



**Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Mecánica-Eléctrica**

**ESTUDIO DE RADIACIÓN POR CAMPOS
ELECTROMAGNÉTICOS DENTRO DEL ÁREA DE DERECHO
DE VÍA DE LAS LÍNEAS DE TRANSMISIÓN ELÉCTRICA EN
EL DEPARTAMENTO DE GUATEMALA**

Jenner Eduardo Velásquez Fuentes

Asesorado por: Ing. José Guillermo Bedoya Barrios

Guatemala, septiembre de 2005

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESTUDIO DE RADIACIÓN POR CAMPOS
ELECTROMAGNÉTICOS DENTRO DEL ÁREA DE DERECHO
DE VÍA DE LAS LÍNEAS DE TRANSMISIÓN ELÉCTRICA EN
EL DEPARTAMENTO DE GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

JENNER EDUARDO VELÁSQUEZ FUENTES

ASESORADO POR

EL ING. JOSÉ GUILLERMO BEDOYA BARRIOS

AI CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
INGENIERO ELECTRICISTA

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2005

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
VOCAL I	
VOCAL II	Lic. Amahán Sánchez Álvarez
VOCAL III	Ing. Julio David Galicia Celada
VOCAL IV	Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz
VOCAL V	Br. Elisa Yazminda Vides Leiva
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
EXAMINADOR	Ing. Edgar Florencio Montúfar Urizar
EXAMINADOR	Ing. Saúl Cabezas Durán
EXAMINADOR	Ing. Carlos Francisco Gressi
SECRETARIO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**ESTUDIO DE RADIACIÓN POR CAMPOS
ELECTROMAGNÉTICOS DENTRO DEL ÁREA DE DERECHO DE
VÍA DE LAS LÍNEAS DE TRANSMISIÓN ELÉCTRICA EN EL
DEPARTAMENTO DE GUATEMALA**

tema que me fuera asignado por la dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica- Eléctrica con fecha de 27 de septiembre de 2004.



Jenner Eduardo Velásquez Fuentes

Guatemala, 18 de mayo de 2,005

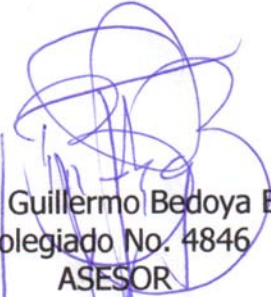
Ing.
Gustavo Benigno Orozco Godinez
Coordinador Área de Potencia
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica (EIME)
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Estimado Ing. Orozco:

De la manera más atenta me dirijo a usted, para informarle que he revisado el trabajo de graduación titulado **ESTUDIO DE RADIACIÓN POR CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS DENTRO DEL ÁREA DE DERECHO DE VÍA DE LAS LINEAS DE TRANSMISIÓN ELÉCTRICA EN EL DEPARTAMENTO DE GUATEMALA**, desarrollado por el estudiante Jenner Eduardo Velásquez Fuentes, con carné 96-15513. Dicho trabajo cumple con los objetivos planteados para su desarrollo. Por lo que doy mi aprobación, solicitándole darle el trámite correspondiente.

Por lo tanto, el autor de este trabajo de graduación y, yo como asesor, nos hacemos responsables por el contenido y conclusiones de la misma.

Atentamente,


Ing. José Guillermo Bedoya Barrios
Colegiado No. 4846
ASESOR



FACULTAD DE INGENIERIA

Guatemala, 22 de agosto de 2005.

Señor Director
Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado: **Estudio de radiación por campos Electromagnéticos dentro del área de derecho de vía de las líneas de transmisión Eléctrica en el Departamento de Guatemala**, desarrollado por el estudiante Jenner Eduardo Velásquez Fuentes, por considerar que cumple con los requisitos establecidos para tal fin.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,

Ing. Gustavo Benigno Crozco Godínez
Revisor de Tesis de Potencia

GBOG/sro



FACULTAD DE INGENIERIA

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante; Jenner Eduardo Velásquez Fuentes titulado: **Estudio de Radiación por campos Electromagnéticos dentro del área de derecho de vía de las líneas de transmisión Eléctrica en el Departamento de Guatemala**, procede a la autorización del mismo.

Ing. Mario Renato Escobedo Martínez

DIRECTOR




GUATEMALA, 13 DE SEPTIEMBRE 2,005.



Ref. DTG. 412-2005.

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Directo de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al trabajo de graduación titulado: **ESTUDIO DE RADIACIÓN POR CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS DENTRO DEL ÁREA DE DERECHO DE VÍA DE LAS LÍNEAS DE TRANSMISIÓN ELÉCTRICA EN EL DEPARTAMENTO DE GUATEMALA**, presentado por el estudiante universitario **Jenner Eduardo Velásquez Fuentes** procede a la autorización para la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.


Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
DECANO

Guatemala, septiembre 29 de 2,005



/gdech

ACTO QUE DEDICO

A:

DIOS

LA VIRGEN MARÍA

MIS PADRES

Eduardo Ramiro Velásquez González
Imelda Luz Fuentes de Velásquez
Por el esfuerzo realizado y el apoyo incondicional que me dieron para poder alcanzar este triunfo.
Especialmente para ellos.

MIS ABUELOS

Victoriano Fuentes (Q.E.P.D.)
Adela Juárez (Q.E.P.D.)
Tomas Velásquez
Agapita González (Q.E.P.D.)
Modesta Mejía (Q.E.P.D.)
Gracias por sus consejos y comprensión.

MIS HERMANOS

Mynor Rodolfo
Mayra Lisbeth
Por su amistad y apoyo incondicional.

MI SOBRINA

Lilian Lisbeth

MI FAMILIA

Tíos, tías, primos y primas
Con mucho cariño.

LA FACULTAD DE INGENIERÍA

AGRADECIMIENTOS

A:

Ing. Edgar Florencio Montúfar Urizar

Por apoyarme en la elaboración de este trabajo.

Ing. José Guillermo Bedoya Barrios

Por asesorarme en la elaboración de este trabajo.

mis compañeros y amigos

Por la amistad que me brindaron.

los catedráticos de la Universidad de San Carlos

Por compartir su conocimiento a través de sus enseñanzas.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN	XV
OBJETIVOS	XVII
INTRODUCCIÓN	XIX

1. RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA Y CAMPOS

ELECTROMAGNÉTICOS	1
1.1. Radiación.....	1
1.1.1. Espectro electromagnético.....	2
1.1.2. Radiación ionizante.....	4
1.1.2.1. Origen.....	4
1.1.2.2. Cantidades y unidades de medición.....	6
1.1.3. Radiación no ionizante.....	10
1.1.3.1. Cantidades y unidades de medición.....	11
1.2. Fuentes de campos electromagnéticos.....	13
1.2.1. Fuentes naturales.....	13
1.2.2. Fuentes artificiales de ELF.....	15
1.2.2.1. Líneas de transmisión.....	15
1.2.2.1.1. Campos en el ambiente.....	21
1.2.2.1.1.1. Campo eléctrico...	21
1.2.2.1.1.2. Campo magnético	27

2.	EXPOSICIÓN A LOS CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS	33
2.1.	Fenómenos físicos.....	33
2.1.1.	Campos eléctricos.....	33
2.1.1.1.	Efectos en el ambiente por el campo eléctrico.....	29
2.1.1.2.	Contacto accidental.....	36
2.1.2.	Campos magnéticos.....	37
2.2.	Efectos biológicos.....	38
2.3.	Estudio de los efectos biológicos.....	40
2.3.1.	Estudios epidemiológicos.....	41
2.3.2.	Estudios de laboratorio.....	45
2.3.2.1.	Estudios a nivel celular.....	45
2.3.2.2.	Estudios en animales.....	47
3.	NORMATIVA RELACIONADA CON LOS NIVELES DE EXPOSICIÓN A CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS	51
3.1.	Criterios generales para limitar la exposición.....	51
3.2.	Establecimiento de criterios para normas.....	52
3.3.	Límites para líneas de transmisión aéreas de alta tensión.....	53
3.3.1.	Comparación con otros sistemas de transmisión.....	53
3.3.1.1.	Campo eléctrico.....	53
3.3.1.2.	Campo magnético.....	56
3.3.2.	Límites generales.....	57
3.3.2.1.	Campo eléctrico.....	58
3.3.2.2.	Campo magnético.....	59

3.4.	Dosis recomendadas por la comisión internacional para la protección contra las radiaciones no ionizantes (ICNIRP).....	60
3.5.	Medidas de protección.....	62
4.	MEDICIÓN DE LOS NIVELES DE EXPOSICIÓN DE LOS CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS	63
4.1.	Equipo de instrumentación para medición.....	63
4.1.1.	Características del equipo utilizado.....	64
4.2.	Selección y obtención de puntos estratégicos para medición.....	65
4.3.	Medición del campo.....	65
4.3.1.	Derecho de vía.....	65
4.3.2.	Medición del perfil en el derecho de vía.....	68
4.4.	Planteamiento del problema.....	69
4.4.1.	Toma de muestras en una línea de transmisión de 230 kV, 138 kV y 69 kV.....	69
4.4.1.1.	Línea Escuintla a Guatemala Sur.....	69
4.4.1.2.	Línea Jurún Marinalá a Guatemala Sur.....	72
4.4.1.3.	Línea Guatemala Sur - Guadalupe 1.....	74
4.4.2.	Detección de posibles molestias para los residentes de las viviendas localizadas en los derechos de vía.....	76
4.5.	Discusión de resultados.....	83
4.5.1.	Escuintla a Guatemala Sur, Jurún Marinalá a Guatemala Sur, Guatemala Sur – Guadalupe 1.....	83
	CONCLUSIONES	85
	RECOMENDACIONES	87
	BIBLIOGRAFÍA	89

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1	Espectro electromagnético.	3
2	Energía de radiación transmitida	13
3	Campo magnético terrestre	14
4	Estructuras de soporte	16
5	Sistema interconectado de líneas de transmisión	19
6	Efecto de la tierra	23
7	Medidor de campo electromagnético de baja frecuencia	64
8	Características del derecho de vía	66
9	Perfil de medición de campos electromagnéticos	68
10	Perfil de campo eléctrico de un sistema de 230 kV	71
11	Perfil de campo magnético de un sistema de 230 kV	71
12	Perfil de campo eléctrico de un sistema de 138 kV	73
13	Perfil de campo magnético de un sistema de 138 kV	74
14	Perfil de campo eléctrico de un sistema de 69 kV	75
15	Perfil de campo magnético de un sistema de 69 kV	76
16	Construcciones ubicadas dentro de los derechos de vía	77
17	Tiempo de vivir de las personas residentes en las viviendas localizadas en el derecho de vía	78
18	¿Cuántas personas residen en la vivienda?	79
19	Posibles cambios de humor sin razón alguna	79

20	¿Cómo describirían su relación con las personas de su comunidad?	80
21	¿Han padecido de mareos?	80
22	¿Acostumbran a tomar algún tipo de tranquilizantes (café, gaseosas)?	81
23	¿Han padecido de dolores de cabeza?	81
24	¿Han tenido que asistir al médico?, ¿por qué razón?	82
25	Dificultad para conciliar el sueño, aún cuando no haya ruido alrededor	82
26	¿Está de acuerdo con el lugar donde vive?	83

TABLAS

I	Factores de calidad para energías de radiación	7
II	Factor de ponderación de tejidos y órganos W_T	8
III	Dosis recomendadas para protección radiológica	9
IV	Estandarización de los niveles de voltajes	18
V	Campos eléctricos presentes en el derecho de vía	26
VI	Campo electromagnético generado por sistemas de 220 y 440 kV	29
VII	Campo eléctrico producido por aparatos electrodomésticos	30
VIII	Campo magnético producido por aparatos electrodomésticos	31
IX	Relación de riesgo en las cercanías de sistemas de 220 y 440 kV	43
X	Efectos a nivel celular observados experimentalmente	41
XI	Distancias de seguridad para prevenir el contacto con los conductores	54
XII	Guías para limitar la exposición al campo eléctrico en el derecho de vía	56
XIII	Guías para limitar la exposición al campo magnético en el derecho	57
XIV	Limitación general para la intensidad de campo eléctrico	58
XV	Limitación general para la intensidad de campo magnético	59
XVI	Restricción básica, recomendación del ICNIRP	61
XVII	Nivel de referencia, recomendación del ICNIRP	61
XVIII	Campo electromagnético bajo una línea de 230 kV	70
XIX	Campo electromagnético bajo una línea de 138 kV	72
XX	Campo electromagnético bajo una línea de 69 kV	74

LISTA DE SÍMBOLOS

α	Partículas de radiación alfa
β	Partículas de radiación beta
γ	Rayos gamma
Q	Factor de calidad de partículas de energía de radiación
T	Unidad de medida de densidad de flujo eléctrico
m	metro longitudinal
σ	Conductividad eléctrica
δ	Profundidad de piel
E	Intensidad de campo eléctrico incidente
h	Altura del conductor de fase
Q	Carga eléctrica del conductor de fase
θ	Ángulo de densidad de flujo magnético
c	Velocidad de la luz
μ_0	Permeabilidad
J	Densidad de corriente inducida
ϵ_0	Permitividad
V_o	Potencial eléctrico
r₁	Distancia de la fuente al punto de exposición
r₂	Distancia de la imagen de la fuente al punto de exposición
z	Altura sobre el nivel del suelo para la medición del campo ELF
λ	Longitud de onda
f	Frecuencia
P_{nm}	Coefficientes de potencial
C_{nm}	Coefficientes de capacidad

I	Corriente eléctrica de la línea de transmisión
B	Densidad de flujo magnético
kV	kilovoltios
a	Radio de la cabeza
A	Ancho del derecho de vía
Q(t)	Carga eléctrica variable
I(t)	Corriente eléctrica variable
ω	Frecuencia eléctrica angular
E₁	Campo eléctrico inducido por un campo eléctrico
E_{ind}	Campo eléctrico inducido por una densidad de flujo magnético
m.s.n.m.	Metros sobre el nivel del mar
%	Porcentaje
H	Intensidad de campo magnético
L	Longitud de la cadena de aisladores
H.S.	Separación horizontal entre conductores
ang	Ángulo de desvío por acción del viento
f_{max}	Flecha máxima del conductor
d	Distancia mínima de acercamiento

GLOSARIO

A/m	Amperios por metro
A/m²	Amperios por metro cuadrado
Aisladores	Materiales que no transportan la carga eléctrica con facilidad, ejemplo de ellos, el vidrio, el caucho y la madera.
Ambiente	Conjunto o sistema de elementos naturales y artificiales de naturaleza física, química, biológica o sociocultural, en constante interacción y en permanente modificación por la acción humana o natural, que rige y condiciona la existencia y desarrollo de la vida en sus múltiples manifestaciones.
Campo	Región del espacio donde ciertos fenómenos ocurren, descrito por un escalar o un vector de cantidad.
CIPR	Comisión Internacional de Protección Radiológica

Cohorte	Conjunto de individuos que han vivido un mismo acontecimiento demográfico en el curso de un mismo período.
Densidad de corriente	Flujo de corriente por unidad de área, una medida de la distribución de corriente dentro de objetos o tejidos del cuerpo, medidos en amperios por metro cuadrado.
Derecho de vía	Franja de terreno que se ubica a lo largo de cada línea aérea, cuyo eje longitudinal coincide con el trazo topográfico de la línea. Su dimensión transversal varía de acuerdo con el tipo de estructuras, con la magnitud y el desplazamiento lateral de la flecha y con la tensión eléctrica de operación.
Endógeno	Que se origina o nace en el interior.
Energía fotónica	Energía de un fotón que es proporcional a la frecuencia de la onda electromagnética $E = hf$.
Flashover	Falla del aislamiento en la superficie del aislador.
Hertz	Unidad de frecuencia para una oscilación periódica, correspondiendo a una oscilación completa por segundo o ciclos por segundo.

ICNIRP	Comisión Internacional de Protección por Radiación No Ionizante
IEEE	Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos
INRC	Comité Internacional para las Radiaciones No Ionizantes
IRPA	Asociación Internacional para la Protección contra la Radiación
Longitud de onda	En una onda completa, representa la distancia entre dos valles o crestas adyacentes.
Nivel de referencia	Son empleadas para evaluar en forma práctica las exposiciones para determinar si es probable que las restricciones básicas sean excedidas.
NRPB	Junta Nacional de Protección Radiológica
NTDOID	Normas Técnicas de Diseño y Operación de las Instalaciones de Distribución
Onda electromagnética	Son generadas por medio de la aceleración de cargas eléctricas.

Restricción básica	Relación con los niveles de exposición a campos eléctricos y magnéticos, variables en el tiempo que están basados directamente en los efectos de la salud de las personas.
Ubicuo	Que está o puede estar al mismo tiempo en todas partes.
UNEP	Programa de Naciones Unidas para el Ambiente
V/m	Voltio por metro

RESUMEN

Las radiaciones electromagnéticas contienen la energía suficiente para producir ionización, mientras los campos electromagnéticos no poseen la energía necesaria para producir el mecanismo de interacción. Las fuentes de campos electromagnéticos constituyen fuentes naturales y artificiales, las de importancia para este trabajo de tesis radica en las segundas, dentro de las cuales encontramos los sistemas de líneas de transmisión construidos por el hombre.

Estos sistemas irradian campos eléctricos y magnéticos, producto de la carga eléctrica, las unidades que caracterizan a estos campos son V/m y A/m respectivamente, pero también suelen emplearse la densidad de corriente en A/m^2 y la densidad de flujo magnético B con unidad en Teslas o Gauss.

En este trabajo se evaluaron los niveles de campo eléctrico y campo magnético en el área de derecho de vía de tres líneas de transmisión, con diferente nivel de voltaje de operación. Después de tomada la muestra de datos, se encontró que en ninguno de los casos los niveles medidos superaron los niveles de referencia, y por ende los niveles de restricción básica, también se presentan los datos proporcionados por los residentes de las viviendas localizadas en el derecho de vía, y que han sido tabulados como representativos de la muestra analizada. Finalizado con las recomendaciones apropiadas para limitar el contacto con los conductores eléctricos de alta tensión.

OBJETIVOS

General

Analizar si existen riesgos para la salud por exposición a los campos electromagnéticos producidos por las líneas de transmisión de potencia eléctrica, en aquellas viviendas que están dentro de la franja de servidumbre.

Específicos

1. Establecer límites de la exposición humana a campos electromagnéticos, basándose en la medición y tolerancia de los diversos aparatos.
2. Establecer recomendaciones referentes a la exposición de campos electromagnéticos.

INTRODUCCIÓN

La radiación electromagnética caracteriza a las ondas de frecuencia alta con longitudes de onda pequeña, mientras los campos electromagnéticos son característicos de las ondas de frecuencia baja y longitud de onda larga. En la actualidad, en el departamento de Guatemala se ha incrementado la demanda de energía eléctrica, junto con ella, la adquisición de tierra que representa un costo muy elevado, esto hace que las familias se establezcan en lugares aledaños a la ruta de diseño para las líneas de transmisión de energía eléctrica.

