



INTERNATIONAL COMMISSION ON NON-IONIZING RADIATION PROTECTION e.V.

RECOMENDACIONES PARA LIMITAR LA EXPOSICION A CAMPOS ELÉCTRICOS, MAGNETICOS Y ELECTROMAGNÉTICOS (hasta 300 GHz)

PREFACIO

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 sobre criterios de salud en relación a las RNI, como parte del Programa de Criterios de Salud Ambiental de la OMS, auspiciado por Programa de Naciones Unidas para el Ambiente (UNEP). Cada documento incluye 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 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, y tratar todos los aspectos sobre protección contra las RNI.

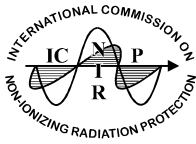
Los efectos biológicos reportados como resultado de la exposición a campos eléctricos y magnéticos estáticos y de frecuencia extremadamente baja- ELF han sido revisadas por la UNEP/ OMS/ IRPA (1984, 1987). Aquellas publicaciones y otras, incluyendo UNEP/ OMS/ IRPA (1993) y Allen y col. (1991) proveyeron la base científica para estas recomendaciones.

Durante la preparación de estas recomendaciones, la composición de la comisión fue como sigue: A. Ahlbom (Suecia); U. Bergqvist (Suecia); J. H. Bernhardt, Presidente desde Mayo de 1996 (Alemania); J. P. Cesarini (Francia); L. A. Court,, hasta Mayo de 1996 (Francia); M. Grandolfo, Vicepresidente hasta Abril de 1996 (Italia); M. Hietanen, desde Mayo de 1996 (Finlandia); A. F. McKinlay, Vicepresidente desde Mayo de 1996 (Reino Unido); M. H. Repacholli, Presidente hasta Abril de 1996, Presidente Emérito desde Mayo de 1996 (Australia); D. H. Sliney (Estados Unidos de América); J. A. J. Stolwijk (Estados Unidos de América); M. L. Swicort, hasta Mayo de 1996 (Estados Unidos de América); L. D. Szabo (Hungría); M. Taki (Japón); T. S. Tenforde (Estados Unidos de América); H. P. Jamment (Miembro Emérito, fallecido) (Francia); R. Matthes, Secretario Científico (Alemania).

Un glosario de términos aparece en el Apéndice.

PROPÓSITO Y CAMPO DE ACCIÓN

El principal objetivo de esta publicación es establecer recomendaciones para limitar la exposición a los 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 sus descendencia; un efecto biológico, por otro lado, puede o no puede resultar en un efecto adverso a la salud.



INTERNATIONAL COMMISSION ON NON-IONIZING RADIATION PROTECTION e.V.

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 a un potencial eléctrico diferente del cuerpo. Resultados de estudios de laboratorio y epidemiológicos, 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 presentes 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).

Para establecer los límites de exposición, la Comisión reconoce la necesidad de reconciliar diferentes opiniones de científicos. La validez de los reportes científicos tiene que ser considerada y las extrapolaciones de experimentos en animales a efectos en los seres humanos tienen que ser realizadas. Las restricciones en estas recomendaciones fueron basadas solamente en datos científicos, el conocimiento disponible 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

- **Restricciones básicas:** Restricciones a la exposición a campos eléctricos, magnéticos y electromagnéticos variables en el tiempo que están basados directamente en los efectos en la salud establecidos 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 tasa de absorción específica

de energía (SAR), y la densidad de potencia (**S**). Sólo la densidad de potencia en aire, fuera del cuerpo, puede ser rápidamente medida en individuos expuestos.

- **Niveles de referencia:** Estos niveles son proporcionados para propósitos de evaluar en forma práctica las exposiciones para determinar si es probable que las restricciones básicas sean excedidas. 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 de energía específica (SA). 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 están destinados a limitar las emisiones de los CEM bajo condiciones específicas de prueba, tampoco se trata sobre las técnicas usadas para medir cualquiera de las cantidades físicas que caracterizan a los campos magnéticos, eléctricos y electromagnéticos.

