



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

**ESTUDIO DE LA NORMATIVA ALEMANA SOBRE
RADIACIONES ELECTROMAGNÉTICAS EN ESTACIONES
DE RADIOCOMUNICACIÓN PROYECTADO A GUATEMALA**

SERGIO FERNANDO JUÁREZ PERNILLO

Asesorado por el Ing. Fernando Waldemar de León Contreras

Guatemala, agosto de 2006

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESTUDIO DE LA NORMATIVA ALEMANA SOBRE
RADIACIONES ELECTROMAGNÉTICAS EN ESTACIONES
DE RADIOCOMUNICACIÓN PROYECTADO A GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

SERGIO FERNANDO JUÁREZ PERNILLO

ASESORADO POR EL INGENIERO FERNANDO WALDEMAR DE LEÓN
CONTRERAS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
INGENIERO ELECTRÓNICO

GUATEMALA, AGOSTO DE 2006

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
VOCAL I	Inga. Glenda Patricia García Soria
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. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Otto Fernando Andrino Gonzales
EXAMINADOR	Ing. Luis Eduardo Durán Córdova
EXAMINADOR	Ing. Guillermo Antonio Puente Romero
SECRETARIO	Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas

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 LA NORMATIVA ALEMANA SOBRE RADIACIONES ELECTROMAGNÉTICAS EN ESTACIONES DE RADIOCOMUNICACIÓN PROYECTADO A GUATEMALA,

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, el 21 de febrero de 2005.

Sergio Fernando Juárez Pernillo

AGRADECIMIENTOS A:

Agradezco el desenlace de la cadena de eventos que fue esta investigación, a Dios, dador de todo.

Dedico especialmente a mi Familia; Irma y Aníbal, mis padres; también a Claudia, Roberto, Rodrigo y Mynor de la Cruz, mis hermanos; y a mi esposa Maya; por su apoyo incondicional y su cariño, sin importar distancias y tiempo. A Camilo Luin y Mariel López. A la Familia Steinmann. A mi Guatemala querida.

Mi tricentenaria alma mater, Facultad de Ingeniería, Escuela de Mecánica-Eléctrica. A mis catedráticos, asesor, el Ing. Waldemar de León.

La Gente U; Ingrid Paredes, Silvia Lemus, Mónica Palma, Madeleine de Alonso, Brenda Miranda, Carlos Alonso, Jacobo Mogollón, Aldo Santacruz, entre tantos. A Giovanni Ramírez, Ferdi Rodríguez, Ludwin Juárez, Marco Herrarte, Julio Estrada.

Al Prof. Dr. Hermann Singer, Frau Jutta Janzen, Karolina Stouracova, Merrit Rathjens, Kinga Molnar, Regina Nickelsen, Natalie Vogel, Irmilla Thormsen, Lisbeth Nielsen, Nina Koss, Marina Baselt, Kay Töllner, Ataulfo López-Mingo Tolm, a los señores Caravallo y a Ayup.

A a la Universidad Tecnológica de Hamburg-Harburg. A RF Teleproducciones.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	9
LISTA DE SIMBOLOS	11
GLOSARIO	12
RESUMEN	21
OBJETIVOS	22
INTRODUCCIÓN	23
1. LEGISLACIÓN ALEMANA	
1.1. Antecedentes	25
1.1.1. Restricciones básicas	28
1.1.2. Niveles de referencia	28
1.2. Cantidades electromagnéticas básicas	29
1.2.1. Ondas planas armónicas en el tiempo	34
1.2.2. Regiones alrededor de una antena	37
1.3. Exposición y parámetros de absorción	41
1.4. Mención de cantidades físicas	45
1.4.1. Dosimetría	47
1.5. Exigencias legales de SAR sobre sistemas de emisión electromagnética	51

2.	NORMALIZACIÓN ALEMANA	
2.1	Criterios	54
	2.1.1. Cantidades físicas	57
	2.1.2. Restricciones básicas y niveles de referencia	59
	2.1.2.1. Restricciones básicas	61
	2.1.2.2. Niveles de referencia	65
2.2.	Corrientes inducidas en un individuo	70
	2.2.1. Haciendo escala a otras alturas	73
2.3.	Implicaciones termales de un alto SAR	74
	2.3.1. Acoplamiento del cuerpo humano a campos magnéticos RF	74
2.4.	Guía de protección de radiofrecuencia (exposición ocupacional)	77
	2.4.1. Protección personal en campos electromagnéticos de alta frecuencia	80
	2.4.1.1. Valores básicos y derivados	83
2.5.	Exposición desde fuentes con frecuencias múltiples	86
	2.5.1. Restricciones básicas	87
	2.5.2. Niveles de referencia	88
3.	LEGISLACIÓN GUATEMALTECA	
3.1.	Ley general de Telecomunicaciones	91
3.2.	Antecedentes	92
3.3.	El caso guatemalteco	93
	3.3.1. Alcances, beneficios y objetivo fundamental de una normalización	97

4. SUGERENCIA DE UNA NORMA PARA GUATEMALA	
4.1. Criterios	100
4.2. Parámetros	105
4.2.1. Consideraciones Técnicas	107
4.2.1.1. Aspectos a considerar	112
4.2.1.2. Niveles de referencia para valores pico	115
4.2.1.3. Exposición desde fuentes con frecuencias	117
múltiples	
4.3. Alcances, beneficios y objetivo fundamental de una	120
.....normalización para territorio guatemalteco	
CONCLUSIONES	123
RECOMENDACIONES	125
BIBLIOGRAFÍA	127

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1	Polarización circular izquierda	13
2	Antena transmisora de apertura circular	16
3	Fuente puntual S a un objetivo plano circular	19
4	Patrón de potencia de un generador de radar	20
5	Modelo de interacción con radiaciones ionizantes	24
6	Norma ANSI-1982 de potencia absorbida	26
7	SAR en el tobillo para un hombre adulto	49
8	Temperatura de varias locaciones sobre la superficie de la sección del tobillo bajo condiciones de corrientes de RF a través de la pierna	52
9	Temperatura de varias locaciones en la superficie de la sección de las muñecas bajo condiciones de corrientes de RF a través de las manos	53
10	SAR por capa para el modelo de cuerpo humano expuesto a un campo magnético de RF linealmente polarizado	54
11	Norma inicialmente impuesta para la protección en exposición ocupacional de campos RF	55
12	Niveles de Referencia ICNIRP para exposición a campos eléctricos variables en el tiempo	62
13	Niveles de Referencia ICNIRP para exposición a campos magnéticos variables en el tiempo	63

TABLAS

I	Espectro electromagnético	9
II	Rangos de corrientes de umbral para efectos indirectos	38
III	Restricciones Básicas para campos Eléctricos, Magnéticos y Electromagnéticos	40
IV	Restricciones básicas ocupacionales y a nivel público hasta 10 GHz	41
V	Niveles de referencia para campos eléctricos, magnéticos y electromagnéticos	44
VI	Niveles de referencia para exposición ocupacional	46
VII	Corrientes de contacto y corrientes en miembros	47

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
κ	Constante dieléctrica.
λ	Longitud de onda.
μ	Constante de permeabilidad.
ρ	Densidad de carga eléctrica.
σ	Conductividad eléctrica.
γ	Constante de permitividad.
ζ	Impedancia intrínseca del medio.
n	Cualquier número entero.
RF	Radiofrecuencia.
HF	Alta frecuencia.
LF	Frecuencia baja.
MF	Frecuencia media.
SHF	Frecuencia super alta.
UHF	Frecuencia ultra alta.
VHF	Frecuencia muy alta.
VLf	Frecuencia muy baja.
SA	Absorción específica.
SAR	Razón de absorción específica.
MHz	10^3 Hertz.
GHz	10^6 Hertz.

GLOSARIO

Absorción	En la propagación de la onda de radio, atenuación de una onda de radio debido a la disipación de su energía, es decir, conversión de su energía en otra forma, tal como calor.
Ángulo sólido	Llamado también estereorradián, determina sobre la superficie de una esfera un área equivalente a la de un cuadrado, cuyo lado es igual al radio de la esfera. 12.57 estereorradianes equivalen a una esfera.
Efecto atermal	Cualquier efecto de la energía electromagnética en un cuerpo que no es un efecto relacionado al calor.
Campo cercano	La región donde la distancia de una antena de radiación es menor que la longitud de onda del CEM irradiado. Nota: La fuerza del campo magnético -multiplicada por la impedancia del espacio- y la fuerza del campo eléctrico son desiguales y, en las distancias menores de un décimo de la longitud de onda de una antena varían inversamente como el cuadrado o el cubo de la distancia, si la antena es pequeña comparada con esta distancia.

Conductancia	El recíproco de la resistencia eléctrica. Expresado en siemens (S).
Conductividad eléctrica	La cantidad escalar o vectorial que cuando es multiplicada por la fuerza del campo eléctrico, da como producto la conducción de la densidad corriente; es la recíproca de la resistencia. Expresado en siemens por metro (S/m).
Onda continua	Una onda cuyas oscilaciones sucesivas son idénticas bajo condiciones de estado estacionario.
Decibel	El decibelio es 1/10 del belio. Un bel se define como el logaritmo decimal de la relación de dos potencias.
Densidad de corriente	Un vector de el cual el integral sobre una superficie dada es igual a la corriente que atraviesa la superficie; la medida de la densidad en un conductor lineal es igual a la corriente dividida por el área seccionada transversalmente del conductor. Expresado en amperios por metro cuadrado (A/ m ²).
Constante dieléctrica	Una constante que define la influencia de un medio isotrópico en las fuerzas de la atracción o de repulsión entre cuerpos electrificados es expresado en faradios por metro (F/m ⁻¹); la permitividad relativa es la permitividad de un material o medio entre la permitividad en el vacío.

Dosimetría	La medida, o la determinación por el cálculo, de la fuerza interna del campo eléctrico o de la densidad de corriente inducida, de la absorción específica de la energía, o de la distribución específica de la tasa de absorción de la energía, en seres humanos o animales expuestos a los campos electromagnéticos.
Energía electromagnética	La energía almacenada en un campo electromagnético. Expresado en Jules (J).
ELF	Frecuencia extremadamente baja; frecuencia debajo de 300 Hz.
EMF	Campos eléctricos, magnéticos y electromagnéticos.
Escalar	Es una cantidad que está caracterizada completamente por su magnitud.
Espectro electromagnético	Clasificación de la radiación electromagnética de acuerdo con su frecuencia o longitud de onda.
Fuerza del campo eléctrico	La fuerza (E) en una carga positiva estacionaria en un punto de un campo eléctrico; medido en voltios por metro (V/m).

Fase	En una onda, posición en su ciclo en un instante específico; una medida de si está en una cresta, en un valle, o en algún punto entre ellos.
Frecuencia	El número de ciclos sinusoidales completados por las ondas electromagnéticas en un segundo; expresado generalmente en impedancia de los Hz (Hz).
Impedancia	La relación del número complejo -vector- que representa el campo eléctrico transversal en una punto a otro que representa el campo magnético transversal en ese punto. Expresado en ohmios (Ω).
Campo lejano	La región donde la distancia de radiación de una antena excede a la longitud de onda de la radiación de CEM; en el campo lejano, los componentes del campo (E y H) y la dirección de propagación son mutuamente perpendiculares y la dimensión de una variable del modelo del campo es independiente de la distancia de la fuente en la cual se toma.
Longitud de onda	La distancia entre dos puntos sucesivos de una onda periódica en la dirección de propagación, en la cual la oscilación tiene la misma fase.

Fuerza del campo magnético	Una cantidad axial del vector, H, que, junto con la densidad de flujo magnético, especifica un campo magnético en cualquier punto en el espacio, y se expresa en amperio por metro (A/m).
Densidad de flujo magnético	Una cantidad del campo del vector B, que da lugar a una fuerza que actúa en una carga o cargas en movimiento, y se expresa en tesla (T).
Permeabilidad magnética	La cantidad escalar o vectorial que cuando es multiplicada por la fuerza del campo magnético, nos da la densidad del flujo magnético; expresado en henrio por metro (H/m). Nota: Para los medios isotrópicos, la permeabilidad magnética es un escalar, para los medios anisotrópicos, es una cantidad del tensor.
Microondas	Radiación electromagnética de longitud de onda suficientemente corta para la cual en la práctica se puede hacer uso de guías de onda y de técnicas asociadas a la cavidad en su transmisión y recepción. Nota: El término se toma para significar las radiaciones o los campos que tienen un radio de acción de frecuencia de 300 Mhz - 300 GHz.

Radiaciones no ionizantes (RNI)	Incluye todas las radiaciones y campos del espectro electromagnético que no tengan normalmente suficiente energía para producir la ionización de materia; caracterizada porque la energía por fotón es menos de 12 eV, las longitudes de onda mayores de 100 nm, y frecuencias más bajas de 3×10^{15} Hz.
Exposición ocupacional	Toda la exposición a EMF experimentado por los individuos en el curso de realización de su trabajo.
Onda plana	Una onda electromagnética en la cual el vector de campo eléctrico y magnético permanece en posición horizontal en un plano perpendicular a la dirección de propagación de la onda, y la fuerza del campo magnético (multiplicada por la impedancia del espacio) y la fuerza del campo eléctrico son iguales.
Densidad de potencia	En la propagación de la onda de radio, la potencia que cruza una unidad de área normal en la dirección de propagación de la onda; expresado en vatios por metro cuadrado (W/m^2).
El vector de Poynting	El flujo del que a través de cualquier superficie representa la potencia electromagnética instantánea, transmitida a través de esta superficie.

Producto escalar	Es el producto de las magnitudes de los vectores originales, por el coseno del ángulo que forman.
Producto cruz	Es el producto de las magnitudes, por el seno del ángulo que forman los vectores originales, con la dirección dada por la regla de la mano derecha.
Profundidad de penetración	Para un campo electromagnético de onda plan (CEM), el incidente en el límite de un buen conductor, profundidad de la penetración de la onda es la profundidad en la cual la fuerza del campo de la onda se ha reducido a $1/e$, o a aproximadamente 37% de su valor original.
Exposición pública	Toda exposición a CEM experimentada por miembros del público en general, excepto la exposición ocupacional y exposición durante procedimientos médicos.
Radiofrecuencia (RF)	Cualquier frecuencia en la cual la radiación electromagnética sea útil para la telecomunicación. Nota: Refiere al rango de frecuencia 300 Hz - 300 GHz.

Resonancia	El cambio en la amplitud que ocurre cuando la frecuencia de la onda se acerca o coincide con una frecuencia natural del medio; la absorción en todo el cuerpo de ondas electromagnéticas presenta su valor más alto, es decir la resonancia, para frecuencias (en MHz) que corresponden aproximadamente a $114/L$, donde está la altura L del individuo en metros.
Valor eficaz (rms)	Ciertos efectos eléctricos son proporcionales a la medida de la raíz cuadrada de una función periódica -concluido un período-. Este valor se conoce como el valor eficaz (rms), puesto que es derivado primero ajustando la función, determinando el valor medio de los cuadrados obtenidos, y tomando la raíz cuadrada de ese valor medio.
Absorción específica de energía (SA)	La energía absorbida por unidad masa del tejido biológico, expresada en jules por kilogramo (J/kg); la absorción específica de la energía es el integral del tiempo de la tasa específica de absorción de energía.
Razón específica de absorción de energía (SAR)	La tasa en la cual la energía se absorbe en tejidos del cuerpo, en vatios por kilogramo (W/kg); El SAR es la medida dosimétrica que se ha adoptado extensamente en las frecuencias cerca de 100 kHz.

Tesla

Unidad de medida para el campo magnético en el sistema internacional.

Vector

Cantidad que está caracterizada completamente por su magnitud y dirección.

RESUMEN

El análisis a profundidad de normativas ambientales europeas sobre radiaciones emitidas en estaciones de radiocomunicación, específicamente en Alemania, provee bases ideales para establecer propuestas de una normativa del mismo tipo aplicable a territorio guatemalteco, ya que toda la infraestructura de telecomunicaciones en Alemania esta supeditada a respetar los criterios técnicos y físicos establecidos por sus entes reguladores referentes a radiaciones electromagnéticas no ionizantes. Para el estudio de exposición a campos electromagnéticos ocho cantidades físicas son comúnmente usadas como parámetros de la norma para seguridad del personal operario y de los vecinos en general y cada una se explica en detalle. En la investigación se incluyen campos estáticos hasta campos de radiofrecuencia de microondas, abarcando el rango de frecuencias de 0 Hz a 300 GHz.

Una legislación de este tipo posibilitaría que las autoridades nacionales cuenten con instrumentos técnicos que puedan ser expuestos a análisis profundos, corrección, mejora periódica para así, no promover la inseguridad jurídica del ciudadano, estos se originarían de un proceso de modernización, fortalecimiento y armonización de sistemas, concernientes a radiaciones electromagnéticas no ionizantes. Se ha podido establecer una serie de lineamientos que pueden guiar hacia el establecimiento de propuestas para una normativa en territorio nacional, que trate específicamente a radiaciones electromagnéticas no ionizantes en beneficio de la población guatemalteca.

OBJETIVOS

- **General**

Hacer un análisis de la normativa ambiental alemana sobre las radiaciones electromagnéticas emitidas en estaciones de radiocomunicación, para establecer las propuestas de una normativa del mismo tipo aplicable a territorio guatemalteco.

- **Específicos**

1. Determinar los criterios técnicos y físicos utilizados en la legislación ambiental alemana referente a estaciones de radiocomunicaciones.
2. Determinar los criterios ambientales (Energía, Campo Eléctrico y Magnético, Frecuencia) en los que se establecen los parámetros de la norma para seguridad del personal operario y de los vecinos en general.
3. Determinar cuáles son los alcances que una legislación contemple en base a la inversión, costos y beneficios que el establecimiento de una normalización representan para las empresas, el estado y la población.
4. Establecer propuestas para una normativa en territorio nacional.

INTRODUCCIÓN

Las normas en telecomunicaciones se refieren a la manera de estandarizar todos los elementos que intervienen en diseño, construcción y operación de sistemas, con el propósito de ejercer un control en su modernización. Esta investigación se enfoca en la República Federal de Alemania, donde existen legislaciones y normas que permiten que la actividad de la industria de telecomunicaciones se desarrolle en un entorno que respete al ciudadano desde el enfoque económico y, a su vez, ambiental estableciendo que toda radiación electromagnética que es emanada de dispositivos de radiocomunicación utilizados para enlaces de telecomunicaciones son benignas para la población.

El análisis se centra en los diferentes criterios técnicos y científicos utilizados en el establecimiento de estas regulaciones, así como, la redacción de las mismas y su posible establecimiento a territorio guatemalteco, teniendo en cuenta que una estructura de normas enfocadas a la calidad de un servicio y beneficio de la población, se traduce en mejores oportunidades de desarrollo y de sana convivencia. Se centra en los aspectos técnicos así como los análisis matemáticos a nivel físico, no así, desde el punto de vista médico o de salud, cuyas ascensiones competen a otras áreas de desarrollo. Para el mismo se incluye una descripción detallada sobre las radiaciones no ionizantes y sus criterios matemáticos y técnicos, así como antecedentes, legislación vigente, parámetros permitidos, según muchas agencias, tanto europeas, como internacionales. Contendrá además, el análisis de las normas europeas y su proyección para aplicación al territorio guatemalteco, así como una propuesta de estudio-base, para un anteproyecto de Ley enfocado al tema ambiental sobre radiaciones electromagnéticas no ionizantes.

La normalización en la industria es algo reciente, por lo tanto, nos encontramos a menudo con la ausencia de legislaciones, información técnica o científica que nos enmarque en cualquier aspecto relacionado con el diseño, desarrollo u optimización de servicios, que en este caso incluyen las radiaciones electromagnéticas. Significa que al existir una serie de normas que rijan el desarrollo de manera homogénea respetando la libertad de empresa y los derechos fundamentales a nivel internacional, la competencia en mercados se hace mucho más efectiva desde el punto de vista que se parte de una plataforma de normas legisladas o inducidas por mercados internacionales, tomando un marco de oferta y demanda que no afecte el ambiente o a quienes viven cerca del área de producción o de sus infraestructuras. En Guatemala, el estudio de las normas que se utilizan en la Unión Europea, nos puede presentar un marco de desarrollo que enfocado a nuestro país signifique un fundamento para futuras normalizaciones que tengan a bien el criterio ambiental y por ende al de los ciudadanos, siendo nuestra población o sea todos nosotros, los más beneficiados con el establecimiento y respeto de leyes de protección al medio ambiente.

1. LEGISLACIÓN ALEMANA

1.1. Antecedentes

En 1974, la Asociación Internacional para la Protección contra la Radiación (IRPA) formó un grupo de trabajo para Radiaciones No- Ionizantes, el cual examinó los problemas suscitados en el campo de la protección contra los varios tipos de Radiaciones No- Ionizantes (RNI). En el Congreso de la IRPA en París en 1977, este grupo de trabajo se convirtió en Comité Internacional para las Radiaciones No- Ionizantes (INIRC). En cooperación con la División de Salud Ambiental de la Organización Mundial de la Salud (OMS), la IRPA/ INIRC desarrolló un número de documentos, en los cuales está basado esta investigación, sobre criterios de salud en relación a las RNI, como parte del Programa de Criterios de Salud Ambiental de la OMS, auspiciado por el Programa de Naciones Unidas para el Ambiente (UNEP). Cada documento incluía una visión panorámica de las características físicas, mediciones e instrumentación, fuentes, y aplicaciones de las RNI, una revisión total de la literatura sobre los efectos biológicos y una evaluación de los riesgos a la salud provenientes de la exposición a las RNI. Estos criterios de salud han proveído la base de datos científica para el subsiguiente desarrollo de los límites de exposición y los códigos de práctica (procedimientos de protección, calibración de equipos, etc.) relacionados a las RNI. En el Octavo Congreso Internacional de la IRPA (Montreal, Mayo 18-22, 1992), fue establecida una nueva organización científica independiente- la Comisión Internacional para la Protección contra las Radiaciones No- Ionizantes(ICNIRP)- como sucesora de la IRPA/ INIRC.

Las funciones de la Comisión son investigar los peligros que pueden ser asociados con las diferentes formas de RNI, desarrollar recomendaciones internacionales sobre límites de exposición para las RNI por parte de fuentes radiantes y tratar todos los aspectos sobre protección contra las RNI.

Los efectos biológicos reportados como resultado de la exposición a campos eléctricos y magnéticos estáticos y de frecuencia extremadamente baja han sido revisados por la UNEP/ OMS/ IRPA (1984,1987).

