , dirigido desde $d\vec{l}$ hasta (x_0, y_0, z_0) y es calculada con la expresión matemática conocida como la Ley de Biot-Savart.

$$d\vec{B}_{r1} = \frac{\mu_0 I_T d\vec{l} \times \hat{r}}{4\pi r^2} = \frac{\mu_0 I_T d\vec{l} \times (\vec{r}_2 - \vec{r}_1)}{4\pi r^3} \quad (\text{H.59})$$

Donde: μ_0 es una constante llamada permeabilidad magnética del vacío ($4\pi \times 10^{-7}$ Tm/A), \vec{r} es el vector posición del punto donde se calcula el campo, y \vec{r}_i es el vector posición de cada punto del conductor.

De la fig. H.7:

$$\hat{r} = \frac{(\vec{r}_2 - \vec{r}_1)}{|\vec{r}_2 - \vec{r}_1|}, \quad \vec{r} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1, \quad r = |\vec{r}_2 - \vec{r}_1| \quad \text{y} \quad \frac{dy}{dz} = \text{senh} \frac{z}{a} \quad (\text{H.60})$$

$$d\vec{l} = dy\hat{u}_y + dz\hat{u}_z = \left(\frac{dy}{dz} dz\hat{u}_y + dz\hat{u}_z \right) = \left(\text{senh} \frac{z}{a} \hat{u}_y + \hat{u}_z \right) dz \quad (\text{H.61})$$

$$\vec{r}_1 = d\hat{u}_x + y\hat{u}_y + z\hat{u}_z, \quad \vec{r}_2 = x_0\hat{u}_x + y_0\hat{u}_y + z_0\hat{u}_z \quad (\text{H.62})$$

$$\vec{r}_2 - \vec{r}_1 = (x_0 - d)\hat{u}_x + (y_0 - y)\hat{u}_y + (z_0 - z)\hat{u}_z, \quad r = \sqrt{(x_0 - d)^2 + (y_0 - y)^2 + (z_0 - z)^2} \quad (\text{H.63})$$

$$d\vec{l} \times (\vec{r}_2 - \vec{r}_1) = \left(\text{senh} \frac{z}{a} \hat{u}_y + \hat{u}_z \right) dz \times \left[(x_0 - d)\hat{u}_x + (y_0 - y)\hat{u}_y + (z_0 - z)\hat{u}_z \right] \quad (\text{H.64})$$

$$d\vec{l} \times (\vec{r}_2 - \vec{r}_1) = \left[\left((z_0 - z)\text{senh} \frac{z}{a} + a \cosh \frac{z}{a} - (y_0 + y_d) \right) \hat{u}_x + (x_0 - d)\hat{u}_y - (x_0 - d)\text{senh} \frac{z}{a} \hat{u}_z \right] dz \quad (\text{H.65})$$

En (7.11):

$$d\vec{B}_{r1} = \frac{\mu_0 I_T}{4\pi} \frac{\left[\left((z_0 - z)\text{senh} \frac{z}{a} + a \cosh \frac{z}{a} - (y_0 + y_d) \right) \hat{u}_x + (x_0 - d)\hat{u}_y - (x_0 - d)\text{senh} \frac{z}{a} \hat{u}_z \right] dz}{\left| (x_0 - d)^2 + \left(a \cosh \frac{z}{a} - (y_0 + y_d) \right)^2 + (z_0 - z)^2 \right|^{3/2}} \quad (\text{H.66})$$

Integrando (H.66) entre $\vec{r}_{ra} = (0, y_T(-L/2), -L/2)$ y $\vec{r}_{rb} = (0, y_T(L/2), L/2)$ de obtiene el campo \vec{B}_{r1} creado por el conductor T .