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).

Respetar las presentes recomendaciones puede no necesariamente excluir interferencias con, o efectos sobre, dispositivos médicos tales como prótesis metálicas, marcapasos y desfibriladores cardiacos, 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 del presente documento; pero están disponibles en documentos como (UNEP /OMS /IRPA 1993).

Estas recomendaciones serán periódicamente revisadas y actualizadas con los avances realizados en la identificación de los efectos adversos a la salud provenientes de los campos eléctricos, magnéticos y electromagnéticos variables en el tiempo.

CANTIDADES Y UNIDADES

Mientras que los campos eléctricos están asociados solamente con la presencia de la carga eléctrica, los campos magnéticos son el resultado del movimiento físico de las cargas eléctricas (corriente eléctrica). Un campo eléctrico **E** ejerce fuerzas sobre una carga eléctrica y se expresa en voltios por metro ($V m^{-1}$). Similarmente los campos magnéticos pueden ejercer fuerzas en las cargas eléctricas; pero solamente cuando las cargas están en movimiento. Los campos eléctricos y magnéticos tienen magnitud y dirección (son vectores): un campo magnético puede ser especificado en dos formas- como densidad de flujo magnético **B**, expresado en teslas (T), o como intensidad de campo magnético **H**, expresado en amperios por metro ($A m^{-1}$), las dos cantidades están relacionadas por:

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (1)$$

donde μ es la constante de proporcionalidad (la permeabilidad magnética); en el vacío o en el aire,

así como también en materiales no-magnéticos (incluyendo materiales biológicos) $\mu = 4 \pi 10^{-7} (H m^{-1})$. Por lo tanto cuando se describa un campo magnético para protección debería especificarse solamente una de las cantidades B o H.

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

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

$$S = E H = E^2 / 377 = H^2 \cdot 377 \quad (2)$$

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

expresar las restricciones a la exposición (como en el campo lejano).

La exposición a CEM variables en el tiempo resulta en corrientes internas dentro del cuerpo y absorción de energía en los tejidos que dependen de los mecanismos de acoplamiento y de la frecuencia involucrada. El campo eléctrico interno y la densidad de corriente están relacionadas por la ley de Ohm.

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (3)$$

donde σ es la conductividad eléctrica del medio.

Las cantidades dosimétricas en estas recomendaciones, tomando en cuenta los diferentes rangos de frecuencia y ondas son las que siguen.

- Densidad de corriente, \mathbf{J} , en el rango de frecuencia hasta 10 MHz
- Corriente, I , en el rango de frecuencia hasta 110 MHz
- Tasa específica de absorción de energía, SAR, en el rango de frecuencia de 100 kHz-10GHz.
- Absorción de energía específica, SA, para campos pulsantes en el rango de frecuencia de 300 MHz- 10GHz
- Densidad de potencia, \mathbf{S} , en el rango de frecuencia de 10-300GHz.

Un resumen general de los CEM y cantidades dosimétricas y unidades usadas en estas recomendaciones es proporcionada en la Tabla 1.

Tabla 1. Cantidades eléctricas, magnéticas electromagnéticas y dosimétricas y las unidades SI correspondientes

Cantidad	Símbolo	Unidades
Conductividad	σ	siemens por metro ($S m^{-1}$)
Corriente	I	amperio (A)
Densidad de corriente	\mathbf{J}	amperio por metro cuadrado ($A m^{-2}$)
Frecuencia	f	Hz (Hz)
Campo eléctrico	\mathbf{E}	voltio por metro ($V m^{-1}$)
Campo magnético	\mathbf{H}	amperio por metro ($A m^{-1}$)
Densidad de flujo magnético	\mathbf{B}	Tesla (T)
Permeabilidad magnética	μ	henrio por metro ($H m^{-1}$)
Permitividad	ϵ	faraday por metro ($F m^{-1}$)
Densidad de potencia	\mathbf{S}	vatio por metro cuadrado ($W m^{-2}$)
Absorción específica de energía	SA	joule por kilogramo ($J kg^{-1}$)
Tasa de absorción específica de energía	SAR	vatio por kilogramo ($W kg^{-1}$)