En Alemania, el establecimiento de normas técnicas para protección de público en general y trabajadores, de radiaciones producidas por fuentes puntuales como lo son las antenas generadoras de microonda (que son el centro de desarrollo de esta investigación) para telecomunicaciones y otros dispositivos, va de la mano con el desarrollo de nuevas tecnologías y al igual que en el resto de países de la Unión Europea tiene sus antecedentes también en algunos de estos estudios, pero en los últimos años estos pasaron a formar parte de la normativa general de la UE. Aquellas publicaciones y otras, incluyendo UNEP/ OMS/ IRPA (1993) y Allen y Col. (1991) proveyeron la base científica para estas recomendaciones, criterios que se describen en la presente investigación. El principal objetivo de estas publicaciones es establecer recomendaciones para limitar la exposición a los campos electromagnéticos (CEM) con el objetivo de proveer protección contra efectos adversos a la salud conocidos.

Un efecto adverso a la salud causa un deterioro detectable de la salud de los individuos expuestos o su descendencia; un efecto biológico, por otro lado, puede o no puede resultar en un efecto adverso a la salud.

Estudios sobre efectos directos e indirectos de los CEM son descritos; los *efectos directos* son el resultado de la interacción directa de los campos con el cuerpo, los *efectos indirectos* envuelven la interacción con un objeto que está a un potencial eléctrico diferente al del cuerpo. Los resultados de estudios de laboratorio, criterios básicos de exposición y niveles de referencia para evaluación práctica del peligro son discutidos y las recomendaciones presentadas se aplican a la exposición ocupacional y poblacional.

Las recomendaciones para los campos electromagnéticos de alta frecuencia y de 50/60 Hz fueron publicadas por el IRPA/ INIRC en 1988 y 1990 respectivamente, pero son sustituidas por las actuales recomendaciones, las cuales cubren todo el rango de frecuencias de los CEM variables en el tiempo (hasta 300 GHz). Los campos magnéticos estáticos son cubiertos por las recomendaciones ICNIRP emitidas en 1994 (ICNIRP 1994) y no forman parte de esta investigación.

Para establecer los límites de exposición, la Comisión reconoció la necesidad de reconciliar diferentes opiniones de científicos. La validez de los reportes científicos tuvo que ser considerada y las extrapolaciones de experimentos en animales a efectos en los seres humanos tuvieron que ser realizadas, es decir, el estudio siempre continúa. Las restricciones en estas recomendaciones fueron basadas solamente en datos científicos disponibles a la fecha, sin embargo se debe indicar que dichas restricciones proveen un adecuado nivel de protección de la exposición a CEM variables en el tiempo. Dos clases de recomendaciones son presentadas:

1.1.1. Restricciones básicas

Restricciones a la exposición a campos eléctricos, magnéticos y electromagnéticos variables en el tiempo, que indiquen directamente efectos adversos en la salud son llamadas “restricciones básicas”. Dependiendo de la frecuencia del campo, las cantidades físicas usadas para especificar estas restricciones son la densidad de corriente (J), la razón de absorción específica de energía (SAR), y la densidad de potencia (S). En individuos expuestos, al aire libre, sólo la densidad de potencia (S) es fácilmente medible.

1.1.2 Niveles de referencia

Estos niveles son proporcionados para propósitos de evaluar en forma práctica la exposición para determinar si es probable que las restricciones básicas sean excedidas. Algunos niveles de referencia son derivados de restricciones básicas relevantes usando técnicas de medición y/o computacionales, y algunas están basadas en percepciones y efectos indirectos adversos por la exposición a los CEM. Las cantidades derivadas son la intensidad de campo eléctrico (E), la intensidad de campo magnético (H), la densidad de flujo magnético (B), la densidad de potencia (S) y las corrientes que fluyen a través de las extremidades (I_L). Las cantidades que están dirigidas a la percepción y otros efectos indirectos son las corrientes de contacto (I_C) y, para campos pulsantes, la absorción específica de energía (*specific absorption SA*, por su siglas en inglés). En cualquier situación de exposición particular, los valores medidos o calculados de cualquiera de estas cantidades pueden ser comparados con el nivel de referencia apropiado. Respetar los niveles de referencia asegurará que se respeten las restricciones básicas relevantes.

Si los valores medidos o calculados exceden los niveles de referencia, no necesariamente son excedidas las restricciones básicas. Sin embargo, siempre que un nivel de referencia sea excedido, es necesario evaluar el cumplimiento de la restricción básica relevante y determinar si son necesarias medidas de protección adicionales.

Estas recomendaciones no están dirigidas a producir estándares funcionales, los cuales estén destinados a limitar las emisiones de los CEM bajo condiciones específicas de prueba; tampoco se trata sobre las técnicas que se utilicen para medir cualquiera de las cantidades físicas que caracterizan a los campos magnéticos, eléctricos y electromagnéticos.

Respetar las recomendaciones no necesariamente excluye interferencias con, o efectos sobre, dispositivos médicos tales como prótesis metálicas, marcapasos y desfibriladores cardíacos, e implantes cocleares. La interferencia con marcapasos puede ocurrir a niveles por debajo de los niveles de referencia recomendados. Consejos para evitar estos problemas están fuera del alcance de la presente investigación; pero están disponibles en documentos como (UNEP /OMS /IRPA 1993).

1.2. Cantidades electromagnéticas básicas

Para propósitos de definición, la unidad de fuerza y carga respectivamente son un newton (N) y un coulomb (C), la unidad de campo eléctrico E es un newton por coulomb que es además un volt por metro (V/m). La unidad de la inducción magnética B es un volt sobre segundo por metro al cuadrado, también llamado tesla (T).

El campo eléctrico E , y la inducción magnética B , obedecen a la siguiente relación, escrita en su forma diferencial e integral:

$$\nabla \times E = \frac{\partial B}{\partial t} \quad (1)$$

$$\oint_C E \cdot dC = -\frac{\partial}{\partial t} \iint_S B \cdot dS \quad (1')$$

Estrictamente relacionados con el campo eléctrico E y el campo de flujo magnético B , están el campo de desplazamiento eléctrico o inducción eléctrica D y la intensidad de campo o campo magnético H , que obedecen a la siguiente relación, escrita en forma diferencial e integral:

$$\nabla \times H = \frac{\partial D}{\partial t} + J, \quad (2)(2')$$

$$\oint_C H \cdot dC = -\frac{\partial}{\partial t} \iint_S D \cdot dS + \iint_S J \cdot dS$$

donde J es la densidad de corriente en amperio por metro al cuadrado (A/m^2) la unidad de inducción eléctrica D es un coulomb por metro al cuadrado (C/m^2) y la unidad de campo magnético H , es un amperio por metro (A/m). Paralelamente en medios no dispersivos $J = \sigma E$, $D = \varepsilon E$, $B = \mu H$, donde σ , ε , μ , son cantidades escalares dependientes de la posición. La conductividad σ se mide en siemens por metro (S/m), la permitividad ε en faradios por metro (F/m), la permeabilidad μ en henrios por metro (H/m). Dejemos todas las componentes escalares de estas cantidades vectoriales ser funciones senoidales de tiempo.

Por ejemplo:

$$E_x(P, t) = E_{xM}(P) \cos[\phi_x(P) + \omega t] \quad (3)$$

donde la amplitud E_{xM} , la fase en el tiempo $t = 0$, ϕ_x , son funciones del punto P. La frecuencia angular es $\omega (=2\pi/T = 2\pi f)$, T es el período y f es la frecuencia. El valor de la raíz cuadrada media (rms) está dada por:

$$E_{x \text{ rms}}(P) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T E_x^2(P, t) dt} = \frac{1}{\sqrt{2}} E_{xM}(P) \quad (4)$$

La ecuación (3) puede ser reescrita como:

$$E_x(P, t) = \sqrt{2} E_{x \text{ rms}}(P) \cdot \cos[\phi_x(P) + \omega t] \quad (5)$$

o como:

$$E_x(P, t) = \sqrt{2} \text{Re}[E_{x \text{ rms}}(P) e^{j\phi_x(P)} \cdot e^{j\omega t}] \quad (6)$$

donde obviamente hablamos de la parte real. Colocando $E_{x \text{ rms}}(P) \exp[j\phi_x(P)] = E_x(P)$, la ecuación (6) puede ser reescrita como:

$$E_x(P, t) = \text{Re}[E_x(P) e^{j\omega t}] \quad (7)$$

que en forma vectorial se tiene:

$$E(P, t) = \sqrt{2} \text{Re}[E(P) \cdot e^{j\omega t}] \quad (8)$$

donde el vector complejo $E(P)$ es el fasor rms del campo eléctrico.

En tiempo invariable, lineal, isotrópico, *en un medio con posible dispersión*

$$\begin{aligned} J &= \sigma(\omega) E, \\ D &= \epsilon(\omega) E, \\ B &= \mu(\omega) H, \end{aligned} \quad (9)$$

En términos de tales cantidades fasoriales, la ecuación (2) se vuelve:

$$\nabla \times H = j\omega \epsilon E + \sigma E = j\omega \left(\epsilon + \frac{\sigma}{j\omega} \right) E \quad (10)$$

de (Collin, 1985; Harrington, 1961):

$$\begin{aligned} \epsilon &= \epsilon_1 - j\epsilon_2, \\ \epsilon_1 &= \epsilon_0 \epsilon', \\ \epsilon_2 + \sigma/\omega &= \epsilon_0 \epsilon'' = \sigma_{\text{eq}} / \omega. \end{aligned} \quad (11)$$

La ecuación (10) puede reescribirse como:

$$\nabla \times H = j\omega \epsilon_0 (\epsilon' - j\epsilon'') E \quad (12)$$

donde $(\epsilon' - j\epsilon'')$ es la permitividad relativa compleja equivalente, σ toma en cuenta pérdidas óhmicas, ϵ_2 toma en cuenta pérdidas dieléctricas, $\sigma_{\text{eq}} (= \omega\epsilon_0 \epsilon'')$ toma en cuenta ambos tipos de pérdidas; la *potencia disipada por unidad de volumen* está dada por:

$$P_r = \sigma_{\text{eq}} |E|^2 = \omega \epsilon_0 \epsilon'' |E|^2 \quad [\text{W/m}^3]. \quad (13)$$

La conductividad equivalente, σ_{eq} , es a veces solo σ , pero debe interpretarse como una conductividad aproximada. Así las ondas electromagnéticas según su frecuencia tienen la siguiente distribución según su uso:

Tabla I. El espectro electromagnético.

Espectro de Radiación Electromagnética			
Región Radiación No Ionizante (RNI), Radiación Ionizante (RI)	Longitud de onda en centímetros	Frecuencia (Hz)	Energía (eV)
Radio y TV (RNI)	> 10	< 3×10^9	< 10^{-5}
Microonda (RNI)	10 - 0.01	3×10^9 - 3×10^{12}	10^{-5} - 0.01
Infrarojo (RNI)	0.01 - 7×10^{-5}	3×10^{12} - 4.3×10^{14}	0.01 - 2
Luz visible (RNI)	7×10^{-5} - 4×10^{-5}	4.3×10^{14} - 7.5×10^{14}	2 - 3
Ultravioleta (RI)	4×10^{-5} - 10^{-7}	7.5×10^{14} - 3×10^{17}	3 - 10^3
Rayos-X (RI)	10^{-7} - 10^{-9}	3×10^{17} - 3×10^{19}	10^3 - 10^5
Rayos Gamma (RI)	< 10^{-9}	> 3×10^{19}	> 10^5

1.2.1. Ondas planas armónicas en el tiempo

Una onda plana armónica en el tiempo homogénea es un campo electromagnético armónico en el tiempo que varía en el espacio sólo a lo largo de cierta dirección dada (digamos z). Esta distribución espacial tiene una forma senoidal que viaja (se propaga) a lo largo de esta dirección. Los vectores E y H son mutuamente perpendiculares y perpendiculares a la dirección de propagación.

Una onda plana armónica en el tiempo se dice que está polarizada linealmente cuando la dirección del campo vectorial es siempre y en cualquier lugar la misma. A lo largo de la dirección de propagación (z) la fase cambia linealmente con el espacio [$\exp(-j\beta z)$] acorde a la constante de fase $\beta = 2\pi/\lambda$. La unidad de β es un radián por metro (rad/m). A lo largo de la dirección de propagación también cambia la amplitud, acorde a [$\exp(-\alpha z)$], siendo α la constante de atenuación. La unidad de α es un neper por metro (1 / m). El recíproco de α ($1 / \alpha = \delta$) es la distancia sobre la cual el campo se reduce por un factor de $1 / e = 0.37$ (~8.7 dB). Estas constantes de amplitud y fase, y la constante compleja de propagación $k = \beta - j\alpha$ depende de los parámetros del medio; en medios biológicos ($\mu = \mu_0$).

$$\kappa = \beta - j\alpha = \omega \sqrt{(\epsilon' - j\epsilon'')\epsilon_0\mu_0} = k_0 \sqrt{(\epsilon' - j\epsilon'')} \quad (14)$$

$$\beta = k_0 \sqrt{\frac{|\epsilon_r| + \epsilon'}{2}}, \quad (15)$$

$$\alpha = k_0 \sqrt{\frac{|\epsilon_r| - \epsilon'}{2}}, \quad (16)$$

$\kappa_0 = \omega \sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$, (constante de propagación en el vacío)

$$y \quad |\epsilon_r| = \sqrt{(\epsilon' \quad ^2 - j\epsilon'' \quad ^2)}, \quad (17)$$

En ondas planas un flujo de potencia ocurre a lo largo de la dirección de propagación y sobre cada plano perpendicular a esta dirección, la densidad superficial de potencia compleja en el caso de una polarización lineal, está dada por:

$$|E|^2 / \zeta = \zeta |H|^2 \quad [W/m^2], \quad (18)$$

donde $\zeta_0 = 377 \quad \Omega$ en el espacio libre y

$$\zeta = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad (19)$$

es la *impedancia intrínseca del medio*. La unidad de ζ es un ohm (Ω).

En medios biológicos:

$$\zeta = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0(\epsilon' - j\epsilon'' \quad)}} \quad (20)$$

En el caso $\epsilon' \ll \epsilon''$ (tejidos de alta pérdida):

$$\zeta = \sqrt{\frac{\mu_0}{-j\epsilon_0\epsilon'' \quad }} = \sqrt{\frac{j\omega\mu_0}{\sigma_{eq}}} \quad (21)$$

En el caso de una discontinuidad (dos espacios medios, unidos a lo largo de un plano y teniendo impedancias intrínsecas ζ_1 y ζ_2) en vez de una onda plana simple, se debe considerar en general, una onda incidente, una onda reflejada y una onda transmitida. En el caso de que el plano de discontinuidad sea perpendicular a la dirección de propagación (incidencia normal) el campo eléctrico reflejado E_r , puede ser fácilmente calculado desde la onda incidente E_i , a través del coeficiente de reflexión Γ :

$$E_r = \Gamma E_i , \quad (22)$$

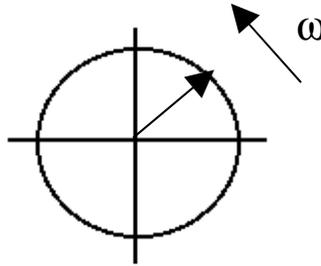
$$\Gamma = \frac{\zeta_2 - \zeta_1}{\zeta_2 + \zeta_1} \quad (23)$$

La parte real de la densidad de potencia incidente multiplicada por $|\Gamma|^2$ da la parte real de la densidad de potencia reflejada, y la parte real de densidad de potencia incidente multiplicada por $(1 - |\Gamma|^2)$ da la parte real de la densidad de potencia transmitida.

Sabemos que dadas dos ondas planas a la misma frecuencia, propagándose a lo largo de la misma dirección, linealmente polarizadas (pensemos, por ejemplo, en la direcciones de E) y mutuamente perpendiculares, existe una diferencia de fase $\Delta\phi = n\pi$ ($n = 0, 1, 2, 3, \dots$), que por superposición produce una nueva onda, cuya amplitud y polarización dependen de las dos ondas componentes. Si por el contrario, existe una diferencia de fase $\Delta\phi = \pi / 2 + n\pi$ y las amplitudes de las dos ondas son las mismas, el campo resultante tiene una amplitud constante, pero su dirección cambia acorde a la fase ($\omega t - \beta z$) por ejemplo:

En un punto dado z , el campo rota con velocidad angular ω : polarización circular, figura 1. En el caso que las amplitudes de las dos ondas no son las mismas, o la diferencia de fase no es $(n\pi)$ ni $(\pi/2 + n\pi)$, el campo resultante está elípticamente polarizado, por ejemplo a un punto dado z este rota, variando periódicamente tanto la amplitud como la velocidad angular.

Figura 1. Polarización circular izquierda. El vector de propagación apunta hacia el observador.



Fuente: Franceschetti, Giorgio y otros. *Electromagnetic Biointeraction. Mechanisms, Safety Standards, Protection Guides*. Pág. 7

1.2.2. Regiones alrededor de una antena

En la región del espacio muy cercana a una antena, o más generalmente, a una fuente de radiofrecuencia o microonda (por ejemplo teléfonos celulares) los vectores eléctricos y magnéticos varían acorde a patrones complejos. Es principalmente en esta región, limitada hasta una distancia menor que λ , que los fenómenos reactivos toman lugar (*región de campo reactivo*).

La densidad de potencia máxima frente a la antena (por ejemplo, en la superficie) se define aproximadamente como:

$$S_{superficie} = 4 \frac{P}{A} \tag{24}$$

Donde: $S_{\text{superficie}}$ = Densidad de potencia máxima en la superficie de la antena

P = Potencia de alimentación de la antena

A = Área física de la apertura de la antena

El espacio afuera de dicha región es caracterizado por campos que contribuyen con la potencia radiada por la antena y se define como *región de campo radiante o zona Fresnel*. La densidad de potencia puede alcanzar un máximo antes de empezar a decrecer con la distancia que se define como:

$$R_{nf} = \frac{D^2}{4\lambda} \quad (25)$$

Donde: R_{nf} = Radio de Fresnel

D = Dimensión máxima de la antena (diámetro si es circular)

λ = Longitud de onda

La magnitud de la densidad de potencia (lóbulo principal) varía acorde a la posición en el campo cercano, sin embargo su valor máximo puede ser expresado como sigue:

$$S_{nf} = \frac{16\eta P}{\pi D^2} \quad (26)$$

Donde: S_{nf} = Densidad de potencia máxima de campo cercano

η = Eficiencia de la apertura, típicamente entre 0.5 – 0.75

P = Potencia de alimentación de la antena

D = Diámetro de la antena

Además en esta región, la amplitud de campo puede seguir oscilando si uno se mueve a lo largo de una dirección prescrita alejándose de la fuente; esto es debido al cambio en la diferencia de fase, entre las contribuciones que surgen desde variados elementos superficiales de una antena. La densidad de potencia en la *región de transición* decrece inversamente con la distancia desde la antena, mientras la densidad de potencia en la *región de campo lejano o región Fraunhofer* de la antena, decrece inversamente *al cuadrado* de la distancia. Para propósitos de evaluación de exposición a campos de radiofrecuencia, la distancia al comienzo de la región de campo lejano (la más lejana extensión de la región de transición) puede ser aproximada por la siguiente ecuación:

$$R_{cl} = \frac{0.6 D^2}{\lambda} \quad (27)$$

Donde: R_{cl} = Distancia al comienzo del campo lejano
 D = Diámetro de la antena
 λ = Longitud de onda

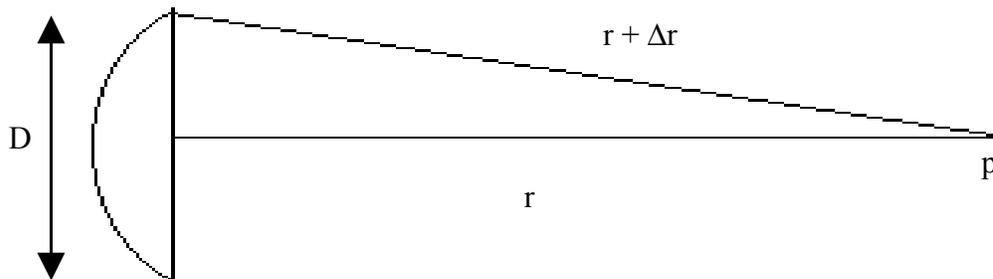
La región de transición será entonces la región que se extiende desde R_{nf} de ecuación 25 y R_{cl} . Si la posición de interés está dentro de la región de transición, la densidad de potencia se determina por la siguiente ecuación:

$$S_t = \frac{S_{nf} R_{nf}}{R} \quad (28)$$

Donde: S_t = la densidad de potencia en la región de transición,
 S_{nf} = la densidad de potencia máxima del campo cercano,
 R_{nf} = la extensión del campo cercano y
 R = la distancia al punto de interés P.

La región de campo radiante lejano comienza a una distancia tal que los cambios en las diferencias de fase pueden ignorarse, y a lo largo de una dirección dada, la amplitud del campo decae monótonamente (Hansen, 1964). A distancias r a lo largo del eje axial de la antena (figura 2), mucho mayores que la dimensión D ($r \gg D$), la condición adicional $r > 2 D^2 / \lambda$ asegura que la diferencia de paso máxima Δr (figura 2) es menor que $\lambda / 16$. En el rango de microondas la antena es usualmente de muchas longitudes de onda de ancho ($D \gg \lambda$); en este caso $2 D^2 / \lambda$ es $\gg D$ ($\gg \lambda$) y un incremento en la distancia r más allá del límite $2 D^2 / \lambda$, tiene como consecuencia un decremento de amplitud de campo en $1 / r^2$ (Hansen, 1964).

Figura 2. Una antena transmisora de apertura circular, y un punto de recepción P a una distancia r del axis de la antena. D es el diámetro de la antena y Δr es la diferencia de paso máxima entre varios elementos de apertura y el punto de recepción P.



Fuente: Franceschetti, Giorgio y otros. *Electromagnetic Biointeraction. Mechanisms, Safety Standards, Protection Guides*. Pág. 8

La densidad de potencia en la región de campo lejano del patrón de una antena puede ser estimado por la ecuación general:

$$S_{cl} = \frac{PG}{4\pi R^2} \quad (29)$$

Donde: S_{cl} = la densidad de potencia (en el eje),
 P = la potencia de alimentación de la antena,
 G = la ganancia de la antena en la dirección de interés relativa a un radiador isotrópico,
 R = la distancia al punto de interés P .