$$\vec{B}_{r1} = \frac{\mu_0}{4\pi} \sum_{k=-N}^N \int_{\frac{-L}{2}}^{\frac{L}{2}} (j_x \hat{u}_x + j_y \hat{u}_y + j_z \hat{u}_z) dz \quad (\text{H.67})$$

$$j_x = \frac{I_T \left((z_0 - z + kL)\text{senh} \frac{z}{a} + a \cosh \frac{z}{a} - (y_0 + y_d) \right)}{r_a} \quad (\text{H.68})$$

$$j_y = \frac{I_T(x_0 - d)}{r_a} \quad (\text{H.69})$$

$$j_z = \frac{-I_T(x_0 - d)\sinh \frac{z}{a}}{r_a} \quad (\text{H.70})$$

Donde:

$$r_a = \left| (x_0 - d)^2 + \left(a \cosh \frac{z}{a} - (y_0 + y_d) \right)^2 + (z_0 - z + kL)^2 \right|^{3/2} \quad (\text{H.71})$$

El parámetro N en (H.67) representa el número de catenarias adicionales a considerar a la derecha y a la izquierda de la catenaria genérica. Para los cálculos prácticos N por lo general no excede a 4.

Considerando el efecto de las corrientes imagen para el conductor T:

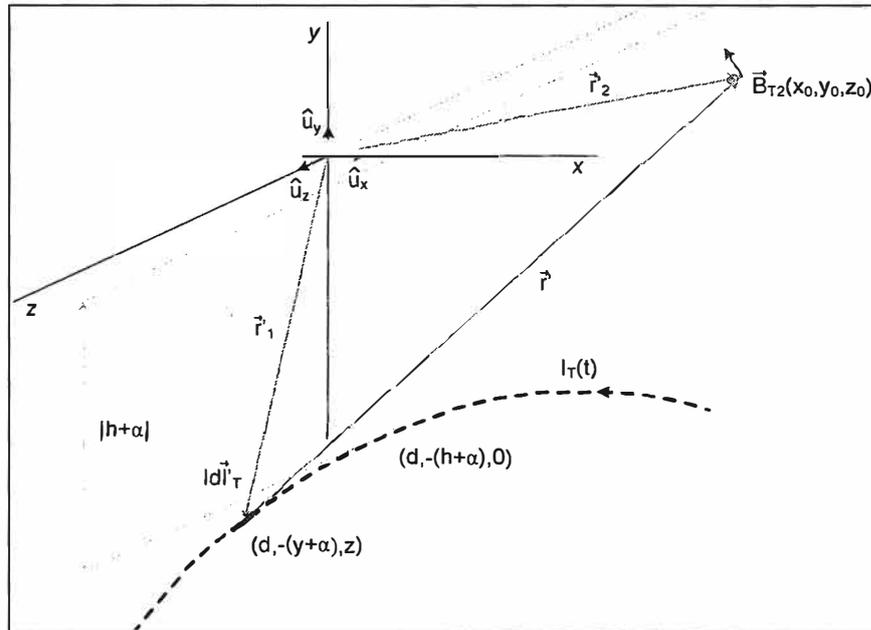


Fig. H.8. Campo magnético creado por un conductor imagen por efecto de la tierra.

$$d\vec{B}_{r_2} = \frac{\mu_0 I_T d\vec{l}' \times (\vec{r}'_2 - \vec{r}'_1)}{4\pi r'^3} \quad (\text{H.72})$$

$$\vec{r}' = \vec{r}'_2 - \vec{r}'_1, \quad r' = |\vec{r}'_2 - \vec{r}'_1| \quad \text{y} \quad \frac{dy}{dz} = \sinh \frac{z}{a} \quad (\text{H.73})$$

De la fig. H.8:

$$d\vec{l}' = -dy\hat{u}_y + dz\hat{u}_z = \left(-\frac{dy}{dz} dz\hat{u}_y + dz\hat{u}_z \right) = \left(-\sinh \frac{z}{a} \hat{u}_y + \hat{u}_z \right) dz \quad (\text{H.74})$$

$$\vec{r}'_1 = d\hat{u}_x - (y + \alpha)\hat{u}_y + z\hat{u}_z, \quad \vec{r}'_2 = x_0\hat{u}_x + y_0\hat{u}_y + z_0\hat{u}_z \quad (\text{H.75})$$