BASES PARA LIMITAR LA EXPOSICIÓN

Estas recomendaciones para limitar la exposición, han sido desarrolladas siguiendo una revisión exhaustiva de toda la literatura científica publicada. Los criterios aplicados en el curso de las revisiones fueron diseñados para evaluar la credibilidad de los diversos hallazgos reportados (Repacholi y Stolwijk 1991; Repacholi y Cardis 1997); sólo efectos establecidos, fueron usados como la base para restricciones de la exposición propuestas. La inducción de cáncer proveniente de exposiciones a los CEM de largo plazo no fue considerada como efecto establecido; luego estas recomendaciones están basadas en efectos inmediatos a la salud proveniente de exposiciones de corto plazo, tales como la estimulación en los nervios periféricos y músculos, choques eléctricos y quemaduras causadas por tocar objetos conductores, y la generación de temperaturas elevadas en los tejidos resultante de la absorción de energía durante la exposición a CEM. En el caso de efectos potenciales de largo plazo por la exposición, tales como un incremento en el riesgo de cáncer, ICNIRP concluye que la información disponible es insuficiente para proporcionar una base para el establecimiento de restricciones a la exposición, aunque la investigación epidemiológica ha proporcionado evidencia sugestiva, pero no convincente, de una posible asociación de efectos carcinogénicos y una exposición a niveles de densidad de flujo magnético de 50/60Hz sustancialmente más bajos que los recomendados por esta recomendación.

Los efectos in vitro para exposiciones de corto plazo a CEM de ELF o amplitud modulada de ELF son resumidos. Las respuestas transitorias de las células y los tejidos a la exposición a los CEM ha sido observado, pero sin una clara relación exposición-respuesta. Estos estudios son de valor limitado en la evaluación de los efectos a la salud porque muchas de las respuestas no han sido demostradas in vivo. Por lo tanto, los estudios in vitro por si mismo no fueron considerados para proporcionar información que pudiera servir como una base primaria para

evaluar los posibles efectos a la salud provenientes de los CEM.

MECANISMOS DE ACOPLAMIENTO ENTRE CAMPOS Y EL CUERPO

Hay tres tipos de mecanismos de acoplamiento básicos establecidos a través de los cuales interactúan los campos eléctricos y magnéticos variables en el tiempo con la materia viva (UNEP /OMS/IRPA 1993):

- Acoplamiento a campos eléctricos de baja frecuencia
- Acoplamiento a campos magnéticos de baja frecuencia
- Absorción de energía de los campos electromagnéticos.

Acoplamiento a los campos eléctricos de baja frecuencia

La interacción de campos eléctricos variables en el tiempo con el cuerpo humano resulta en un flujo de cargas eléctricas (corriente eléctrica), la polarización de la dirección de las cargas (formación de dipolos eléctricos), y la reorientación de dipolos eléctricos ya es presentes en el tejido. Las magnitudes relativas de estos diferentes efectos dependen de las propiedades eléctricas del cuerpo - que son, la conductividad eléctrica (que gobierna el flujo de corriente eléctrica) y la permitividad (que gobierna la magnitud del efecto de polarización). La conductividad eléctrica y la permitividad varían con el tipo de tejido y también dependen de la frecuencia del campo aplicado. Los campos eléctricos externos al cuerpo inducen una carga superficial en el cuerpo; esto produce corrientes inducidas en el cuerpo, la distribución de los cuales depende de las condiciones de exposición, del tamaño y forma del cuerpo, y de la posición del cuerpo frente al campo.

Acoplamiento a campos magnéticos de baja frecuencia

La interacción física de los campos magnéticos variables en el tiempo con el cuerpo humano genera campos eléctricos inducidos y la circulación de corrientes eléctricas. Las magnitudes

de los campos inducidos y de la densidad de corriente son proporcionales al radio de la espira, la conductividad eléctrica del tejido, y la tasa de cambio y la magnitud de la densidad de flujo magnético. Para una magnitud y frecuencia dada del campo magnético, los campos eléctricos inducidos son más fuertes cuando las dimensiones de la espira son mayores. La trayectoria exacta y la magnitud resultante de las corrientes inducidas en cualquier parte del cuerpo dependerán de la conductividad eléctrica del tejido.