Las densidades de potencia sobre el eje así representadas, estiman los niveles máximos de exposición que un determinado sistema puede producir; fuera del eje las densidades de potencia serán considerablemente menores. En el rango de microondas la distancia ($r = 2 D^2 / \lambda$) es usualmente asumida como el límite de la región de campo lejano. A frecuencias más bajas (a frecuencias medias, por ejemplo) la antena puede ser corta en términos de su longitud de onda ($D \ll \lambda$). En este caso $r = 2 D^2 / \lambda$ ($\gg D \gg \lambda$) es una distancia que disminuye con la región reactiva, y una distancia mayor debe ser elegida como el límite de la región del campo lejano. Una elección adecuada en las condiciones mencionadas puede ser $r = \lambda$, y una regla general para todas las frecuencias, es asumir la distancia más grande entre $2 D^2 / \lambda$ y λ como el límite entre las regiones de campo cercano y lejano.

1.3. Exposición y parámetros de absorción

El campo electromagnético que existe en una región dada del espacio libre se conoce como *campo incidente* con referencia a un cuerpo que debería subsecuentemente ser posicionado en esta región. Debe ser acentuado que una vez el cuerpo es puesto en esta región, el campo actual, tanto dentro como fuera del cuerpo deberá ser muy diferente del incidente.

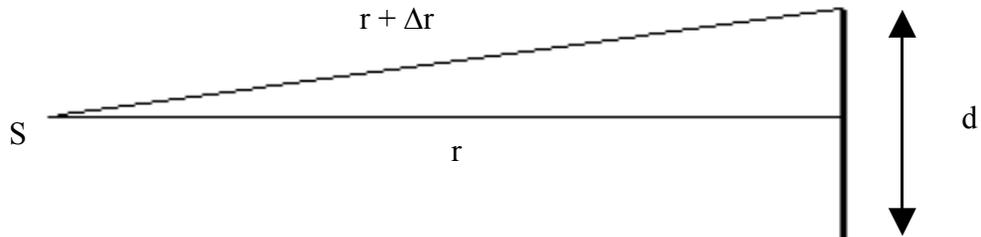
El campo incidente describe las *condiciones de exposición* de un cuerpo. Por definición estas condiciones de exposición son dependientes de la fuente y de la posición con respecto a la fuente, pero no son dependientes del cuerpo expuesto. Una antena radiante, a distancias r mucho más grandes que la longitud de onda ($r \gg \lambda$) y la anchura de la antena ($r \gg D$, Fig. 2), puede ser vista como una fuente puntual S radiando una onda esférica. A estas distancias la iluminación es igual en fase sobre una dimensión transversal pequeña d (fig. 3) con respecto a la distancia ($d \ll r$) y que satisface la condición adicional $d < \sqrt{r\lambda/2}$ ($r > 2d^2/\lambda$). De hecho la diferencia de camino máxima Δr sobre d es menos que $\lambda/16$ y la diferencia de fase máxima es menos que $(2\pi/\lambda)(\lambda/16) = \pi/8$.

En adición, para muchos orígenes prácticos, bajo estas condiciones la disminución de amplitud sobre d es despreciable, de manera que se obtiene una onda plana iluminando d .

En el espacio libre la densidad de potencia de la onda plana es real y es dada tanto por $|E|^2 / \zeta_0$ como por $\zeta_0 |H|^2$ (polarización lineal, ecuación (18)), de manera que bajo las condiciones de onda plana en el campo lejano, las intensidades de ambos campos eléctricos y magnéticos pueden ser fácilmente calculadas una vez que la densidad de potencia es conocida.

De lo contrario en la zona de campo cercano, donde patrones más complejos toman lugar, los campos eléctricos y magnéticos deben ser especificados independientemente en cada punto.

Figura 3. Una fuente puntual S a una distancia r sobre el eje de un objetivo plano circular de diámetro d. Δr es la diferencia de paso máxima entre el origen y los varios elementos de la superficie del objetivo.



Fuente: Franceschetti, Giorgio y otros. *Electromagnetic Biointeraction. Mechanisms, Safety Standards, Protection Guides*. Pág. 9

Una vez el cuerpo es expuesto al campo, alguna cantidad de potencia P en watts puede ser absorbida por el cuerpo mismo, y esta potencia depende tanto de las condiciones de exposición como de el cuerpo expuesto.

La potencia absorbida P, dividida por el volumen V del cuerpo da la *densidad de volumen promedio de potencia absorbida* (en todo el cuerpo) expresada en watts por metro cúbico (W/m^3). Con referencia a un elemento de volumen decreciente ΔV sobre un punto dado en el cuerpo, tenemos la razón dP/dV , que a nivel local es la *densidad volumétrica de potencia absorbida*.

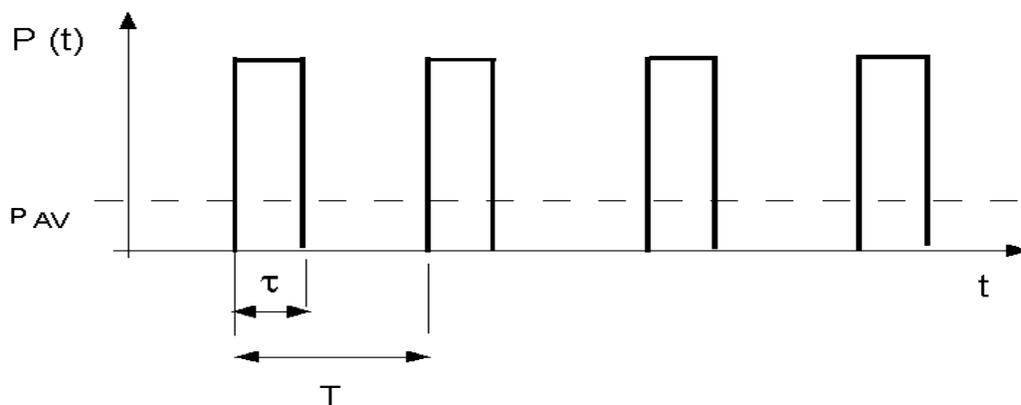
Como se dijo antes en la ecuación (13), en un medio material que no tiene pérdidas magnéticas sino permitividad compleja $\epsilon_0(\epsilon' - j\epsilon'')$, la densidad local volumétrica de la potencia absorbida puede ser relacionada con la intensidad de campo eléctrico local (interno) rms $|E|$ como sigue:

$$dP/dV = \sigma_{eq} |E|^2 = \omega \epsilon_0 \epsilon'' |E|^2 \quad (W/m^3) \quad (30)$$

Si uno refiere la potencia absorbida P a la masa del cuerpo M en vez de a su volumen, se tiene (sobre todo el cuerpo) la *densidad de masa promedio de potencia absorbida* expresada en watts por kilogramo [W/kg], y la densidad de potencia absorbida por masa localizada, dP / dM . La densidad de masa de potencia absorbida (sobre todo el cuerpo o localizada) es usualmente indicada como el promedio sobre el cuerpo completo, o promedio local, que es la razón específica de absorción, o *specific absorption rate (SAR)*, por sus siglas en inglés. El SAR localizado en la superficie del cuerpo humano puede ser muy alto a longitudes de onda milimétricas (Gandhi y Riazzi, 1986) y crece linealmente con la frecuencia en el límite de alta frecuencia (Franceschetti, 1988).

La potencia absorbida P , con la que tratamos, puede variar en tiempo debido a cambios en las condiciones de exposición (campo incidente) o debido a cambios (por ejemplo orientación) del cuerpo con respecto al campo incidente. El caso anterior puede ocurrir debido a condiciones específicas de la fuente: por ejemplo generadores de radar dan altos niveles, pero sólo durante pequeños intervalos de tiempo, seguidos por largos intervalos de cero potencia (figura 4).

**Figura 4. Patrón de potencia de un generador de RADAR. T = período.
 τ = ancho del pulso. τ / T = duración del ciclo.**



Fuente: Franceschetti, Giorgio y otros. *Electromagnetic Biointeraction. Mechanisms, Safety Standards, Protection Guides*. Pág. 10

En tales condiciones de onda de pulso, se tiene un valor de potencia pico P_M y un valor de potencia promedio P_{AV} :

$$P_{AV} = P_M \cdot \tau / T \quad (31)$$

donde τ / T es el ciclo de duración del pulso.

Más generalmente, una vez que la dependencia del tiempo de la potencia absorbida $P = P(t)$ es conocida, se obtiene la *energía absorbida (dosis)* integrando sobre un intervalo de tiempo (t_1, t_2) :

$$\int_{t_1}^{t_2} P(t) dt \quad \text{watt} * \text{segundo} = \text{joule} [J] \quad (32)$$

y la *densidad promedio de potencia absorbida*:

$$\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} P(t) dt \quad \text{watt} (W) \quad (33)$$

1.4. Mención de cantidades físicas

Para propósitos de una legislación, en términos de Campos Electromagnéticos se ha de incluir los campos estáticos, como campos de ultrabaja frecuencia y los campos de radiofrecuencia incluyendo microondas, abarcando el rango de frecuencias de 0 Hz a 300 GHz. En el contexto de exposición a campos electromagnéticos ocho cantidades físicas son comúnmente usadas:

1. La corriente de contacto (I_c) entre una persona y un objeto es expresada en amperios (A). Un objeto conductor en un campo eléctrico puede ser cargado por el campo.
2. La densidad de corriente (J) es definida como la corriente que fluye a través de una unidad de sección transversal perpendicular a su dirección, en el volumen de un conductor tal como el cuerpo humano o una parte de él, expresado en amperios sobre metro cuadrado (A/m^2).
3. La intensidad de campo eléctrico es una cantidad vectorial (E) que corresponde a la fuerza ejercida en una partícula cargada sin tomar en cuenta su movimiento en el espacio. Está expresada en voltios por metro (V/m).
4. La intensidad de campo magnético es una cantidad vectorial (H), la cual junto con la densidad de flujo magnético, especifica un campo magnético en cualquier punto en el espacio. Está expresada en amperios sobre metro (A/m).
5. La densidad de flujo magnético es una cantidad vectorial (B), resultando en una fuerza que actúa sobre cargas en movimiento, es expresada en teslas (T). En el espacio libre y en materiales biológicos, la densidad de flujo magnético y la intensidad de campo magnético pueden ser intercambiadas usando la equivalencia $1 A/m = 4\pi \cdot 10^{-7} T$.
6. La densidad de potencia (S) es la cantidad apropiada usada para muy alta frecuencia, donde la profundidad de penetración en el cuerpo es baja. Es la potencia incidente de radiación perpendicular a la superficie, dividida por el área de la superficie, y es expresada en watts sobre metro al cuadrado (W/m^2).

7. La absorción específica de energía (SA) está definida como la energía absorbida por unidad de masa de tejido biológico, expresada en joules sobre kilogramo (J/kg). En la normalización esto es usado para limitar los efectos no térmicos de la radiación de pulso de microonda.

8. La medida de absorción específica de energía (SAR), promediada sobre todo el cuerpo o sobre partes del cuerpo, es definida como la medida a la cual la energía es absorbida por unidad de masa de tejido del cuerpo, y es expresada en watts sobre kilogramo (W/kg). El SAR sobre todo el cuerpo es una medida ampliamente aceptada para relacionar efectos térmicos adversos con la exposición a radiofrecuencia. Además del promedio de SAR sobre todo el cuerpo, valores de SAR localizados son necesarios para evaluar y limitar la localización excesiva de energía en pequeñas partes del cuerpo, resultantes de condiciones especiales de exposición. Ejemplos de tales condiciones son: individuos aterrizados expuestos a radiofrecuencias en el rango bajo de MHz, e individuos expuestos en el campo cercano de una antena.

De estas cantidades, la densidad de flujo magnético, la corriente de contacto, las intensidades de campo eléctrico y magnético, y la densidad de potencia pueden ser medidas directamente.

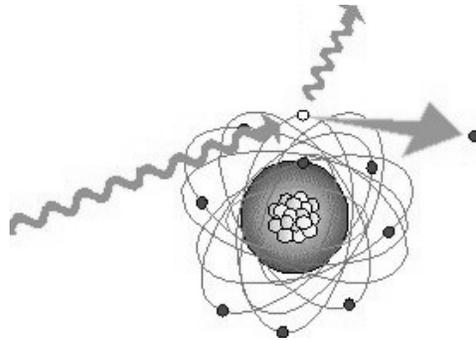
1.4.1. Dosimetría

La radiación es el transporte de energía por ondas electromagnéticas o por partículas atómicas, donde se hace necesario definir la diferencia entre estos dos tipos de radiación, que son la no-ionizante y la ionizante, respectivamente.

La radiación ionizante tiene suficiente energía para romper enlaces químicos y separar electrones de sus átomos y moléculas, creando iones en el material irradiado. A su vez la radiación ionizante consiste de radiación directa e indirecta. La ionización directa es llevada a cabo por partículas cargadas (electrones, positrones, protones, partículas alfa, iones pesados) con suficiente energía para ionizar o excitar átomos o moléculas (figura 5).

La radiación indirecta es llevada a cabo por partículas sin carga (fotones, neutrones) que son puestas en movimiento directamente por radiación ionizante (partículas cargadas) o que pueden iniciar transformaciones nucleares.

Figura 5. Modelo de interacción con radiaciones ionizantes.



Fuente: Durney, C. H. y otros. *Radiofrequency radiation dosimetry handbook*. Pág. 23.

Radiación con menor energía que la requerida para producir iones en el material irradiado, es llamada no-ionizante. La radiación ultravioleta (con excepción de la de mayor energía al final del espectro ultravioleta), luz visible, luz infrarroja, microondas y radioondas, son todas no-ionizantes. Dosis absorbida es la cantidad de energía dada en el medio por unidad de masa. Es medida en gray (Gy) definida como joule por kilogramo (J/kg). La dosimetría determina la dosis absorbida y su interpretación física.

A diferencia de la radiación ionizante, donde la *sección transversal de absorción* del objeto biológico está directamente relacionada con su *sección transversal física*, ha sido demostrado que la absorción de radiación no-ionizante (energía electromagnética) sobre el cuerpo completo, depende mayoritariamente de su polarización (orientación del campo eléctrico E de las ondas incidentes), frecuencia, y ambientes físicos como la presencia de la tierra y otras superficies reflejantes. De Gandhi, 1980; Durney, 1980) tenemos:

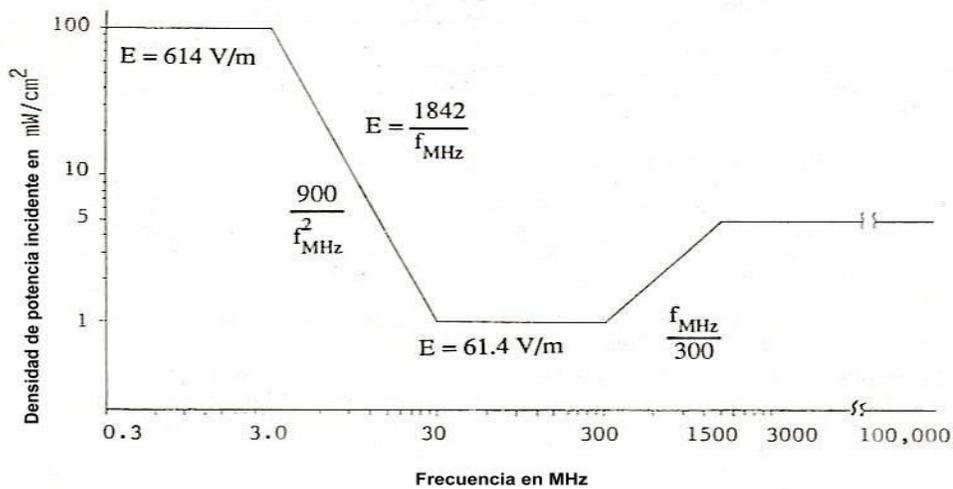
A. Para un campo incidente a lo largo de la altura de un cuerpo humano para frecuencias tales que la altura h sea aproximadamente 0.36 a 0.4 veces la longitud de onda (λ), es absorbida la máxima energía de la irradiación en el espacio libre. Para un individuo de 1.75 metros de altura, esto corresponde a una frecuencia del orden de 65 a 70 MHz. La potencia absorbida bajo estas condiciones es 4.2 mayor dependiendo de las consideraciones físicas de la sección transversal. Esta es la *región resonante de absorción* de radiación electromagnética (Gandhi, 1975).

B. Para frecuencias fuera de la región resonante, se ha observado una dependencia del tipo f^2 para la energía absorbida, donde f es la frecuencia de radiación (Durney et al., 1978). Fuera de la región resonante, la potencia absorbida se reduce como $1 / f$, acercándose gradualmente al valor que correspondería aproximadamente a la mitad del valor basado en consideraciones físicas de la sección transversal.

C. Para un humano parado sobre un suelo altamente conductivo, la frecuencia para la máxima absorción es aproximadamente la mitad que sin el suelo; o sea, aproximadamente 35 MHz. A la nueva frecuencia de resonancia, la potencia absorbida es algo mayor y corresponde aproximadamente 8 veces más que la proyectada desde las consideraciones físicas para sección transversal (Gandhi et al., 1977; Hill, 1984; Guy y Chou, 1982).

En la Figura 6, se observa como ejemplo, una norma de 1982 del Instituto Americano de Estándares Nacionales o ANSI por sus siglas en inglés, en la que se observan las magnitudes de potencia absorbida según la frecuencia.

Figura 6. Norma ANSI 1982 de potencia absorbida por exposición humana a campos electromagnéticos de RF.



Fuente: Franceschetti, Giorgio y otros. *Electromagnetic Biointeraction. Mechanisms, Safety Standards, Protection Guides*. Pág. 12.

La norma de protección recomienda como seguro un nivel de densidad de potencia de 100 mW/cm² (campo eléctrico E = 614 V/m), para la región de frecuencia de 0.3 a 3.0 MHz con un nivel de seguridad reduciéndose como 900/f²_{MHz} mW/cm² (E = 1842 f_{MHz} V/m, donde f_{MHz} es la frecuencia en MHz) para la región de frecuencia de 3.0 a 30.0 MHz hacia un valle de densidad de potencia P = 1 mW/cm² (E ~ 61.4 V/m) para la banda de frecuencia de 30 a 300 MHz. La norma había sido recomendada para asegurar que el SAR promediado sobre el cuerpo entero no excediera los 0.4 W/kg para cualquier tamaño o edad humano.

La información dosimétrica sobre absorción de energía EM en seres humanos (Gandhi, 1975, 1979; Durney et al., 1978) fue usada para obtener la densidad de potencia como función de la frecuencia, de manera que bajo las peores circunstancias (Campo E a lo largo de la altura del cuerpo, aterrizado o no aterrizado), el SAR promedio sobre todo el cuerpo fuera menor que 0.4 W/kg. Pero reconociendo la naturaleza muy poco uniforme del SAR este valor fue elevándose según las herramientas de medición disponibles hasta la fecha, por lo que actualmente está elevado en las normas europeas hasta el valor actual de límite básico del SAR localizado de 2 W/Kg promediado sobre 10 gramos de tejido.

1.5. Exigencias legales de SAR sobre sistemas de emisión electromagnética

Productores de sistemas de emisión electromagnética deben hacer una evaluación de conformidad de sus productos para su aceptación en el mercado europeo y estadounidense según la norma R&TTE (*Radio and Telecommunications Terminal Equipment – Equipo Terminal de Radio y Telecomunicaciones*), estos aparatos requieren de un permiso de aceptación.

Las normas van dirigidas tanto a los productores como a los comerciantes de aparatos de radioemisoras y hace un resumen del tema "protección de la salud del usuario" de campos electromagnéticos.

La protección de la salud del usuario es uno de los requisitos básicos de la norma R&TTE. La comprobación de los requisitos básicos se cumple ya sea por la aplicación de normas aceptadas por la comunidad europea, o por medio de la conexión a una locación específica.

El desarrollo de las normas se llevó a cabo bajo el mandato de la Comisión Europea (CE) en las instituciones de normalización europea. Todos los estados miembros de la Unión Europea asumen que se han cumplido los requisitos básicos, si un aparato satisface las exigencias de las normas europeas (suposición de conformidad). La consideración de una locación específica sólo se hace necesaria cuando no se puede referir a una norma aceptada.

Las normas genéricas se aplican a los productos para los cuales aún no existen normas específicas, la norma EN 50371 (armonizada desde 10/8/2002) se aplica a aparatos electrónicos y eléctricos con una potencia de emisión de 20 mW o menos, su cálculo o medición no requiere de una disposición explícita del SAR, sino que parte de la adherencia a la recomendación de la comisión europea de 1999/519/EG acerca de los límites SAR, ya que no puede ser excedido el valor límite básico del SAR localizado de 2 W/Kg promediado sobre 10 gramos de tejido. La norma EN 50383 sugiere un procedimiento de referencia y un procedimiento alternativo, dependiendo de la distancia que se tiene de la emisora.

El procedimiento de *referencia* se conoce por ser el procedimiento más exacto que existe actualmente, y se debe aplicar cuando hay diferencia de opinión. Para la exposición en el campo cercano reactivo e irradiado de la fuente de radiación, la medición SAR se define como el procedimiento de referencia. En contraste con las normas EN 50383/384/385, la norma prEN 50401 y su complementaria norma básica prEN 50400, no se encargan de regular la integración al mercado sino la entrada en operación de estaciones celulares y de aparatos participantes de estaciones de telecomunicaciones inalámbricas en sus ambientes de operación.

Al usar aparatos de emisión de radio cerca del cuerpo, el calentamiento del tejido causado por la radiación electromagnética de alta frecuencia, se puede estimar por medio de los valores límites básicos. Estos están determinados como valores límite del SAR medidos en W/kg e indican la intensidad de radiación absorbida por masa de tejido. Las mediciones en la práctica para el establecimiento de las normas, se basan en criterios experimentales llevados a cabo con SAM (*Specific Antropomophic Mannequin*), maniqués de prueba con forma humanoide, y otras configuraciones que dentro poseen un liquido dieléctrico que simula el tejido humano; estos son sometidos a radiaciones electromagnéticas para observar la respuesta SAR y establecer límites de seguridad para las personas.

La norma EN 50383 establece que el maniquí debe ser posicionado de tal manera que la superficie de la antena emisora esté paralela a la superficie del maniquí y que el punto medio de las antenas esté posicionado exactamente debajo del punto medio del maniquí. Al utilizar antenas direccionales de microonda, estas se deben posicionar de tal manera que el lóbulo de radiación máximo esté perpendicular a la superficie del maniquí. En Alemania el máximo de radiación relativo al lóbulo principal, es referido a una medida volumétrica y se toma sobre el 50% del máximo absoluto de radiación.