En estos lugares, muchas veces suelen pasar las líneas de alta tensión usadas para transmisión de energía eléctrica, diseñadas ya hace varios años, diseño que contempla: niveles de tensión, número de circuitos, configuración de las estructuras de soporte y el área de servidumbre (derecho de vía) utilizado para prevenir daños a la población por posibles fallas mecánicas (romperse un conductor eléctrico o bien caerse una estructura de soporte de conductores), y posibles ampliaciones debido a la demanda creciente de energía y potencia eléctrica, siendo áreas de carácter privado y que suelen ser invadidas; de tal manera, es necesario efectuar un estudio con la finalidad de conocer los niveles de campos electromagnéticos presentes en el derecho de vía de las líneas de transmisión.

Se ha considerado también que la investigación desarrollada en este trabajo de tesis, y la importancia del estudio a corto o mediano plazo que puede hacerse, no forma un criterio definitivo, tomando en cuenta que el tema de por sí es muy discutible, ya que el propósito radica en iniciar en nuestro medio el estudio o conocimiento de un problema que involucra a todos.

El uso inmediato obtenible comprende la comparación de los niveles de campos electromagnéticos de 60 Hz permitidos en otros países, con los que existen en el derecho de vía de los sistemas de transmisión del departamento de Guatemala, los cuales han sido determinados por medio de mediciones y el empleo de cálculos que forman parte de la aplicación práctica.

También dependiendo del resultado obtenido, recomendaciones apropiadas podrían ser sugeridas.

1. RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA Y CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS

1.1. Radiación

La radiación es un mecanismo de transferencia del calor (la palabra calor describe la energía que se trasfiere de un lugar a otro). La generación, emisión y absorción de radiación tiene lugar en los átomos. El átomo esta formado en su núcleo por protones y neutrones. Alrededor giran los electrones en diferentes capas u órbitas. El núcleo tiene una carga positiva igual al número de protones que lo forman. Puesto que el átomo en su estado natural es eléctricamente neutro, el número total de electrones debe ser igual al de protones.

La fuerza electrostática entre el núcleo cargado positivamente y sus electrones con carga negativa, se equilibra con la fuerza centrífuga originada por el movimiento giratorio de los electrones que de ese modo se mantienen en sus órbitas alrededor del núcleo.

De acuerdo con lo anterior, la energía necesaria para extraer un electrón de una capa determinada debe ser mayor que la fuerza electrostática de atracción entre éste y su núcleo. Cuando un electrón pasa de una órbita determinada a otra más alejada absorbe energía. Por el contrario en el momento en que un electrón pasa de una órbita con nivel de energía mas alto a otra con menor nivel de energía, más próxima al núcleo, debe perder energía y la emite en forma de radiación electromagnética.

Las radiaciones son ondas electromagnéticas que están formadas por paquetes muy pequeños de energía llamados cuantos o fotones y que tienen diferente frecuencia f y longitud de onda λ . Mientras más corta es la longitud de onda es mas alta la frecuencia y mayor la cantidad de energía contenida en el fotón. Las ondas electromagnéticas de baja frecuencia se denominan campos electromagnéticos y las de muy alta frecuencia radiaciones electromagnéticas.

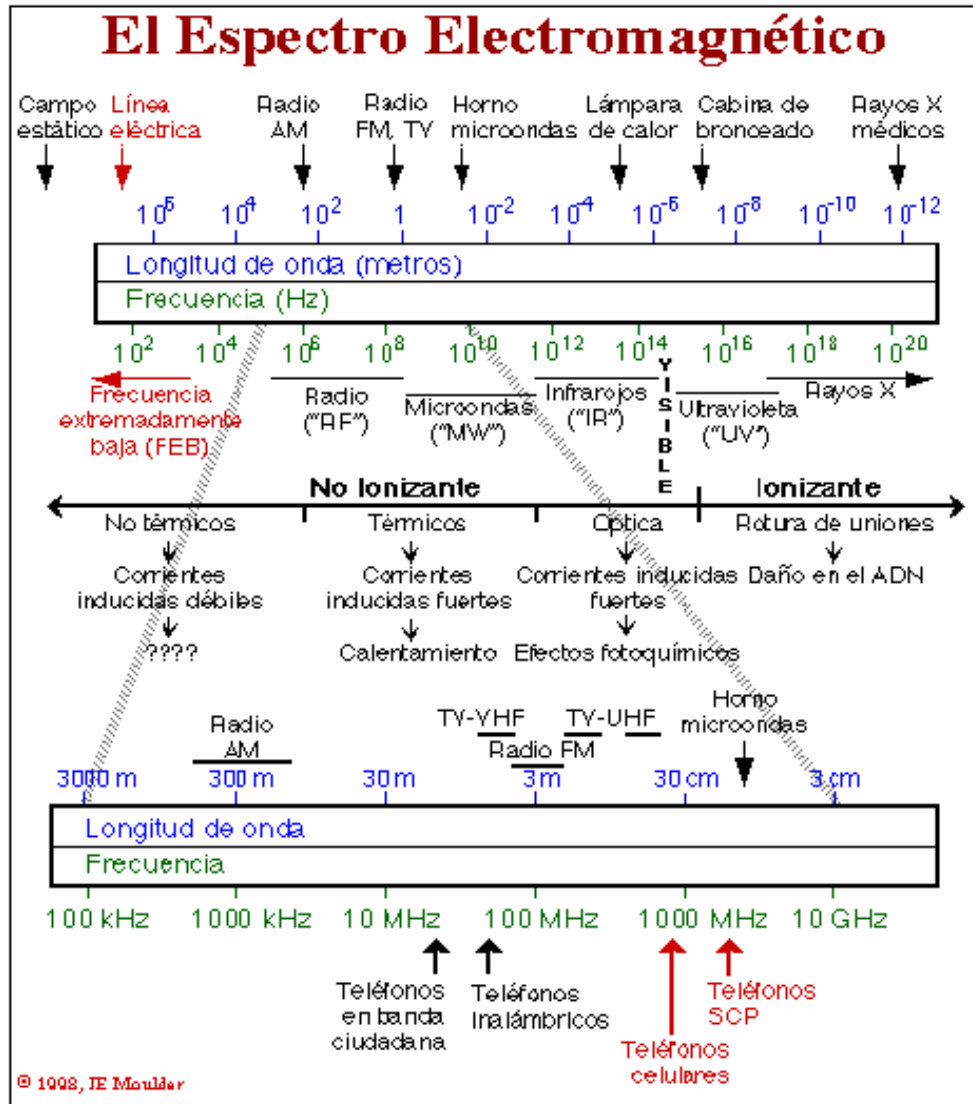
Antes de dar a conocer las dos regiones de radiación mas importantes que existen, es oportuno examinar al Espectro Electromagnético, donde se ubicará la correspondiente radiación electromagnética en la banda de frecuencia de ELF entre 0 a 300 Hz, dentro de cuyo rango se encuentra la frecuencia de operación con la que trabajan las líneas de transmisión aéreas en alta tensión y de interés para la presente investigación.

1.1.1. Espectro electromagnético

El espectro electromagnético como lo presenta la figura 1, lo forma toda la gama de frecuencias, desde las frecuencias extremadamente bajas ELF, hasta las frecuencias extremadamente altas como los rayos X y rayos Gamma. Según la frecuencia y energía de las ondas electromagnéticas, el espectro electromagnético se divide en dos regiones de radiación, las cuales son, la región no ionizante y la región ionizante. La región no ionizante puede subdividirse también de la siguiente manera:

- a. Estática
- b. Cuasiestática
- c. Microondas
- d. Cuasióptica y óptica

Figura 1. Espectro electromagnético



FUENTE: **Las radiaciones y sus características. s.d.e.**

Según la última subdivisión, la frecuencia de 0 Hz (longitud de onda de ∞) correspondiente a la región estática y la frecuencia de 1 GHz (longitud de onda de 30 cm) región de microondas, son los límites dentro de los cuales se localiza las frecuencias extremadamente bajas ELF de 0 a 300 Hz.

1.1.2. Radiación ionizante

La gama de frecuencias que abarca la región ionizante es de 3×10^{15} Hz hasta 10^{27} Hz. Las radiaciones ionizantes son ondas electromagnéticas de frecuencia muy alta que contienen energía fotónica para producir ionización. Cuando esta radiación atraviesa la materia produce partículas eléctricamente cargadas llamadas "iones".

La consecuencia de la colisión entre la radiación ionizante y la materia, en la que existe transferencia de energía suficiente para liberar a un electrón de su átomo, es lo que se conoce como ionización. La ionización es la formación de iones, negativos (electrones liberados) y positivos (átomo sin uno de sus electrones). Esta producción de iones se le conoce con el nombre de pares de iones, y son de igual importancia debido a que los iones pueden iniciar reacciones químicas en los tejidos vivos que conducen a cambios en las células y que pueden persistir durante intervalos de tiempos relativamente cortos o largos.

1.1.2.1. Origen de la radiación ionizante

Las fuentes que dan origen a este tipo de radiación ionizante provienen principalmente del espacio exterior y de isótopos radiactivos que se originan en forma natural. Los rayos cósmicos y la lluvia radioactiva son ejemplos de radiación del espacio exterior, mientras que el material radioactivo natural acumulado en el cuerpo, es el resultado de la inhalación e ingestión de materiales tales como el aire, los alimentos y el agua, en forma de isótopos de Pb (plomo), Po (Polonio), Bi, Ra, K (potasio).

Además, se ha generalizado el empleo de la radiación ionizante de origen artificial. Estas fuentes de radiación son indispensables para la moderna atención de la salud; la aceptación por la sociedad de los riesgos derivados de la radiación se condiciona a los beneficios reportados por su utilización; en la lucha contra enfermedades; los rayos X (en medicina, son empleados para obtener radiografías para el diagnóstico de lesiones internas) y los rayos gamma γ , partículas alfa α , beta β y neutrones son empleados para tratamientos con radioterapias lo cual es un elemento habitual de tratamiento de las enfermedades malignas.

Los rayos X son ondas de radiación electromagnética con longitudes de onda en el rango de 10^{-8} m hasta 10^{-13} m, resultado de la interacción de los electrones (1 electrón = 1.602×10^{-19} C y masa de 9.1095×10^{-31} Kg), acelerados mediante una diferencia de potencial eléctrico en el orden de kV o MV.

Los rayos gamma γ son ondas de radiación electromagnética emitidas por núcleos radioactivos (los núcleos radioactivos emiten este tipo de radiación cuando sufren una transición de un estado de energía más alto a otro más bajo), sus longitudes de onda comprenden el rango de 10^{-10} m a menos de 10^{-14} m, poseen un alto poder de penetración debido a que contienen mayor energía que los rayos X.

Los neutrones son partículas sin carga, que producen ionización indirectamente (al interactuar con los átomos de la materia, originan rayos α , β , γ o X que producen a su vez ionización). Las α están formadas por núcleos de helio (He^{2+}) y las radiaciones β por electrones (e^{-}).

A su vez la radiación de las partículas alfa, la menos penetrante, puede ser detenida por varias de placas de papel común o tela, por lo que no puede penetrar al cuerpo más allá de la capa externa de epidermis. Se requiere de aluminio de por lo menos 0.3 cm de espesor para detener las partículas beta y estas son capaces de penetrar varios milímetros de huesos o tejidos vivos. La radiación gamma es la más penetrante. Para proteger el cuerpo de esta radiación, se requieren gruesas placas de plomo o concreto ya que los rayos gamma pueden atravesar el cuerpo humano en su totalidad. La energía asociada a este tipo de radiaciones se transfiere a cualquier material que se emplee para detener la partícula o absorber la radiación. Esto es importante, porque los daños que provocan las radiaciones se relacionan con la energía absorbida.

1.1.2.2. Cantidades y unidades de medición

Las cantidades dosimétricas empleadas para la medición física y evaluación del efecto potencial de los campos de radiación, compuestos por todos los tipos de radiación y que merecen mayor importancia son las siguientes:

- a. **Exposición:** cuando la radiación ionizante atraviesa la materia produce ionización, el parámetro empleado para cuantificar la cantidad de radiación, es el Roëntgen (R) y la unidad en el Sistema Internacional es el C/Kg. Sin embargo es más habitual usar la magnitud de Dosis.

- b. **Dosis absorbida:** se define como la energía que la unidad de masa de la sustancia absorbe de la radiación a la que esta expuesta. La unidad de medición es el joule por kilogramo, denominado Gray (Gy).

- c. **Dosis equivalente:** es el resultado de multiplicar la dosis absorbida de radiación por el factor de calidad Q. Los factores de calidad Q para diferentes tipos de radiación están dados en la tabla I. Y es empleada para evaluar el daño biológico resultado de la dosis de absorción y tipo de radiación.

Tabla I. Factor de calidad Q para diferentes tipos de energía

Partícula emisora de energía de radiación	Q
Rayos X, rayos gamma y electrones	1.0
Neutrones, protones y partículas alfa	10
Iones pesados	20

- d. **Dosis efectiva:** es el resultado de multiplicar la dosis equivalente recibida en cada órgano y tejido por el factor de ponderación tisular W_T . Los factores de ponderación del tejido están dados en la tabla II. La suma total de esas dosis equivalentes ponderadas en todos los tejidos expuestos de un individuo se denomina dosis efectiva. Y la unidad de medida empleada es el Sievert (Sv).

Otras unidades de medición empleadas son las siguientes:

$$1 \text{ Roentgen} = 0.9 \text{ Rad} = 9.009 \text{ mGray}$$

$$1 \text{ Rad} = 0.01 \text{ Gray} = 1 \text{ Rem}$$

$$1.11 \text{ Roentgen} = 0.01 \text{ Gray}$$

$$1 \text{ Sievert} = 1000 \text{ mSievert} = 100 \text{ Rem}$$

$$1 \text{ mSievert} = 0.1 \text{ Rem} = 0.1 \text{ Rad} = 0.11 \text{ Roentgen}$$

Tabla II. Factor de ponderación de tejidos u órganos W_T

Tejido u órgano	W_T
Gónadas	0.20
Medula ósea	0.12
Colon	0.12
Pulmón	0.12
Estomago	0.12
Vejiga	0.05
Mama	0.05
Esófago	0.05
Tiroides	0.05
Piel	0.01
Superficies óseas	0.01
Resto de tejidos u órganos	0.05

Fuente: **Quantities and units in radiation protection dosimetry**, September 1993, pag. 13

La exposición a pequeñas cantidades de radiación es inevitable, los procedimientos médicos donde se utilizan radioisótopos constituyen un factor importante. El campo de aplicación se limita a la protección de los seres humanos exclusivamente; debido a la exposición ocuriente por trabajadores y el público en general, el límite de dosis publicados por la CIPR se presentan en la tabla III, a manera que la exposición ocupacional y publica, no rebasen los límites seguros:

Tabla III. Dosis recomendadas para protección radiológica

Límite de Dosis	
Exposición Ocupacional	a. Dosis efectiva de 20 mSv por año como promedio en un periodo de cinco años consecutivos
	b. Una dosis efectiva de 50 mSv en cualquier año
	c. Una dosis equivalente al cristalino de 150 mSv en un año
	d. Una dosis equivalente a las extremidades (manos y pies) o la piel de 500 mSv en un año
Exposición al público	a. Una dosis efectiva de 1 mSv en un año
	b. En circunstancias especiales, una dosis efectiva de hasta 5 mSv en un solo año, a condiciones de que la dosis promedio en cinco años consecutivos no exceda de 1 mSv por año
	c. Una dosis equivalente al cristalino de 15 mSv en un año
	d. Una dosis equivalente a la piel de 50 mSv en un año

Nos hemos referido al contexto de las radiaciones ionizantes con el propósito de entender los efectos biológicos y conocer los límites establecidos, debido a la gran cantidad de energía que contienen las ondas de radiación electromagnética, para luego compararla con la energía de radiación no ionizante.

1.1.3. Radiación no ionizante

Son ondas de radiación cuya energía no es lo suficientemente fuerte para alterar la estructura de una molécula o un átomo quitándole uno o más electrones. Abarca el rango de frecuencias de 0 Hz hasta 3×10^{15} Hz como puede verse en la figura 1.

La radiación no ionizante se puede clasificar en dos grupos: la radiación óptica y los campos electromagnéticos.

Entre las radiaciones ópticas se pueden mencionar los rayos láser, los rayos infrarrojos, la luz visible y la radiación ultravioleta. Se ha comprobado que estas radiaciones producen efectos biológicos, por ejemplo: calentamiento, alteración de las reacciones químicas o inducción de corrientes eléctricas en los tejidos y las células.

Dentro de los campos electromagnéticos se pueden distinguir aquellos generados por las líneas de transmisión de alta tensión o por campos eléctricos estáticos, las ondas de radiofrecuencia utilizadas por las estaciones de radio en sus transmisiones, y las microondas utilizadas en electrodomésticos y en el área de las telecomunicaciones.

Así como la luz visible rodea el espacio exterior, también lo hace la energía de los campos electromagnéticos, como se menciono anteriormente son ondas electromagnéticas de baja frecuencia, que viajan en el espacio a la velocidad de la luz c (3×10^8 m/s).

A frecuencias menores de 300 MHz la exposición a la radiación de los campos electromagnéticos de baja frecuencia, tiene significado únicamente cuando se emplea la condición de “campo próximo” ya que la exposición se caracteriza principalmente por campos eléctrico y magnético.

1.1.3.1. Cantidades y unidades de medición

La preocupación concerniente a los efectos biológicos en la salud, como consecuencia de la exposición a la radiación por campos electromagnéticos, hace conveniente conocer las cantidades y unidades de exposición; las unidades comúnmente empleadas son:

- **Intensidad de campo eléctrico** designada con el símbolo E . La unidad de medición es voltio por metro (V/m).
- **Intensidad de campo magnético** designada con el símbolo H . La unidad de medición es el amperio por metro (A/m).

Otra cantidad utilizada es la densidad de flujo magnético B relacionada con H por medio de la constante de permeabilidad del espacio libre μ_0 ($H = \mu_0 \cdot B$). La unidad de medición para B es el tesla (T); pero también se emplea el gauss (G).

$$1 \text{ gauss (G)} = 1 \times 10^{-4} \text{ tesla (T)}$$

La irradiación de las fuentes de campos electromagnéticos también da lugar a corrientes internas en el cuerpo; para lo cual se emplea la siguiente definición:

- **Densidad de corriente** designada con el símbolo J . La unidad de medición es el amperio por metro cuadrado (A/m^2). Y se relaciona con E mediante la siguiente ecuación:

$$J = \sigma \cdot E \quad (1)$$

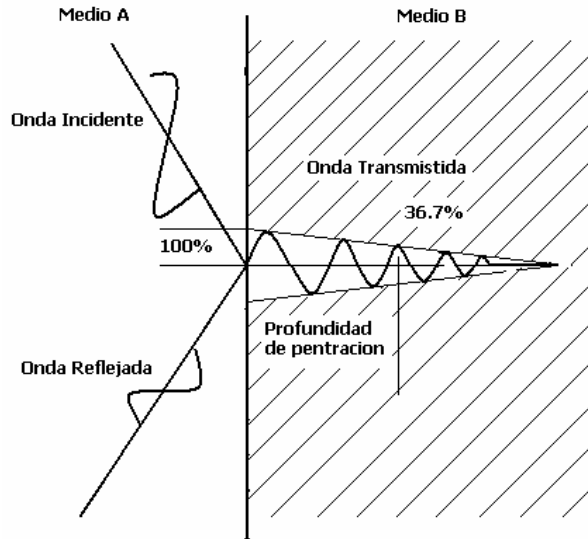
σ es la conductividad eléctrica del medio. La unidad de medición es siemens por metro (S/m).