$$\vec{r}'_2 - \vec{r}'_1 = (x_0 - d)\hat{u}_x + (y_0 + y + \alpha)\hat{u}_y + (z_0 - z)\hat{u}_z \quad (\text{H.76})$$

$$r = \sqrt{(x_0 - d)^2 + (y_0 + y + \alpha)^2 + (z_0 - z)^2} \quad (\text{H.77})$$

$$d\vec{l}' \times (\vec{r}_2' - \vec{r}_1') = \left(-\operatorname{senh} \frac{z}{a} \hat{u}_y + \hat{u}_z \right) dz \times \left[(x_0 - d) \hat{u}_x + (y_0 + y + \alpha) \hat{u}_y + (z_0 - z) \hat{u}_z \right] \quad (\text{H.78})$$

$$d\vec{l}' \times (\vec{r}_2' - \vec{r}_1') = \left[- \left((z_0 - z) \operatorname{senh} \frac{z}{a} + a \cosh \frac{z}{a} + (y_0 + \alpha - y_d) \right) \hat{u}_x + (x_0 - d) \hat{u}_y + (x_0 - d) \operatorname{senh} \frac{z}{a} \hat{u}_z \right] dz \quad (\text{H.79})$$

En (1):

$$d\vec{B}_{T2} = \frac{\mu_0 I_T}{4\pi} \frac{\left[- \left((z_0 - z) \operatorname{senh} \frac{z}{a} + a \cosh \frac{z}{a} + (y_0 + \alpha - y_d) \right) \hat{u}_x + (x_0 - d) \hat{u}_y + (x_0 - d) \operatorname{senh} \frac{z}{a} \hat{u}_z \right] dz}{\left| (x_0 - d)^2 + \left(a \cosh \frac{z}{a} + (y_0 + \alpha - y_d) \right)^2 + (z_0 - z)^2 \right|^{3/2}} \quad (\text{H.80})$$

Integrando (H.80) entre $\vec{r}_{T_a} = (0, y_T(-L/2), -L/2)$ y $\vec{r}_{T_b} = (0, y_T(L/2), L/2)$ de obtiene el campo \vec{B}_{T2} creado por el conductor T .

$$\vec{B}_{T2} = \frac{\mu_0}{4\pi} \sum_{k=-N}^N \int_{-L/2}^{L/2} (j'_x \hat{u}_x + j'_y \hat{u}_y + j'_z \hat{u}_z) dz \quad (\text{H.81})$$

$$j'_x = \frac{-I_T \left((z_0 - z + kL) \operatorname{senh} \frac{z}{a} + a \cosh \frac{z}{a} + (y_0 + \alpha - y_d) \right)}{r'_a} \quad (\text{H.82})$$

$$j'_y = \frac{I_T (x_0 - d)}{r'_a} \quad (\text{H.83})$$

$$j'_z = \frac{I_T (x_0 - d) \operatorname{senh} \frac{z}{a}}{r'_a} \quad (\text{H.84})$$

Donde:

$$r'_a = \left| (x_0 - d)^2 + \left(a \cosh \frac{z}{a} + (y_0 + \alpha - y_d) \right)^2 + (z_0 - z + kL)^2 \right|^{3/2} \quad (\text{H.85})$$

El campo magnético \vec{B}_T para un solo conductor por fase con corriente de intensidad I_T será:

$$\vec{B}_T = \vec{B}_{T1} + \vec{B}_{T2} \quad (\text{H.86})$$

$$\vec{B}_T = \frac{\mu_0}{4\pi} \sum_{k=-N}^N \int_{-L/2}^{L/2} (J_{Tx} \hat{u}_x + J_{Ty} \hat{u}_y + J_{Tz} \hat{u}_z) dz \quad (\text{H.87})$$

$$J_{Tx} = \frac{I_T \left((z_0 - z + kL) \sinh \frac{z}{a} + a \cosh \frac{z}{a} - (y_0 + y_d) \right)}{r_a}$$

$$\frac{I_T \left((z_0 - z + kL) \sinh \frac{z}{a} + a \cosh \frac{z}{a} + (y_0 + \alpha - y_d) \right)}{r'_a} \quad (\text{H.88})$$

$$J_{Ty} = \frac{I_T(x_0 - d)}{r_a} + \frac{I_T(x_0 - d)}{r'_a} \quad (\text{H.89})$$

$$J_{Tz} = -\frac{I_T(x_0 - d) \sinh \frac{z}{a}}{r_a} + \frac{I_T(x_0 - d) \sinh \frac{z}{a}}{r'_a} \quad (\text{H.90})$$