Por esta razón se analizan volumétricamente en el liquido dieléctrico, todas las respuestas de éste a la radiación que estén arriba del 50% del máximo absoluto de radiación, lo cual se analiza por porciones volumétricas menores a 5 mm. En la posición que tenga el mayor SAR promedio, se evalúan también los límites superiores e inferiores de la banda de frecuencia. Esto tiene como objetivo el establecimiento de límites seguros de exposición a la radiación no-ionizante.

2. NORMALIZACIÓN ALEMANA

2.1. Criterios

Siendo Alemania parte de la Unión Europea y teniendo en cuenta que como ente regional establece medidas de protección para sus ciudadanos, dentro de la legislación vigente para las comunidades europeas se establece por medio de convenios la estructuración regional de normativas de alto nivel dirigidas a la protección de la salud, cuyas ascensiones protegen tanto a trabajadores como a consumidores.

En el campo de las radiaciones llamadas no-ionizantes, la Comunidad Europea propone medidas legislativas dirigidas a limitar la exposición de trabajadores y público en general a las mismas. Estos requerimientos mínimos para la protección de la salud y seguridad respecto a campos electromagnéticos, existen en forma de medición de radiaciones electromagnéticas y agentes físicos, cubriendo a trabajadores y entre el público en general, mujeres embarazadas o en periodo de lactancia. El respeto a estos requerimientos por parte de los empleadores, les obliga "entre otras cosas" a estimar actividades que envuelvan un riesgo específico de exposición a radiaciones no-ionizantes. Sin embargo deja a comunidades específicas la implementación de un requerimiento de protección, donde se implique un riesgo ocupacional por exposición a radiaciones electromagnéticas, siendo de carácter imperativo la protección del público en general dentro de la Comunidad Europea, contra efectos establecidos adversos a la salud que puedan resultar como consecuencia de exposición a campos electromagnéticos.

Mediciones respecto a campos electromagnéticos deberían proporcionar a todos los ciudadanos de la comunidad un alto nivel de protección, por lo que se hace necesario un marco de común acuerdo de manera que se pueda asegurar una consistencia de protección a través de la comunidad. Por ende, las acciones para limitar la exposición del público en general a la radiación electromagnética deberían lograr un balance entre salud y seguridad por una parte y los beneficios que los dispositivos de emisión electromagnética traigan a la calidad de vida en las áreas de telecomunicaciones, energía y seguridad pública, por otra.

Este marco de común acuerdo se redacta sobre el gran cuerpo de documentación científica existente y debe ser basado en los mejores datos científicos e información disponible en esta área tomando en cuenta el aspecto de precaución. Debería abarcar las restricciones básicas y los niveles de referencia en exposición a campos electromagnéticos, recalando que sólo efectos establecidos son usados como la base de la recomendación sobre limitación de exposición, dada por la Comisión Internacional para la Protección de Radiaciones No-Ionizantes, *International Commission on Non-Ionising Radiation Protection (ICNIRP)* por sus siglas en inglés o cualquier otra institución internacional competente. El marco debería ser revisado y reestimado con regularidad en la luz de nuevos conocimientos desarrollados en tecnología y aplicaciones que resulten de la exposición a campos electromagnéticos.

Tales restricciones y niveles de referencia deberían aplicarse a todas las radiaciones emitidas por campos electromagnéticos con excepción de radiación óptica y radiaciones ionizantes; ya que estas tienen otras características que necesitan un análisis específico.

Estas normativas no necesariamente evitan los problemas de interferencia o sobre funcionamiento de dispositivos médicos como prótesis metálicas, marcapasos, desfibriladores, implantes auditivos y otros implantes; problemas de interferencia con marcapasos pueden ocurrir a niveles abajo de los niveles de referencia recomendados y deben por tanto, ser objeto de precauciones apropiadas que forman parte de otra legislación que es llamada "Legislación de Compatibilidad Electromagnética y dispositivos médicos", que no forma parte de esta investigación.

También, en orden de incrementar la concientización de los riesgos, así como las medidas de protección contra campos electromagnéticos, se debe promover la diseminación de información y reglas de práctica en este campo, en particular respecto a el diseño, instalación y uso de equipo, dirigido a obtener niveles de exposición que no excedan las restricciones recomendadas.

Debe prestarse atención a lograr una apropiada comunicación y entendimiento respecto a los riesgos relacionados con campos electromagnéticos, mientras se toma en cuenta la percepción del público a tales riesgos.

Para propósitos de una legislación en términos de Campos Electromagnéticos se han de incluir los campos estáticos, como campos de ultrabaja frecuencia y campos de radiofrecuencia, incluyendo microondas, abarcando el rango de frecuencias de 0 Hz a 300 GHz.

2.1.1. Cantidades físicas

Hemos mencionado en el contexto de exposición a campos electromagnéticos ocho cantidades físicas que son comúnmente usadas:

- Corriente de contacto (I_c) entre personas y un objeto es expresado en amperios (A). Un objeto conductor en un campo eléctrico puede ser cargado por el campo.
- Densidad de corriente (J) es definida como la corriente que fluye a través de una unidad de sección transversal perpendicular a su dirección en el volumen de un conductor tal como el cuerpo humano o una parte de él, expresado en amperios sobre metro cuadrado (A/m^2).
- La intensidad de campo eléctrico es una cantidad vectorial (E) que corresponde a la fuerza ejercida en una partícula cargada sin tomar en cuenta su movimiento en el espacio. Está expresada en voltio sobre metro (V/m).
- La intensidad de campo magnético es una cantidad vectorial (H), la cual, junto con la densidad de flujo magnético, especifica un campo magnético en cualquier punto en el espacio. Está expresada en amperios sobre metro (A/m).
- Densidad de flujo magnético es una cantidad vectorial (B), resultando en una fuerza que actúa sobre cargas en movimiento, está expresada en teslas (T). En el espacio libre y en materiales biológicos, la densidad de flujo magnético y la intensidad de campo magnético pueden ser intercambiadas usando la equivalencia $1 A/m = 4\pi \cdot 10^{-7} T$.

- Densidad de potencia (S) es la cantidad apropiada usada para muy alta frecuencia, donde la profundidad de penetración en el cuerpo es baja. Es la potencia incidente de radiación perpendicular a la superficie, dividida por el área de la superficie, y es expresada en watts sobre metro cuadrado (W/m^2).
- Absorción específica de energía (SA). Está definida como la energía absorbida por unidad de masa de tejido biológico, expresada en joules sobre kilogramo (J/kg). En la normalización esto es usado para limitar los efectos no térmicos de la radiación de pulso de microonda.
- Razón de absorción específica de energía (SAR). Promediado sobre todo el cuerpo o sobre partes del cuerpo, es definido como la medida a la cual la energía es absorbida por unidad de masa de tejido del cuerpo, y es expresada en watts sobre kilogramo (W/kg). El SAR sobre todo el cuerpo es una medida ampliamente aceptada para relacionar efectos termales adversos a la exposición a radiofrecuencia. Además del promedio de SAR sobre todo el cuerpo, valores de SAR localizados son necesarios para evaluar y limitar la localización excesiva de energía en pequeñas partes del cuerpo, resultantes de condiciones especiales de exposición. Ejemplos de tales condiciones son: individuos aterrizados expuestos a radiofrecuencias en el rango bajo de MHz, e individuos expuestos en el campo cercano de una antena.

De estas cantidades, la densidad de flujo magnético, la corriente de contacto, las intensidades de campo eléctrico y magnético, y la densidad de potencia pueden ser medidas directamente.

2.1.2. Restricciones básicas y niveles de referencia

Para la aplicación de restricciones basadas en una estimación de posibles efectos a la salud por campos electromagnéticos, debe hacerse una diferenciación entre restricciones básicas y niveles de referencia. Las restricciones básicas y los niveles de referencia para la limitación de exposición han sido desarrollados siguiendo una detallada revisión de toda la literatura científica publicada, bajo el criterio de evaluar la credibilidad de varios descubrimientos reportados; sólo efectos establecidos fueron usados como base para las restricciones de exposición propuestas. Inducción de cáncer por exposición prolongada a campos electromagnéticos no fue considerada como establecida. Sin embargo, ya que existen factores de seguridad de aproximadamente 50% (sección 1.5) entre los valores umbral para efectos agudos y las restricciones básicas, la normativa implícitamente cubre posibles efectos de tiempo prolongado en todo el rango de frecuencias.

Como *restricciones básicas* se entiende la restricción sobre exposición a campos eléctricos y magnéticos variantes en el tiempo y campos electromagnéticos los cuales son basados directamente sobre efectos a la salud establecidos y consideraciones biológicas. Dependiendo de la frecuencia del campo, las cantidades físicas usadas para especificar estas restricciones son densidad de flujo magnético (B), densidad de corriente (J), razón de la absorción específica de energía (SAR), y densidad de potencia (S). La densidad de flujo magnético y la densidad de potencia pueden ser fácilmente medidas en individuos expuestos.

Como *niveles de referencia* se entienden niveles que son proporcionados para propósitos prácticos de estimación de exposición para determinar si es probable que las restricciones básicas sean excedidas.

Algunos niveles de referencia son derivados de restricciones básicas relevantes, usando mediciones y/o técnicas computacionales, y algunos niveles de referencia van dirigidos a la percepción y a efectos indirectos adversos de exposición a campos electromagnéticos como los mostrados en la tabla 2. Las cantidades derivadas son intensidad de campo eléctrico (E), intensidad de campo magnético (H), densidad de flujo magnético (B), densidad de potencia (S), corriente de desplazamiento (I_L). Cantidades dirigidas a la percepción y otros efectos indirectos son corriente de contacto (I_C) y, para campos pulsantes, medida de absorción específica de energía (SA).

En cualquier situación de exposición particular, valores medidos o calculados de cualquiera de estas cantidades pueden ser comparados con los niveles de referencia apropiados. Respeto de los niveles de referencia asegurará un respeto hacia las restricciones básicas relevantes. Si los valores medidos exceden los valores de referencia, no necesariamente significa que la restricción básica será excedida. Bajo tales circunstancias, sin embargo, es necesario establecer si hay respeto a las restricciones básicas. La norma no contiene restricciones cuantitativas sobre campos eléctricos estáticos. Sin embargo recomienda que cualquier percepción de cargas eléctricas superficiales y chispas que causen irritación o estrés deben ser evitadas. Algunas cantidades como la densidad de flujo magnético (B) y la densidad de potencia (S) sirven ambas como restricción básica y nivel de referencia, a ciertas frecuencias.

Tabla II. En el rango de frecuencia hasta aproximadamente 100 kHz, el flujo de corriente eléctrica de un objeto en un campo al cuerpo del individuo puede dar lugar al estímulo de los músculos y/o los nervios periféricos.

Rangos de corrientes de umbral para efectos indirectos, incluyendo niños, mujeres y hombres				
Efecto Indirecto	Umbral de corriente (mA) a una frecuencia dada			
	50/60 Hz	1 KHz	100 KHz	1 MHz
Percepción al tocar	0.2 – 0.4	0.4 – 0.8	25 – 40	25 – 40
Dolor en el dedo que hace contacto	0.9 – 1.8	1.6 – 3.3	33 – 55	28 – 50
Descarga dolorosa / umbral Let-go	8 – 16	12 – 24	112 – 224	No determinado
Descarga secera / dificultad para respirar	12 – 23	21 – 41	160 – 320	No determinado

Fuente: *International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection ICNIRP. Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields.* Pág. 16

2.1.2.1. Restricciones básicas

Dependiendo de la frecuencia, las siguientes cantidades físicas (dosimétricas y expométricas) son usadas para especificar la restricción básica sobre campos electromagnéticos:

1. entre 0 y 1 Hz las restricciones básicas son proporcionadas por la densidad de flujo magnético, para campos magnéticos estáticos (0 Hz) y densidad de corriente de campos variantes en el tiempo de hasta 1 Hz, en orden de prevenir efectos sobre el sistema cardiovascular y nervioso central,
2. entre 1 Hz y 10 MHz las restricciones básicas son proporcionadas por la densidad de corriente para prevenir efectos sobre las funciones del sistema nervioso,

3. Entre 100 KHz y 10 GHz las restricciones básicas sobre el SAR son proporcionadas para prevenir el estrés por calentamiento de todo el cuerpo o calor excesivo localizado en tejidos. En el rango de 100 KHz a 10 MHz, son proporcionadas las restricciones sobre ambos densidad de corriente y el SAR,
4. entre 10 GHz y 300 GHz las restricciones básicas sobre densidad de potencia son proporcionadas para prevenir calentamiento en tejidos o cerca de la superficie del cuerpo.

Las restricciones básicas dadas en la tabla 3, son fijadas de manera que cuenten para incertezas relacionadas con la sensibilidad del individuo, condiciones ambientales y por el hecho de que la edad y estatus de salud de los miembros del público varían.

La restricción sobre la densidad de corriente es propuesta para protección de cabeza y tronco e incluye un factor de seguridad. Para los campos de ultra baja frecuencia, las restricciones están basadas en efectos adversos establecidos sobre el sistema nervioso central y tales efectos en agudeza son esencialmente instantáneos y no hay justificación científica para modificar la restricción básica por exposición de corta duración. Sin embargo, ya que se refiere a efectos adversos sobre el sistema nervioso central, esta restricción básica permitirá densidades altas de corriente en tejidos del cuerpo y sistema nervioso bajo condiciones instantáneas de exposición. Debido a que el cuerpo humano es no homogéneo, las densidades de corriente deberían ser promediadas sobre una sección transversal de 1 cm^2 perpendicular a la dirección de la corriente.

Tabla III. Restricciones básicas para campos eléctricos, magnéticos y electromagnéticos. (0 Hz a 300 GHz)

Restricciones Básicas para campos Eléctricos, Magnéticos y Electromagnéticos (0 Hz a 300 GHz)						
Rango de Frecuencia	Densidad de Flujo Magnético (mT)	Densidad de Corriente (mA/m ²) (rms)	Promedio sobre todo el cuerpo SAR (W/kg)	SAR Localizado (cabeza y tronco) (W/kg)	SAR Localizado (miembros) (W/kg)	Densidad de Potencia (S) (W/m ²)
0 Hz	40	--	--	--	--	--
> 0 – 1 Hz	--	8	--	--	--	--
1 – 4 Hz	--	8 / f	--	--	--	--
4 – 1000 Hz	--	2	--	--	--	--
1000 Hz – 100 KHz	--	f / 500	--	--	--	--
100 KHz – 10 MHz	--	f / 500	0.08	2	4	--
10 MHz – 10 GHz	--	--	0.08	2	4	--
10 – 300 GHz	--	--	--	--	--	10

Fuente: *International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection ICNIRP. Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields. Pág. 26.*

Para frecuencias hasta de 100 KHz, los valores de la densidad pico de corriente pueden ser obtenidos del valor rms por la raíz cuadrada de 2, (~1.414). Para pulsos de duración t_p , la frecuencia equivalente a aplicar en la restricción básica debería ser calculada como $f = 1/(2 t_p)$. También para estas frecuencias y para campos de pulso magnéticos, la densidad de corriente máxima asociada con los pulsos puede ser calculada desde el período (tiempo de subida y bajada) y el rango máximo de cambio de la densidad de flujo magnético. La densidad de corriente inducida puede ser comparada con la restricción básica apropiada.

Todos los valores del SAR deberán ser promediados sobre cualquier período de seis minutos y el SAR localizado, promediando la masa sobre 10 gramos de tejido homogéneo; el SAR máximo así obtenido debería ser el valor usado para la estimación de exposición.

Tabla IV. Restricciones básicas ocupacionales y a nivel público hasta 10 GHz.

Restricciones básicas para exposiciones a campos eléctricos y magnéticos para frecuencias hasta 10 GHz					
Características de exposición	Rango de Frecuencias	Densidad de Corriente para cabeza y tronco (mA/m ²) (rms)	SAR promedio en todo el cuerpo (W/kg)	SAR localizado cabeza y tronco (W/kg)	SAR localizado (extremidades) (W/kg)
Exposición Ocupacional	Hasta 1 Hz	40	--	--	--
	1 – 4 Hz	40 / f	--	--	--
	4 Hz - 1kHz	10	--	--	--
	1 – 100 kHz	f / 100	--	--	--
	100 kHz – 10 MHz	f / 100	0.4	10	20
	10 MHz – 10 GHz	--	0.4	10	20
Exposición al público en general	Hasta 1 Hz	8	--	--	--
	1 – 4 Hz	8 / f	--	--	--
	4 Hz - 1kHz	2	--	--	--
	1 – 100 kHz	f / 500	--	--	--
	100 kHz – 10 MHz	f / 500	0.08	2	4
	10 MHz – 10 GHz	--	0.08	2	4

Fuente: *International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection ICNIRP. Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz).*

Pág. 27.

Estos 10 gramos de tejido son propuestos para ser la masa de tejido homogéneo con propiedades eléctricas homogéneas y como puede verse, este concepto puede aplicarse para un análisis computacional de dosimetría, pero tiene la dificultad para mediciones físicas directas. Una simple geometría como la de un cubo de tejido como masa puede proveer una dosimetría calculada de manera que los valores obtenidos sean conservativos respecto a las normas de exposición. Adicionalmente, para exposiciones pausadas, en el rango de frecuencia de 0.3 hasta 10 GHz y para exposiciones localizadas en la cabeza, en orden de limitar y evitar efectos auditivos causados por expansión termo-elástica, es utilizada una restricción básica adicional y es que el SA no debería exceder los 2 mJ/kg promediado sobre 10 gramos de tejido. Los valores para exposición ocupacional y pública son mostrados en la tabla 4.

2.1.2.2. Niveles de referencia

Los niveles de referencia de exposición (tabla 5) son proporcionados para el propósito de comparación con valores de cantidades medidas. El respeto de todos los niveles de referencia recomendados asegurará el respeto a las restricciones básicas. Si las cantidades de los valores medidos son tan grandes como los niveles de referencia, no necesariamente significa que las restricciones básicas han sido excedidas. En este caso una estimación debería ser hecha como si los niveles de exposición estuvieran debajo de las restricciones básicas. Los niveles de referencia para limitación de exposición son obtenidos de las restricciones básicas para la condición de máximo acoplamiento de los campos al individuo expuesto, de esta manera se provee la máxima protección. Generalmente se propone que los niveles de referencia sean valores espacialmente promediados sobre la dimensión del cuerpo del individuo expuesto, pero con la importante condición que las restricciones básicas localizadas sobre exposición no son excedidas.

En ciertas situaciones donde la exposición es altamente localizada, como teléfonos celulares y la cabeza humana, el uso de los niveles de referencia no es apropiado. En tales casos el respeto a las restricciones básicas localizadas debería ser directamente estimado.

Tomando en cuenta que los impactos adversos a la salud o efectos indirectos de exposición (como *microshocks*) pueden ser evitados, se reconoce que los niveles de referencia públicos generales pueden ser excedidos, bajo la condición de que la restricción básica sobre la densidad de corriente no es sobrepasada. En la práctica en muchas situaciones de exposición, campos externos de baja frecuencia en los niveles de referencia inducirán densidades de corriente en los tejidos del sistema nervioso central, que están por debajo de las restricciones básicas. Además es reconocido que una cantidad de dispositivos de uso común emiten campos localizados que exceden los niveles de referencia. Sin embargo, esto generalmente ocurre bajo condiciones de exposición donde las restricciones básicas no son excedidas debido a un acoplamiento débil entre el campo y el cuerpo. Para valores pico, los siguientes niveles de referencia se aplican para la intensidad del campo eléctrico (V/m), la intensidad del campo magnético (A/m) y la densidad de campo magnético B (μT):

1. Para frecuencias de hasta 100 kHz, los valores pico de referencia son obtenidos multiplicando los valores correspondientes rms por aproximadamente 1.414. Para pulsos de duración t_p la frecuencia equivalente a aplicar debería ser calculada como $f = 1 / (2 t_p)$,
2. para frecuencias entre 100 kHz y 10 MHz los valores pico de referencia son obtenidos multiplicando el valor correspondiente rms por 10^a , donde $a = (0,665 \log (f/10^5) + 0,176)$, f en Hz,

3. para frecuencias entre 10 MHz y 300 GHz los valores pico de referencia son obtenidos multiplicando el valor correspondiente por 32.

Tabla V. Niveles de referencia para campos eléctricos, magnéticos y electromagnéticos. (0 Hz a 300 GHz, valores RMS no perturbados)

Niveles de referencia para exposición poblacional de campos Eléctricos, Magnéticos y Electromagnéticos (0 Hz a 300 GHz)				
Rango de frecuencia	Intensidad de campo E (V / m)	Intensidad de campo H (A / m)	Campo B (μT)	Densidad de potencia de onda plana equivalente S_{eq} (W / m ²)
0 – 1 Hz	--	3.2×10^4	4×10^4	--
1 – 8 Hz	10 000	$3.2 \times 10^4 / f^2$	$4 \times 10^4 / f^2$	--
8 – 25 Hz	10 000	$4\,000 / f$	$5\,000 / f$	--
0.025 – 0.8 KHz	$250 / f$	$4 / f$	$5 / f$	--
0.8 – 3 KHz	$250 / f$	5	- 6.25 -	--
3 – 150 KHz	87	5	- 6.25 -	--
0.15 – 1 MHz	87	$0.73 / f$	$0.92 / f$	--
1 – 10 MHz	$87 / f^{0.5}$	$0.73 / f$	$0.92 / f$	--
10 – 400 MHz	28	- 0.073 -	- 0.092 -	2
400 – 2000 MHz	$1.375 f^{0.5}$	$0.0037 f^{0.5}$	$0.0046 f^{0.5}$	$f / 200$
2 – 300 GHz	61	0.16	0.20	10

Fuente: *International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection ICNIRP. Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz).*

Pág. 28.

Generalmente respecto a campos pulsados o transientes a bajas frecuencias, existen restricciones básicas dependientes de la frecuencia y niveles de referencia de los cuales pueden ser derivadas estimaciones de peligro y normas de exposición. Un acercamiento conservador involucra representar una señal electromagnética pulsada o transiente como un espectro de Fourier de sus componentes en cada rango de frecuencia, la cual puede entonces ser comparada con los niveles de referencia de éstas frecuencias. La fórmula de sumatoria para exposiciones simultáneas de múltiples campos de frecuencia (sección 2.5) también puede ser aplicada con el propósito de determinar su conformidad con las restricciones básicas. Aunque existe poca información disponible acerca de la relación entre efectos biológicos y valores pico de campos pulsados, se sugiere que, para frecuencias que excedan los 10 MHz, S_{eq} como promedio sobre el ancho del pulso no debería exceder 1000 veces los niveles de referencia o que las intensidades de los campos no deberían exceder 32 veces la intensidad de los campos de los niveles de referencia.