Los tejidos vivos son conductores eléctricos, y la conductividad de los mismos se encuentra en el rango de 0.01 a 1.5 S/m, a diferencia con otros materiales conductores como el cobre cuya conductividad se encuentra alrededor de 60×10^6 S/m. Cuando la radiación incide sobre cualquier superficie de separación entre dos medios, una parte se refleja y la otra se transmite al otro medio, absorbiéndose en mayor o menor grado durante el proceso, según lo verán en la figura 2. Como consecuencia de la absorción de energía se produce una atenuación de la onda a medida que ésta avanza por el medio material.

Un parámetro utilizado comúnmente para caracterizar la absorción de la radiación es la profundidad de penetración δ . Se define como la distancia en que la amplitud E se reduce en 36.7% a partir de la superficie.

La fracción absorbida, reflejada y transmitida queda determinada por la frecuencia de la radiación junto con algunas características del medio material considerado (conductividad, permitividad, constante dieléctrica, espesor).

Figura 2. Energía de radiación transmitida



1.2. Fuentes campos electromagnéticos

De una manera similar con la radiación ionizante, cuya fuente de origen proviene del espacio exterior y de la naturaleza con los materiales radioactivos, los campos electromagnéticos de frecuencia extremadamente baja abarcan el intervalo de frecuencias por encima de los campos estáticos (>0 Hz) hasta los 300 Hz; cuya fuente de origen radica en la existencia de fuerzas de campo de origen natural que están presentes en el ambiente y las de origen artificial principalmente las que generan las líneas de transmisión en alta tensión.

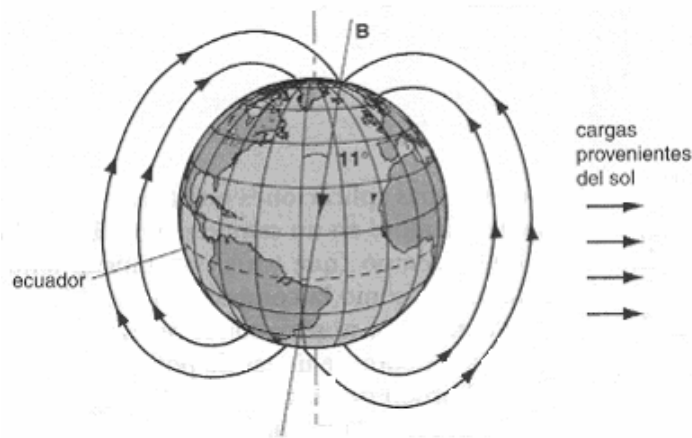
1.2.1. Fuentes naturales

Se ha mencionado que la radiación emitida por fuentes de baja frecuencia es conocida con el nombre de campos electromagnéticos, este campo electromagnético se compone a su vez de un campo eléctrico E y un campo magnético H.

Por otro lado, producto de la evolución planetaria, el planeta tierra se encuentra rodeado de un campo magnético terrestre de $50 \mu\text{T}$ en la latitud de los Estados Unidos y 20% mas fuerte en los polos (polo norte y polo sur), junto con un campo eléctrico estático de más o menos 120 V/m .

Cerca del 90% del campo magnético medido en la superficie terrestre se debe al campo proveniente del interior, el resto es debido a las corrientes producidas por las partículas cargadas del sol y al magnetismo de las rocas de la corteza terrestre. La región donde puede detectarse el campo magnético es conocida con el nombre de magnetosfera (en geología la magnetosfera es utilizada para descubrir diversos tipos de metales). La figura 3 muestra las ondas de campo en la superficie terrestre.

Figura 3. Ondas de campo en la superficie de la tierra



FUENTE: Zoya Popovic / Branco D. Popovic, **Introducción al electromagnetismo**, Pag. 326

Por lo tanto, los seres vivientes han estado sometidos por millones de años a influencias magnéticas de origen natural.

1.2.2. Fuentes artificiales de ELF

1.2.2.1. Líneas de transmisión

En las zonas urbanas del departamento de Guatemala, las líneas de transmisión recorren gran parte de la ciudad. Estos dispositivos operan a 60 Hz, que es la frecuencia de operación utilizada en los sistemas de energía eléctrica de Estados Unidos, Canadá, México y Guatemala. Mientras que en los países de Europa la frecuencia de operación es de 50 Hz.

La energía eléctrica es generada en las centrales de generación (lugar donde se ubican las fuentes de energía primaria que hacen girar las turbinas, que a su vez, hacen girar un alternador, generando así energía eléctrica), y luego es transportada por medio de conexiones de transmisión metálicas (líneas de potencia aéreas) hasta las subestaciones y finalmente a los consumidores de energía.

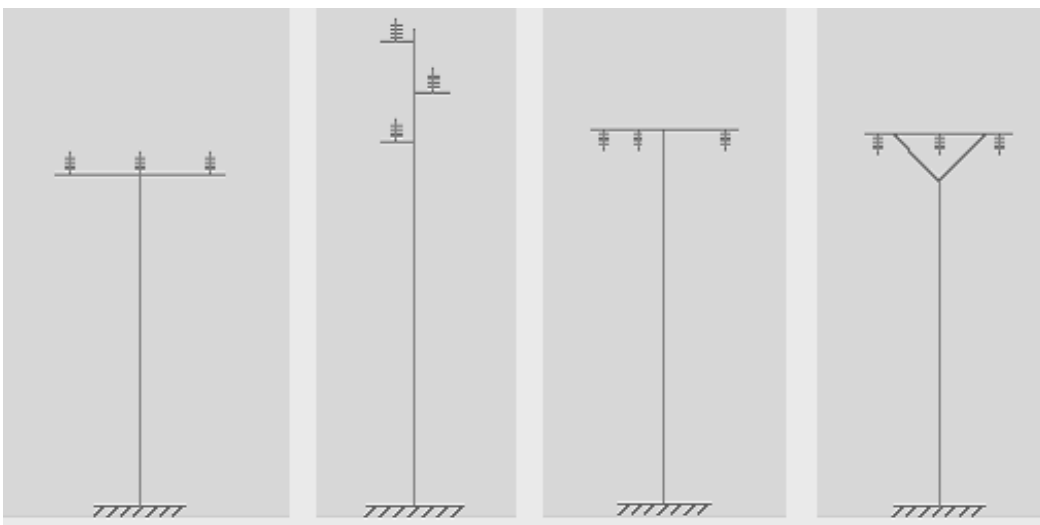
Una línea de transmisión aérea consiste principalmente de estructuras de soporte (torres o postes) de las cuales los conductores eléctricos son suspendidos por medio de un juego de aisladores. Cada juego de aisladores soporta uno o un arreglo de conductores los cuales llevan una fase eléctrica del suministro de potencia. Los conductores de cada fase son suspendidos y separados de los otros conductores y de la torre de transmisión para prevenir el flashover y corto circuitos entre una fase y otra, o entre la fase y tierra (usando como medio de aislamiento el aire).

En las líneas aéreas, los conductores consisten de cables desnudos. Así cualquiera que se acerque a uno de ellos presenta un peligro letal debido a que se rompe la rigidez dieléctrica del aire establecido y un flujo de corriente eléctrica precederá el contacto real con el conductor.

La corriente eléctrica más comúnmente usada por las líneas de transmisión, es la corriente alterna AC trifásica, circuitos trifásicos compuestos por tres conductores o un arreglo de conductores conducen la corriente eléctrica alterna, mientras que uno o dos conductores conectados a tierra localizados en la parte superior a los conductores vivos protegen los circuitos de las descargas atmosféricas. En la figura 4 se muestran las estructuras utilizadas para el soporte de conductores eléctricos.

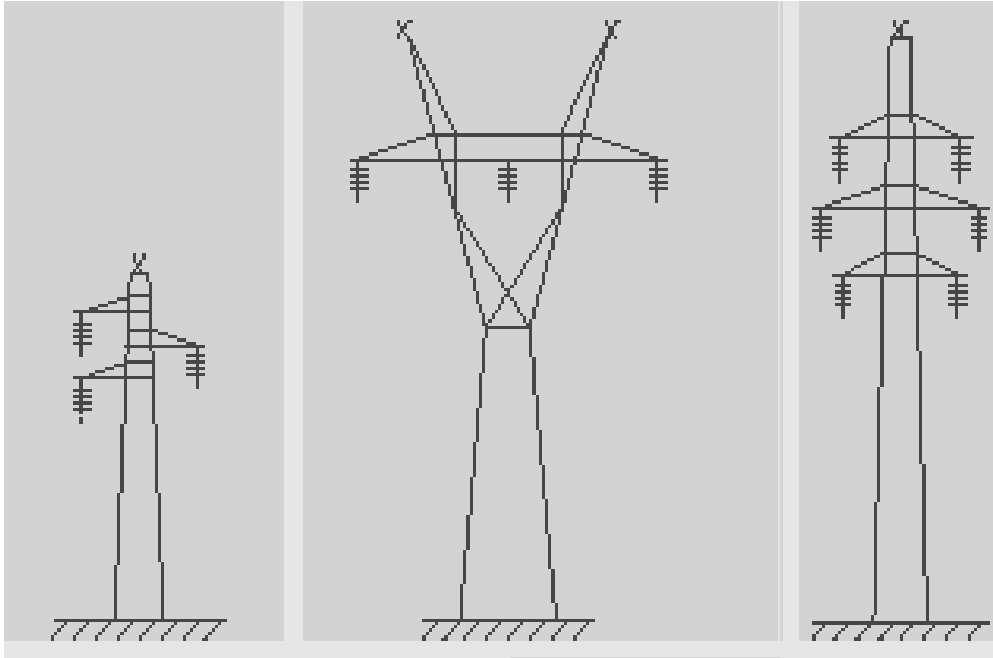
FIGURA 4. a) y b) Estructuras de soporte de conductores eléctricos

a)



Fuente: **Siemens Power Engineering Guide, Transmission & Distribution.** s.d.e.

b)



Fuente: **Siemens Power Engineering Guide, Transmission & Distribution.** s.d.e

Los voltajes normalizados o estandarizados para uso en la transmisión de la energía eléctrica han sido establecidos por el American National Standards Institute (ANSI) en Estados Unidos. Los voltajes normalizados según la norma C84 y C92.2 del ANSI, se muestran en la tabla IV.

Tabla IV. Normalización de los niveles de voltaje, utilizados en las líneas de transmisión (* empleados en nuestro medio)

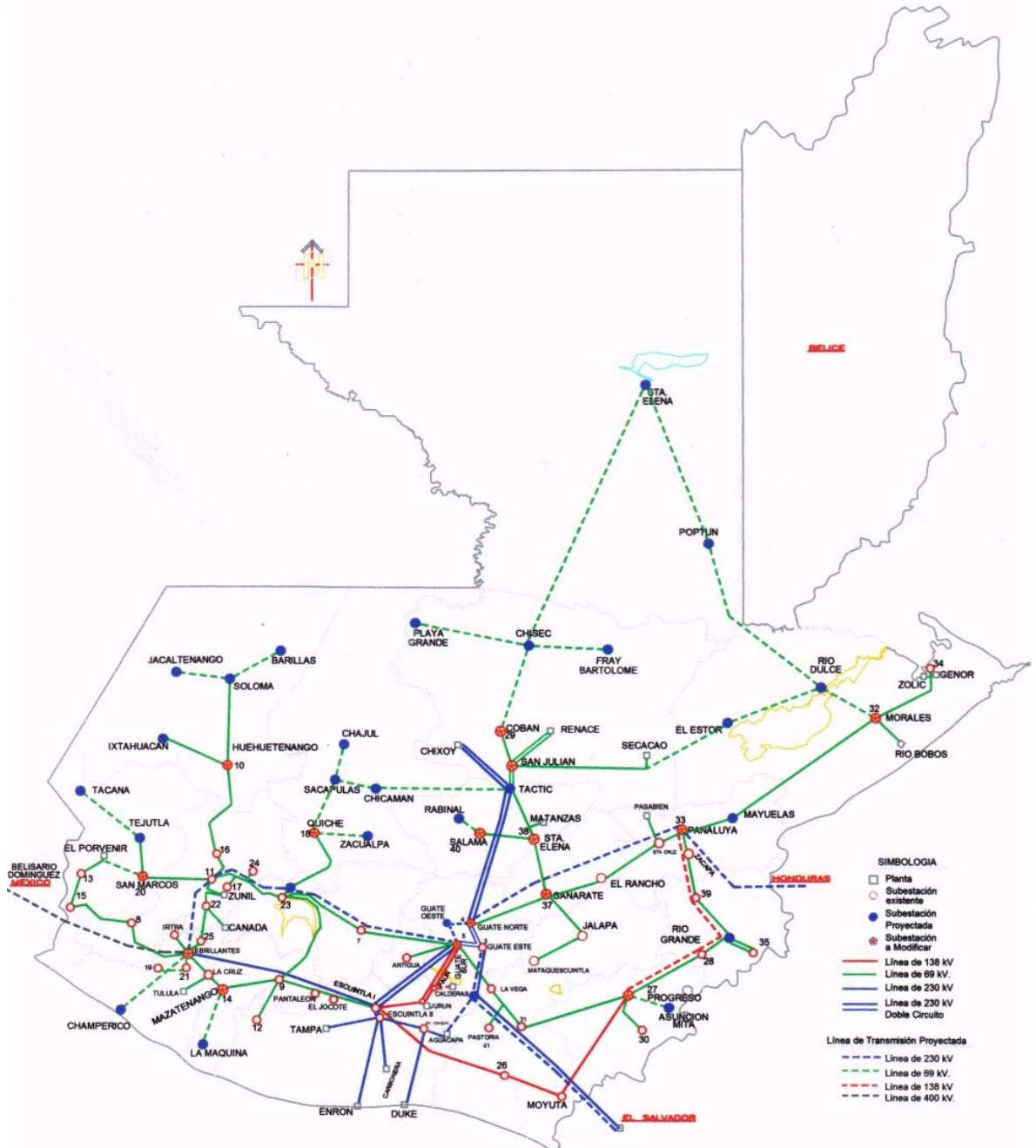
Voltaje normalizado, en kV		
Nominal	Máximo	Clasificación
34.5*	36.5	HV Alto Voltaje
46	48.3	
69*	72.5	
115	121	
138*	145	
161	169	
230*	242	
345	362	EHV Extra Alto Voltaje
500	550	
765	800	
1100	1200	UHV Ultra alto Voltaje

Fuente: **Normas ANSI C84, C92.2**

Se utiliza también la transmisión en 400 kV (EHV), mientras que la transmisión con niveles de 1,100 kV (1,200 kV) normalizado, no se emplea aun como nivel comercial, si bien se han terminado suficientes estudios de investigación y desarrollo que comprueban su factibilidad técnica.

El recorrido de la corriente eléctrica desde la etapa de generación hasta la entrega final (consumidores), se realiza en lo que se denomina sistema interconectado de líneas o sistema de potencia, la figura 5 presenta el sistema de potencia empleado en nuestro medio.

FIGURA 5. Sistema interconectado de líneas de transmisión



FUENTE: Instituto Nacional de Electrificación. s.d.e.

Un sistema de potencia se divide en partes tales como:

- **Sistema de transmisión:** conectan los centros de generación de energía eléctrica con las subestaciones o instalaciones industriales, para realizar esta función se elevan los voltajes por medio del uso de transformadores de potencia, a valores con capacidad de 115, 230 y 500 kV.

- **Sistema de subtransmisión:** este sistema tiene como función alimentar las subestaciones de distribución, desde las subestaciones de transmisión o las estaciones generadoras. Los voltajes de los circuitos de subtransmisión van desde 12 a 245 kV, pero en la actualidad son más comunes los niveles de 69, 115 y 138 kV.

- **Sistema de distribución:** esta parte del sistema de potencia se encuentra entre las subestaciones de distribución y el equipo de entrada de servicio de los consumidores. Por lo general consta de:
 - a) circuitos de subtransmisión con voltajes nominales que suelen estar entre 14.47 y 245 kV, los que entregan la energía a las subestaciones de distribución.

 - b) subestaciones de distribución que llevan la energía hacia un nivel de voltaje más bajo; sistema primario para la distribución local.

 - c) circuitos primarios o alimentadores, que suelen operar en el rango de 4.16 a 34.5 kV

No existe una delimitación clara entre los niveles de voltaje de transmisión, subtransmisión y distribución. En algunos sistemas el nivel de voltaje de 69 kV puede ser un voltaje de subtransmisión mientras que en otros sistemas se le puede llegar a clasificar como de distribución, en realidad esta diferencia radica en el hecho del criterio a emplear.

1.2.2.1. Campos en el ambiente

Las líneas de transmisión en alta tensión (HV), se encuentran en un medio uniforme como el aire y producen dos tipos de campos en el ambiente tal como el campo eléctrico AC y magnético AC, estos dos campos forman lo que se llama campo electromagnético.

1.2.2.1.1. Campo eléctrico

El campo eléctrico E , existe siempre que estén presentes partículas eléctricamente cargadas, la carga de estas puede ser positiva o negativa (protones y electrones) las mismas ejercen fuerzas una sobre la otra. Si dos partículas de carga opuesta están presentes ejercerán una fuerza de atracción. Al contrario si dos partículas de carga de igual signo están presentes la fuerza será de repulsión. El concepto que relaciona la fuerza eléctrica entre partículas es el campo eléctrico.

Otro concepto que se relaciona muy ligadamente al campo eléctrico, es el potencial eléctrico debido a que el potencial eléctrico entre dos puntos esta relacionado con el trabajo físico (fuerza que actúa a través de una distancia), el campo eléctrico hará mover la carga eléctrica entre los dos puntos.

La unidad para el potencial eléctrico es el Voltio (V), pero dado que la diferencia de potencial es definida en términos del trabajo hecho por el campo eléctrico a mover un carga de prueba entre dos puntos, también tiene unidades de trabajo por unidad de carga, esto es, la fuerza por unidad de carga multiplicada por la distancia. Si las unidades para el campo eléctrico son fuerza por unidad de carga, entonces los Voltios = campo eléctrico x distancia (metros). Así un conjunto de unidades apropiadas para medir el campo eléctrico es el voltio por metro (V/m).