El cuerpo no es eléctricamente homogéneo; sin embargo la densidad de las corrientes inducidas puede ser calculada usando modelos anatómicamente y eléctricamente realistas del cuerpo y métodos computacionales, los cuales tienen un alto grado de resolución anatómica.

Absorción de energía de los campos electromagnéticos

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 deposición 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):

- 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.

- 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).
- Frecuencias en el rango por encima de los 300 MHz a varios GHz, en las cuales ocurre una absorción no- uniforme significativamente local.
- Frecuencias por encima de los 10 GHz, en las cuales la absorción de energía ocurre principalmente en la superficie del cuerpo.

En los tejidos, el SAR es proporcional al cuadrado de campo eléctrico interno. La distribución del SAR promedio y del SAR puede ser calculada o estimada a partir de medidas de laboratorio. Los valores de SAR dependen de los siguientes factores:

- Los parámetros de campos incidentes, por Ej., la frecuencia, la intensidad, polarización, y la configuración fuente-objeto (campo cercano o lejano)
- Las características del cuerpo expuesto, es decir su tamaño, su geometría interna y externa y las propiedades dieléctricas de sus tejidos varios.
- Los efectos de la tierra eléctrica y los efectos de reflexión de otros objetos en el campo cercano del cuerpo expuesto.

Cuando el eje mayor del cuerpo humano es paralelo al vector del campo eléctrico, y bajo condiciones de exposición de onda plana (Por Ej. exposición de campo lejano), el SAR de cuerpo entero alcanza valores máximos. La cantidad de energía absorbida depende de un número de factores, incluyendo el tamaño del cuerpo expuesto. "Hombre de referencia estandarizado" (ICRP 1994), si no tiene conexión a tierra eléctrica, tiene una frecuencia de resonancia de la absorción cercana a los 70 MHz. Para individuos más altos, la frecuencia de resonancia de la absorción es un tanto más baja, y para adultos más bajos, niños, bebés, e individuos sentados

puede exceder los 100 MHz. Los valores de los niveles de referencia del campo eléctrico están basados en la dependencia con respecto a la frecuencia de la absorción humana; en individuos con conexión a tierra eléctrica, las frecuencias resonantes son más bajas por un factor de 2 (UNEP /OMS/IRPA 1993).

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. Finalmente, los datos de SAR obtenidos mediante mediciones son consistentes con la información obtenida de los cálculos matemáticos con modelación numérica. El SAR promedio de cuerpo entero y el SAR localizado son cantidades convenientes para comparar los efectos observados bajo condiciones variadas de exposición. Una discusión en detalle del SAR se puede encontrar en (UNEP /OMS/IRPA 1993).

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



INTERNATIONAL COMMISSION ON NON-IONIZING RADIATION PROTECTION e.V.

energía absorbida; la densidad de potencia incidente del campo (en $W m^{-2}$) es una cantidad dosimétrica más apropiada.

MECANISMOS DE ACOPLAMIENTO INDIRECTO

Hay dos mecanismos de acoplamiento indirecto:

- Corrientes de contacto que resultan cuando el cuerpo humano entra en contacto con un objeto a un potencial eléctrico diferente (Ej. cuando el cuerpo o los objetos están cargados por un CEM).
- Acoplamiento a los CEM de dispositivos médicos adheridos, o implantados en un individuo (no considerados en este documento).

La carga de un objeto conductor por parte de CEM causa corrientes eléctricas que pasan a través del cuerpo humano en contacto con dicho objeto (Tenforde y Kaune 1987; UNEP /OMS /IRPA 1993). La magnitud y distribución espacial de tales corrientes dependen de la frecuencia, del tamaño del objeto, del tamaño de la persona, y del área de contacto; las descargas transitorias chispas- pueden ocurrir cuando un individuo y un objeto conductor expuesto a campos intensos entran en una situación de proximidad cercana.