Para frecuencias alrededor de 0.3 GHz en adelante y para la exposición localizada en la cabeza, con el propósito de limitar o prevenir efectos auditivos causados por la expansión termo-elástica, la absorción específica de pulsos debe ser limitada. En este rango de frecuencia, el umbral de SA de 4-16 mJ/Kg para producir este efecto corresponde, para pulsos de 30 ms, a valores pico SAR de 130 - 520 W/Kg en el cerebro. Entre 100 kHz y 10 MHz, los valores pico para intensidades de los campos son obtenidos por interpolación de 1.5 veces el pico a 100 kHz hasta 32 veces el pico a 10 MHz. El caso para exposición ocupacional se presenta en la tabla 6.

Tabla VI. Niveles de referencia para exposición ocupacional.

Niveles de referencia para exposición ocupacional a campos eléctricos y magnéticos (valores rms no perturbados)				
Rango de Frecuencia (MHz)	Intensidad de Campo Eléctrico (V/m)	Intensidad de Campo Magnético (A/m)	Densidad de Flujo Magnético (μT)	Densidad de Potencia (W/m ²)
Hasta 1 Hz	--	1.63×10^5	2×10^5	--
1 – 8 Hz	20 000	$1.63 \times 10^5 / f^2$	$2 \times 10^5 / f^2$	--
8 – 25 Hz	20 000	$2 \times 10^4 / f$	$2.5 \times 10^4 / f$	--
0.025 – 0.82 KHz	$500 / f$	$20 / f$	$25 / f$	--
0.82 – 65 KHz	610	24.45	30.75	--
0.065 – 1 MHz	610	$1.6 / f$	$2 / f$	--
1 – 10 MHz	$610 / f$	$1.6 / f$	$2 / f$	--
10 – 400 MHz	61	0.16	0.2	10
400 – 2000 MHz	$3 f^{0.5}$	$0.008 f^{0.5}$	$0.01 f^{0.5}$	$f / 40$
2 – 300 GHz	137	0.36	0.45	50

Fuente: *International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection ICNIRP. Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz).*

Pág. 29.

Para frecuencias de hasta 110 MHz niveles de referencia adicionales son recomendados con el propósito de prevenir peligros debido a corrientes de contacto (Tabla 7) y fueron fijados tomando en cuenta, para el factor de que el umbral de corrientes de contacto que causan respuestas biológicas en mujeres adultas y en niños son aproximadamente dos tercios y un medio, respectivamente, de las que corresponden a hombres adultos.

Tabla VII. Corrientes de contacto y corrientes en miembros.

Niveles de referencia para corrientes de contacto desde objetos conductivos (f en Mhz)	
Rango de frecuencia	Corriente máxima de contacto (mA)
0 – 2.5 KHz	0.5
2.5 KHz – 100 KHz	0.2 f
100 KHz – 110 MHz	20

Fuente: *International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection ICNIRP. Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz).*

Pág. 29.

Para frecuencias en el rango de 10 MHz o 110 MHz un nivel de referencia de 45 mA en términos de corriente a través de cualquier miembro es recomendada. Esto tiene el propósito de limitar el SAR localizado sobre cualquier período de seis minutos.

2.2. Corrientes inducidas en un individuo

Las corrientes inducidas en un individuo en pie en condiciones de exposición de ondas planas verticalmente polarizadas (De Gandhi et al., 1986), la corriente I_h que fluye a través de los pies de un individuo en pie aterrizado está dada por:

$$\frac{I_h}{E} = 0.108 h_m^2 f_{MHz} \frac{mA}{V/m} \quad (34)$$

donde E es la onda plana incidente de campo eléctrico (asumida vertical) en V / m; h_m es la altura de un individuo en metros; y f_{MHz} es la frecuencia en MHz.

Es interesante notar que la corriente en la ecuación (34) puede ser considerada como si todos los campos que cayeran sobre un área de 1.936 h_m^2 , o aproximadamente 5.93 m^2 para un humano de altura 1.75 metros, fueran efectivamente pasados a través del cuerpo humano. Se ha encontrado que la ecuación (34) es válida para un humano de dicha altura.

Debido a la dependencia f^2 , corrientes tan altas como $13.0 \text{ mA} / (\text{V} / \text{m})$ han sido medidas a 40 MHz para humanos adultos (Gandhi, 1986). Esto implica una corriente I_h , de cerca de 800 mA para el campo eléctrico recomendado de 61.4 V/m a esta frecuencia. Datos anatómicos (Morton et al., 1941) han sido utilizados para estimar el área efectiva para corrientes que fluyen sobre varias secciones transversales de una pierna (Gandhi, 1985). El área efectiva A_e es estimada por la ecuación:

$$A_e = \frac{A_c \sigma_c + A_l \sigma_l + A_m \sigma_m}{\sigma_c} \quad (35)$$

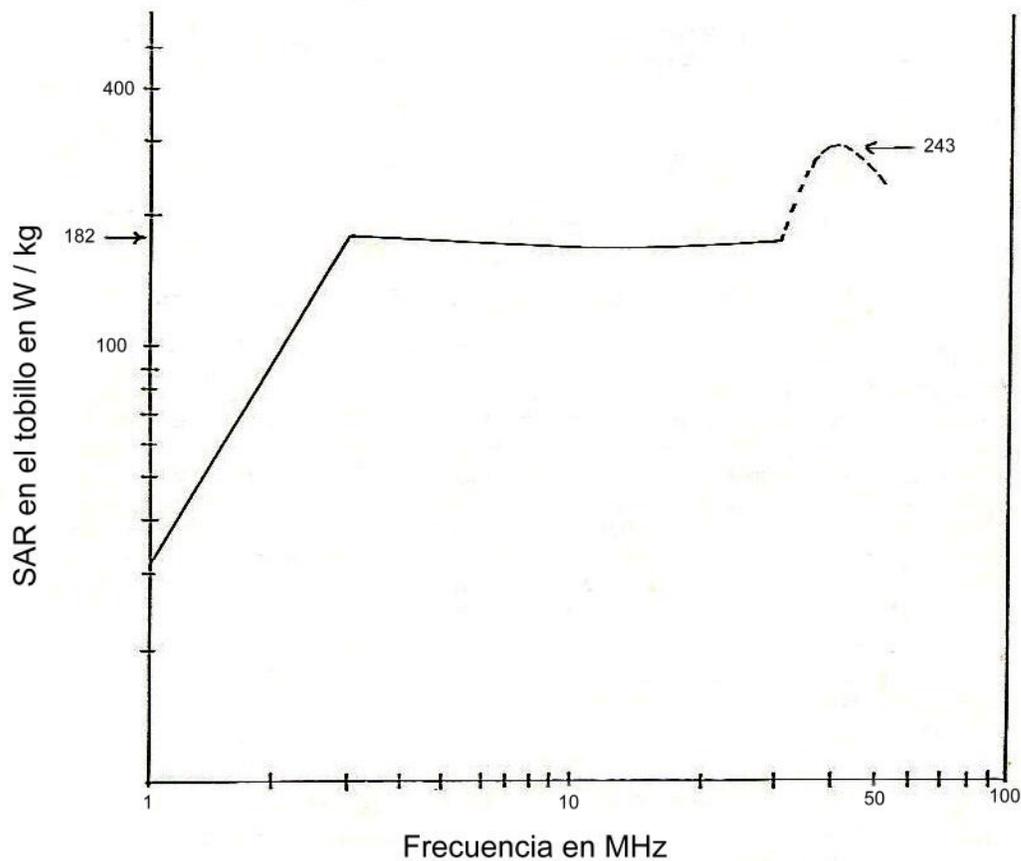
donde A_c , A_l y A_m son las áreas físicas de tejidos de alto y bajo contenido de agua, y de la región que contiene médula ósea roja, de conductividades σ_c , σ_l , σ_m , respectivamente. Note que la mayoría de la sección transversal del tobillo consiste de tejido con baja conductividad, una área efectiva de 9.5 cm^2 es calculada para esta sección transversal para un humano adulto, aunque la sección transversal física está en el orden de 40 cm^2 (Gandhi, 1986). El SAR ha sido calculado de la ecuación:

$$\frac{J^2}{\sigma_c \rho} = \left(\frac{I_h}{2}\right)^2 A_e^2 \sigma_c \rho \quad (36)$$

donde ρ es la densidad de masa de tejido, tomada como 10^3 kg/m^3 .

La corriente en cada una de las piernas es $I_h/2$. El SAR sobre la sección del tobillo es calculada usando I_h de la ecuación (34), y los valores de conductividad para tejidos de alto contenido de agua de Johnson y Guy, 1972.

Figura 7. SAR en el tobillo para un hombre adulto ($h = 1.75$ m) para campos electromagnéticos recomendadas en una norma de seguridad de 1982.



Fuente: Franceschetti, Giorgio y otros. *Electromagnetic Biointeraction. Mechanisms, Safety Standards, Protection Guides*. Pág. 14

El SAR así calculado se muestra en la figura 7. Para una sección de tobillo un SAR de 243 W/Kg esta proyectada para un adulto en pie de altura 1.75 m a una frecuencia de 40 MHz, y debe de multiplicarse por la raíz cuadrada de un factor de reducción de corriente debido a si el individuo usa zapatos de hule o cuero. Se ilustra con el propósito de demostrar las razones que guian a las normas utilizadas actualmente, así como describir gráficamente las normas iniciales en una sección de tobillo, por ende sus densidades de potencia y corrientes inducidas.

2.2.1. Haciendo escala a otras alturas

La ecuación (34) demuestra que las corrientes inducidas son proporcionales a h^2 , y son consecuentemente reducidas para individuos de menor altura. Ya que la dimensión de la sección transversal del cuerpo son en primer orden una aproximación proporcional de $(\text{peso})^{2/3}$ o h^2 , la densidad de corriente J y por ello el SAR ($= J^2 / \sigma_c \rho$) en la sección del tobillo, no será muy diferente a una frecuencia específica de una altura a otra. La frecuencia correspondiente a la máxima corriente en el tobillo o SAR sería, sin embargo, aumentada como $1/h$, para estar en el orden de 50.7 MHz para un individuo de 10 años ($h=1.38$ m) y 62.5 MHz para uno de 5 años ($h=1.12$ m), contra 40 MHz para un adulto. Ya que la corriente se incrementa en f , el máximo SAR proyectado para frecuencias pico en el SAR será considerablemente mayor. Interpolando linealmente entre los valores dados de 40.68 y 100 MHz (Johnson y Guy, 1972), el más alto SAR proyectado sobre una sección de tobillo para niños de 5 a 10 años para 1 mW/cm^2 onda plana incidente ($E=61.4 \text{ V/m}$) son estimados en 534 y 371 W/Kg, respectivamente. Por lo tanto las densidades de corriente en la sección del tobillo son 64 y 52 mA/cm² para niños de 5 y 10 años respectivamente.

2.3. Implicaciones termales de alto SAR

Parece obvio que densidades de corriente substanciales y SAR pueden ser fijadas en las extremidades corporales como la sección del tobillo para individuos en pie (sin contacto con objetos metálicos) o la sección de la muñeca para condiciones de contacto con objetos metálicos. Midiendo la elevación de temperatura superficial de las secciones de la muñeca y el tobillo para un ser humano saludable a temperatura ambiente para una variedad de corrientes inducidas por radiofrecuencias, los valores SAR en la banda de frecuencia 1 – 50 MHz han sido estimados (Chen y Gandhi, 1988). Se muestran en las siguientes gráficas, la temperatura en muñecas y tobillos (figura 8 y 9) que por conducción de experimentos se llegó a que el incremento de temperatura $\Delta T/\Delta t$ en °C/min está dada por las siguientes relaciones 31 y 32:

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} \Big|_{\text{sección del tobillo}} = 0.0045 \times SAR \quad ^\circ C/min \quad (37)$$

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} \Big|_{\text{sección de muñeca}} = 0.0048 \times SAR \quad ^\circ C/min \quad (38)$$

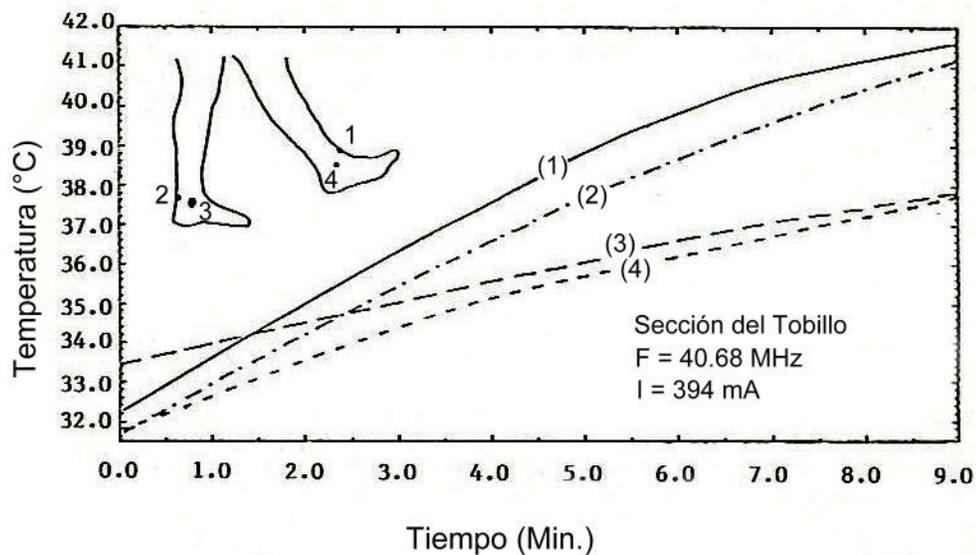
donde el SAR es en W/Kg.

2.3.1. Acoplamiento del cuerpo humano a campos magnéticos RF

Los campos de RF polarizados verticalmente asociados con ondas planas son capaces de inducir corrientes RF bastante significativas en el cuerpo humano, particularmente para condiciones de contacto con el suelo.

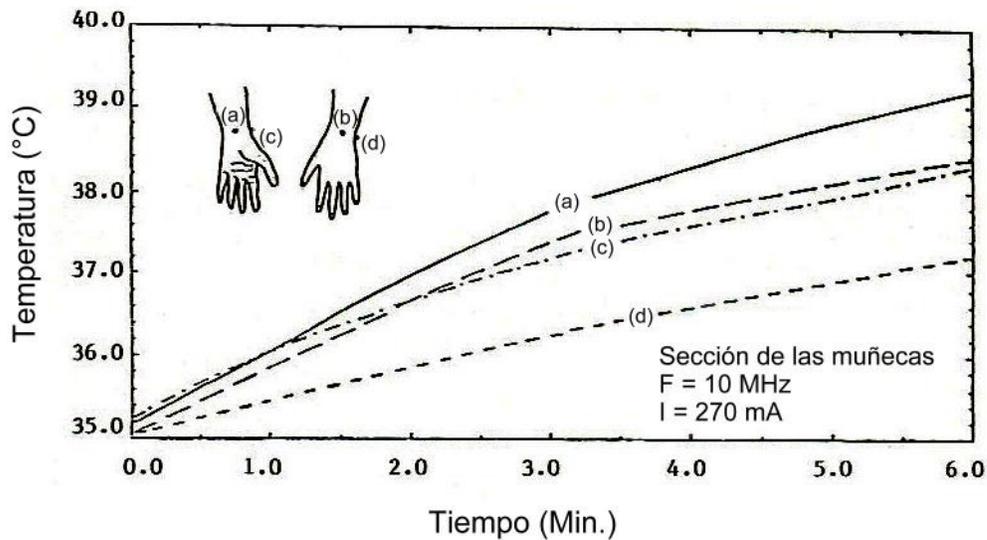
A través de la observación de un alto SAR en los tobillos, a partir del aumento de la frecuencia, se infiere el establecimiento de restricciones para la región de alta frecuencia. Para establecer el cuerpo humano como una cantidad medible dentro de estas ecuaciones, se usa como referencia un modelo de cuerpo humano no homogéneo de base anatómica descrito por Sullivan et al. (1988). Usando celdas de 1.31 cm cúbicos, este modelo especifica la conductividad y la constante dieléctrica para cada una de las 144,000 celdas en un prisma de 59 x 31 x 175 cm. Aproximadamente 64,000 de estas celdas están enteramente en el aire.

Figura 8. Temperatura de varias locaciones sobre la superficie de la sección del tobillo bajo condiciones de corrientes de RF a través de la pierna. SAR estimado en tejidos con alto contenido de agua = 239 W/kg.



Fuente: Franceschetti, Giorgio y otros. *Electromagnetic Biointeraction. Mechanisms, Safety Standards, Protection Guides*. Pág. 17

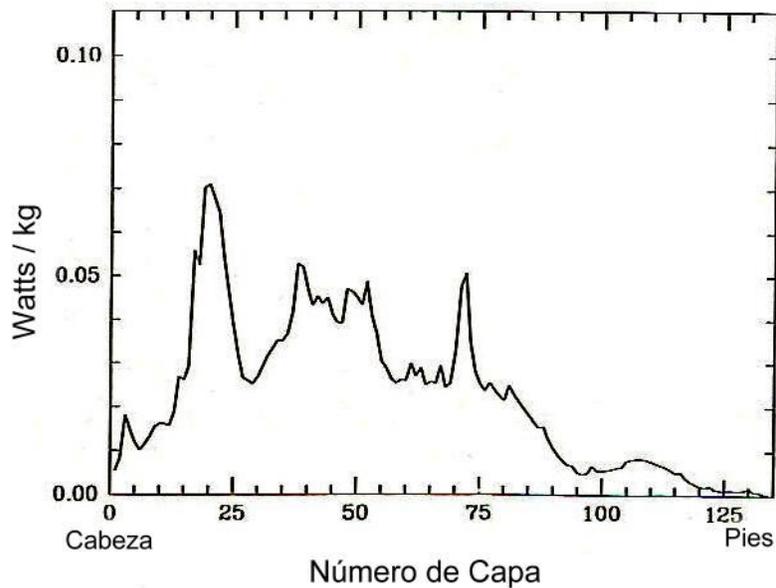
Figura 9. Temperatura de varias locaciones en la superficie de la sección de las muñecas bajo condiciones de corrientes de RF a través de las manos. SAR estimado en tejidos con alto contenido de agua = 134 W/kg.



Fuente: Franceschetti, Giorgio y otros. *Electromagnetic Biointeraction. Mechanisms, Safety Standards, Protection Guides*. Pág. 17

La figura 10 muestra el SAR promedio por capa calculado para el cuerpo humano expuesto a un campo magnético de 1 A/m a 30 MHz, polarizado desde el frente hacia atrás del modelo. El SAR promedio para todo el cuerpo es 0.03 W/Kg. El SAR pico para este caso, 0.64 W/Kg, ocurrió en la capa número 72.

Figura 10. SAR por capa para el modelo de cuerpo humano expuesto a un campo magnético de RF linealmente polarizado de adelante a atrás de 1 A/m a 30 MHz. Cada una de las capas tiene un espesor de 1.31 cm.

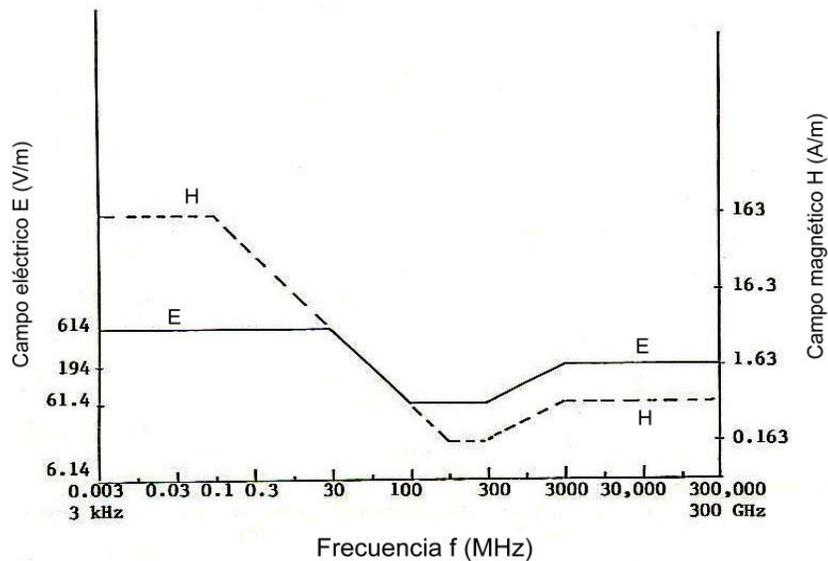


Fuente: Franceschetti, Giorgio y otros. *Electromagnetic Biointeraction. Mechanisms, Safety Standards, Protection Guides*. Pág. 19

2.4. Guía de protección de radiofrecuencia (exposición ocupacional)

En lo que se refiere a exposición ocupacional, las normas tienen su origen en experimentos prácticos, propuestos por IRPA (1988) y Dr. Maria Stuchly on Health & Welfare, Canada (1987), y graficados en la figura 11.

Figura 11. Norma inicialmente impuesta para la protección en exposición ocupacional de campos RF.



Fuente: Franceschetti, Giorgio y otros. *Electromagnetic Biointeraction. Mechanisms, Safety Standards, Protection Guides*. Pág. 20

Originalmente la norma establece:

1. Para individuos de pie (sin contacto con objetos metálicos), las corrientes inducidas de RF en el cuerpo deben ser menores que o iguales a 100 mA como medidas a través de ambos pies o 50 mA a través de cada uno. Para frecuencias menores que 100 KHz, la corriente inducida permitible debe ser reducida como sigue:

$$I = 1.0 f_{\text{kHz}} \text{ mA} \quad (39)$$

Que aseguraría que el SAR sobre la sección del tobillo para frecuencias mayores que 0.1 MHz no serán más que 5.8 - 10.7 W/Kg para adultos de alturas 1.75 – 1.5 m.

Para frecuencias menores que 100 KHz, la densidad de corriente en la sección del tobillo será ligeramente menor que las necesitadas para estimulación del umbral del sistema nervioso muscular (Chatterjee et al. 1986; Berhnardt, 1985; Gandhi et al., 1985b; Guy and Chou, 1985). Para campos eléctricos polarizados verticalmente, la limitación sobre la corriente implicaría (Gandhi et al., 1986) que el campo E permisible es menos que $(300/f)$ V/m para frecuencias en exceso de 0.1 MHz.