La intensidad del campo eléctrico es una medida de la fuerza sobre una carga que está en el campo; la intensidad del campo eléctrico en V/m es igual a la fuerza en Newtons por Coulomb sobre un Coulomb de carga en el punto de interés, tal como:

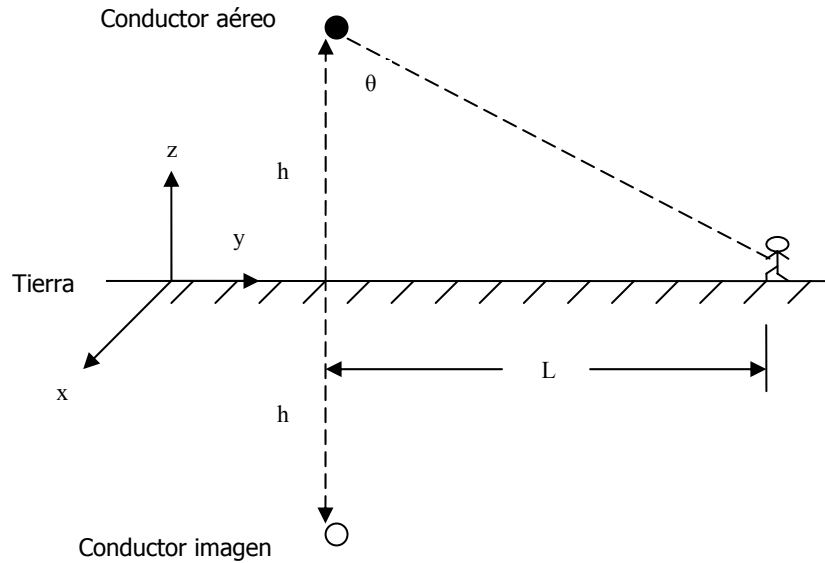
$$E = \frac{q}{2 * \pi * x * k} \quad \text{V/m}$$

x distancia entre el objeto y la fuente de campo eléctrico

k permitividad del medio, en unidades de faradios por metro; su valor en el espacio libre es de $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ F/m.

La intensidad máxima del campo eléctrico E al nivel del suelo, esta relacionada principalmente con la altura de los conductores, la distancia lateral y el voltaje de la misma. El efecto que ejerce la tierra puede representarse por las cargas imagen de los conductores, localizados a una distancia igual (profundidad) a la altura del conductor, vea la figura 6.

Figura 6. Efecto de la tierra (conductor imagen)



El campo eléctrico que rodea la línea de transmisión es función de la carga instantánea de la misma. La carga por lo regular no es conocida, pero si lo es en cambio el voltaje a tierra de los conductores. La carga Q de cada conductor es función del voltaje de todos los conductores, el resultado será una matriz de capacitancias de $n \times n$, en la que n representa el número de conductores, por la siguiente fórmula:

$$[Q] = [C] [V] \quad (2)$$

Aplicando (2) a un sistema trifásico de tres conductores (excluyendo los hilos de guarda), obtenemos la siguiente forma matricial:

$$Q_1 = C_{11}V_1 + C_{12}V_2 + C_{13}V_3 \quad (3)$$

$$Q_2 = C_{12}V_1 + C_{22}V_2 + C_{23}V_3 \quad (4)$$

$$Q_3 = C_{13}V_1 + C_{13}V_2 + C_{33}V_3 \quad (5)$$

Los términos de capacitancia fuera de la diagonal (mutua) afectan de una manera significativa el resultado final. Y los términos individuales de la matriz de capacitancia se calculan de la siguiente manera:

$$C_{nm} = Q_n / V_m \mid \text{ todos los demás voltajes} = 0 \quad (6)$$

n y m son los conductores de las fases.

Sin embargo, cuando existe un conjunto de conductores cargados a distancias no muy grandes entre si, la distribución de carga y el potencial de cada uno depende de todos los otros debido a la redistribución de carga producida por la inducción electrostática. Por lo que no es posible usar la superposición de los potenciales creados por cada conductor individual sino que para analizar esta situación se deben utilizar los llamados coeficientes de potencial.

La matriz de coeficientes de potencial, más adecuada para el cálculo se define por:

$$[V] = [P] [Q] \quad (7)$$

y los términos individuales se calculan por:

$$P_{nm} = \frac{V_m}{Q_m} \quad \text{todas las demás cargas} = 0 \quad (8)$$

La ecuación matricial (7) puede invertirse para poder expresar las cargas de los conductores en función de sus potenciales:

$$[Q] = [P]^{-1} [V] = [C] [V] \quad (9)$$

$$[C] = [P]^{-1} \quad (10)$$

los coeficientes diagonales C_{nn} de la matriz $[C]$ se conocen con el nombre de coeficientes de capacidad y los no diagonales C_{nm} ($n \neq m$) como coeficientes de inducción.

La matriz de coeficientes de potencial, es una matriz de circuito abierto, debido a que los términos individuales pueden ser calculados suponiendo una carga en un conductor y calcular el voltaje en el lugar deseado, a la vez que se supone que todos los demás conductores no existen (circuito abierto).

Ahora bien, un conductor único de radio r y a una altura h sobre el nivel del suelo, crea un potencial con la tierra el cual se describe por medio de la siguiente expresión:

$$V(r) = V_0 [\ln(r_2 / r_1) / \ln(2h / r)] \quad \text{con } r_{1,2} = [(z \pm h)^2 + y^2]^{1/2} \quad (11)$$

r_1 y r_2 son las distancias del conductor y el conductor imagen al punto de interés donde deseamos conocer el potencial eléctrico.

Considerando que la intensidad del campo eléctrico es más importante que el potencial cuando se trata de determinar la seguridad de las instalaciones de alta tensión (HV), la intensidad puede obtenerse a partir del potencial (11), en términos de los ejes normales a la dirección del conductor.

$$E(r)y = \frac{V_0 * y}{\ln(2h/r)} * \left\{ \frac{1}{y^2 + (z-h)^2} - \frac{1}{y^2 + (z+h)^2} \right\} \quad (12)$$

$$E(r)z = \frac{V_0}{\ln(2h/r)} * \left\{ \frac{z-s}{y^2 + (z-h)^2} - \frac{z+s}{y^2 + (z+h)^2} \right\} \quad (13)$$

El campo eléctrico máximo bajo las líneas de transmisión; presente en el derecho de vía se muestra en la tabla V, tomando en consideración que las mediciones deben basarse en el Estándar de Medición IEEE; el cual establece la altura de 3.28 pies sobre el nivel del suelo para dichas mediciones.

Tabla V. Campo eléctrico, dentro del área de derecho de vía para diferente nivel de voltaje

Voltaje Estandar (kV)	Campo eléctrico E (kV/m)
69*	1.0 – 1.5
115	1.0 – 2.0
138*	2.0 – 3.0
161	2.0 – 3.0
230*	2.0 – 3.5
345	4.0 – 6.0
500	5.0 – 9.0
765	8.0 – 13.0

Fuente: Fink Donald/Beaty Wayne. **Manual de Ingeniería Eléctrica**. Tomo I, México: Editorial McGraw Hill, Pág. 14-23.

Merece especial atención las ecuaciones (12) y (13), ya que trata de una valoración bastante confiable para determinar la intensidad del campo eléctrico en cualquier punto del espacio en V/m, que es el término representativo de inducción de la radiación de campos electromagnéticos.

1.2.2.1.2. Campo magnético

La intensidad del campo magnético producido por las líneas de transmisión de energía aéreas, también depende de la carga eléctrica pero a diferencia con el campo eléctrico, el campo magnético depende solamente de las cargas eléctricas en movimiento. La manifestación más común de cargas eléctricas en movimiento constituye la corriente eléctrica, medida en amperios.

El acoplamiento del campo magnético afecta a los objetos que se encuentran paralelos a la línea, localizados a una cierta distancia, tales como las tuberías y los cercados, y por lo general es despreciable para los vehículos y edificios. El acoplamiento de los campos magnéticos es una fuente de bajo voltaje y baja impedancia con corrientes de cortocircuito relativamente altas. La puesta a tierra única no es suficiente para prevenir los voltajes acoplados magnéticamente y se necesita de puesta a tierra múltiple de baja resistencia.

En teoría, la exposición a campos magnéticos grandes de la frecuencia eléctrica, sin contacto con un conductor, puede dar lugar también a choques y quemaduras. Sin embargo, estos peligros requieren fuerzas de campo grandes que las encontradas en el lugar de trabajo o en las viviendas.

Campos magnéticos por encima de 50 mT pueden estimular o excitar los tejidos (músculos y nervios), y por encima de 500 mT pueden causar fibrilación ventricular. En residencias y la mayoría de lugares de trabajo, los campos magnéticos están típicamente debajo de 1 μT (normalmente debajo de 0.5 μT o 0.00001 veces la densidad de flujo requerida para estimular los nervios).

En el cálculo del campo magnético, la suposición de una línea de transmisión en el espacio abierto es muy útil cuando se desea conocer la intensidad del campo magnético a nivel del terreno. Normalmente es adecuado el considerar a los conductores en el espacio abierto sin imágenes, de acuerdo con esto se obtiene la siguiente expresión, para considerar la distancia al punto de interés:

$$B = \frac{\mu * I}{2 \pi r} = \frac{\mu * I}{2 \pi * (h^2 + L^2)^{1/2}} \quad (13)$$

I Corriente eléctrica de la línea de transmisión, en Amperios

μ es la permeabilidad del medio, con unidad de Henry por metro, su valor en el espacio libre es de $4 \pi \times 10^{-7}$ H/m

B representa la densidad de flujo magnético del campo

r distancia del conductor al punto de interés a considerar

h altura del conductor, en metros

L distancia horizontal del conductor hacia el punto a consideración, en metros

Para obtener el campo resultante de un circuito trifásico de tres conductores, las componentes verticales y horizontales de B , eso es $\text{sen}\theta$ y $\text{cos}\theta$, deben de combinarse individualmente como fasores, considerando los ángulos de las diferentes corrientes.

El campo electromagnético radiado por una línea de transmisión de alta tensión (HV) de 600 amperios y 220 kV, así como también para una línea de extra alta tensión (EHV) de 1200 amperios y 400 kV se muestra en la tabla VI; siendo la altura normada para medición de los campos de la frecuencia eléctrica de 3.28 pies (1 metro sobre el nivel del suelo).

Tabla VI. Campos electromagnéticos generados por las líneas de transmisión de alto voltaje (HV)

Y(metros)	Campo eléctrico, V/m		Campo magnético, μT	
	220 kV	440 kV	220 kV	440 kV
10	1,070	2,140	3.56	7.12
20	574	1,148	1.92	3.84
30	280	560	0.94	1.88
40	140	280	0.46	0.92
50	30.8	61.6	0.102	0.204
100	10.8	21.6	0.036	0.072
200	1.4	2.8	0.0046	0.0092
300	0.412	0.824	0.0014	0.0028

Fuente: M. Feychting/A. Ahlbom, **Magnetic fields and cancer in children residing near Swedish high-voltage power lines**, Amer. J. Epidemiol., vol. 138, Pag. 467 – 481, 1993.

Los campos electromagnéticos naturales se distinguen de los artificiales en que los primeros varían muy lentamente, a cambio los segundos, son creados por cargas eléctricas, moviéndose alternativamente a una frecuencia conocida como Hertz.

Por otro lado, el cableado eléctrico de las viviendas y los electrodomésticos transportan electricidad de 60 Hz, los campos eléctrico y magnético estarán presentes oscilando a la misma frecuencia. Si bien la frecuencia se origina de la estación generadora y termina en electrodomésticos de las viviendas, con la diferencia de que los voltajes altos cambian la intensidad de los campos pero no la frecuencia. Las tablas VII y VIII, muestran el campo eléctrico y magnético presentes en las viviendas, por el uso de aparatos eléctricos.

Tabla VII. Campo eléctrico medido a 0.30 m de aparatos electrodomésticos

Electrodoméstico	E (kV/m)
Receptor estereofónico	0.18
Batidora	0.1
Tostadora	0.08
Secador de pelo	0.08
Televisor	0.06
Cafetera eléctrica	0.06
Aspiradora	0.05
Horno eléctrico	0.008
Bombilla	0.005
Valor limite recomendado	5.0

Fuente: **Oficina federal alemana de seguridad radiológica (Bundesamt für Strahlenschutz, BfS), 1999.**

Tabla VIII. Campo magnético medido a 0.3 m de aparatos electrodomésticos

Electrodoméstico	B (uT)
Secador de pelo	0.01 – 7
Máquina de afeitar eléctrica	0.08 – 9
Aspiradora	2.0 – 20.0
Luz fluorescente	0.5 – 2.0
Horno de microondas	4.0 – 8.0
Radio portátil	1.0
Horno eléctrico	0.15 – 0.5
Lavadora	0.15 – 3.0
Computadora	< 0.01
Televisor de color	0.04 – 2.0
En la mayoría de los electrodomésticos, la intensidad del campo magnético a una distancia de 0.3m es considerablemente inferior al límite recomendado para el conjunto de la población de 100 μ T.	

Fuente: **Oficina federal alemana de seguridad radiológica (Bundesamt für Strahlenschutz, BfS), 1999.**

Además, estos aparatos disminuyen su intensidad muy rápidamente, y se han hecho mención con fines de comparación por lo que de ahora en adelante estaremos refiriéndonos a los campos electromagnéticos de las líneas de alta tensión, donde hemos de estudiarlos desde aspectos tales como efectos biológicos, en donde la preocupación principal nos conduce a conocer cual sería el mecanismo de interacción con el ser humano.

2. EXPOSICIÓN A LOS CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS

El posible daño que pueda ocasionar la exposición a la radiación de baja frecuencia (campos electromagnéticos) ha sido objeto de estudio durante los últimos años, con la finalidad de conocer la posible incidencia de éstos sobre los seres vivos, es necesario indicar los fenómenos físicos que se producen en el ser humano, para luego conocer los posibles efectos biológicos que pudieran producirse por exposición a la irradiación.

2.1. Fenómenos físicos

2.1.1. Campos eléctricos

2.1.1.1. Efectos en el ambiente por el campo eléctrico

Los campos eléctricos son ubicuos en la sociedad moderna, al nivel del suelo debajo de una línea de transmisión de 765-kV, la fuerza del campo eléctrico puede alcanzar 12 kV/m. Por debajo de los conductores de las líneas de 525-kV, el campo eléctrico máximo en el plano de la tierra es alrededor de 9 kV/m. Referidos al nivel de medición sobre el suelo de 3.28 pies establecido por IEEE para los campos de la frecuencia eléctrica; sin embargo los campos eléctricos disminuyen su intensidad en proporción al cuadrado de la distancia ($1/d^2$). Los umbrales humanos de percepción de campos eléctricos provenientes de la frecuencia eléctrica (asociado con la vibración del vello de la piel) han sido reportados en el rango de 5 a 20 kV/m.

Las corrientes eléctricas existen naturalmente en el cuerpo humano y son parte esencial en las funciones normales del cuerpo, los nervios transmiten sus señales por impulsos eléctricos y la mayoría de las reacciones bioquímicas, desde las asociadas con la digestión hasta las que abarcan la actividad cerebral incluyen procesos eléctricos.

A bajas frecuencias, los campos electromagnéticos atraviesan el cuerpo humano, mientras que en la banda de radiofrecuencias los campos son absorbidos y penetran una pequeña profundidad en los tejidos. El efecto del campo eléctrico externo E sobre el cuerpo humano, puede aproximarse si se representa el mismo por medio una esfera de radio " a " (la esfera representa la cabeza que es la parte más importante).

Cuando la esfera que representa el cuerpo humano, se expone a un campo eléctrico incidente, que depende del voltaje nominal y la posición del observador; se induce una carga en su superficie, que puede expresarse de la siguiente manera:

$$\sigma = 3\epsilon_0 E \cos\theta \quad (14)$$

donde:

- σ densidad de carga superficial, en unidades de C/m^2 .
- ϵ_0 es la permitividad del aire, en unidades de F/m .
- E campo eléctrico incidente en el aire, en unidades de kV/m .
- θ ángulo medido de la vertical a través del eje z , al centro de la esfera.

Si una carga Q está uniformemente distribuida sobre su superficie de área A , la densidad de carga superficial σ está definida por:

$$\sigma = \frac{Q}{A} \quad (15)$$

Sin embargo esta carga Q es una carga variable en el tiempo $Q(t)$, debido a que E también lo es. Empleando (14) y (15) puede obtenerse la carga total en un hemisferio con $0 \leq \theta \leq \pi/2$ por:

$$Q(\theta) = \int \sigma \cdot A = 3 \pi a^2 \epsilon_0 E \quad (16)$$

Con $Q(\theta, t) = Q(\theta)e^{j\omega t}$ variante en el tiempo habrá una corriente también variante en el tiempo dentro de la esfera, a partir de (16) podemos obtener dicha corriente por medio de $I(t) = dQ(t)/dt$:

$$I(\theta, t) = dQ(\theta, t) / dt = \omega Q(\theta) \quad (17)$$

Empleando la ecuación (1), la densidad de corriente dentro de la esfera es por tanto:

$$J_1 = \sigma \cdot E_1 = \frac{I(\theta, t)}{\pi a^2} \quad (18)$$

así que el campo eléctrico dentro de la esfera no es cero, sino que tiene un valor de raíz cuadrada de la media E , la ecuación (18) será de mucha importancia, ya que nos permitirá calcular el valor de la corriente inducida por la acción de la irradiación del campo eléctrico.

2.1.1.2. Contacto accidental

La corriente de contacto puede ocurrir tanto en residencias como lugares de trabajo cuando una persona toca una superficie conductiva a diferente potencial y completa el camino para el flujo de corriente a través del cuerpo.

La importancia de estas corrientes reside en el hecho de que producen a menudo altas densidades de corrientes en los tejidos cerca del punto del contacto. Típicamente, el camino de la corriente puede ser mano a mano o de una mano para uno o ambos pies. La fuente de contacto puede incluir el chasis de los electrodomésticos, transmitiendo un pequeño potencial sobre un punto de tierra de las viviendas. Otros objetos conductores situados en un campo eléctrico, son los vehículos parqueados bajo las líneas de transmisión y que sirven como fuente de corriente de contacto, ya que son objetos aislados del terreno que se cargan eléctricamente por inducción desde la línea.

El efecto al nivel del suelo se relaciona con la posibilidad de exposición a descargas eléctricas por objetos situados en el campo de la línea. Los peligros inminentes incluyen los choques eléctricos y quemaduras donde la electrocución representa la forma extrema por lesión eléctrica y capaz de matar al ser humano (principalmente por contacto directo con un conductor vivo).

La ICNIRP y otras organizaciones concernientes con la seguridad, han especificado límites para corrientes de contacto o "salida". Los límites actuales para corrientes de contacto para frecuencias menores de 2.5 kHz son 1.0 mA para trabajadores y 0.5 mA para el público en general, y el objetivo es prevenir peligros de sobresaltos y efectos preceptuales adversos, que pudieran tener lugar.

2.1.2. Campos magnéticos

Contrario a la exposición al campo eléctrico, los seres humanos, animales y otros organismos vivos no perturban el campo magnético variante de la frecuencia eléctrica a la cual son expuestos. El campo magnético variante de AC genera un campo eléctrico a través de un proceso conocido como inducción magnética. La inducción, tal como la ley de inducción electromagnética de Faraday, es también el principio mediante el cual un transformador eleva o baja el voltaje. En un transformador, una corriente eléctrica alterna a través de los alambres de una bobina, irradia campos magnéticos y en otra bobina adyacente los alambres captan los campos magnéticos y los convierte de nuevo en corriente alterna.