BASE BIOLÓGICA PARA LIMITAR LA EXPOSICION (HASTA 100 kHz)

Los siguientes párrafos proveen una revisión general de literatura relevante acerca de los efectos biológicos y a la salud que producen los campos eléctricos y magnéticos con rangos de frecuencia hasta 100 kHz, en el cual el principal mecanismo de interacción es la inducción de corrientes en tejidos. Para rangos de frecuencia entre 0 a 1Hz, la base biológica para las restricciones básicas y los niveles de referencia son proveidos por ICNIRP (1994). Revisiones más detalladas están disponibles en otros lugares (NRPB 1991, 1993; UNEP/WHO/IRPA 1993; Blanck 1995; NAS 1996; Polk y Postow 1996; Ueno 1996).

Efectos directos de los campos eléctricos y magnéticos

Estudios epidemiológicos. Han habido muchas revisiones de estudios epidemiológicos del riesgo de cáncer en relación a la exposición a los campos en frecuencia de potencia (NRPB 1992, 1993, 1994b; ORAU 1992; Savitz 1993; Brezo 1996; Stevens y Davis 1996; Tenforde 1996; NAS 1996).

Revisiones similares se han publicado sobre el riesgo de resultados reproductivos adversos asociados a la exposición a CEM (Chernoff y col. 1992; Brent y col. 1993; Shaw y Croen 1993; NAS 1996; Tenforde 1996).

Resultados en la reproducción. Los estudios epidemiológicos acerca de resultados en el embarazo no han proveído de ninguna evidencia consistente de efectos reproductivos adversos en la mujeres que trabajaban con monitores de video (VDU) (Bergqvist 1993; Shaw y Croen 1993; NRPB 1994a; Tenforde 1996). Por ejemplo, el meta-análisis no reveló ningún exceso de riesgo de aborto espontáneo o de malformación en estudios combinados que comparaban a mujeres embarazadas usando las VDU con mujeres que no usaban las VDU (Shaw y Croen 1993). Otros dos estudios se concentraron en mediciones reales de los campos eléctricos y magnéticos emitidos por VDUs; uno sugería una asociación entre los campos magnéticos de ELF y el aborto (Lindbohm y col. 1992), mientras que el otro no encontró ninguna asociación (Schnorr y col. 1991). Un estudio prospectivo que incluyó una gran cantidad de casos, con altas tasas de participación, y evaluación detallada de la exposición (Bracken y col. 1995) señaló que ni el peso del recién nacido, ni la tasa de crecimiento intrauterina fue relacionado con la exposición al campo ELF. Los resultados reproductivos adversos no fueron asociados a niveles más altos de exposición. Las mediciones de la exposición incluyeron la capacidad real de las líneas de potencia fuera de los hogares, mediciones de siete días de exposición individual, mediciones de 24 horas en el hogar, incluyendo el uso de mantas eléctricas, de camas de agua caliente, y de las VDU. La mayoría de la información actualmente disponible

no logra demostrar una asociación entre la exposición ocupacional a VDU y los efectos reproductivos adversos (NRPB 1994a; Tenforde 1996).

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

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

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

estimado más válido. Aunque, de hecho, los resultados sugieren que el campo magnético puede desempeñar un rol en asociación con el riesgo de leucemia, hay incertidumbre debido a la pequeña cantidad de la muestra y debido a la correlación entre el campo magnético y la proximidad a las líneas de potencia (Feychting y col. 1996).