2. Para condiciones de contacto con objetos metálicos, la corriente máxima RF a través de una impedancia equivalente a aquella del cuerpo humano para condiciones de contacto (ver Chatterjee et al, 1986, Fig. 1), medido con un medidor de corriente de contacto no deberá exceder los siguientes valores:

$$I = 0.5 f_{\text{kHz}} \quad \text{mA} \quad \text{para } 3 < f < 100\text{KHz} \quad (40)$$

$$I = 50 \quad \text{mA} \quad \text{para } f > 0.1 \text{ MHz} \quad (41)$$

Estos límites asegurarían que la corriente experimentada por un individuo en contacto con objetos metálicos sería menor que la necesitada para la percepción de dolor a estas frecuencias.

Condiciones de seguridad adicionales como ropa protectora o una correcta aterrizada, obviamente permitiría campos mayores sin exceder los límites. Para la banda de frecuencia 0.1 – 100 MHz, la norma de campo magnético de RF es:

$$H = 16.3 / f \quad \text{A/m} \quad (42)$$

Para frecuencias menores que 0.1 MHz, un campo magnético de RF de 163 A/m implica un densidad de corriente pico $< 0.0117 f_{\text{kHz}} \text{ mA/cm}^2$, la cual es considerablemente menor que el umbral de percepción de corrientes a estas frecuencias. Descripciones amplias de la instrumentación y las técnicas de medición para determinar de manera precisa tales cantidades pueden ser encontradas en otros documentos (NCRP 1981; IEEE 1992; NCRP 1993; DIN VDE 1995).

2.4.1. Protección personal en campos electromagnéticos de alta frecuencia: normalización actual y procedimiento de medición

La influencia que tiene la radiación electromagnética de alta frecuencia sobre el cuerpo humano ha sido investigada con precisión desde hace muchos años, al menos el tema de los efectos térmicos. La transformación de energía radiada a calor, se basa en el hecho de que corrientes de alta frecuencia son inducidas dentro del cuerpo o estimulan a molecular polares a cambiar de orientación o a rotar. Especialmente los cambios de orientación de moléculas de agua contribuyen fuertemente a la absorción. Otro es el caso de los efectos térmicos como por ejemplo la influencia sobre el crecimiento de tumores la actividad cerebral o los cambios del comportamiento del sueño. Si existen efectos térmicos comprobados, sin embargo sólo bajo condiciones especiales o con campos de alta intensidad. Efectos dañinos causados por campos de intensidad baja no han podido ser comprobadas hasta hoy. Por ende se toman en cuenta los efectos térmicos para el establecimiento de valores límites hoy en día. La protección contra efectos térmicos de campos electromagnéticos ha sido de gran importancia en áreas en las cuales se trabaja con intensidades de campo extremadamente altas, desde hace por lo menos 30 años.

Desde los años 70 existen normas y publicaciones del entorno militar en Estados Unidos, especialmente los marines. Incluyen especificaciones para vestimenta protectora contra alta frecuencia. Se supone que esto surgió debido a que los soldados debían trabajar en las cercanías de equipos de radar de alta potencia. Investigaciones científicas de la vestimenta protectora contra alta frecuencia fueron llevadas a cabo en Estados Unidos en los años 80, al igual que en Europa. En Alemania se comenzaron a desarrollar estas vestimentas desde principios de los años 90.

La motivación para este tema vino de la empresa *Deutsche Telekom* ya que se le hizo necesario realizar trabajos en cercanía inmediata de antenas en funcionamiento, a causa de que los canales de información a través de antenas eran compartidos con otras empresas de telecomunicaciones, y sacar de operación una antena emisora con el fin de reparaciones representaba un coste demasiado alto.

A pesar de que la vestimenta protectora para el personal que trabaja en campos electromagnéticos de alta frecuencia existe desde hace más de 20 años, en el pasado fue escasamente implementada. Entre las razones estaba de que el personal no se daba cuenta de la necesidad de usar la vestimenta. Varios factores influyen en esto. Aunque ya existían los valores límites para campos electromagnéticos a principios de los años 80, el tema era casi inexistente en cuanto protección de trabajadores. La población estaba sensibilizada al tema de la radiación ionizante, pero no a la radiación electromagnética. Por ende el tema sólo se discutía donde se realizaban trabajos con intensidades de campo extremadamente altas. Además no existía una norma para vestimenta protectora contra alta frecuencia que tuviera un procedimiento de evaluación del "efecto protector" de la vestimenta, por ende este efecto no podía ser descrito y comparado con otra vestimenta.

Por esta razón casi no había acceso a valores medidos debido a la ausencia de estos.

Esta situación ha cambiado:

1. A causa de la discusión acerca de emisiones celulares hay gran cantidad de publicaciones acerca de los efectos biológicos causados por campos electromagnéticos. El tema esta en discusión entre el publico.
2. Con la norma DIN 32780-100 existe desde marzo de 2002 una norma en la cual están establecidas las exigencias y el procedimiento de evaluación para vestimenta protectora contra alta frecuencia.
3. Los sindicatos publicaron una norma de protección en contra de accidentes en junio 2001 llamada BGV B11 la cual aplica los valores límites del DIN-VDE 0848 a la protección del trabajador. Por ende el empleador esta obligado a brindar protección a sus empleados.

La creciente atención del publico hacia la radiación electromagnética, tanto como un aumento en las normativas han creado más oferta de estas vestimentas en el mercado. Para esto fue necesario desarrollar materiales textiles con propiedades "impermeables" hacia la radiación electromagnética. Aparte de su utilización en vestimentas protectoras, estos textiles también sirven para la producción de empaques para aparatos o dispositivos electrónicos que pueden ser dañados por campos electromagnéticos. Otra cantidad de aplicaciones está en el área militar.

Aquí mencionaremos la utilización de estos textiles para la producción de vestimenta protectora contra alta frecuencia, por ende el criterio de calidad es la "impermeabilidad", que sin embargo varía con su aplicación y el área de frecuencia.

En cuanto a campos eléctricos, se puede alcanzar una impermeabilización de 30 a 60 dB en el área de 200 MHz a 10 GHz. Cuando las exigencias son más altas normalmente se colocan varias capas del textil para alcanzar el valor de impermeabilización requerido.

2.4.1.1. Valores básicos y derivados

En el área de alta frecuencia la interacción entre campos electromagnéticos y tejido humano es en su mayoría térmico. La potencia del campo electromagnético se transforma en calor por "mecanismos descritos".

La intensidad con la que se calienta un tejido por unidad de tiempo depende de su constante calorífica específica y la potencia transformada. Este comportamiento también se puede describir por medio de la Razón de Absorción Específica (SAR). Este relaciona la potencia transformada en calor con la masa del tejido expuesto y mide en W/Kg.

$$SAR = \frac{P}{m} = c \frac{\Delta T}{\Delta t} \quad (43)$$

P es la potencia absorbida en watts, m es masa en kg, c es la constante específica de calentamiento en J/kg^{°K}, T la temperatura en °K y t es tiempo en segundos.

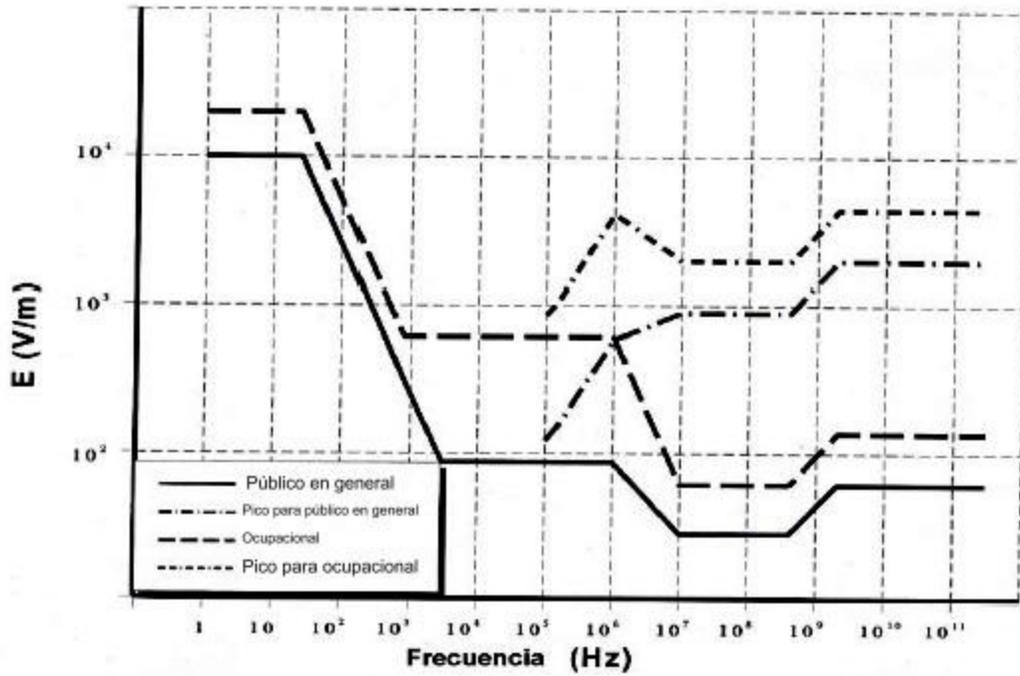
Ya que el SAR describe satisfactoriamente este problema, ha sido adoptado como valor base en la lista de los valores permitidos del BGV B11.

Como lo pensó, el problema es obvio. Existen muchas dificultades al medir el SAR. Se debe medir el ascenso de temperatura sobre un intervalo de tiempo utilizando un modelo del cuerpo con un relleno equivalente al tejido humano. Además debe considerarse en qué área del cuerpo se deben realizar las mediciones. Por esta razón se derivan del SAR, por medio de mediciones y cálculos, los valores límites para densidad de potencia, intensidad de campo eléctrico y densidad de flujo magnético, que se miden en la ausencia de un cuerpo y aseguran que no se exceda el valor SAR permitido para un cuerpo que entra al campo. La densidad de potencia es un caso especial. Se define como valor básico en el rango de 10 GHz a 300 GHz, y adicionalmente como valor derivado en el rango de 30 MHz a 300 GHz.

La justificación para ello puede verse en el hecho de que en este rango la radiación no penetra muy profundamente en el cuerpo y que el peligro de quemaduras prácticamente solo existe para las capas superficiales de la piel. En el rango de 100 KHz a 10 GHz el SAR es el valor base. Se diferencia el valor medio corporal total, el valor en cabeza y tronco, así como el valor en las extremidades. Son válidos los valores 0, 4, 10 y 20 W/Kg respectivamente entre el rango de frecuencias total.

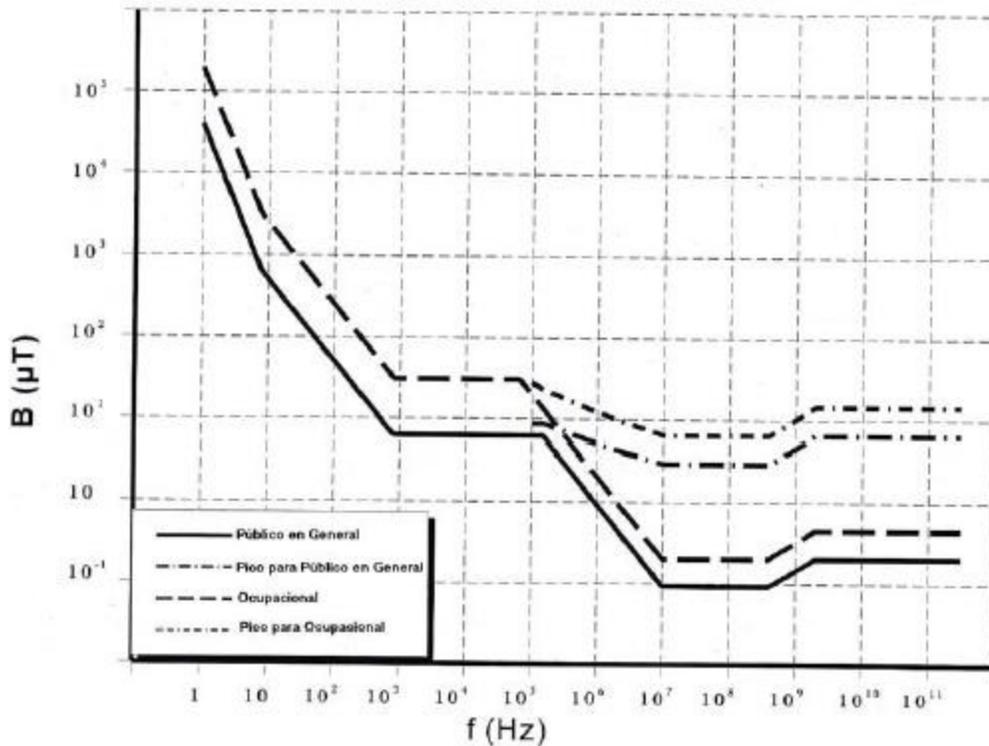
El BGV B11 divide a una empresa en 4 áreas: Área de exposición 2, área de exposición 1, área de exposición elevada y área de peligro. En cuanto a vestimenta protectora contra alta frecuencia es importante mencionar que en el área de exposición elevada y área de peligro el uso de estos accesorios protectores es obligatorio. Las gráficas actuales se presentan en figuras 12 y 13.

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



Fuente: *International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection ICNIRP. Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz).*

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



Fuente: *International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection ICNIRP. Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz).*

Pág. 31

2.5. Exposición desde fuentes con frecuencias múltiples

En situaciones donde exposiciones simultáneas a campos de diferentes frecuencias ocurre, la posibilidad que estas exposiciones sean aditivas en sus efectos debe ser considerada. Cálculos basados en tal aditividad deben desarrollarse separadamente para cada efecto, así evaluaciones separadas deben también ser hechas para efectos de estimulación eléctricos y térmicos sobre el cuerpo.

2.5.1. Restricciones básicas

En el caso de exposición simultánea a campos de diferentes frecuencias, el siguiente criterio debe satisfacer los términos de las restricciones básicas. Para estimulación eléctrica, relevante para frecuencias desde 1 Hz hasta 10MHz, las densidades de corrientes inducidas deben ser sumadas acorde a:

$$\sum_{i=1\text{Hz}}^{10\text{MHz}} \frac{J_i}{J_{L,i}} \leq 1 \quad (44)$$

Para efectos termales, relevantes desde 100 KHz, las densidades del SAR deben de ser sumadas de acuerdo a:

$$\sum_{i=100\text{KHz}}^{10\text{GHz}} \frac{\text{SAR}_i}{\text{SAR}_L} + \sum_{i>10\text{GHz}}^{300\text{GHz}} \frac{S_i}{S_L} \leq 1 \quad (45)$$

donde:

J_i es la densidad de corriente a la frecuencia i ;

$J_{L,i}$ es la restricción básica de densidad de corriente a la frecuencia i como es dada en la tabla 3;

SAR_i es el SAR causado por la exposición a la frecuencia i ;

SAR_L es el SAR de la restricción básica dada en tabla 3;

S_i es la densidad de potencia a la frecuencia i ;

S_L es la densidad de potencia de la restricción básica dada en tabla 3.

2.5.2. Niveles de referencia

Para la aplicación de las restricciones básicas, el siguiente criterio tomando en cuenta los niveles de referencia de intensidades de campo debe ser aplicado.

Para densidades inducidas de corriente y efectos de estimulación eléctrica, relevantes hasta 10 MHz, los siguientes dos requerimientos deberían ser aplicados a los niveles del campo:

$$\sum_{i=1\text{ Hz}}^{1\text{ MHz}} \frac{E_i}{E_{L,i}} + \sum_{i>1\text{ MHz}} \frac{E_i}{a} \leq 1 \quad (46)$$

y

$$\sum_{j=1\text{ Hz}}^{150\text{ KHz}} \frac{H_j}{H_{L,j}} + \sum_{j>150\text{ KHz}} \frac{H_j}{b} \leq 1 \quad (47)$$

donde:

E_i es la intensidad de campo eléctrico a la frecuencia i ;

$E_{L,i}$ es la intensidad de campo eléctrico de nivel de referencia dado en tabla 5;

H_j es la intensidad de campo magnético a la frecuencia j ;

$H_{L,j}$ es la intensidad de campo magnético nivel de referencia dado en tabla 5;

a es 87 V/m y b es 5 A/m (6.25 μ T).

El uso de valores constantes (a y b) arriba de 1 Mhz para el campo eléctrico y arriba de 150 kHz para el campo magnético es debido al hecho de que la sumatoria esta basada en densidades de corriente inducida, y no deberían ser confundidas con efectos termales circunstanciales.

Las ultimas formas básicas para $E_{L,i}$ y $H_{L,j}$ arriba de 1 Mhz y 150 Khz respectivamente, se encuentran en la tabla 5.

Para efectos termales circunstanciales, relevantes desde 100 kHz, los siguientes dos requerimientos deben ser aplicados para los niveles del campo:

$$\sum_{i=100\text{KHz}}^{1\text{MHz}} \left(\frac{E_i}{c} \right)^2 + \sum_{i>1\text{MHz}}^{300\text{GHz}} \left(\frac{E_i}{E_{L,i}} \right)^2 \leq 1 \quad (48)$$

y

$$\sum_{j=100\text{KHz}}^{150\text{kHz}} \left(\frac{H_j}{d} \right)^2 + \sum_{j>150\text{kHz}}^{300\text{GHz}} \left(\frac{H_j}{H_{L,j}} \right)^2 \leq 1 \quad (49)$$

y donde:

E_i es la intensidad de campo eléctrico a la frecuencia i ;

$E_{L,i}$ es la intensidad de campo eléctrico de nivel de referencia dado en tabla 5;

H_j es la intensidad de campo magnético a la frecuencia j ;

$H_{L,j}$ es la intensidad de campo magnético nivel de referencia dado en tabla 5;

c es $87 / f^{1/2}$ V/m y d es $0.73 / f$ A/m

Para las corrientes en los miembros y de contacto, respectivamente, los siguientes requerimientos deben ser aplicados:

$$\sum_{k=10\text{MHz}}^{110\text{MHz}} \left(\frac{I_k}{I_{L,k}} \right)^2 \leq 1 \quad \sum_{n>1\text{Hz}}^{110\text{MHz}} \left(\frac{I_n}{I_{C,n}} \right)^2 \leq 1 \quad (50)$$

Donde:

I_k es la componente de la corriente en miembros a la frecuencia k ;

$I_{L,k}$ es el nivel de referencia para la corriente en miembros, 45 mA;

I_n es la componente de corriente de contacto a la frecuencia n ;

$I_{C,n}$ es el nivel de referencia para corrientes de contacto a frecuencias (tabla 7).

La fórmula de sumatoria asume el peor caso de condiciones de fase entre los campos de múltiples fuentes. Como resultado, situaciones típicas de exposición pueden en la práctica resultar en menos restrictivos niveles de exposición que los indicados en la anterior fórmula para los niveles de referencia.

3. LEGISLACIÓN GUATEMALTECA

3.1. Ley general de Telecomunicaciones

En la legislación vigente para Guatemala se mencionan primeramente aspectos de tienen el propósito de definir los “Términos Técnicos” que nos lleven a la interpretación de todo lo que a materia de Telecomunicaciones se refiere. Citando el Título 1, Capítulo 3 de la ley vigente, nos dice: *“Para efectos de interpretación y aplicación de la presente ley, los términos técnicos en materia de telecomunicaciones tendrán los significados reconocidos por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT).”* La Ley también establece en el Capítulo II, Artículo 57, inciso (a); que para el usufructo de una frecuencia se exige por escrito entre otras cosas, la potencia máxima efectiva de radiación, la máxima intensidad de campo eléctrico o potencia máxima admisible en el contorno del área de cobertura de los sistemas de emisión.

Tomando en cuenta que la Ley establece un reconocimiento de las disposiciones técnicas de validez internacional referentes a telecomunicaciones media vez sean ratificadas por el gobierno de Guatemala, se puede esperar que una normalización técnica referente a radiaciones electromagnéticas no-ionizantes de aplicación internacional pueda asimilarse en territorio guatemalteco.

Es así como parcialmente se define el propósito de este trabajo de investigación como una herramienta de información a disposición del público guatemalteco que traduzca las disposiciones técnicas de uso corriente en naciones como Alemania sobre la intensidad permitida de radiaciones electromagnéticas no-ionizantes tanto en exposición general como ocupacional, con lo que se estaría estableciendo el primer paso de cualquier proceso normativo, que es el de sensibilizar acerca de una situación determinada.

3.2. Antecedentes

En julio de 2002 el Consejo de Ministros de Ambiente de la Comisión de Centroamérica de Ambiente y Desarrollo (CCAD) aprobó el “Acuerdo para el Fortalecimiento de los Sistemas de Evaluación de Impacto Ambiental en Centroamérica”, el cual establece una serie de instrumentos y lineamientos básicos cuya implementación permitiría la modernización y fortalecimiento de dichos sistemas, así como el inicio de un proceso de armonización a nivel regional. Este plan de acción tomó en cuenta insumos resultantes de diagnósticos más profundos y de planes de acción nacional realizados en tres países del área (Guatemala, Nicaragua y Costa Rica), en el marco del Proyecto de EIA (Evaluación de Impacto Ambiental)-Centroamérica de CCAD-UICN/Gobierno de Holanda. Producto de este acuerdo fue redactado el Manual Técnico de EIA Lineamientos Generales para Centroamérica, en el cual se aborda el tema de una regulación sobre radiaciones no-ionizantes, las que se agrupan dentro de Factor Ambiental – Gestión del Aire. Acorde al Registro Integral de Regulaciones / Normas Ambientales en Centroamérica derivadas por PROSIGA (Programa de Modernización de los Sistemas de Gestión Ambiental en Centroamérica) -CCAD, Guatemala a la fecha carece de una regulación sobre emisión de radiaciones no-ionizantes, pero la sitúa como un proceso en vías de desarrollo.

El manual técnico de EIA, establece como riesgo ambiental, *“la probabilidad condicional de la ocurrencia de un acontecimiento ambiental específico, de consecuencias negativas para el medio ambiente y que está aunado a la evaluación (medición) de las consecuencias de dicho acontecimiento (daños producidos). Es la probabilidad de exceder un valor específico de consecuencias económicas, sociales o ambientales en un sitio particular y durante un tiempo de exposición determinado”*.

Se obtiene de relacionar la amenaza o probabilidad de ocurrencia de un fenómeno de una intensidad específica, con la vulnerabilidad de los elementos expuestos. El riesgo puede ser de origen natural, geológico, hidrológico o atmosférico, o también de origen tecnológico provocado por el ser humano.

Partiendo de lo hasta aquí mencionado podemos determinar que la regulación sobre emisión de radiaciones no-ionizantes para territorio guatemalteco tendría que ir enmarcada en los procesos de desarrollo ya existentes en Centroamérica y Latinoamérica en general, por lo que las áreas de investigación y desarrollo se hacen necesarias para enmarcar el proceso de normalización globalmente.