Si bien los campos magnéticos pueden inducir corrientes eléctricas circulantes en el cuerpo, y que pueden inducir efectos vía algún mecanismo como la corriente producida por el campo eléctrico inducido, producto del campo magnético incidente B .

Los modelos para el campo magnético asumen que el cuerpo posee una conductividad homogénea e isotrópica, y emplea el modelo de lazos conductores y circulares para estimar la corriente inducida en el cuerpo humano, de manera que el campo eléctrico inducido en la cabeza de radio a , puede calcularse mediante la Ley de Inducción de Faraday:

$$\int E_{\text{ind}} \cdot dl = - \frac{\partial \int B \cdot dS}{\partial t}$$

mediante la cual, puede determinarse el campo eléctrico inducido y la densidad de corriente:

$$E_{\text{ind}} = 1 \times 10^{-7} \cdot \pi \cdot a \cdot f \cdot B \quad (19)$$

$$J = \sigma \cdot E_{\text{ind}} \quad (20)$$

donde:

E_{ind} Campo eléctrico inducido por la acción de B , en V/m

B Densidad de flujo magnético, en mG

f frecuencia en Hz

a radio del lazo para la inducción de la corriente

2.2. Efectos biológicos

El ser humano no siempre detecta físicamente la presencia de los campos electromagnéticos (radiación de baja frecuencia), pero independientemente de la percepción, podrían o no existir en nuestro entorno.

Hace ya varios años, instituciones nacionales e internacionales desarrollan investigaciones para conocer cual podría ser el efecto de los campos electromagnéticos sobre la salud. La conclusión acerca de estas investigaciones es que no se han detectado alteraciones significativas a corto plazo en la salud de las personas irradiadas por campos electromagnéticos de intensidades incluso superiores a las que generan las líneas de transmisión de alta tensión.

Otras investigaciones referentes a campos eléctricos de 20 kV/m o campos magnéticos 30 veces más intensos que los que se producen bajo una línea de transmisión de alta tensión, no detectaron variación alguna en la producción de glóbulos rojos y blancos, en plaquetas, hemoglobina, enzimas, etc., en la sangre de las personas expuestas a estos campos electromagnéticos con respecto a los no expuestos.

Sin embargo alguna investigación pudo indicar leves síntomas tales como menor cansancio, más sed, problemas en la audición, en personas que laboran en este tipo de ambientes. Por otro lado estos síntomas no se han podido confirmar en otras investigaciones que se han realizado.

Por las anteriores razones, parece ser que la exposición a la irradiación de estos campos no tiene algún efecto sobre la salud a corto plazo. Se tiene también la interrogante de si la exposición continua a los campos electromagnéticos podría no tener consecuencias negativas a largo plazo para las personas expuestas a ellos de forma habitual.

Lo que se puede consignar en este aspecto, es que las investigaciones realizadas no han probado de forma concluyente que los campos electromagnéticos tengan efectos negativos a largo plazo sobre la salud, la reproducción o el desarrollo de los seres vivos inclusive que sean la causa de una posible enfermedad.

A continuación se describen los efectos biológicos, que han sido objeto de estudio en forma específica por la literatura.

2.3. Estudios de los efectos biológicos

Normalmente la absorción de la radiación, por los tejidos del cuerpo, resulta en un incremento de temperatura. No hace mucho, la generación de calor era considerada como la causa principal de la ocurrencia de daños biológicos, pues se había observado que si se absorbía suficiente energía, se podrían producir quemaduras frecuentemente por un punto caliente local, provocado por disturbios en el campo.

La evaluación de los posibles daños en la salud hace a menudo distinción entre efectos térmicos y no térmicos, esto se refiere al mecanismo del efecto, los efectos térmicos son resultado del calentamiento (tal como el calentamiento con hornos de microondas o luz infrarroja) y los efectos no térmicos son resultado de la interacción directa entre el campo y el organismo (como ocurre en los procesos fotoquímicos que incluye la visión y la fotosíntesis).

La más grande necesidad de hoy en día, en el estudio de los efectos biológicos por exposición a los campos electromagnéticos (radiación de baja frecuencia), es determinar el mecanismo por el cual se produce el daño a las células; considerando que los efectos biológicos son respuestas medibles del organismo o células a un estímulo o cambio en el ambiente.

La investigación del estudio de los efectos biológicos, se ha realizado a partir de tres categorías: los estudios epidemiológicos, estudios animales y estudios celulares. Ya que cualquier efecto adverso en la salud, resulta de un efecto biológico que cause daño detectable en la salud de las personas o en el bienestar de los humanos expuestos.

2.3.1. Estudios epidemiológicos

La epidemiología como ciencia es utilizada para investigar la asociación entre efectos de la salud por exposición a un agente causante de una posible enfermedad. El diseño conducido de estos estudios implica varios pasos que incluyen:

- Identificación de la población a estudiar
- Definir la exposición a ser estudiada (fenómeno que afecta a la comunidad)
- Elección del estudio a conducir (estudio cohorte versus el estudio de control)
- Descripción del periodo sobre la exposición pertinente

Todos estos factores influyen en la calidad del estudio y los límites que se deben de colocar para la interpretación de un estudio encontrado.

Estos estudios han usado varios métodos de medida, para estimar la exposición de la radiación de los campos electromagnéticos y proporcionar la evidencia científica concerniente a la posibilidad de efectos de la salud. También implican a poblaciones humanas expuestas a campos en el trabajo (estudios ocupacionales) o en viviendas (estudios residenciales en niños y en adultos).

La incertidumbre de peligro crece a partir del estudio epidemiológico realizado por Wertheimer y Lepper en 1979, asociando el cáncer de la niñez con las viviendas cercanas a las líneas de transmisión de alta tensión. En el estudio los autores emplearon como medida el código de cables, para clasificar las viviendas como HCC o LCC, (era HCC si se encontraba cerca de 3 o más circuitos primarios o líneas de alto voltaje de 50 a 230 kV), este estudio fue realizado en el periodo de 1950 a 1973. Encontrando que los niños expuestos a un ambiente residencial con configuración HCC presentaban incidencia de 1.6 a 2.2.

La proporción de incidencia de fondo para el cáncer de la niñez (leucemia), entre las edades de 0 a 14 años es aproximadamente de 10 en 100,000 por año. Si la exposición de la niñez con incidencia es cerca de 2, relativo a la proporción de fondo, significa que el riesgo de los niños expuestos a una configuración HCC es del doble con respecto a la relación de fondo o 20 en 100,000 por año.

A partir de estos resultados otras investigaciones han sido realizadas en diferentes países, tendientes a determinar o probar el efecto tras la medida puntual de los campos electromagnéticos, como es el caso de estudio de la incidencia del cáncer en niños quienes habían vivido a 300 metros de líneas de transmisión de 220 y 400 kV en Suecia durante el periodo de tiempo de 1,960 a 1,985. La proporción de riesgo para la ocurrencia de leucemia se muestra en la tabla IX como una función del campo magnético y de la distancia a la línea de transmisión.

Tabla IX. Relación de riesgo en las cercanías de las líneas de transmisión de 220 y 400 kV.

Campo magnético	Proporción de riesgo	Distancia desde la línea	Proporción de riesgo
$\leq 0.09 \mu\text{T}$	1	$\geq 101 \text{ m}$	1
$0.1 \leq 0.19 \mu\text{T}$	4.3	51 – 100 m	1.1
$> 0.2 \mu\text{T}$	3.5	$\leq 50 \text{ m}$	2.9

Fuente: M. Feychting/A. Ahlbom, **Magnetic fields and cancer in children residing near Swedish high-voltage power lines**, Amer. J. Epidemiol., vol. 138, Pag. 467 – 481, 1993.

Es de mencionarse, que una proporción de riesgo para la leucemia entre 3 y 4 resulta cuando B es $\geq 0.2 \mu\text{T}$. De la tabla VI se observa que los campos mayores de $0.2 \mu\text{T}$ suceden a distancias $\leq 50\text{m}$ de la línea de transmisión.

Este estudio indica un riesgo de exposición a largo plazo con la proporción en el orden de tres a cuatro cuando la distancia a la línea es $\leq 50\text{m}$; la tabla VI muestra que para esa distancia los campos serán:

$$B \geq 0.2 \mu\text{T} \text{ y } E \geq 61 \text{ V/m}$$

Recientemente se publicó el resultado de dos meta-análisis (análisis estadístico mediante el cual los resultados son combinados para obtener una respuesta simple) de los estudios publicados con respecto al cáncer de la niñez. En uno de ellos un riesgo levemente elevado de leucemia y tumor cerebral fue encontrado, pero ningún riesgo elevado para los linfomas.

Mientras que en el otro meta-análisis en el que analizaron 12 estudios de cáncer de la niñez, no encontraron ningún riesgo estadísticamente significativo para la leucemia y el linfoma, pero estadísticamente significativo para los tumores del sistema nervioso. A través de todos los estudios, los autores encontraron la adecuada evaluación de la exposición a los campos electromagnéticos como imprecisa. Hasta ahora ninguno de los estudios epidemiológicos proporciona evidencia convincente que vincule la exposición a los campos magnéticos con la leucemia infantil. Los modelos de respuesta empleados para medir la exposición, sugieren una asociación débil entre el incremento de la exposición y el incremento de riesgo. El principal inconveniente que se tiene es el número pequeños de casos que involucran los estudios y que hace imposible firmemente demostrar esta asociación.

Las investigaciones que se han realizado y que muestran una relación entre cáncer y líneas de energía eléctrica no proporcionan ninguna evidencia consistente sobre a que distancia o nivel de exposición esta asociado con un incremento en la incidencia de cáncer. Mientras las investigaciones epidemiológicas de exposición residencial infantil y su relación con el cáncer son demasiadas, algunas se han enfocado en los adultos, el primer estudio de los efectos de la salud y estos, encontró correlaciones débiles para el cáncer.

En los Estados Unidos y otros países han examinado la asociación con el cáncer, la reproducción, los efectos neurofisiológicos en los trabajadores del sector eléctrico y los operadores de radio, por considerar que son ellos los que tendrían un nivel de exposición más alto. Algunos estudios parecen indicar un ligero aumento en la incidencia del cáncer (leucemia y tumores cerebrales), pero los resultados a la fecha son retrospectivos y pueden implicar efectos debido a la confusión, por lo que las investigaciones continúan en varios países.

2.3.2. Estudios de laboratorio

2.3.2.1. Estudios a nivel celular

El campo de acción entre los campos electromagnéticos y la célula tiene lugar en la membrana celular, la membrana celular es responsable de controlar algunas funciones críticas de la célula como el flujo de señales de materia y energía dentro de la misma y transportar la información que llega de la superficie al interior para que los procesos de la vida puedan suceder, también funciona como un filtro pues es la encargada de mantener una concentración no igual de iones en cualquier lado, permitiendo también la entrada de nutrientes al interior de la célula.

Los experimentos relacionados con los campos electromagnéticos a nivel celular se han concentrado en examinar algunos de los procesos específicos gobernados por un cambio en la membrana como resultado de la exposición.

Sin embargo cuando se leen los resultados luego de observar algún efecto a nivel de la célula, la extrapolación de los mismos es muy difícil, debido a que la exposición de los campos electromagnéticos del ambiente es muy compleja, compuesta no solamente por los campos eléctricos y magnéticos de 60 Hz, sino que también por transientes (puntos y cambios intermitentes de la frecuencia del campo) y armónicos (múltiplos de la frecuencia de 60 Hz: 120, 180, 240, etc.).

En virtud de lo anterior, la tabla X, muestra el resultado de algunos efectos observados a nivel celular, durante la exposición a los campos electromagnéticos.

Tabla X. Efectos observados a nivel celular por exposición a los campos electromagnéticos de ELF

Experimento	Efecto notado	Posible significado
Flujo calcio de la membrana celular (6 experimentos)	El flujo cambio dramáticamente. El cambio ocurre solamente en algunos valores de la frecuencia y de la intensidad, pero no en otros. (Efecto ventana)	Significado no claro. Pero señala la posibilidad que el efecto de los campos no pueden ser semejantes "intensidades de campo grandes son peores que intensidades más bajas"
Daño cromosomal	No se detecto daño cromosomal.	No causa el daño que usualmente inicia el cáncer.
Índice de la síntesis del DNA	Índice del cambio del flujo magnético.	Campos magnéticos extremadamente bajos de AC tan pequeños como el campo natural de DC de la tierra pueden afectar el índice de procesos de la célula.
Traducción del RNA	Proteínas nuevas hechas por la célula. Índice de la transcripción alterado.	Los campos pueden alterar el ritmo de los procesos primarios de la célula.
Modificaciones en la Respuesta de la Célula: Respuesta :		
A. Hormonas	Modificaciones en el tejido del hueso y suprarrenal y respuesta conectiva de la célula.	Significado no claro. La respuesta suprarrenal muestra ventanas de intensidad. Los experimentos en los tejidos del hueso señalan la membrana como sitio de acción.
B. Neurotransmisores	Desplazamientos de fase en la periodicidad de los ritmos de secreción.	Si es verdad en seres humanos, puede haber implicaciones para desórdenes psicológicos, por ejemplo la depresión crónica.
C. Sistema inmune	No hay efectos claros significativos excepto casos especiales.	Implicaciones no claras.

Fuente: U.S. Congress, Office of Technology Assessment, **Biological effects of power frequency electric fields and magnetic fields**, Washington, D.C: U.S. Government Printing, May 1989, Page: 34

En cuanto a la posible relación con el cáncer y la mutagénesis, hay que decir que no se conocen estudios en los que se haya demostrado que los campos electromagnéticos ELF de 50/60 Hz que provoquen malformaciones o aumenten la incidencia del cáncer.

2.3.2.2. Estudios en animales

Si bien los estudios a nivel celular (in vitro) han buscado los mecanismos de acción de los efectos biológicos de los campos ELF, los estudios en animales (in vivo) buscan examinar los efectos sistemáticos de los mismos, para ello han utilizado animales de laboratorio tales como ratones, cerdos, etc., para el estudio del comportamiento, detección campos, niveles hormonales y el sistema nervioso central, efectos sobre la reproducción, crecimiento y desarrollo e incidencia del cáncer.

Estos estudios se han llevado a cabo bajo una gama de intensidades de campos eléctricos y magnéticos así como también en una variada duración y condiciones de exposición. Los experimentos efectuados por algunos investigadores han establecido los resultados siguientes:

Para un campo eléctrico en el orden de 4 - 10 kV/m, las ratas han percibido el campo eléctrico, mientras intentan evitar los campos de 100 kV/m, sin embargo los resultados no indican que los mismos tengan un poder carcinogénico o producción de otros efectos tóxicos.

Mientras en otro estudio una gran cantidad de ratones fueron expuestos a los campos de 60 Hz (de 1 mT y 50 kV/m), por tres generaciones. Los resultados obtenidos no encontraron ningún aumento en la tarifa de mutación (no indica ningún cambio potencial genotóxico), ninguno en la reducción de vida, ningún aumento en la mortalidad de cáncer.

Las publicaciones de estudios dirigidos a evaluar la capacidad de actuar como promotores tumorales en modelos animales de inducción de cáncer de piel, mama, hígado y algunos linfomas. Alguno de estos estudios presentaba resultados con una relación positiva entre campos de 50 - 100 μ T e incidencia de cáncer de mama en animales tratados previamente con un agente químico capaz de iniciar el proceso carcinogénico. Así también, estudios realizados en huevos de ave mostraban alteraciones en la fertilidad, tamaño de las crías, supervivencia, proporción de sexos e incidencia de malformaciones a intensidades de campo de tan solo 10 μ T; aunque otros estudios no hallaban tales efectos en embriones de mamíferos incluso con campos magnéticos de hasta 500 μ T ni con campos eléctricos de hasta 250 kV/m.

Estudios coordinados por el laboratorio Battelle de Washington, han observado el funcionamiento de la glándula pínea. Con la exposición a campos eléctricos de 60 Hz de 1.7 a 65 kV/m produjo una depresión de los niveles de melatonina en ratas e introdujo un retraso en los ritmos de otras actividades bioquímicas. Para un campo de 39 kV/m el comienzo del efecto aparece después de dos y antes de tres semanas de exposición, mientras que en menos de tres días fuera de la exposición, los niveles volvieron a su normalidad.

El uso de modelos animales para estudiar los efectos de la exposición a los campos electromagnéticos es a menudo limitado principalmente por dos problemas, el primero de ellos la extrapolación de los resultados a través de las especies y el segundo por la extrapolación de los patrones de exposición ambientales empleados en el laboratorio.

Finalmente, parece ser que los campos electromagnéticos no son iniciadores del proceso canceroso. La incertidumbre de si podrían ser promotores (ayudar a iniciar algún tipo de cáncer) sigue actualmente en estudio.

3. NORMATIVA RELACIONADA CON LOS NIVELES DE EXPOSICIÓN A CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS

Existen normas establecidas para proteger nuestra salud, como las relativas a aditivos alimentarios, a las concentraciones de productos químicos en el agua o a los contaminantes del aire. De forma similar, existen normas que previenen la exposición excesiva a los campos electromagnéticos presentes en el entorno.

Pocos son los países en el mundo que han establecido normas, para limitar la exposición a los campos de la frecuencia eléctrica, las mismas forman carácter de guías o recomendaciones y algunos casos en particular constituyen o son de uso obligatorio.

3.1. Criterios generales para limitar la exposición

Organizaciones internacionales tales como el IRPA/INIRC han establecido criterios para limitar la exposición, basadas en posibles efectos de la salud inmediatos o predecibles. Tales efectos son resultado de la corriente inducida en el cuerpo por los campos eléctricos y magnéticos. Los límites se refieren a la densidad de corriente inducida, que esta, por lo general, al nivel o levemente por encima de aquellas que tienen lugar en el organismo de forma natural. En un organismo existen corrientes endógenas de hasta 10 mA/m^2 aunque este valor puede llegar a ser más alto, bajo determinadas condiciones fisiológicas.

El IRPA también consideró que para tener una medida conservadora, la densidad de la corriente inducida por los campos eléctricos y magnéticos no debería exceder de este valor. El IRPA junto con la Organización Mundial de la Salud y el UNEP concluyen de la siguiente manera:

- Entre 1 y 10 mA/m² se producen efectos mínimos.
- Entre 10 y 100 mA/m² existen efectos biológicos establecidos, incluyendo efectos visuales y del sistema nervioso.
- Entre 100 y 1000 mA/m² se observa estimulación de tejido excitable.
- Sobre el valor de 1000 mA/m² puede ocurrir fibrilación ventricular y extrasístoles.

Dentro del contexto de efectos en el sistema visual, los efectos visuales comúnmente llamados "fosfenos" representan los puntos de luz que vemos cuando cerramos los ojos y frotamos con fuerza, siendo los mismos efectos reversibles debido a que cesan al terminar la exposición, y no son necesariamente nocivos.