El campo magnético total será la suma de la contribución de campo creado por cada uno de los conductores de la línea eléctrica.

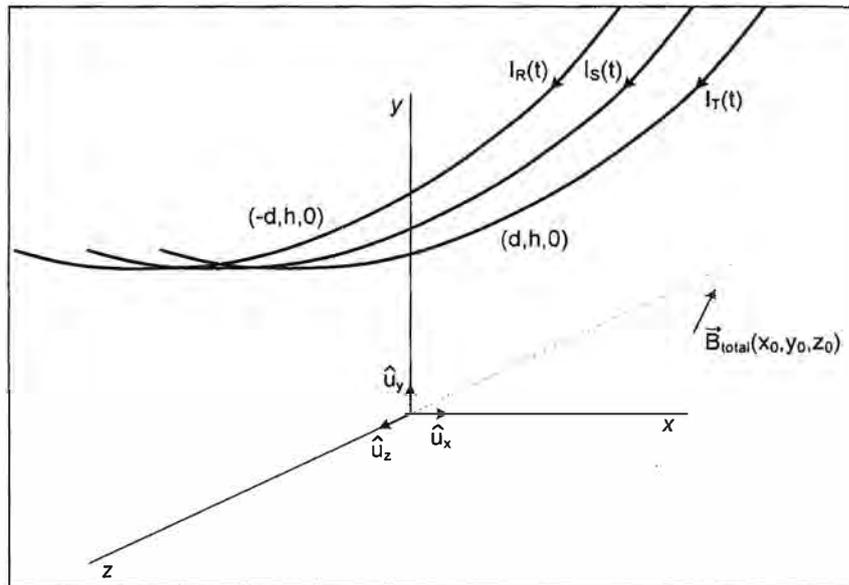


Fig. H.9. Campo magnético total de un sistema trifásico para una línea eléctrica aérea.

$$\vec{B}_{total} = \vec{B}_R + \vec{B}_S + \vec{B}_T \quad (\text{H.91})$$

$$\vec{B}_{total} = \frac{\mu_0}{4\pi} \sum_{i=1}^3 \sum_{k=-N}^N \int_{\frac{-L}{2}}^{\frac{L}{2}} (J_x \hat{u}_x + J_y \hat{u}_y + J_z \hat{u}_z) dz \quad (\text{H.92})$$

$$J_x = \frac{I_i \left((z_0 - z + kL) \sinh \frac{z}{a_i} + a_i \cosh \frac{z}{a_i} - (y_0 + y_{di}) \right)}{r_{ai}}$$

$$\frac{I_i \left((z_0 - z + kL) \sinh \frac{z}{a_i} + a_i \cosh \frac{z}{a_i} + (y_0 + \alpha - y_{di}) \right)}{r'_{ai}} \quad (\text{H.93})$$

$$J_y = \frac{I_i(x_0 - d_i)}{r_{ai}} + \frac{I_i(x_0 - d_i)}{r'_{ai}} \quad (\text{H.94})$$

$$J_z = -\frac{I_i(x_0 - d_i)\sinh \frac{z}{a_i}}{r_{ai}} + \frac{I_i(x_0 - d_i)\sinh \frac{z}{a_i}}{r'_{ai}} \quad (\text{H.95})$$