3.3. El caso guatemalteco

En febrero de 2005 la Organización de Estados Americanos (OEA) a través de la Comisión Interamericana de Telecomunicaciones (CITEL) y el Comité Consultivo Permanente II (CCP.II) publicó el informe final sobre su IV reunión en la que trató entre otras cosas, temas de radiocomunicaciones incluyendo radiodifusión.

En el mismo entre otras cosas establece lo siguiente:

ESTABLECIMIENTO DE UN GRUPO RELATOR SOBRE ASPECTOS TÉCNICOS Y REGULATORIOS RELATIVOS A LOS EFECTOS DE LAS EMISIONES ELECTROMAGNÉTICAS NO-IONIZANTES. [CCP.II/RES. 21 (IV-04)]

La IV reunión del Comité Consultivo Permanente II: Radiocomunicaciones incluyendo Radiodifusión,

VISTO:

- a) Que en virtud de la continua evolución de las tecnologías utilizadas en las comunicaciones inalámbricas, se ha incrementado la demanda de instalación de antenas, especialmente en los lugares densamente poblados; y*
- b) Que la población tiene preocupación sobre los posibles efectos de las emisiones no-ionizantes, en particular, con la proliferación de antenas,*

CONSIDERANDO:

- a) Que es deber de las autoridades de telecomunicaciones establecer reglamentos técnicos para la utilización del espectro radioeléctrico;*
- b) Que es importante que la población tenga información adecuada sobre las regulaciones vigentes respecto a las emisiones radioeléctricas;*
- c) Que las Administraciones de las Américas tienen interés en contar con información científica para el desarrollo de su propia regulación;*

d) *Que la compilación de información contribuirá a que los miembros de la CITELE dispongan de mayores antecedentes para la toma de decisiones, y*

e) *Que el Grupo Relator en el marco de la V reunión del CCP.II identificó importantes fuentes adicionales de información,*

RECONOCIENDO:

a) *Que en el CCP.II las Administraciones y los Miembros Asociados pueden tener importante información sobre este tema; y*

b) *Que resulta ventajoso compartir información entre los países miembros de la CITELE,*

RESUELVE:

1. *Establecer un Grupo Relator adscrito a la Presidencia del CCP.II para la recopilación de información sobre aspectos técnicos y regulatorios relativos a los efectos de las emisiones electromagnéticas no-ionizantes según los términos de referencia en el anexo.*

2. *Establecer como plazo para culminar los trabajos del presente grupo relator la VI Reunión del CCP.II.*

3. *Designar como Relator al Sr. Héctor Carril (Argentina) y como Relatores Alternos a Sr. Marc Girouard (Canadá), Sr. Claudio Palomares Sartor (Peru); y Sr. Maximiliano Martinhao (Brasil).*

4. *Derogar la resolución CCP.II/RES. 17 (III-04)*

*ANEXO A LA RESOLUCIÓN CCP.II/RES 21 (IV-04)
TERMINOS DE REFERENCIA GRUPO RELATOR SOBRE ASPECTOS
TÉCNICOS Y REGULATORIOS RELATIVOS A LOS EFECTOS DE LAS
EMISIONES ELECTROMAGNÉTICAS NO-IONIZANTES*

- *Realizar una compilación de la información y reglamentaciones disponibles en los siguientes organismos referente a los efectos de las radiaciones no-ionizantes y a las normas técnicas establecidas:*

Organización Mundial de la Salud

Organización Panamericana de la Salud

(UIT) Unión Internacional de Telecomunicaciones

ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection)

MMF (Mobile Manufacturers Forum)

IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers)

IEC (International Electrotechnical Commission)

- *Realizar un acopio de las reglamentaciones vigentes respecto a las radiaciones electromagnéticas en las distintas Administraciones de la Región y otras Regiones*
- *Considerar, dada la importante información contenida en el mismo, el Estudio sobre Normas Legislativas y Procedimientos de Control de Emisiones Radioeléctricas en América Latina realizado por AHCIET.*
- *Identificar otras fuentes adicionales de información y ponerlas a consideración del CCP.II en la V reunión del CCP.II.*
- *Poner a disposición el informe final en la página de la CITELE.*

No cabe duda que Guatemala al ser miembro de la OEA también se encuentra indirectamente en el proceso de una normativa sobre radiaciones no-ionizantes y que la voluntad política que se tenga por parte del gobierno y población a abordar un tema tan complejo es definitivamente necesario para avanzar otro paso de la vía del desarrollo, que a su vez presente oportunidades tanto al interior como al exterior del país.

3.3.1. Alcances, beneficios y objetivo fundamental de una normalización

El proceso continúa en Latinoamérica para la implementación de normativas como las que se abordan en la presente investigación para el caso europeo. Más que alcances puntuales, de entre los que podemos mencionar:

- Que es deber de las autoridades de telecomunicaciones establecer reglamentos técnicos para la utilización del espectro radioeléctrico;
- Que es importante que la población tenga información adecuada sobre las regulaciones vigentes respecto a las emisiones radioeléctricas;
- Que las administraciones de las Américas tienen interés en contar con información científica para el desarrollo de su propia regulación;
- Que la compilación de información contribuye a que se dispongan de mayores antecedentes para la toma de decisiones y
- Que es ventajoso el intercambio de información para el progreso.

Lo que el establecimiento de cualquier normalización representa para el desarrollo del país son las posibilidades de desarrollo (beneficios) en otros campos, como por ejemplo:

- Un proceso de rutas de decisión en función de los resultados de la evaluación inicial;
- Un código de buenas prácticas y un conjunto de normativas aplicables,
- Un procedimiento para el desarrollo de términos de referencia para la elaboración de estudios posteriores;
- Procesos de fortalecimiento del proceso de participación de la sociedad civil durante la elaboración y revisión de las normativas;
- La estandarización de un procedimiento para la valoración de impactos durante la elaboración del estudio;
- Procedimientos de revisión de los estudios por parte de las autoridades;
- Un conjunto de instrumentos de control y seguimiento;
- Procedimientos para el desarrollo de inspecciones a cargo de funcionarios de la autoridad respectiva;
- Instrumentos que estén sujetos a un proceso de mejora continua, entre otros.

El objetivo fundamental sería, en primer lugar:

- Aportar a las autoridades nacionales los instrumentos técnicos que se originan del proceso de modernización, fortalecimiento y armonización de los sistemas cualquiera que estos sean y, en segundo lugar;
- Exponerlos para su análisis profundo, corrección, complementación y mejora periódica, y así no promover la inseguridad jurídica del administrado. Esta mejora debe darse, como en este caso, dentro de un proceso interactivo e iterativo, alimentado por las experiencias acumuladas y todas aquellas nuevas experiencias que se están dando y se darán a futuro.

4. PROPUESTA DE UNA NORMA PARA GUATEMALA

4.1. Criterios

Toda la presente investigación ha venido describiendo todo el entorno sobre el tema de la regulación sobre radiaciones no-ionizantes que en Alemania y en general en la Unión Europea (UE) existe y por tanto, ha tenido el propósito de hacer una estimación muy aproximada de sus resultados para una aplicación en Guatemala aprovechando el movimiento hacia el tema que tienen varios organismos latinoamericanos en el área de telecomunicaciones.

Es así como los criterios que se aplicarán en la propuesta, serán tanto de definición como de forma y fondo, parcialmente iguales en lo que se refiere a las restricciones básicas y niveles de referencia en lo que a radiaciones se refiere. Pero primeramente describiremos definiciones que se utilizan en la normativa alemana para describir los objetos propios de análisis:

- a) "Aparato": cualquier equipo que sea equipo radioeléctrico, equipo terminal de telecomunicación o ambas cosas a la vez;

- b) "Equipo terminal de telecomunicación": un producto que permita la comunicación, o un componente del mismo, destinado a ser conectado directa o indirectamente por cualquier medio a interfaces de redes públicas de telecomunicaciones (es decir, redes de telecomunicaciones utilizadas total o parcialmente para la prestación de servicios de telecomunicaciones accesibles al público);

c) "Equipo radioeléctrico": un producto o componente del mismo, que permita la comunicación mediante la emisión y/o recepción de ondas radioeléctricas que utilicen el espectro asignado a las radiocomunicaciones terrenas/espaciales;

d) "Ondas radioeléctricas": las ondas electromagnéticas de frecuencias comprendidas entre los 9 kHz y los 3000 GHz, propagadas por el espacio sin guía artificial;

e) "Interfaz" un punto de terminación de red, que constituye un punto de conexión física en el que se facilita a un usuario el acceso a una red pública de telecomunicaciones, y/o una "interfaz" aérea que especifique la trayectoria radioeléctrica entre los equipos radioeléctricos; y sus especificaciones técnicas;

f) "Categoría de equipo": una categoría que designe los tipos particulares de aparatos que, sean considerados similares y las interfaces a las que los aparatos están destinados a ser conectados. Un aparato puede pertenecer a más de una categoría de equipo;

g) "Expediente técnico de construcción": un expediente en el que se describe el aparato y que da información y explicaciones sobre cómo se han plasmado los requisitos esenciales aplicables al mismo;

h) "Norma armonizada": una especificación técnica adoptada por un organismo de normalización reconocido;

i) "Interferencia perjudicial": una interferencia que suponga un riesgo para el funcionamiento del servicio de radionavegación o de otros servicios de seguridad o que degrade u obstruya gravemente o interrumpa de forma repetida un servicio de radiocomunicación que funcione de conformidad con la reglamentación comunitaria o nacional aplicables;

j) Una "ubicación" es un lugar de instalación en el cual se ha establecido o debe establecerse una estación de radio; a la ubicación pertenecen todas las emisoras de radio que se operan ahí o en proximidad directa (si los márgenes de seguridad de las distintas antenas se traslapan);

k) "Margen de seguridad en relación a la ubicación": se define como la distancia necesaria entre la antena de referencia y el rango en el cual los valores límites incluyendo las intensidades de campos relevantes de otras estaciones de radio cercanas son respetadas;

l) "Antena de referencia" se define como la antena transmisora con la menor altura de montaje sobre el suelo que requiere de un "margen de seguridad en relación a su sistema"; o debe ser tomada en cuenta al calcular el "margen de seguridad en relación a la ubicación" debido a sus características;

m) "Margen de seguridad en relación a la distancia" se define como la distancia entre una antena individual estacionaria y el rango dentro del cual están contenidos los valores límite;

n) "Rango controlable" se define como el rango dentro del cual el operador puede determinar la admisión o estadía de personas; o ya bien excluir la admisión de personas dadas las condiciones actuales;

o) "Operador" es la entidad natural o legal que tiene el control legal y actual de la totalidad de las funciones del sistema de radiocomunicaciones;

p) "Valores límite" se deben manejar tomando en consideración las emisiones de otros sistemas de telecomunicación estacionarios, al menos en los lugares en los cuales se deben respetar los valores límites para la regulación de campos electromagnéticos;

q) "Certificado de localización" para instalaciones que utilizan 10 watt o más, o una estación de radio con una potencia de radiación isotrópica equivalente (EIRP) de menos de 10 watt construida en una ubicación con una potencia de radiación total de 10 watt, o si se pasa de 10 watt, se debe tener una certificación de localización. Se deben indicar las coordenadas geográficas del lugar de instalación y adjuntar un mapa de la propiedad y sus edificaciones. Si se monta sobre un edificio se deben adjuntar un dibujo del mismo visto desde el lado y desde arriba, sus medidas, y marcar el lugar de montaje de las antenas. Además un diagrama de las antenas.

r) "Certificación de ubicación temporal" Si es que hay que construir la estación para realmente poder darse cuenta si se manejará dentro de los valores limitantes, se puede dar una certificación de ubicación temporal, si es que las medidas planificadas hacen esperar de que los valores limitantes no se sobrepasarán.

Respecto a radiaciones no-ionizantes, se debe proponer medidas legislativas de carácter imperativo, dirigidas a limitar la exposición de trabajadores, mujeres embarazadas o en periodo de lactancia y público en general.

Mediciones de campos electromagnéticos deben proporcionar a todos los ciudadanos un alto nivel de protección; las acciones para limitar la exposición del público en general a la radiación electromagnética tiene que ser balanceada con la salud, seguridad y a la vez asegurar beneficios que los dispositivos de emisión electromagnética traigan a la calidad de vida en las áreas de telecomunicaciones, energía y seguridad pública.

Tiene que abarcar las restricciones básicas y los niveles de referencia en exposición a campos electromagnéticos; recalando que sólo los efectos establecidos son usados en la base de la recomendación sobre limitación de exposición, dada por la Comisión Internacional para la Protección de Radiaciones No-Ionizantes, International Commission on Non-Ionising Radiation Protection (ICNIRP) por sus siglas en inglés o cualquier otra institución internacional competente. El marco debería ser revisado y reestimado con regularidad en la luz de nuevos conocimientos desarrollados en tecnología y aplicaciones que resulten de la exposición a campos electromagnéticos.

También, en orden de incrementar la concientización de los riesgos, así como las medidas de protección contra campos electromagnéticos, se debe promover la diseminación de información y reglas de práctica en este campo, en particular respecto a el diseño, instalación y uso de equipo, dirigido a obtener niveles de exposición que no excedan las restricciones recomendadas.

Tiene que prestarse atención a lograr una apropiada comunicación y entendimiento respecto a los riesgos relacionados con campos electromagnéticos, mientras se toma en cuenta la percepción del público a tales riesgos.

Para propósitos de una legislación en términos de Campos Electromagnéticos se han de incluir los campos estáticos, como campos de ultrabaja frecuencia y campos de radiofrecuencia, incluyendo microondas, abarcando el rango de frecuencias de 0 Hz a 300 GHz.

4.2. Parámetros

Deberá de entenderse igualmente dentro del concepto de exposición a campos electromagnéticos las ocho cantidades físicas comúnmente usadas:

- Corriente de contacto (I_c) entre personas y un objeto es expresado en amperios (A). Un objeto conductor en un campo eléctrico puede ser cargado por el campo.
- Densidad de corriente (J) es definida como la corriente que fluye a través de una unidad de sección transversal perpendicular a su dirección en el volumen de un conductor tal como el cuerpo humano o una parte de él, expresado en amperios sobre metro al cuadrado (A/m^2).
- La intensidad de campo eléctrico es una cantidad vectorial (E) que corresponde a la fuerza ejercida en una partícula cargada sin tomar en cuenta su movimiento en el espacio. Está expresada en voltio sobre metro (V/m).
- La intensidad de campo magnético es una cantidad vectorial (H), la cual, junto con la densidad de flujo magnético, especifica un campo magnético en cualquier punto en el espacio. Está expresada en amperios sobre metro (A/m).

- Densidad de flujo magnético es una cantidad vectorial (B), resultando en una fuerza que actúa sobre cargas en movimiento, está expresada en teslas (T). En el espacio libre y en materiales biológicos, la densidad de flujo magnético y la intensidad de campo magnético pueden ser intercambiadas usando la equivalencia $1 \text{ A/m} = 4\pi \times 10^{-7} \text{ T}$.
- Densidad de potencia (S) es la cantidad apropiada usada para muy alta frecuencia, donde la profundidad de penetración en el cuerpo es baja. Es la potencia incidente de radiación perpendicular a la superficie, dividida por el área de la superficie, y es expresada en watts sobre metro al cuadrado (W/m^2).
- Absorción específica de energía (SA). Está definida como la energía absorbida por unidad de masa de tejido biológico, expresada en joules sobre kilogramo (J/kg). En la normalización esto es usado para limitar los efectos no térmicos de la radiación de pulso de microonda.
- Razón de absorción específica de energía (SAR). Promediado sobre todo el cuerpo o sobre partes del cuerpo, es definido como la medida a la cual la energía es absorbida por unidad de masa de tejido del cuerpo, y es expresada en watts sobre kilogramo (W/kg). El SAR sobre todo el cuerpo es una medida ampliamente aceptada para relacionar efectos termales adversos a la exposición a radiofrecuencia.
Además del promedio de SAR sobre todo el cuerpo, valores de SAR localizados son necesarios para evaluar y limitar la localización excesiva de energía en pequeñas partes del cuerpo, resultantes de condiciones especiales de exposición. Ejemplos de tales condiciones son: individuos aterrizados expuestos a radiofrecuencias en el rango bajo de MHz, e individuos expuestos en el campo cercano de una antena.

De estas cantidades, la densidad de flujo magnético, la corriente de contacto, las intensidades de campo eléctrico y magnético, y la densidad de potencia pueden ser medidas directamente. Igualmente la restricción sobre exposición a campos eléctricos y magnéticos variantes en el tiempo, y campos electromagnéticos los cuales son basados directamente sobre efectos a la salud establecidos y consideraciones biológicas debe de entenderse como las Restricciones Básicas. Y como Niveles de Referencia se entenderán los niveles que son proporcionados para propósitos prácticos de estimación de exposición para determinar si es probable que las restricciones básicas sean excedidas.

En cualquier situación de exposición particular, los valores medidos o calculados de cualquiera de estas cantidades pueden ser comparados con el nivel de referencia apropiado. Respetar los niveles de referencia asegurará que se respeten las restricciones básicas relevantes.

Si los valores medidos o calculados exceden los niveles de referencia, no necesariamente son excedidas las restricciones básicas. Sin embargo, siempre que un nivel de referencia sea excedido, es necesario evaluar el cumplimiento de la restricción básica relevante y determinar si son necesarias medidas de protección adicionales.

4.2.1. Consideraciones técnicas

La exposición a los campos eléctricos y magnéticos normalmente produce una absorción de energía insignificante y un incremento no mensurable de temperatura en el cuerpo. Sin embargo la exposición a los campos electromagnéticos a frecuencias por encima de los 100 kHz puede producir una absorción de energía y un incremento de temperatura significativos.

En general, la exposición a campos electromagnéticos uniformes (onda plana) ocasiona una localización y una distribución de la energía dentro del cuerpo altamente no uniformes, las cuales deben ser evaluadas mediante mediciones dosimétricas y cálculos matemáticos. Con respecto a la absorción de energía por el cuerpo humano, los campos electromagnéticos pueden ser divididos en cuatro rangos (Durney y col. 1985):

1. Frecuencias de alrededor de 100 kHz a menos de 20 MHz, en las cuales la absorción en el tórax decrece rápidamente con la disminución de la frecuencia, y absorción significativa puede ocurrir en el cuello y las piernas.
2. Frecuencias en el rango por encima de los 20 MHz a 300 MHz, en las cuales una absorción relativamente alta puede ocurrir en todo el cuerpo, y aún valores más altos si se consideran las resonancias parciales del cuerpo (Ej. cabeza).
3. Frecuencias en el rango por encima de los 300 MHz a varios GHz, en las cuales ocurre una absorción no- uniforme significativamente local.
4. Frecuencias por encima de los 10 GHz, en las cuales la absorción de energía ocurre principalmente en la superficie del cuerpo.

Dependiendo de la frecuencia, las siguientes cantidades físicas (dosimétricas y expométricas) deberán ser usadas para especificar la restricción básica sobre campos electromagnéticos:

- Entre 0 y 1 Hz las restricciones básicas son proporcionadas por la densidad de flujo magnético, para campos magnéticos estáticos (0 Hz) y densidad de corriente de campos variantes en el tiempo de hasta 1 Hz, en orden de prevenir efectos sobre el sistema cardiovascular y nervioso central. Así $J_{f < 1\text{Hz}}$, densidad de corriente para cabeza y tronco deberá ser de 8 mA/m² para exposición al público en general y 40 mA/m² para exposición ocupacional en rms.
- Entre 100 KHz y 10 GHz las restricciones básicas sobre el SAR son proporcionadas para prevenir el estrés de calentamiento de todo el cuerpo y calor localizado excesivo en tejidos. En el rango de 100 KHz a 10 MHz, son proporcionadas las restricciones sobre ambos densidad de corriente y el SAR. Así $J_{100\text{ KHz} < f < 10\text{ MHz}}$, es $(f / 100)$ mA/m², el SAR $_{100\text{ KHz} < f < 10\text{ MHz}}$, es 10 (W/kg) para exposición ocupacional, así mismo $J_{100\text{ KHz} < f < 10\text{ MHz}}$, es $(f / 500)$ mA/m² y el SAR $_{100\text{ KHz} < f < 10\text{ MHz}}$, es 2 (W/kg) para exposición general.
- Entre 10 GHz y 300 GHz las restricciones básicas sobre densidad de potencia son proporcionadas para prevenir calentamiento en tejidos o cerca de la superficie del cuerpo. A frecuencias mayores de 10 GHz, la profundidad de penetración del campo en los tejidos es pequeña, y el SAR no es una buena medida para evaluar la energía absorbida; la densidad de potencia incidente del campo (en W/m²) es una cantidad dosimétrica más apropiada. Así $S_{10\text{GHz} < f < 300\text{ GHz}} = 10\text{ W/m}^2$

Para algunos dispositivos que operan a frecuencias por encima de 10 MHz (Ej. calentadores dieléctricos, teléfonos móviles), la exposición humana puede ocurrir bajo condiciones de campo cercano. La dependencia de la frecuencia de absorción de energía, bajo estas condiciones, es muy diferente que la descrita para condiciones de campo lejano. Los campos magnéticos pueden ser dominantes para ciertos dispositivos tales como teléfonos móviles, bajo ciertas condiciones de exposición.

La utilidad de cálculos matemáticos de modelos numéricos; así como las mediciones de corrientes inducidas e intensidad de campo en los tejidos, para evaluar la exposición de campo cercano ha sido demostrada para teléfonos móviles, walkie-talkies, torres de radiodifusión, fuentes de comunicación entre barcos y calentadores dieléctricos (Kuster y Balzano 1992; Dimbylow y Mann 1994; Jokela y col. 1994; Gandhi 1995; Tofani y col. 1995). La importancia de estos estudios se basa en su demostración de que la exposición a los campos cercanos puede producir un SAR alto localizado (Ej. en la cabeza, muñecas y tobillos) y que el SAR de cuerpo entero y el SAR localizado son fuertemente dependientes de la distancia de separación entre la fuente de alta frecuencia y el cuerpo.

El SAR promedio de cuerpo entero y el SAR localizado son cantidades convenientes para comparar los efectos observados bajo condiciones variadas de exposición.

Las restricciones básicas fueron dadas en las tablas 3 y 4, pero las incluimos de nuevo.