3.2. Establecimiento de criterios para normas

El establecimiento de normas es variado, mientras unas pretenden limitar la corriente inducida en una persona o la que puede circular cuando se tocan vehículos o estructuras con una inadecuada puesta a tierra, otras se concentran en limitar algunos efectos desagradables (descarga eléctrica); por otro lado, algunos (límites establecidos por estados americanos) se han establecido con la finalidad de no sobrepasar los niveles existentes en líneas de transmisión de alta tensión aéreas. Sin embargo ninguno se basa en posibles efectos a largo plazo para la salud.

3.3. Límites para líneas de transmisión aéreas de alta tensión

3.3.1. Comparación con otros sistemas de transmisión

3.3.1.1. Campo eléctrico

Si bien las distancias de seguridad, tienen la función de limitar la posibilidad de contacto por personas con los circuitos e impedir que los conductores y partes energizadas entren en contacto con la propiedad pública o privada. En función de seguridad de las personas; las líneas de transmisión son diseñadas bajo normas que rigen la construcción, supervisión, operación y el mantenimiento de las instalaciones eléctricas.

La tabla XI muestra las distancias de seguridad establecidas por NTDOID, para tensiones entre 22 y 470 kV, la distancia de los conductores especificada en la Tabla XI, deberá de incrementarse de la siguiente manera:

- a. 0.01 m por cada kV en exceso de 22 kV
- b. si la tensión fuera superior a 50 kV, las distancias estarán basadas en la máxima tensión de operación. Para tensiones mayores a 50 kV, el inciso anterior se incrementara un (3%) por cada 300 m de altura en exceso de 1000 m.s.n.m.

Tabla XI. Distancias de seguridad para prevenir el contacto con los conductores

DISTANCIAS MINIMAS DE SEGURIDAD DE		Conductores y cables de comunicación aislados, mensajeros, retenidas aterrizadas y no aterrizadas expuestas a tensiones de hasta 300 V, conductores neutrales que cumplen con 18.1 E1, cables de suministro que cumplen con 18.1 C1.	Cables Suministradores de 0 a 750V que cumplen con 18.1 C2.	Partes Rígidas Energizadas No protegidas de 0-750V, conductores de comunicación no aislados, carcasas de equipos no aterrizado, retenidas no aterrizadas expuestas a conductores abiertos de suministro de 300 a 750 V	Cables Suministradores de más de 750 V que cumplen con 18.1 C2 ó 18.1 C3. Conductores Suministradores en línea abierta de 0 a 750 V.	Partes Rígidas Energizadas No protegidas de 750V - 22 kV. carcasas de equipo no aterrizado, retenidas no aterrizadas expuestas a tensiones de 750 V a 22 kV.	Conductores Suministradores en línea abierta de 750V – 22 kV
		m	m	m	m	m	m
Edificios	Horizontal a paredes, ventanas y áreas accesibles a personas	1.4 ^(1,2)	1.5 ^(1,2)	1.5 ^(1,2)	1.7 ^(1,4)	2.0 ^(1,2)	2.3 ^(1,5,6)
	Vertical arriba o abajo de techos y áreas no accesibles a personas	0.9	1.10	3.0	3.2	3.6	3.8
	Vertical arriba o abajo de techos y áreas accesibles a personas y vehículos además de vehículos pesados (Nota 3)	3.2	3.4	3.4	3.5	4.0	4.1
	Vertical arriba de techos accesibles al tránsito de vehículos pesados (Nota 3)	4.7	4.9	4.9	5.0	5.5	5.6
Anuncios, chimeneas,	Horizontal	0.9	1.07	1.5 ⁽¹⁾	1.7 ^(1,4)	2.0 ⁽¹⁾	2.3 ^(1,2,5,6)
	Vertical arriba o abajo de cornisas y otras superficies sobre las cuales pueden caminar personas	3.2	3.4	3.4	3.5	4.0	4.1
	Vertical arriba o abajo de otras partes de tales instalaciones	0.9	1.07	1.7	1.8 ⁽¹⁾	2.45	2.3

1. Los edificios, anuncios, chimeneas, antenas, tanques u otras instalaciones que no requieran de mantenimiento tal como pintura, lavado u otra operación que requiera personas trabajando o pasando en medio de los conductores y el edificio, la distancia mínima de seguridad puede ser reducida en 0.60 m.
2. Cuando el espacio disponible no permita alcanzar este valor, la distancia mínima de seguridad puede ser reducida en 0.60 m.

3. Para efectos de estas Normas, vehículo pesado se define como aquel vehículo que excede los 2.45 m de altura.
4. La distancia mínima de seguridad en reposo no debe ser menor que el valor indicado en esta tabla. Cuando el conductor o cable es desplazado por el viento, la distancia mínima de seguridad no debe ser menor a 1.1 m.
5. La distancia mínima de seguridad en reposo no debe ser menor que el valor indicado en esta tabla. Cuando el conductor o cable es desplazado por el viento, la distancia mínima de seguridad no debe ser menor a 1.40 m.
6. En los lugares donde el espacio disponible no permite alcanzar este valor, la distancia mínima de seguridad puede ser reducida a 2.00 m para conductores de hasta 8.7 kV a tierra.
7. Todas las tensiones son de fase a tierra para circuitos efectivamente aterrizados.

Si bien pocos son los países que han establecido límites para la exposición, en los Estados Unidos hay una variedad de normas con respecto al control del campo eléctrico; la mayoría de los estados no tienen regulaciones específicas que consideren los efectos eléctricos de las líneas de transmisión. Solamente los estados de Florida, Minnesota, Montana, New Jersey, New York y Oregón, tienen normas publicadas para campos eléctricos y magnéticos. Las normas publicadas para cada estado y el campo eléctrico máximo permitido en el borde del derecho de vía, dentro del rango de 1 a 3 kV/m, se muestran en la tabla XII.

Tabla XII. Guías adoptadas para limitar la exposición al campo eléctrico en el derecho de vía

Estado	Campo eléctrico kV/m	
	En el derecho de vía	Borde del derecho de vía
Florida	8.0 ^a	2.0
	10.0 ^b	
Minnesota	8.0	
Montana	7.0	1.0
New Jersey	-	3.0
New York	11.8	1.6
	11.0 ^f	
	7.0 ^d	
Oregón	9.0	

- a para líneas de 69 – 230 kV
- b para líneas de 500 kV
- d el máximo para cruces de carreteras
- f el máximo para cruce de carreteras privadas

3.3.1.2. Campo magnético

Debido a que no se conocen efectos de los campos magnéticos y que estos estudios continúan en la actualidad, algunos estados norteamericanos han procurado publicar guías como medida de exposición de las líneas de transmisión, la cual se muestra en la tabla XIII, para la intensidad del campo magnético presente en el borde del derecho de vía.

Tabla XIII. Guías para limitar los campos magnéticos, en el área de derecho de vía y borde

Estado	Campo magnético mG	
	En el derecho de vía	Borde del derecho de vía
Florida	-	150 ^a
	-	200 ^b
	-	250
New York	-	200

a para líneas de 69 – 230 kV

b para líneas de 500 kV

3.3.2. Límites generales

Desde que Maxwell y Henry formularon hace ya más de un siglo las relaciones básicas entre corriente y magnetismo, no se han modificado de forma apreciable los modelos que ellos establecieron.

Desde entonces, lo que si ha crecido especialmente, ha sido las aplicaciones de la electricidad. La generalización de aparatos y maquinas eléctricas ha disparado el consumo per cápita y en una proporción paralela, ha inducido a las personas a su "inmersión" en los campos eléctricos y campos magnéticos asociados, por lo que establecer recomendaciones para limitar la exposición, de trabajadores y del público en general en términos de campo eléctrico y magnético se ha suscitado en diferentes países.

3.3.2.1. Campo eléctrico

La tabla siguiente presenta las normas en conjunto con su aplicación.

Tabla XIV. Límites generales de campos eléctricos

País	Trabajadores (kV/m)	Público en general (kV/m)	Estatus	Base
Alemania	20	20	S	J
	7	7		
Australia	IRPA	IRPA	G	J
Checoslovaquia	15	-	S	P, H
Polonia	20 ^a	10	S	P, H
	15	1 ^b		
EE.UU.	25	-	G	J
U.R.S.S.	25 a 5 ^d	-	S	P, H
IRPA	30 a 10 ^e	10 ^f - 5 ^g	G	J
Reino Unido_NRPB	12 - 3 ^c	12 - 3 ^c	G	I

- a 2 horas máximo
- b 1 kV para casas, hospitales y escuelas
- c puede excederse, solo si se observa la restricción básica
- d depende de la duración de la exposición, en función de $t = 50/E^2$, donde t esta dado en horas por día laborable con E entre 5 y 20 kV/m. Entre 20 y 25 kV/m, 10 minutos
- e depende de la duración de la exposición, con $t \leq 80/E$ para E entre 10 y 30 kV/m
- f horas al día, puede excederse unos minutos tomando precauciones

- g para más de 24 horas/día. Para áreas abiertas en las que el público pueda pasar gran parte del día
- G Recomendación
- H Posibles efectos o preocupación por la salud
- I La restricción básica es la corriente inducida
- J La restricción básica es la densidad de corriente inducida
- P Preocupación por chispas o sensación de hormigueo
- S Norma con valor legal

3.3.2.2. Campo magnético

La tabla siguiente muestra las normas tomadas por los diferentes países.

Tabla XV. Límites generales de campos magnéticos

País	Trabajadores (mT)	Público en general (mT)	Estatus	Base
Alemania	5	5	S	J
Australia	IRPA	IRPA	G	J
EE.UU.	1	-	G	I
U.R.S.S.	7,5 – 1,8	-		W
IRPA	25 – 5 ^a – 0.5 ^b	1 ^c – 0.1 ^d	G	J
Reino Unido	2	2	G	I

- a 2 horas/día trabajo
- b todo el día de trabajo
- c unas horas al día
- d 24 horas/día
- W Valor establecido para trabajos con arco de soldadura

3.4. Dosis recomendadas por la comisión internacional para la protección contra las radiaciones no ionizantes (ICNIRP)

Dada la carencia crónica de conclusiones a nivel científico que relacionan campos electromagnéticos con la salud, los Organismos que deben preparar borradores legislativos no pueden preparar límites puesto que no hay efectos definidos y sus consecuencias. Son muy pocos estados los que han emitido Leyes o Normas y en estos casos, basados en "criterios precautorios".

De acuerdo con la existencia de variabilidad de estándares usados en diferentes países para limitar la exposición, en 1992 el IRPA estableció la ICNIRP como sucesora de la IRPA/INIRC, la cual debería investigar los peligros asociados con las radiaciones no ionizantes así como también desarrollar recomendaciones internacionales sobre límites de exposición.

Los ambientes de exposición ocupacional son generalmente conocidos y por lo tanto se pueden tomar medias precautorias adecuadas. Mientras que la población en general comprende personas de todas las edades con diferentes estados de salud, y que en muchos casos no están consientes de sus exposiciones a los campos electromagnéticos, no se esperaría que los mismos tomen las precauciones pertinentes para minimizar su exposición. La comisión sugirió que la exposición del público en general debería ser menor a comparación con los niveles ocupacionales, por lo que dos tipos de restricciones fueron establecidas para limitar la exposición; a continuación se presentan las tablas XVI y XVII que indican los niveles aceptados para evitar riesgos en la salud utilizados por la ICNIRP.

Tabla XVI. Restricciones básicas para limitar la exposición a los campos electromagnéticos, en el rango de 4Hz a 1 kHz

Características de la exposición	Densidad de corriente inducida J (mA/m ²)
Exposición Ocupacional	10
Exposición del público en general	2

Tabla XVII. Niveles de referencia para limitar la exposición a los campos electromagnéticos, en el rango de 0.025 a 0.82 kHz

Características de la exposición	Intensidad de campo eléctrico (V/m)	Intensidad de campo magnético A/m	Densidad de flujo magnético μT
Exposición ocupacional	500/f	20/f	25/f
Exposición del público en general	250/f	4/f	5/f

A 60 Hz las recomendaciones para la exposición laboral y público en general con respecto a la exposición de campos eléctricos y magnéticos son: 10 kV/m, 500 μT; 5 kV/m y 100 μT.

La restricción básica basada en la densidad de corriente de 10 mA/m², asegura la protección porque debajo de este nivel los efectos adversos no existen, los niveles de referencia sin embargo son proporcionados como medidas de comparación con respecto a valores medidos físicamente. El cumplimiento de los valores de referencia asegura el cumplimiento de las restricciones básicas.

3.5. Medidas de protección

Como ya es de nuestro conocimiento, la exposición a la radiación, puede provocar algún efecto en la salud dependiendo de la cantidad de radiación absorbida. Con el creciente uso de la energía eléctrica, la necesidad del estudio de los campos electromagnéticos, es importante para que sean más los beneficios recibidos por el suministro de energía que los posibles riesgos.

Dentro del medio ambiente, los factores para protección a la exposición de los campos electromagnéticos de 60 Hz lo constituye principalmente la distancia. El factor distancia, disminuye la intensidad de los campos eléctricos y magnéticos al aumentar la separación entre la fuente de emisión y el punto expuesto.

4. MEDICIÓN DE LOS NIVELES DE EXPOSICIÓN DE LOS CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS

En este capítulo se discutirá la parte más importante del estudio por su aplicación práctica. Anteriormente se han mencionado los estudios efectuados en otros países. En lo que respecta al departamento de Guatemala, conviene investigar en que condiciones se encuentra el medio ambiente que envuelve al ser humano.

Tal como lo indica el título de este trabajo, la radiación de los campos electromagnéticos de 60 Hz, se encuentra comprendido en la banda ELF; donde operan en la ciudad los sistemas de líneas de transmisión de energía eléctrica en 69, 138 y 230 kV; sistemas de alta tensión HV.

Es oportuno también mencionar o hacer una descripción del equipo utilizado para hacer la medición.

4.1. Equipo de instrumentación para medición

Las medidas dosimétricas en términos de densidad de corriente inducida tiene su base científica en el estímulo de los tejidos, que es el efecto a ser evitado y que sirve como parámetro de comparación o referencia de la radiación.

La facilidad para poder medir la intensidad del campo eléctrico en cualquier punto del espacio, favorece a que el medidor emplee una sonda que detecta la intensidad por medio de un sensor con un instrumento para indicar la fuerza relativa de la intensidad resultante. La figura 7 presenta una fotografía de dicho medidor.

Figura 7. Medidor de campo electromagnético de baja frecuencia



4.1.1. Características del equipo utilizado

El equipo llevado al campo para efectuar las pruebas de medición, cuyas características más importantes son las siguientes:

- Medidor de campo eléctrico y campo magnético
- Marca: ELF Survey Meter
- Modelo: HI – 3604
- Rango de frecuencia: 30 – 2000 Hz
- Respuesta de frecuencia: +/- 2.0 dB (30 – 2000 Hz)
- Sensibilidad de campo eléctrico: 1 V/m – 200 kV/m
- Sensibilidad de campo magnético: 0.2 mG – 20 G
- Fabricante: Holaday Industries Inc

4.2. Selección y obtención de puntos estratégicos para medición

Para obtener una muestra más o menos representativa, se escogieron puntos arbitrarios de la ciudad, tratando de cubrir especialmente la zona urbana y sus alrededores. Los puntos de medición se tomaron al azar para verificar en una forma consistente las cantidades de radiación de los campos electromagnéticos no ionizantes presentes en el área del derecho de vía y alrededores de la línea de transmisión de alta tensión. El cuidado que se observó fue buscar espacios donde el campo no fuese perturbado.

4.3. Medición del campo

4.3.1. Derecho de vía

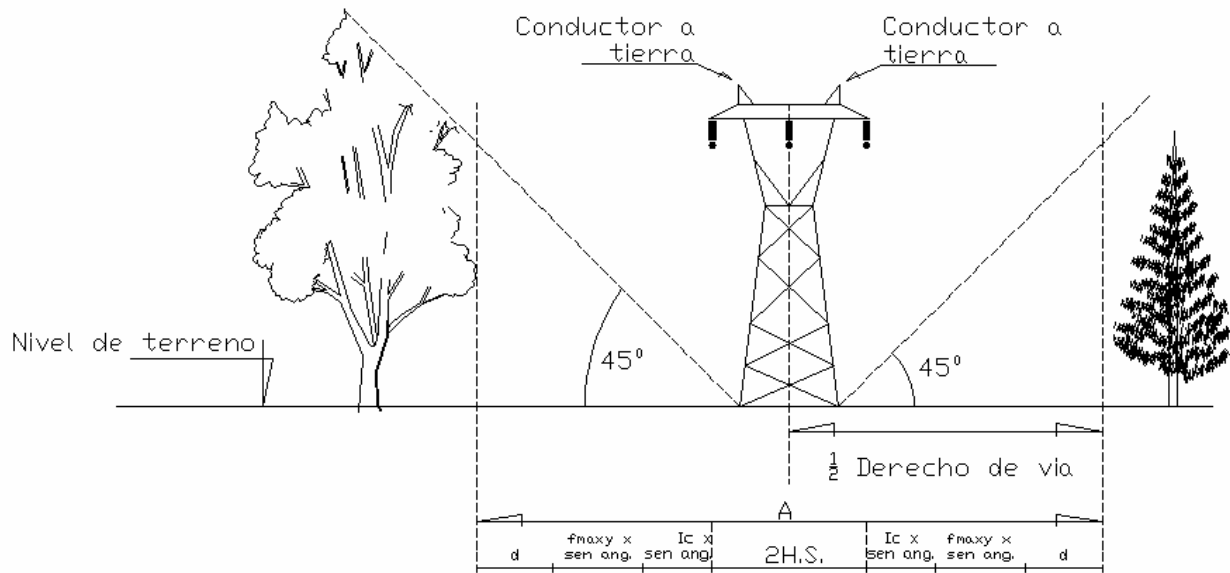
El derecho de vía, zona de servidumbre o zona de seguridad obedece a la siguiente definición:

Es el área bajo la línea de transmisión que se debe dejar a lo largo de la misma para garantizar la seguridad de las personas, en cuanto a contactos directos e indirectos; además alrededor de los conductores que transportan la energía eléctrica se forma un campo electromagnético, que como bien lo mencionamos anteriormente representa los campos de baja frecuencia, que dependen del nivel de tensión y de corriente, el cual no debe causar perturbaciones al medio ambiente y menos a quienes lo habitan en la cercanía.

Dentro del área de derecho de vía se prohíbe hacer construcciones, instalaciones, cultivos, siembras y otros trabajos que puedan constituir un peligro a manera que puedan afectar la continuidad del servicio eléctrico.

Las características de los derechos de vía pueden identificarse a partir de la figura 8.

Figura 8. Características del derecho de vía



- Dentro del área del derecho de vía la siembra es permitida siempre y cuando esta no exceda la altura de 5.00 metros o que se considere que no ofrecerá peligro alguno para los conductores de las líneas de transmisión.
- Los árboles cercanos a los conductores eléctricos según se observa en la figura 8, se desramara únicamente la parte que afecte el ángulo de 45°, y no se botara ningún árbol que no se localicé dentro de los límites establecidos, en la figura 8.