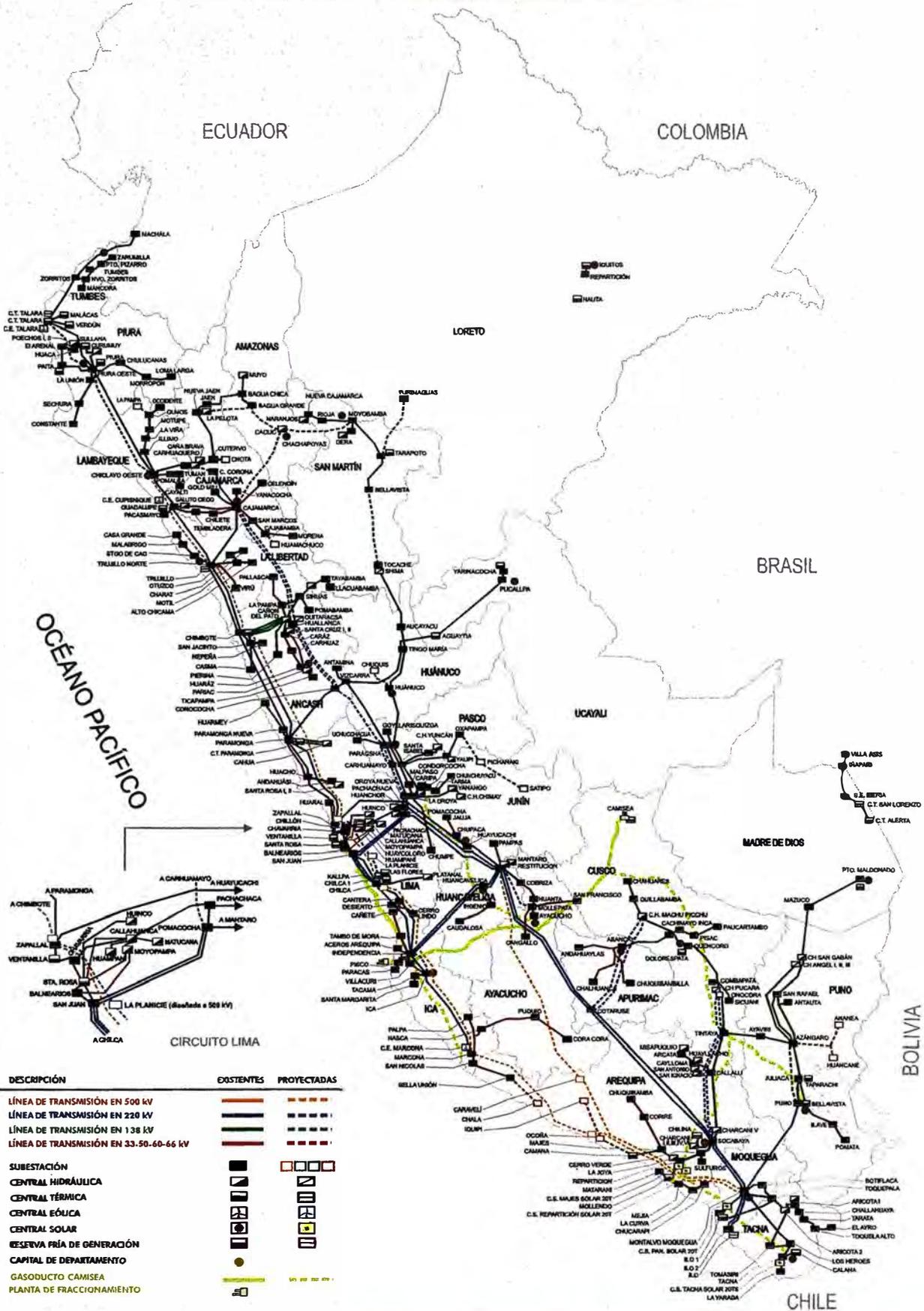
El subíndice i denota el i -ésimo conductor del sistema trifásico de la línea eléctrica. Se puede asumir tranquilamente que los parámetros i -ésimos de la catenaria de una línea eléctrica son constantes (considerando la rigidez flexional nula y que la tensión horizontal y la longitud en cada tramo de la misma no varíen a pesar de estar sometido a fuerzas).