Poco se sabe sobre la etiología de la mayoría de los tipos de cáncer en niños, pero varios intentos por controlar factores de confusión potenciales tales como el estatus socioeconómico y la contaminación atmosférica por humos de los desfogues de los vehículos motorizados han tenido pocos resultados. Los estudios que han examinado el uso de aparatos eléctricos (sobre todo mantas eléctricas) en lo referente a cáncer y a otros problemas de salud han señalado resultados generalmente negativos (Preston-Martin y col. 1988; Verreault y col. 1990; Vena y col. 1991, 1994; Li y col. 1995). Solamente dos estudios de caso-control han evaluado el uso de aparatos en lo referente al riesgo de la leucemia en la niñez. Uno fue conducido en Denver (Savitz y col. 1990) y sugirió una conexión con el uso de mantas eléctricas en prenatales; el otro, realizado en Los Ángeles (London y col. 1991), encontró una asociación entre la leucemia y los niños usando los secadores de pelo y mirando televisión monocromática.

El hecho de que los resultados para la leucemia basada en la proximidad de hogares a las líneas de potencia son relativamente consistentes llevó al Comité de Ciencias de la Academia Nacional de los E.E.U.U. a concluir que los niños que viven cerca de líneas de potencia parecen estar en riesgo creciente de leucemia (NAS 1996). Debido a la pequeña magnitud de las muestras, los intervalos de confianza en los estudios individuales son amplios; cuando se toman en conjunto, sin embargo, los resultados son consistentes, con un riesgo combinado de 1,5 (NAS 1996). En contraste, las mediciones de corto plazo del campo magnético en algunos de los estudios no proporcionaron ninguna evidencia de una asociación entre la exposición a los campos de 50/60 Hz y el riesgo de leucemia o de

INTERNATIONAL COMMISSION ON NON-IONIZING RADIATION PROTECTION e.V.

ninguna otra forma de cáncer en niños. El Comité de la NAS no fue convencido de que este aumento en riesgo fuera explicado por la exposición a los campos magnéticos, puesto que no había asociación evidente cuando la exposición era estimada por lecturas de contadores de campo magnético en los hogares de los casos de leucemia y en los hogares de los casos de control. Se sugirió que hubo una confusión por un cierto factor de riesgo desconocido para la leucemia en la niñez, asociado a la residencia en la cercanía de líneas de potencia, pero no se postuló ningún factor probable.

Después de que el Comité de la NAS terminó su revisión, los resultados de un estudio realizado en Noruega fueron reportados (Tynes y Haldorsen 1997). Este estudio incluyó 500 casos de todos los tipos de cáncer en la niñez. Cada exposición individual era estimada por el cálculo del nivel del campo magnético producido en la residencia por las líneas de transmisión próximas, estimadas haciendo el promedio de un año completo. No se observó ninguna asociación entre el riesgo de leucemia y los campos magnéticos para residencia cuando se realizó el diagnóstico. La distancia de la línea de potencia, la exposición durante el primer año de la vida, la exposición de las madres en la época de la concepción y la exposición a niveles más altos que el nivel medio de los casos-control no mostraron ninguna asociación con leucemia, cáncer cerebral, o linfoma. Sin embargo, el número de casos expuestos era pequeño.

También un estudio realizado en Alemania ha sido reportado después de la terminación de la revisión de la NAS (Michaelis y col. 1997). Este fue un estudio caso-control de la leucemia de la niñez basada en 129 casos y 328 controles. La tasa de exposición abarcó mediciones del campo magnético en un periodo de 24 horas en el dormitorio del niño en la residencia donde el niño había estado viviendo por el periodo más largo antes de la fecha del diagnóstico. Un riesgo relativo elevado de 3,2 fue observado para niveles mayores a 0,2 μT .