Restricciones Básicas para campos Eléctricos, Magnéticos y Electromagnéticos (0 Hz a 300 GHz)						
Rango de Frecuencia	Densidad de Flujo Magnético (mT)	Densidad de Corriente (mA/m ²) (rms)	Promedio sobre todo el cuerpo SAR (W/kg)	SAR Localizado (cabeza y tronco) (W/kg)	SAR Localizado (miembros) (W/kg)	Densidad de Potencia (S) (W/m ²)
0 Hz	40	--	--	--	--	--
> 0 – 1 Hz	--	8	--	--	--	--
1 – 4 Hz	--	$8 / f$	--	--	--	--
4 – 1000 Hz	--	2	--	--	--	--
1000 Hz – 100 KHz	--	$f / 500$	--	--	--	--
100 KHz – 10 MHz	--	$f / 500$	0.08	2	4	--
10 MHz – 10 GHz	--	--	0.08	2	4	--
10 – 300 GHz	--	--	--	--	--	10

Tablas III y IV

Restricciones básicas para exposiciones a campos eléctricos y magnéticos para frecuencias hasta 10 GHz					
Características de exposición	Rango de Frecuencias	Densidad de Corriente para cabeza y tronco (mA/m ²) (rms)	SAR promedio en todo el cuerpo (W/kg)	SAR localizado cabeza y tronco (W/kg)	SAR localizado (extremidades) (W/kg)
Exposición Ocupacional	Hasta 1 Hz	40	--	--	--
	1 – 4 Hz	$40 / f$	--	--	--
	4 Hz - 1kHz	10	--	--	--
	1 – 100 kHz	$f / 100$	--	--	--
	100 kHz – 10 MHz	$f / 100$	0.4	10	20
	10 MHz – 10 GHz	--	0.4	10	20
Exposición al público en general	Hasta 1 Hz	8	--	--	--
	1 – 4 Hz	$8 / f$	--	--	--
	4 Hz - 1kHz	2	--	--	--
	1 – 100 kHz	$f / 500$	--	--	--
	100 kHz – 10 MHz	$f / 500$	0.08	2	4
	10 MHz – 10 GHz	--	0.08	2	4

Fuente: *International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection ICNIRP. Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields.*

4.2.1.1. Aspectos a considerar

- Incertezas: Se relacionan con la sensibilidad del individuo, condiciones ambientales y por el hecho de que la edad y estatus de salud de los miembros del público varían. El efecto auditivo de las microondas es un ejemplo bien conocido de esto (Frey 1961; Frey y Messenger 1973; Lin 1978): la gente con una audición normal puede percibir campos de pulso-modulados con frecuencias de cerca de 200 MHz a 6,5 GHz. La sensación auditiva ha sido descrita diversamente como un zumbido, un clic, o un estallido, dependiendo de las características de la modulación del campo. Los efectos auditivos de las microondas se han atribuido a una interacción termoelástica en la corteza auditiva del cerebro, con un umbral de percepción de cerca de 100-400 mJ /m² para pulsos de duración menores de 30 µs en 2,45 GHz (que corresponde a un SAR de 4,16 mJ/Kg).
- No homogeneidad del cuerpo humano: Las densidades de corriente deberían ser promediadas sobre una sección transversal de 1 cm² perpendicular a la dirección de la corriente. También para campos pulsantes de microonda, la densidad de corriente máxima asociada con los pulsos puede ser calculada desde el periodo (tiempo de subida y bajada) y el rango máximo de cambio de la densidad de flujo magnético. La densidad de corriente inducida puede ser comparada con la restricción básica apropiada. Comparadas con la radiación de onda continua, los campos pulsantes de microondas con la misma tasa promedio de localización de energía en tejidos son generalmente más eficaces en producir una respuesta biológica, especialmente cuando hay un umbral bien definido que se debe exceder para obtener el efecto (ICNIRP 1996).

- Período de medición SAR: Todos los valores del SAR deberán ser promediados sobre cualquier periodo de seis minutos y el SAR localizado, promediando la masa sobre 10 gramos de tejido homogéneo; el SAR máximo así obtenido debería ser el valor usado para la estimación de exposición. Estos 10 gramos de tejido son propuestos para ser la masa de tejido homogéneo con propiedades eléctricas homogéneas.
- Exposición limitada: En el rango de frecuencia de 0.3 hasta 10 GHz y para exposiciones localizadas en la cabeza, en orden de limitar y evitar efectos auditivos causados por expansión termo-elástica, es utilizada una restricción básica adicional y es que el SA no debería exceder los 2 mJ/kg promediado sobre 10 gramos de tejido. Esto tiene el propósito de limitar el SAR localizado sobre cualquier período de seis minutos.

Los niveles de referencia para limitar la exposición son obtenidos de las restricciones básicas para la condición de máximo acoplamiento de los campos al individuo expuesto, de esta manera se provee la máxima protección. Generalmente se propone que los niveles de referencia sean valores espacialmente promediados sobre la dimensión del cuerpo del individuo expuesto, pero con la importante condición que las restricciones básicas localizadas sobre exposición no son excedidas. En ciertas situaciones donde la exposición es altamente localizada, como teléfonos celulares y la cabeza humana, el uso de los niveles de referencia no es apropiado. En tales casos el respeto a las restricciones básicas localizadas debería ser directamente estimado.

Niveles de referencia para exposición poblacional de campos Eléctricos, Magnéticos y Electromagnéticos (0 Hz a 300 GHz)				
Rango de frecuencia	Intensidad de campo E (V / m)	Intensidad de campo H (A / m)	Campo B (μT)	Densidad de potencia de onda plana equivalente S _{eq} (W / m ²)
0 – 1 Hz	--	3.2 x 10 ⁴	4 x 10 ⁴	--
1 – 8 Hz	10 000	3.2 x 10 ⁴ / f ²	4 x 10 ⁴ / f ²	--
8 – 25 Hz	10 000	4 000 / f	5 000 / f	--
0.025 – 0.8 KHz	250 / f	4 / f	5 / f	--
0.8 – 3 KHz	250 / f	5	- 6.25 -	--
3 – 150 KHz	87	5	- 6.25 -	--
0.15 – 1 MHz	87	0.73 / f	0.92 / f	--
1 – 10 MHz	87 / f ^{0.5}	0.73 / f	0.92 / f	--
10 – 400 MHz	28	- 0.073 -	- 0.092 -	2
400 – 2000 MHz	1.375 f ^{0.5}	0.0037 f ^{0.5}	0.0046 f ^{0.5}	f / 200
2 – 300 GHz	61	0.16	0.20	10

Tabla V y VI

Niveles de referencia para exposición ocupacional a campos eléctricos y magnéticos (valores rms no perturbados)				
Rango de Frecuencia (MHz)	Intensidad de Campo Eléctrico (V/m)	Intensidad de Campo Magnético (A/m)	Densidad de Flujo Magnético (μT)	Densidad de Potencia (W/m ²)
Hasta 1 Hz	--	1.63 x 10 ⁵	2 x 10 ⁵	--
1 – 8 Hz	20 000	1.63 x 10 ⁵ / f ²	2 x 10 ⁵ / f ²	--
8 – 25 Hz	20 000	2 x 10 ⁴ / f	2.5 x 10 ⁴ / f	--
0.025 – 0.82 KHz	500 / f	20 / f	25 / f	--
0.82 – 65 KHz	610	24.45	30.75	--
0.065 – 1 MHz	610	1.6 / f	2 / f	--
1 – 10 MHz	610 / f	1.6 / f	2 / f	--
10 – 400 MHz	61	0.16	0.2	10
400 – 2000 MHz	3 f ^{0.5}	0.008 f ^{0.5}	0.01 f ^{0.5}	f / 40
2 – 300 GHz	137	0.36	0.45	50

Fuente: *International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection ICNIRP. Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields*

Tomando en cuenta que los impactos adversos a la salud o efectos indirectos de exposición (como *microshocks*) pueden ser evitados, se reconoce que los niveles de referencia públicos generales pueden ser excedidos, bajo la condición de que la restricción básica sobre la densidad de corriente no es sobrepasada. En la práctica en muchas situaciones de exposición, campos externos de baja frecuencia en los niveles de referencia inducirán densidades de corriente en los tejidos del sistema nervioso central, que están por debajo de las restricciones básicas. Además es reconocido que una cantidad de dispositivos de uso común emiten campos localizados que exceden los niveles de referencia. Sin embargo, esto generalmente ocurre bajo condiciones de exposición donde las restricciones básicas no son excedidas debido a un acoplamiento débil entre el campo y el cuerpo.

4.2.1.2. Niveles de referencia para valores pico

Para valores pico, los siguientes niveles de referencia se deberán aplicar para la intensidad del campo eléctrico (V/m), la intensidad del campo magnético (A/m) y la densidad de campo magnético B (μT)

- Para frecuencias de hasta 100 kHz, los valores pico de referencia son obtenidos multiplicando los valores correspondientes rms por aprox. 1,414. Para pulsos de duración t_p la frecuencia equivalente a aplicar debería ser calculada como $f = 1 / (2 t_p)$,
- Para frecuencias entre 100 kHz y 10 MHz los valores pico de referencia son obtenidos multiplicando el valor correspondiente rms por 10^a donde $a = (0,665 \log (f/10^5) + 0,176)$, f en Hz,
- Para frecuencias entre 10 MHz y 300 GHz los valores pico de referencia son obtenidos multiplicando el valor correspondiente por 32.

Para frecuencias entre alrededor de 0.3 GHz y 10 GHz y para la exposición localizada en la cabeza, con el propósito de limitar o prevenir efectos auditivos causados por la expansión termo-elástica, la absorción específica de pulsos debe ser limitada. En este rango de frecuencia, el umbral de SA de 4-16 mJ / Kg para producir este efecto corresponde, para pulsos de 30 ms, a valores pico SAR de 130 - 520 W / kg en el cerebro. Entre 100 kHz y 10 MHz, los valores pico para intensidades de los campos son obtenidos por interpolación de 1.5 veces el pico a 100 kHz hasta 32 veces el pico a 10 MHz.

Tabla VII. Corrientes de contacto y corrientes en miembros.

Niveles de referencia para corrientes de contacto desde objetos conductivos (f en Mhz)	
Rango de frecuencia	Corriente máxima de contacto (mA)
0 – 2.5 KHz	0.5
2.5 KHz – 100 KHz	0.2 f
100 KHz – 110 MHz	20

Fuente: *International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection ICNIRP. Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields.*

Para frecuencias de hasta 110 MHz niveles de referencia adicionales son recomendados con el propósito de prevenir peligros debido a corrientes de contacto. Los niveles de referencia sobre corrientes de contacto (tabla 7) fueron fijados tomando en cuenta para el factor, de que el umbral de corrientes de contacto que causan respuestas biológicas en mujeres adultas y en niños son aproximadamente dos tercios y un medio, respectivamente, de las que corresponden a hombres adultos.

Para frecuencias en el rango de 10 MHz o 110 MHz un nivel de referencia de 45 mA en términos de corriente a través de cualquier miembro es recomendada. Esto tiene el propósito de limitar el SAR localizado sobre cualquier período de seis minutos.

4.2.1.3. Exposición desde fuentes con frecuencias múltiples

También en situaciones donde exposiciones simultáneas a campos de diferentes frecuencias ocurre, el siguiente criterio debería satisfacer los términos de las restricciones básicas.

Para estimulación eléctrica, relevante para frecuencias desde 1 Hz hasta 10MHz, las densidades de corrientes inducidas deben ser sumadas acorde a:

$$\sum_{i=1\text{Hz}}^{10\text{MHz}} \frac{J_i}{J_{L,i}} \leq 1 \quad (44)$$

Para efectos termales, relevantes desde 100 Khz, las densidades del SAR deben de ser sumados de acuerdo a:

$$\sum_{i=100\text{KHz}}^{10\text{GHz}} \frac{\text{SAR}_i}{\text{SAR}_L} + \sum_{i>10\text{GHz}}^{300\text{GHz}} \frac{S_i}{S_L} \leq 1 \quad (45)$$

Donde:

J_i es la densidad de corriente a la frecuencia i ;

$J_{L,i}$ es la restricción básica de densidad de corriente a la frecuencia i como es dada en la tabla 3;

SAR_i es el SAR causado por la exposición a la frecuencia i ;

SAR_L es el SAR de la restricción básica dada en tabla 3;

S_i es la densidad de potencia a la frecuencia i ;

S_L es la densidad de potencia de la restricción básica dada en tabla 3.

Para la aplicación de las restricciones básicas, el siguiente criterio tomando en cuenta los niveles de referencia de intensidades de campo debe ser aplicado. Para densidades inducidas de corriente y efectos de estimulación eléctrica, relevantes hasta 10 Mhz, los siguientes dos requerimientos deberían ser aplicados a los niveles del campo:

$$\sum_{i=1 \text{ Hz}}^{1 \text{ MHz}} \frac{E_i}{E_{L,i}} + \sum_{i>1 \text{ MHz}}^{10 \text{ MHz}} \frac{E_i}{a} \leq 1 \quad (46)$$

y

$$\sum_{j=1 \text{ Hz}}^{150 \text{ KHz}} \frac{H_j}{H_{L,j}} + \sum_{j>150 \text{ KHz}}^{10 \text{ MHz}} \frac{H_j}{b} \leq 1 \quad (47)$$

Donde: E_i es la intensidad de campo eléctrico a la frecuencia i ;

$E_{L,i}$ es la intensidad de campo eléctrico de nivel de referencia dado en tabla 5;

H_j es la intensidad de campo magnético a la frecuencia j ;

$H_{L,j}$ es la intensidad de campo magnético nivel de referencia dado en tabla 5;

a es 87 V/m y b 5 A/m (6.25 μ T).

El uso de valores constantes (a y b) arriba de 1 MHz para el campo eléctrico y arriba de 150 kHz para el campo magnético es debido al hecho de que la sumatoria esta basada en densidades de corriente inducida, y no deberían ser confundidas con efectos termales circunstanciales. Las últimas formas básicas para $E_{L,i}$ y $H_{L,j}$ arriba de 1 MHz y 150 KHz respectivamente, se encuentran en la tabla 5.

Para efectos termales circunstanciales, relevantes desde 100 kHz, los siguientes dos requerimientos deberían ser aplicados para los niveles del campo:

$$\sum_{i=100\text{ KHz}}^{1\text{ MHz}} \left(\frac{E_i}{c}\right)^2 + \sum_{i>1\text{ MHz}}^{300\text{ GHz}} \left(\frac{E_i}{E_{L,i}}\right)^2 \leq 1 \quad (48)$$

y

$$\sum_{j=100\text{ KHz}}^{150\text{ kHz}} \left(\frac{H_j}{d}\right)^2 + \sum_{j>150\text{ kHz}}^{300\text{ GHz}} \left(\frac{H_j}{H_{L,j}}\right)^2 \leq 1 \quad (49)$$

y donde

E_i es la intensidad de campo eléctrico a la frecuencia i ;

$E_{L,i}$ es la intensidad de campo eléctrico de nivel de referencia dado en tabla 5;

H_j es la intensidad de campo magnético a la frecuencia j ;

$H_{L,j}$ es la intensidad de campo magnético nivel de referencia dado en tabla 5;

c es $87 / f^{1/2}$ V/m y d $0.73 / f$ A/m

Para las corrientes en los miembros y de contacto, respectivamente, los siguientes requerimientos deben ser aplicados:

$$\sum_{k=10\text{ MHz}}^{110\text{ MHz}} \left(\frac{I_k}{I_{L,k}}\right)^2 \leq 1 \quad \sum_{n>1\text{ Hz}}^{110\text{ MHz}} \left(\frac{I_n}{I_{C,n}}\right)^2 \leq 1 \quad (50)$$

Donde

I_k es la componente de la corriente en miembros a la frecuencia k ;

$I_{L,k}$ es el nivel de referencia para la corriente en miembros, 45 mA;

I_n es la componente de corriente de contacto a la frecuencia n ;

$I_{C,n}$ es el nivel de referencia para corrientes de contacto a frecuencias (tabla 7)

4.3. Alcances, beneficios y objetivo fundamental de una normalización para territorio guatemalteco

En Guatemala la implementación de normativas como las que se abordan en la presente investigación para el caso europeo, tendría un impacto positivo tanto en la industria como en la sociedad y podemos mencionar como ejemplo:

- Que las autoridades de telecomunicaciones implementen reglamentos técnicos y científicos para la utilización del espectro radioeléctrico;
- Que la población pueda acceder a información actualizada sobre las regulaciones vigentes respecto a las emisiones radioeléctricas;
- Que una propia regulación significa un avance positivo en la vía del desarrollo en muchos niveles como por ejemplo, aspectos relacionados con el diseño, desarrollo u optimización de servicios, que en este caso incluyen las telecomunicaciones;
- Que la compilación de información contribuye a que se dispongan de mayores antecedentes para la toma de decisiones;
- Que un marco de desarrollo enfocado a nuestro país signifique un fundamento para futuras legislaciones que tengan a bien el criterio ambiental y por ende el de los ciudadanos, siendo estos últimos los más beneficiados y a los que se debe la empresa, con el establecimiento y respeto de leyes de protección al medio ambiente en el área urbana y rural;
- Que el respeto de las normativas ambientales motiva el bienestar del ciudadano y el mejoramiento del entorno en el que vive;

Y los beneficios del establecimiento de cualquier normalización para el desarrollo del país son las posibilidades de desarrollo en otros campos, como por ejemplo:

- Un proceso de rutas de decisión en función de los resultados de la evaluación inicial;
- Un código de buenas prácticas y un conjunto de normativas aplicables,
- Un procedimiento para el desarrollo de términos de referencia para la elaboración de estudios posteriores;
- Procesos de fortalecimiento del proceso de participación de la sociedad civil durante la elaboración y revisión de las normativas;
- La estandarización de un procedimiento para la valoración de impactos durante la elaboración del estudio;
- Procedimientos de revisión de los estudios por parte de las autoridades;
- Un conjunto de instrumentos de control y seguimiento;
- Procedimientos para el desarrollo de inspecciones a cargo de funcionarios de la autoridad respectiva;
- Instrumentos que estén sujetos a un proceso de mejora continua, entre otros.

El objetivo fundamental sería, en primer lugar:

- Aportar a las autoridades nacionales los instrumentos técnicos que se originan del proceso de modernización, fortalecimiento y armonización de los sistemas que en este caso representa la normalización sobre radiaciones electromagnéticas no ionizantes y, en segundo lugar;
- Exponerlos para su análisis profundo, corrección, complementación y mejora periódica, y así no promover la inseguridad jurídica del ciudadano.

CONCLUSIONES

1. El análisis a profundidad de normativas ambientales europeas sobre radiaciones emitidas en estaciones de radiocomunicación, específicamente en Alemania, provee bases ideales para establecer propuestas de una normativa del mismo tipo aplicable a territorio guatemalteco.
2. Toda la infraestructura de telecomunicaciones en Alemania, esta supeditada a respetar los criterios técnicos y físicos utilizados en la normativa ambiental, referente a radiaciones electromagnéticas no ionizantes.
3. La legislación, en términos de campos electromagnéticos incluyen los campos estáticos y campos de radiofrecuencia, incluyendo microondas, abarcando el rango de frecuencias de 0 Hz a 300 Ghz; y para el contexto de exposición a campos electromagnéticos ocho cantidades físicas son comúnmente usadas como parámetros de la norma para seguridad del personal operario y de los vecinos en general.
4. Se ha podido establecer una serie de lineamientos que pueden guiar hacia el establecimiento de propuestas para una normativa en territorio nacional, que trate específicamente a radiaciones electromagnéticas no ionizantes, en beneficio de la población guatemalteca.

5. Entre los alcances que una legislación de este tipo contempla se puede mencionar que se aporta a las autoridades nacionales de instrumentos técnicos que se originan del proceso de modernización, fortalecimiento y armonización de los sistemas, que en este caso trata las radiaciones electromagnéticas no ionizantes, para exponerlos a análisis profundo, corrección, complementación y mejora periódica, y así no promover la inseguridad jurídica del ciudadano.

RECOMENDACIONES

1. El análisis de otras muchas fuentes de información actualizadas respecto de normativas ambientales sobre radiaciones electromagnéticas emitidas en sistemas de telecomunicaciones en general, amplía el espectro de información y oportunidad de progreso, por lo tanto, siempre deberá ser considerado.
2. Más que criterios técnicos y físicos que se utilicen en una legislación referente a radiaciones en telecomunicaciones, es que el proceso de verificación de la misma debe ser garantizado.
3. Deberá tenerse en cuenta que existe otras variables que determinan los criterios ambientales -como efectos biológicos- aparte de las tratadas en esta investigación, muchas tienen un carácter subjetivo, debido a que no se han podido verificar científicamente, pero esto no las excluye del tema, por lo que cualquier incerteza siempre deberá tenerse en consideración y la búsqueda de información y consenso deberá facilitarse.
4. Obviamente debe de tomarse en cuenta el aspecto económico y de inversión que el establecimiento de normativas siempre representa, pero al mismo tiempo debe de sopesarse los beneficios que se puedan traer a la calidad de vida de los guatemaltecos en un futuro.

5. En lo que respecta a los lineamientos es posible divisar una extrapolación a otros campos, ya que valdría la pena abordar una normalización, por tanto, se exhorta a la investigación y desarrollo de las mismas.

BIBLIOGRAFÍA

1. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bundesnetzagentur. **Messung Nichtionisierender Electromagnetischer Strahlung, Frequenzbereich 100 KHz bis 300 GHz.** Bern, 1992. 45 pp.
2. Official Journal of the European Communities. **Council Recommendation on the limitation of exposure of the general public to electromagnetic fields (0 Hz to 300 GHz).** 1999. 12 pp
3. International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection ICNIRP. **Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varing Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz).** 1998.
4. Franceschetti, Giorgio y otros. **Electromagnetic Biointeraction. Mechanisms, Safety Standards, Protection Guides.** Plenum Press, New York and London; 1989. 217 pp.
5. Gandhi, O. P. **Some numerical methods for dosimetry: extremely low frequencies to microwave frequencies.** Radio Science; 1995. 177 pp
6. Durney, C. H. y otros. **Radiofrequency radiation dosimetry handbook,** Reg. No. SANI-TR-85-73. IJ.S.Air Force School of Aerospace, Medical Division, Brooks Air Force Base, Texas; 1985
7. Hansen R.C. **Academic Press,** New York. 1960.
8. Harrington, R.F. **Time-Harmonic Electromagnetic Fields,** McGraw-Hill, New York 1961. 230 pp
9. Collin, R.E. **Antennas and radiowave propagation.** Estados Unidos: McGraw-Hill,1985. 487 pp.
- 10.Astorga, Allan. **Manual Técnico de Evaluación de Impacto Ambiental.** Costa Rica. CCAD-Gobierno de Holanda, 2003. 53 pp.