ANEXO I
MAPA DE LAS LÍNEAS DE TRANSMISIÓN ELÉCTRICA DEL PERÚ 2010



PERÚ

Ministerio de Energía y Minas



LÍNEAS DE TRANSMISIÓN ELÉCTRICA 2010

ANEXO J
GLOSARIO DE TÉRMINOS

Absorción. La absorción de los campos electromagnéticos en los tejidos es medida como una Tasa de Absorción Específica (SAR) dentro una masa de tejido dada. La unidad de la SAR es en vatios por kilogramo (W/Kg.) o por milivatio por gramo (mW/g). El SAR es la cantidad utilizada para medir la dosis de los campos de RF aproximadamente entre 1 MHz y 10 GHz.

Absorción específica de energía (SA). La energía absorbida por unidad masa del tejido biológico, expresada en jules por kilogramo (J/kg); la absorción específica de la energía es el integral del tiempo de la tasa específica de absorción de energía.

Alta Tensión. (Abreviatura: A.T.): conjunto de niveles de tensión superior utilizados en los sistemas eléctricos para la transmisión masiva de electricidad.

Carcinógeno. Un agente carcinógeno, o cancerígeno, tanto físico, como químico o biológico, es aquél que puede actuar sobre los tejidos vivos de tal forma que produce cáncer.

Dosimetría. La medida, o la determinación por el cálculo, de la fuerza interna del campo eléctrico o de la densidad de corriente inducida, de la absorción específica de la energía, o de la distribución específica de la tasa de absorción de la energía, en seres humanos o animales expuestos a los campos electromagnéticos.

Efecto adverso para la salud. Un cambio en las funciones fisiológicas o en la estructura de las células que puede provocar enfermedades o problemas de salud.

Efecto biológico. Un efecto biológico, puede o no puede resultar en un efecto adverso para la salud.

Fantoma. Aparato o elemento utilizado para el calibrado de equipos de imagen y que contiene, en su interior, elementos de características similares a los del organismo. Es un modelo del cuerpo humano basado en estándares según ICRU-44.

Melatonina. Es una hormona producida por la glándula pineal que se encuentra en el centro del cerebro. La melatonina regula el ciclo sueño-vigilia y es estimulada por la oscuridad e inhibida por la luz, la exposición a campos ELF podría suprimir la secreción de melatonina. Se ha indicado que la melatonina podría proteger contra el cáncer de mama, de modo que su supresión podría contribuir a una mayor incidencia de esta enfermedad por causa de otros agentes.

Leucemia. Es un grupo de enfermedades malignas de la médula ósea (cáncer hematológico) que provoca un aumento incontrolado de leucocitos en la médula ósea, que suelen pasar a la sangre. La causa de la leucemia se desconoce en la mayoría de los casos. Sin embargo, está demostrado que no es un padecimiento hereditario o contagioso. La mayor parte de las veces se presenta en niños previamente sanos.

El proceso de carcinogénesis se inicia cuando los agentes externos producen

alteraciones irreversibles en la información genética (mutaciones del ADN de las células), convirtiendo genes normales de una persona en los llamados oncogenes, capaces de inducir un cáncer (iniciación tumoral). Posteriormente, determinados factores medio-ambientales hacen que estas células, con información genética ya alterada, se desarrollen y multipliquen (promoción tumoral), y que gradualmente se establezca un cáncer y se disemine (metástasis) (progresión tumoral).

La radiación ultravioleta actúa como iniciadora y promotora del cáncer de piel, por lo que se trata de un carcinógeno completo.

Los carcinógenos completos son sustancias u otros factores capaces de operar por sí mismos en todas las fases de la carcinogénesis (por ejemplo, el tabaco en el cáncer de laringe o de pulmón). Los llamados co-carcinógenos son factores incapaces por sí solos de generar cáncer, pero que sí pueden hacerlo en conjunción con otros factores (por ejemplo, el radón o el asbesto en conjunción con el tabaco en la génesis del cáncer de pulmón). También existen **anticarcinógenos**, que son sustancias que pueden inhibir la carcinogénesis.