- **El ancho del derecho de vía lo constituye la distancia "A":** el cual lo forman las distintas distancias horizontales enmarcadas en la figura 8. Y que pueden resumirse en la fórmula siguiente:

$$A = 2 * d + 2 * (f_{\max} + L) * \text{sen}(\text{ang}) + (\text{H.S.})$$

- f_{\max} flecha máxima, en pies
- L longitud de la cadena de aisladores, en pies
- H.S. Separación horizontal de los conductores, en pies
- d Mínima distancia de acercamiento, en pies

- La distancia horizontal H.S. puede evaluarse por medio de la fórmula propuesta por el NESC (National Electric Safety Code):

$$\text{H.S.} = 0.025 * \text{kV} + F * (S)^{1/2} + 0.71 L$$

- kV Voltaje nominal de la línea
- L Longitud de la cadena de aisladores, en pies
- S Flecha final del conductor a 60° F, en pies
- F Factor experimental de corrección, comprendido entre 0.67 y 1.4, y para líneas de transmisión se recomienda usar el valor de 1.0

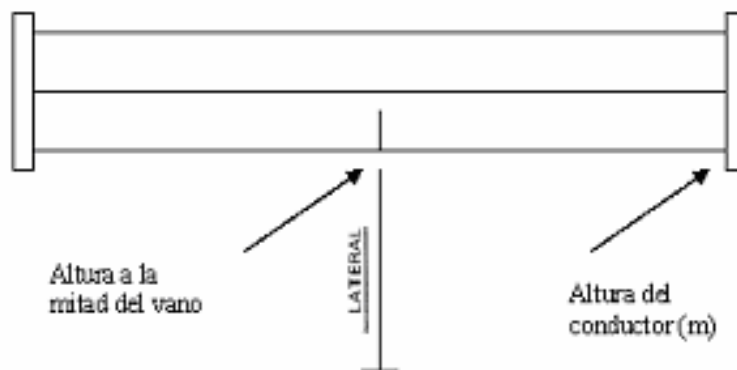
- El desvío de conductores debido al viento es la cantidad $(f_{\max} + L) * \text{sen}(\text{ang})$, y (ang) es el ángulo de desvío. El NESC permite como mayor ángulo de desvío 60° respecto a la vertical de la cadena de aisladores.

4.3.2. Medición del perfil en el derecho de vía

El perfil perpendicular de la intensidad del campo eléctrico y magnético en los puntos de interés a lo largo del espacio debe ser medido a intervalos seleccionados, en una dirección normal a la línea y a 1 m (3.28 pies) de altura sobre del nivel del suelo. La medida del perfil comenzará del centro de la línea, área de interés y será hecha a una distancia lateral más allá del conductor externo. La medición completa del perfil comenzará en la región de interés más allá del conductor externo y el progreso sucesivamente hacia el lado opuesto. De acuerdo con las Normas de Medición de Campos de Líneas de Transmisión Aéreas del IEEE.

La figura siguiente muestra el perfil de medición para la obtención de los muestreos.

Figura 9. Perfil de medición de campos electromagnéticos



4.4. Planteamiento del problema

Las líneas eléctricas de transmisión en alta tensión son trifásicas, constan de tres fases o conductores (inclusive un arreglo de conductores) y eso es lo que denomina un circuito. Normalmente las líneas poseen 1 ó 2 circuitos, soportados mediante estructuras de apoyo, siendo las más comunes, las verticales y horizontales.

Investigar si los campos electromagnéticos pueden presentar peligro alguno para las personas que residen en las viviendas construidas dentro del área de derecho de vía de las líneas de transmisión eléctrica en el departamento de Guatemala.

4.4.1. Toma de muestras en una línea de transmisión de 230 kV, 138 kV y 69 kV

Las muestras que se tomaron debajo de las líneas de transmisión (Escuintla - Guatemala Sur doble circuito, Jurún Marinalá - Guatemala Sur doble circuito y Guatemala Sur - Guadalupe 1) son tabuladas en conjunto con los cálculos correspondientes a densidades de corrientes producto de la inducción del campo eléctrico y magnético.

4.4.1.1. Línea Escuintla a Guatemala Sur

Este sistema de transmisión que se evaluó es un sistema de 230 kV, doble circuito y conductores ACSR 477 MCM 26/7, los campos fueron medidos a la mitad del vano, donde la altura del conductor más bajo esta cerca de las viviendas.

La tabla XVIII muestra los datos medidos de campo eléctrico y campo magnético, así como los valores calculados de densidades inducidas por el campo eléctrico y magnético. Las figuras 10 y 11 muestran el perfil transversal de intensidad de campo eléctrico y magnético.

Tabla XVIII. Campo electromagnético bajo una línea de 230 kV

Distancia al eje de la línea, metros	E (kV/m)	H (A/m)	J mA/m ² por inducción de E	J mA/m ² por inducción de H
-20	0.1500	1.7200	0.0015	0.0057
-18	0.3400	1.8800	0.0034	0.0062
-16	0.6600	2.2100	0.0066	0.0073
-14	0.8000	2.4500	0.0080	0.0081
-12	1.0000	2.7800	0.0100	0.0092
-10	1.1000	3.0500	0.0110	0.0101
-8	1.4200	3.4000	0.0142	0.0113
-6	2.0600	3.6600	0.0206	0.0121
-4	2.3400	3.7000	0.0234	0.0123
-2	2.8000	3.8200	0.0280	0.0127
0	2.0550	3.9100	0.0206	0.0130
2	2.2000	3.7300	0.0220	0.0124
4	2.4000	3.5000	0.0240	0.0116
6	2.1300	3.3400	0.0213	0.0111
8	1.4430	3.2300	0.0144	0.0107
10	0.7310	2.8400	0.0073	0.0094
12	0.5500	2.6000	0.0055	0.0086
14	0.4500	2.3000	0.0045	0.0076
16	0.7200	2.2000	0.0072	0.0073
18	0.4900	1.9000	0.0049	0.0063
20	0.5700	1.7400	0.0057	0.0058

Figura 10. Perfil de campo eléctrico

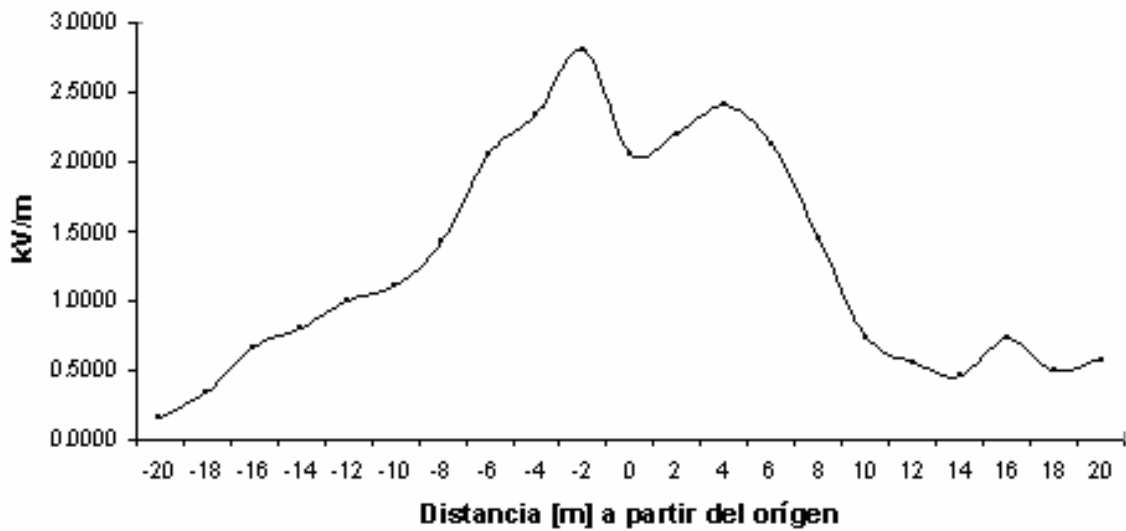
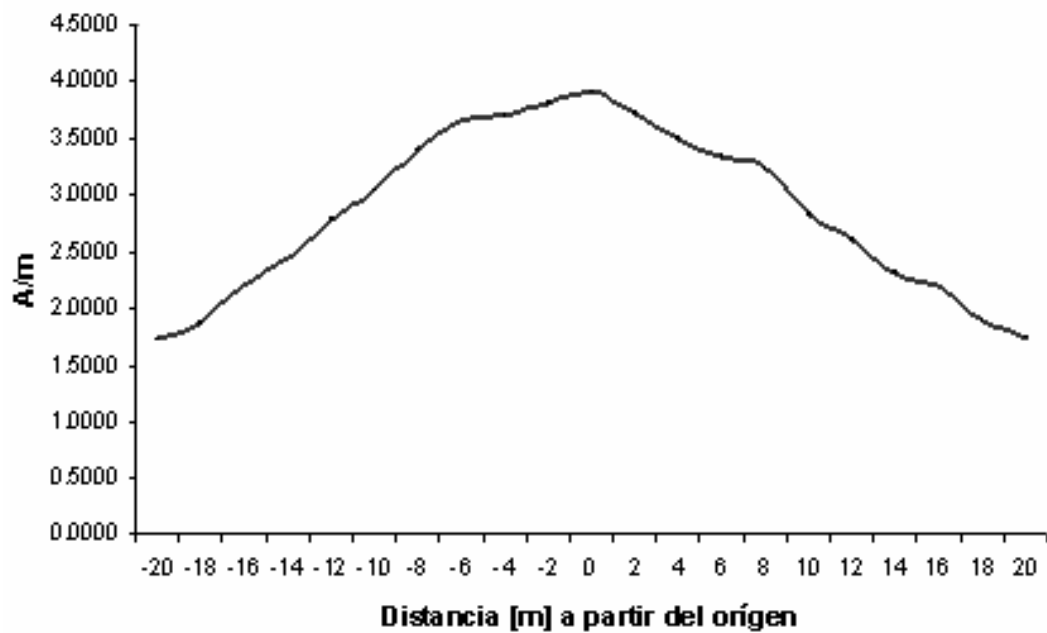


Figura 11. Perfil de campo magnético



4.4.1.2. Línea Jurún Marinalá a Guatemala Sur

Este sistema de transmisión de 138 kV, doble circuito y conductores ACSR 477 MCM 26/7, los campos fueron medidos a la mitad del vano y donde la altura del conductor más bajo esta cerca de las viviendas.

La tabla XIX muestra los datos de mediciones efectuadas para campo eléctrico y campo magnético, así como los valores calculados de densidades inducidas por el campo eléctrico y magnético. Las figuras 12 y 13 muestran el perfil transversal de intensidad de campo eléctrico y campo magnético.

Tabla XIX. Campo electromagnético bajo una línea de 138 kV

Distancia al eje de la línea, metros	E (kV/m)	H (A/m)	J mA/m ² por inducción de E	J mA/m ² por inducción de H
-18	0.3200	0.2300	0.0032	0.0008
-16	0.4200	0.3300	0.0042	0.0011
-14	0.6200	0.3900	0.0062	0.0013
-12	0.6600	0.4200	0.0066	0.0014
-10	0.8500	0.4400	0.0085	0.0015
-8	0.8300	0.4600	0.0083	0.0015
-6	0.9000	0.4900	0.0090	0.0016
-4	0.7800	0.3400	0.0078	0.0011
-2	0.4900	0.2800	0.0049	0.0009
0	0.3600	0.2140	0.0036	0.0007
2	0.5900	0.5300	0.0059	0.0018
4	0.6800	0.6400	0.0068	0.0021
6	0.8300	0.7200	0.0083	0.0024
8	0.7300	0.6900	0.0073	0.0023

Continúa tabla XIX.

Distancia al eje de la línea, metros	E (kV/m)	H (A/m)	J mA/m ² por inducción de E	J mA/m ² por inducción de H
10	0.6200	0.6300	0.0062	0.0021
12	0.5500	0.5700	0.0055	0.0019
14	0.4000	0.4700	0.0040	0.0016
16	0.2000	0.3800	0.0020	0.0013
18	0.1300	0.3300	0.0013	0.0011

Figura 12. Perfil de campo eléctrico

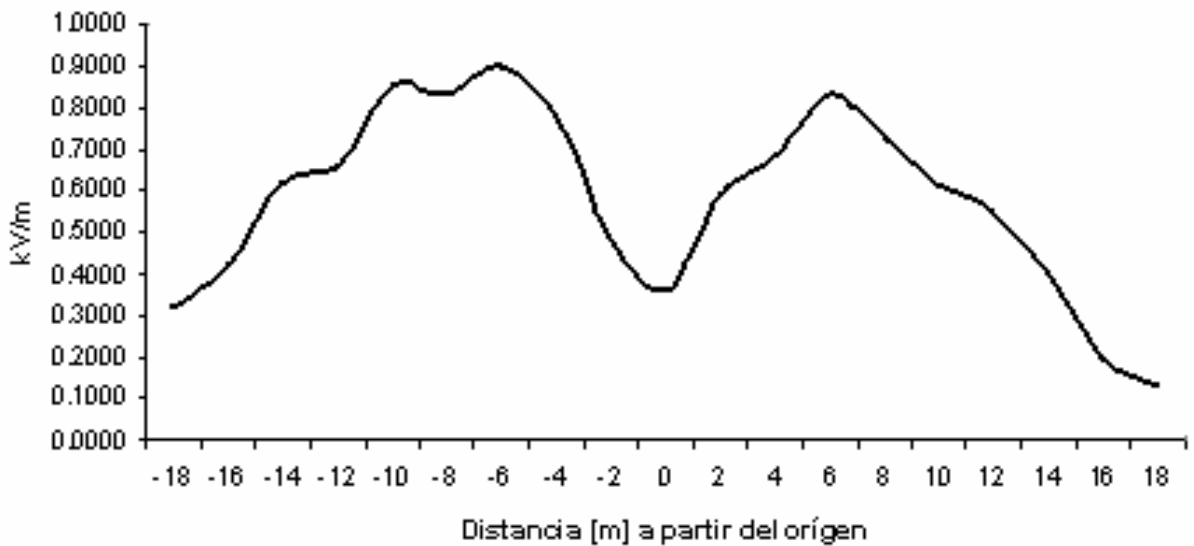
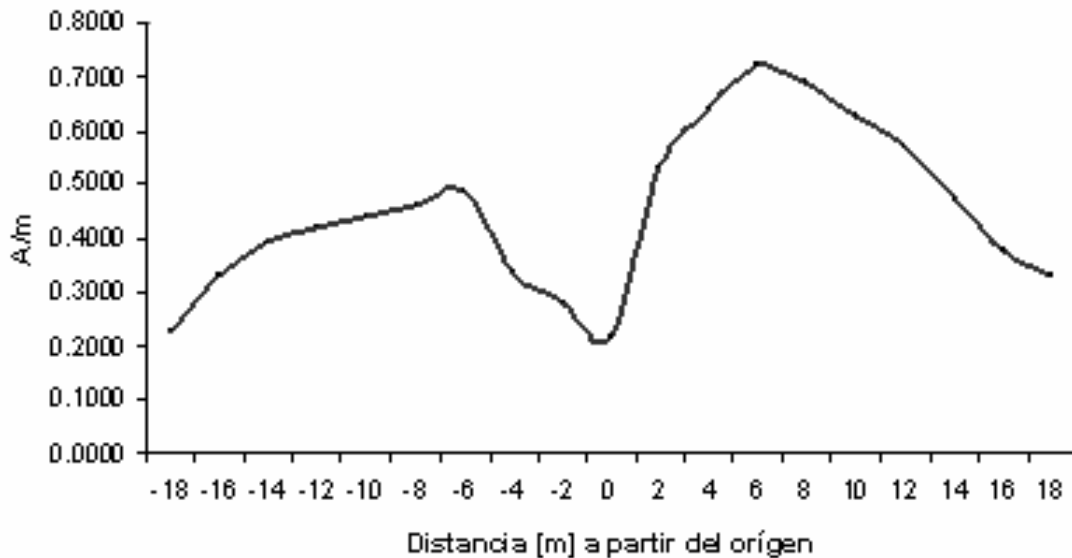


Figura 13. Perfil de campo magnético



4.4.1.3. Línea Guatemala Sur - Guadalupe 1

Este sistema de transmisión de 69 kV, un circuito y conductores ACSR 266 MCM 26/7, los campos fueron medidos a la mitad del vano y donde la altura del conductor más bajo está cerca de las viviendas.

La tabla XX muestra los datos de mediciones efectuadas para campo eléctrico y campo magnético, así como los valores calculados de densidades inducidas por el campo eléctrico y magnético. Las figuras 14 y 15 muestran el perfil transversal de intensidad de campo eléctrico y campo magnético.

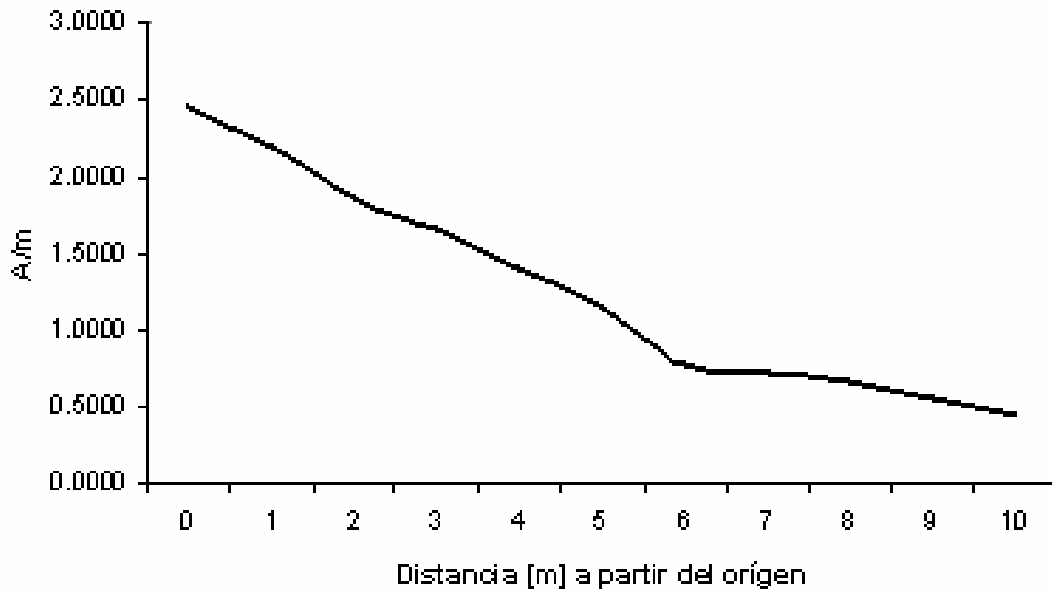
Tabla XX. Campo electromagnético bajo una línea de 69 kV

Distancia de la línea	E (kV/m)	H (A/m)	J mA/m ² por inducción de E	J mA/m ² por inducción de H
0	0.9800	2.4400	0.0098	0.0081
1	0.7500	2.2000	0.0075	0.0073
2	0.6200	1.8600	0.0062	0.0062
3	0.5600	1.6500	0.0056	0.0055
4	0.3800	1.4000	0.0038	0.0046
5	0.3210	1.1500	0.0032	0.0038
6	0.1670	0.7800	0.0017	0.0026
7	0.1076	0.7300	0.0011	0.0024
8	0.0641	0.6650	0.0006	0.0022
9	0.0224	0.5570	0.0002	0.0018
10	0.0062	0.4490	0.0001	0.0015

Figura 14. Perfil de campo eléctrico



Figura 15. Perfil de campo magnético



4.4.2. Detección de posibles molestias para los residentes de las viviendas localizadas en los derechos de vía

Para detectar las posibles molestias se diseñó una encuesta, la cual consta de una serie de diez preguntas. El procedimiento de selección para la muestra de datos considero únicamente las viviendas construidas dentro del derecho de vía de las líneas de transmisión anteriormente mencionadas, como el caso que muestra la figura 16, porque los habitantes dentro de esta área son irradiados con campos electromagnéticos más intensos.