Líneas de suministro eléctrico. Aquellos conductores utilizados para transmitir energía eléctrica y sus estructuras de soporte y contención. Las líneas de señales de más de 400 V son siempre líneas de suministro dentro del alcance de las reglas, y aquellas de menos de 400 V pueden ser consideradas líneas de suministro si son totalmente construidas y operadas de esa manera.

Longitud del vano. Distancia horizontal entre dos puntos de enlace del conductor sobre dos soportes consecutivos.

Material dieléctrico. Se denomina dieléctricos a los materiales que no conducen la electricidad, por lo que se pueden utilizar como aislantes eléctricos.

Prolato. Un esferoide prolato es un esferoide en el cual su eje polar es mayor que su diámetro ecuatorial

Radiación. Significa simplemente energía transmitida por ondas. Las ondas eléctricas y magnéticas son ondas de fuerzas eléctricas y magnéticas, cuyo movimiento ondulatorio se define como propagación de perturbaciones en un sistema físico.

Tarifa específica de absorción de energía (SAR). La tasa en la cual la energía se absorbe en tejidos del cuerpo, en vatios por kilogramo (W/kg); El SAR es la medida dosimétrica que se ha adoptado extensamente en las frecuencias cerca de 100 kHz.

Tumor. Masa anormal de tejido que resulta de una división excesiva de las células que es incontrolada y progresiva. Los tumores no desarrollan ninguna función biológica útil. Pueden ser benignos (sin cáncer) o malignos (cáncer).

BIBLIOGRAFÍA

1. ICNIRP. Rudiger Matthes, Alastair F. McKinlay, Jurgen H. Bernhardt, Pablo Vecchia, Bernard Veyret. "Exposure to Static and Low Frequency Electromagnetic Fields, Biological Effects and Health Consequences (0-100 kHz)", 2003.
2. http://www.who.int/peh-emf/publications/elf_ehc/en/index.html. "Extremely Low Frequency Fields", Environmental Health Criteria N° 238, WHO 2007.
3. Wait J. R., Spies K. P., "On the Image representation of the Quasi-Static Fields of a Line Current Source above the Ground", Canadian Journal of Physics, Vol. 47, pp.2731-2733, 1963.
4. Mamishev A. V., Nevels R. D., Russell B. D. "Effects of Conductor Sag on Spatial Distribution of Power Line Magnetic Fields." IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 11, N° 3, pp. 1571-1576, Julio 1996.
5. Latorre J., Soto F., Sancha J.L. "Diseño de Líneas Aéreas Eléctricas en Alta Tensión en Relación con los Campos Eléctricos y Magnéticos". 3^{as} Jornadas Hispano-Lusas de Ingeniería Eléctrica, Barcelona, Julio 1993.
6. <http://www.icnirp.de/documents/emfgdlesp.pdf>. "Recomendaciones para Limitar la Exposición a Campos Eléctricos, Magnéticos y Electromagnéticos (hasta 300 GHz)". ICNIRP.
7. <http://intranet2.minem.gob.pe/web/archivos/dge/publicaciones/compendio/rm037-2006.pdf>. "Código Nacional de Electricidad – Utilización". Ministerio de Energía y Minas, Dirección General de Electricidad, R. M. N° 037-2006-MEM/DM. 2002.07.01.
8. <http://www.osinerg.gob.pe/newweb/uploads/Publico/1.CNE%20SUMINISTRO.pdf>. "Código Nacional de Electricidad – Suministro". Ministerio de Energía y Minas, Dirección General de Electricidad, R. M. N° 366-2001-EM/VME. 2006.07.01.
9. <http://www.bvsde.paho.org/bvsast/e/fulltext/enciclopedia/49.pdf>. Bengt Knave, Michael H. Repacholi. "Radiaciones No Ionizantes - Riesgos Generales. Enciclopedia de Salud y Seguridad en el Trabajo".
10. R. Cech, N. Leitgeb. "Fetal Exposure to Low Frequency Electric and Magnetic Fields". Institute of Clinical Engineering, Gray University of Technology, Austria. Published 17 January 2007.