Dentro del recorrido de estos circuitos; Escuintla - Guatemala Sur, Jurún Marinalá - Guatemala Sur y Guatemala Sur - Guadalupe 1; la muestra esta conformada por un total de treinta viviendas, en cada una se evaluó la serie de diez interrogantes, a continuación se tabula la información proporcionada, trabajando conjuntamente con personas que tienen conocimiento en la salud de las personas, las figuras 17 a 26, indican para cada vivienda, las interrogantes a interés.

Figura 16. Construcciones ubicadas dentro del área del derecho de vía

- a) Línea transmisión de 230 kV Escuintla a Guatemala Sur, a la salida de la subestación Guatesur

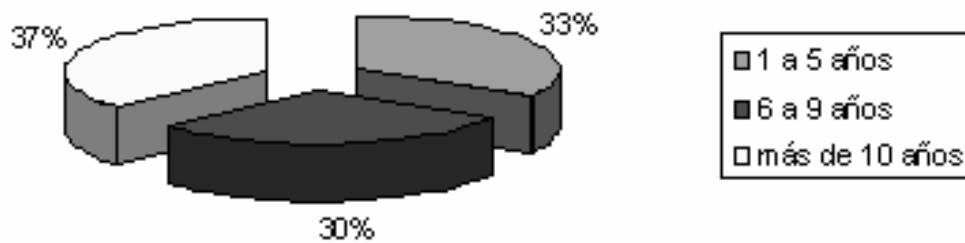


b) Línea transmisión de 138 kV Jurún Marinalá a Guatemala Sur, a la salida de la subestación Guatesur



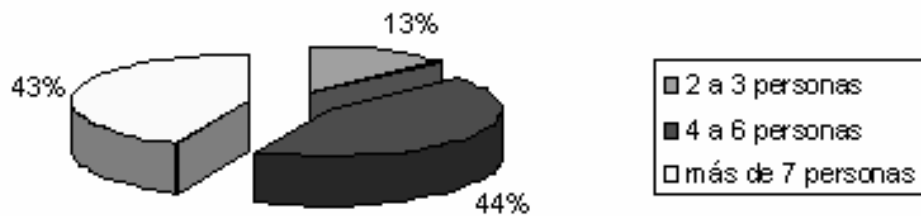
Pregunta No. 1

Figura 17. Tiempo de vivir de las personas residentes en las viviendas localizadas en el derechos de vía



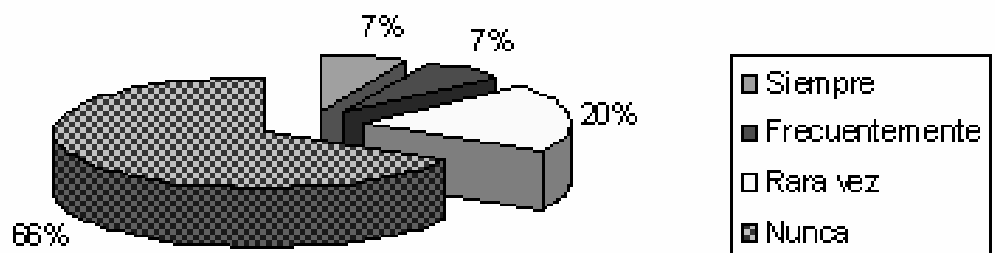
Pregunta No. 2

Figura 18. ¿Cuántas personas residen en la vivienda?



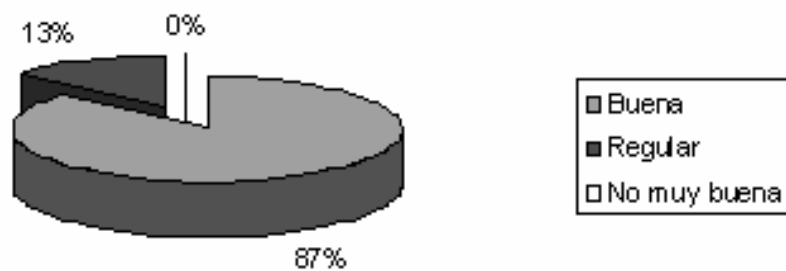
Pregunta No. 3

Figura 19. Posibles cambios de humor sin razón alguna



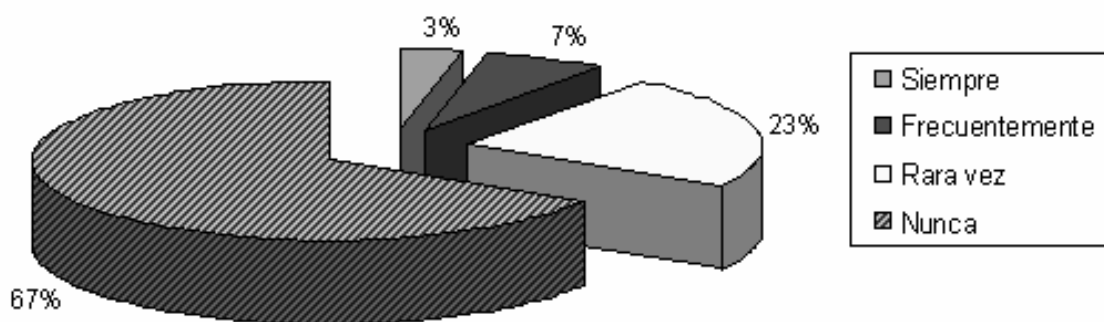
Pregunta No. 4

Figura 20. ¿Cómo describirían su relación con las personas de su comunidad?



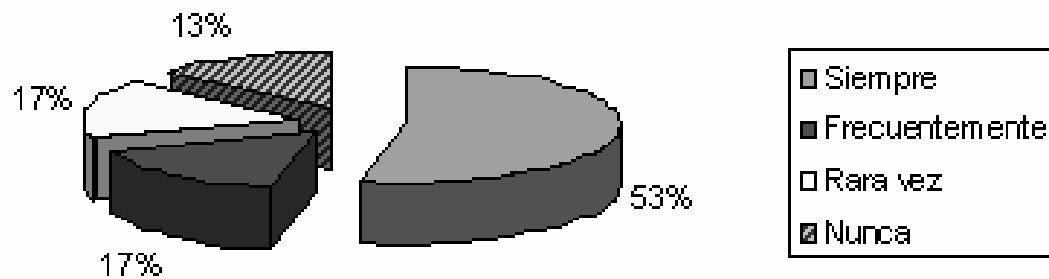
Pregunta No. 5

Figura 21. ¿Han padecido de mareos?



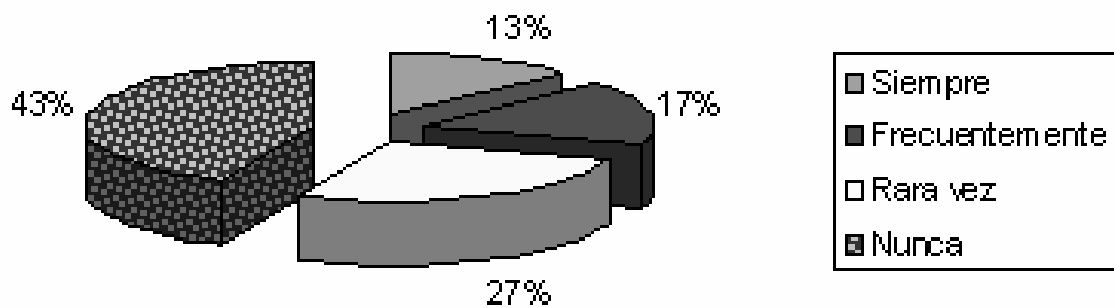
Pregunta No. 6

Figura 22. ¿Acostumbran a tomar algún tipo de tranquilizantes (café, gaseosas)?



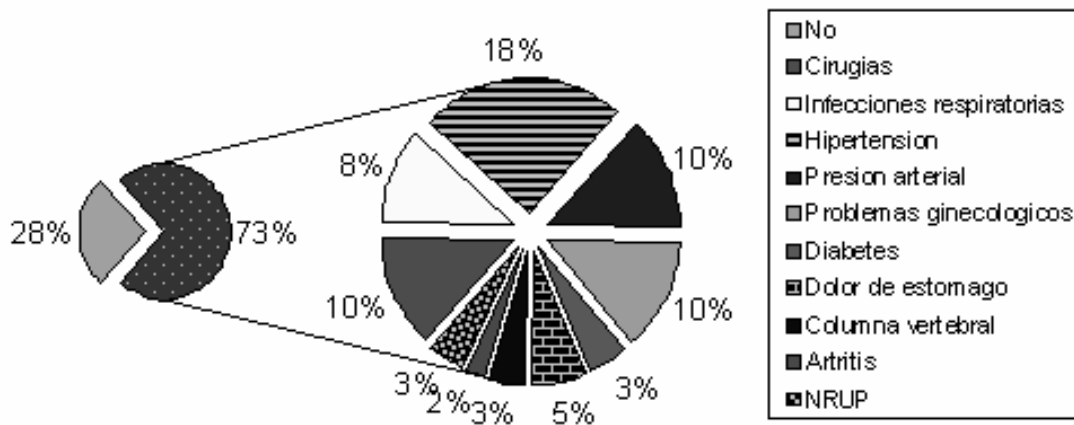
Pregunta No. 7

Figura 23. ¿Han padecido de dolores de cabeza?



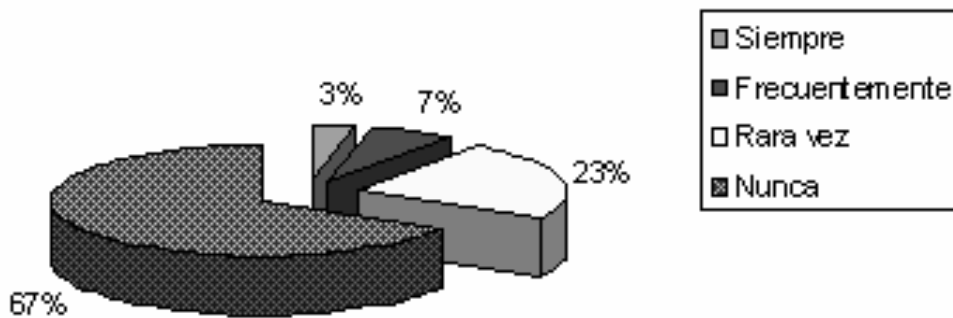
Pregunta No. 8

Figura 24. ¿Han tenido que asistir al médico?, ¿por que razón?



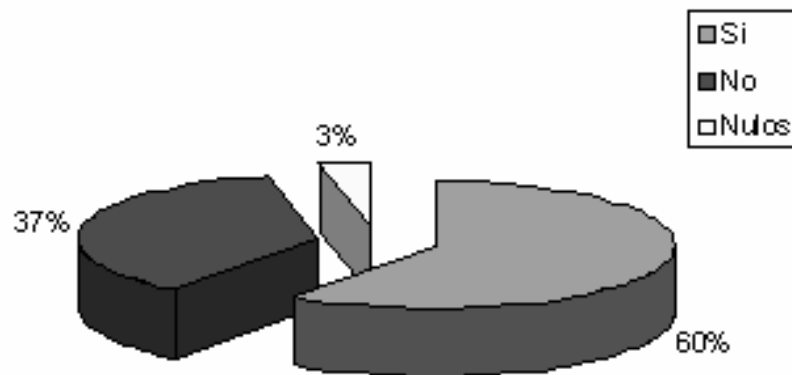
Pregunta No. 9

Figura 25. Dificultad para conciliar el sueño, aún cuando no haya ruido alrededor



Pregunta No. 10

Figura 26. ¿Está de acuerdo con el lugar donde vive?



4.5. Discusión de resultados

4.5.1. Escuintla - Guatemala Sur, Jurún Marinalá - Guatemala Sur, Guatemala Sur - Guadalupe 1

De acuerdo con los valores medidos de campo eléctrico y campo magnético podemos observar que los valores máximos obtenidos para el circuito de línea de 230 kV, 138 kV y 69 kV, estos son bastante bajos con respecto a los valores recomendados internacionalmente en cuanto al nivel de referencia.

Para obtener un panorama mejor del compartimiento de la distribución de corriente, vemos que los cálculos realizados demuestran que los valores de densidad de corriente inducida en mA/m² están por debajo de aquellos en los cuales podrían manifestarse efectos biológicos establecidos.

Resalta un hecho observable en la tabulación anterior, y es que los campos son menos intensos a medida que aumenta la distancia entre la fuente emisora y el punto irradiado.

Finalmente, el aporte de la información proporcionada por las personas que residen bajo las líneas de transmisión muestra que las afecciones de salud que padecen no puedan ser atribuidas a la exposición de los campos electromagnéticos producidos por las líneas de transmisión. Un caso que llama la atención y que debería ser objeto de un análisis específico más profundo, es el padecimiento de hipertensión, aun cuando su presencia no puede considerarse alarmante.

CONCLUSIONES

1. Los niveles máximos para campo eléctrico y magnético, medidos en el área de derecho de vía, no superan las recomendaciones establecidas para seguridad del público en general y trabajadores ocupacionales en los circuitos de 230 kV para la línea de Escuintla a Guatemala Sur.
2. Los niveles máximos para campo eléctrico y magnético medidos en el área de derecho de vía, no superan las recomendaciones establecidas para seguridad del público en general y trabajadores ocupacionales en los circuitos de 138 kV para la línea de Jurún Marinalá a Guatemala Sur.
3. Los niveles máximos para campo eléctrico y magnético medidos en el área de derecho de vía, no superan las recomendaciones establecidas para seguridad del público en general y trabajadores ocupacionales en el circuito de 69 kV para la línea de Guatemala Sur - Guadalupe 1.
4. La construcción de viviendas en el área del derecho de vía, viola las características legales del mismo, ya que impiden el libre acceso a las instalaciones de los sistemas de transmisión de alta tensión.

5. El establecimiento de límites de exposición, está relacionado principalmente con el nivel de exposición a los campos electromagnéticos y no particularmente a las distancias de exposición por las personas.
6. La hipertensión parece ser la causa de más consultas al médico, por los residentes de las viviendas localizadas en los derechos de vía, ésta representa el 18% con respecto a la muestra total de entrevistados.
7. Debido a que no se pueden irradiar personas para determinar los niveles de exposición, se ha tenido que utilizar los modelos experimentales a nivel celular y animal, extrapolando los resultados obtenidos para dar una aproximación o respuesta de los posibles efectos a esperarse en los seres humanos.
8. La preocupación mayor, por parte de las personas constituye el hecho de romperse un conductor eléctrico, derrumbamiento de una estructura de soporte y la radiación, si bien hemos aclarado las ondas de baja frecuencia son conocidas como campos electromagnéticos y difieren del mecanismo de interacción con la materia provocado por las ondas de alta frecuencia, conocidas como radiaciones electromagnéticas.

RECOMENDACIONES

1. Proporcionar una adecuada orientación al público en general respecto a las distancias mínimas, horizontales y verticales que deben respetarse para prevenir corrientes de contacto, que pudieran llegar a darse principalmente con los trabajadores de obra civil, cuando la altura de las construcciones llega a alcanzar una altura considerable.
2. De acuerdo con los estudios efectuados, hay que tomar en cuenta que las personas que están expuestos a campos más intensos son los trabajadores del sector eléctrico y los operadores de radio.
3. Considerar estructuras de soporte más altas cuando la ruta de la línea de transmisión tuviera que atravesar poblaciones, con alta densidad de habitantes por kilómetro cuadrado.
4. Considerar un estudio más a fondo, con la finalidad de aclarar si el padecimiento de hipertensión tiene relación directa con la exposición a los campos electromagnéticos producidos por las líneas de transmisión.

BIBLIOGRAFÍA

1. COMAR. **"Possible health hazards from exposure to power frequency electric and magnetic fields"**. IEEE Engineering in Medicine and Biology. (EEUU)(1): 131 – 137. 2000.
2. FINK, Donald and Beaty, Wayne. **Manual de ingeniería eléctrica**. Tomo I, México: Editorial. McGraw HILL INTERAMERICANA DE MÉXICO, S.A. DE C.V. 1996. Cap. 14, 1- 106 pp.
3. Dawson. W. Trevor. **"Electric fields in the human body resulting from 60 Hz contact currents"**. IEEE Transactions on Biomedical Engineering. (EEUU)(48). 1020 - 1026. 2001.
4. Enríquez Harper, Gilberto. **Líneas de transmisión y redes de distribución de potencia**. México: Editorial Limusa, 1986, 381pp.
5. F. Alonso Marín. **Campos eléctrico y magnético. Estudio teórico - práctico**. Madrid: Editorial Alhambra. 1974. 259pp.
6. Hayt, William H, Jr. **Teoría electromagnética**. 5ª. Ed. México: Editorial McGraw Hill, 1997. 525pp.
7. ICNIRP. **Recomendaciones para limitar la exposición a campos eléctricos, magnéticos y electromagnéticos (hasta 300 GHz)**.
8. ICRU REPORT No. 51. **Quantities and units in radiation protection dosimetry**

9. IEEE. **Standard procedures for measurement of power frequency electric and magnetic fields from AC power lines.** Estados Unidos. IEEE, INC. 1994. 1 - 25pp.
10. King, P. W. Ronold. **"Fields and currents in the organs of the human body when exposed to power lines and VLF transmitters".** IEEE Transactions on biomedical engineering. (EEUU)(45): 520 - 530. 1998.
11. M. Feychting and A. Ahlbom. **Magnetic fields and cancer in children residing near Swedish high - voltage power lines.** (Amer. J. Epidemiol., Vol. 138). 1993. 467 – 481 pp.
12. Moulder J. E. y otros. **"Is there a link between exposure to power - frequency electric fields and cancer".** IEEE Engineering in Medicine and Biology. (EEUU)(18). 109 - 117. 1999.
13. Nair, Indira y otros. **Biological effects of power frequency electric and magnetic fields - background paper.** Estados Unidos: Washington, DC. 1999. 103pp.
14. NIEHS. **Report on health effects from exposure to power- line frequency electric and magnetic fields.**
15. NRPB. **ELF electromagnetic fields and the risk of cancer.**
16. RADIATION HEALTH SERIES No. 30. **Interim guidelines on limits of exposure to 50/60 Hz electric and magnetic fields. 1989.**
17. Salam Abdel y otros. **"Transmission line electric field induction in humans using charge simulation method".** IEEE Transactions on biomedical engineering. (EEUU)(42): 1105 - 1109. 1995