Un estudio grande de caso-control en los E.E.U.U. (638 casos y 620 controles) para probar si la leucemia linfoblástica aguda de la niñez está asociada a la exposición a campos magnéticos 60-Hz fue publicado por Linet y col. (1997). Las exposiciones del campo magnético fueron determinadas usando mediciones promedio durante 24 horas con ponderación en tiempo en el dormitorio y mediciones de 30 segundos en las otras habitaciones. Las mediciones fueron tomadas en los hogares en los cuales el niño había vivido un 70% de los últimos 5 años anteriores al diagnóstico, o el período correspondiente para los controles. Los códigos de los alambres fueron evaluados para pares caso-control residencialmente estables en los cuales ambos no habían cambiado su residencia durante los años anteriores al diagnóstico. El número de tales pares para los cuales se pudo realizar la evaluación fueron 416. No hubo ninguna indicación de alguna asociación entre el código de alambre y la leucemia. En cuanto a las mediciones del campo magnético, los resultados son más intrigantes. Para los puntos de corte de 0,2 μT los análisis emparejados y no emparejados dieron riesgos relativos de 1,2 y 1,5, respectivamente. Para un punto de corte de 0,3 μT , el riesgo relativo para sujetos no-emparejados se estimó en 1,7 basados en 45 casos expuestos. Por lo tanto los resultados de las mediciones sugieren una asociación positiva entre los campos magnéticos y el riesgo de leucemia. Este estudio es una contribución importante en términos de tamaño, número de sujetos en categorías de exposición alta, oportunidad con respecto a la ocurrencia de leucemia (generalmente dentro de los 24 meses después del diagnóstico), otras mediciones utilizadas para obtener datos de exposición, y calidad de análisis permiten múltiples confusiones potenciales. Las debilidades potenciales incluyen el procedimiento para la selección del control, las tasas de participación, y los métodos usados para el análisis estadístico de los datos. Los instrumentos usados para las mediciones no tuvieron en cuenta ningún tipo de campos transitorios o armónicos de

orden superior. El tamaño de este estudio es tal que sus resultados, combinados con los de otros estudios, debilitarían perceptiblemente (sin embargo no necesariamente invalidan) la asociación previamente observada con resultados del código del alambre.

A través de los años también han habido intereses substanciales en conocer si es que hay una asociación entre la exposición del campo magnético y el cáncer de cerebro en niños, el segundo tipo frecuente de cáncer encontrado en niños. Tres estudios recientemente completados después de la revisión del Comité NAS fallaron en proporcionar un soporte para una asociación entre, cáncer al cerebro y la exposición a campos magnéticos en niños; indistintamente si la fuente de los campos fueron las líneas de potencia o mantas eléctricas, o si es que el campo magnético se estimó por cálculos o por código de los alambres (Guenel y col. 1996; Preston-Martin y col. 1996a, b; Tynes y Haldorsen 1997).

Los datos sobre cáncer en adultos y la exposición residencial a campos magnéticos son escasos (NAS 1996). Los pocos estudios publicados hasta la fecha (Wertheimer y Leeper 1979; McDowall 1985; Seversen y col. 1988; Coleman y col. 1989; Schreiber y col. 1993; Feychting y Ahlbom 1994; Li y col. 1996; Verkasalo 1996; Verkasalo y col. 1996), todos muestran hasta cierto punto una pequeña cantidad de casos expuestos, y ninguna conclusión puede ser desarrollada.

El juicio de ICNIRP es que los resultados de las investigaciones epidemiológicas en exposiciones a campos CEM y cáncer incluyendo leucemia en niños, no son suficientemente fuertes, por la ausencia de un soporte de investigaciones experimentales, para formar una base científica para establecer recomendaciones sobre la exposición. Este juicio también está en concordancia con revisiones recientes (NRPB 1992, 1994b; NAS 1996; CRP 1997).

Estudios Ocupacionales. Una gran cantidad de estudios epidemiológicos se han realizado para

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

Tres estudios recientes han intentado superar algunas de las deficiencias en el trabajo anterior midiendo la exposición del campo de ELF en el lugar de trabajo y tomando en consideración la duración del trabajo (Floderus y col. 1993; Thériault y col. 1994; Savitz y Loomis 1995). Se observó un riesgo elevado de cáncer entre individuos expuestos, pero el tipo de cáncer varío de estudio en estudio. Floderus y col. (1993) encontraron una asociación significativa con leucemia; también fue observada por Theriault y col. (1994), pero solamente fue débil y no significativa, y no se observó ninguna conexión por Savitz y Loomis (1995). Para los subtipos de la leucemia había incluso mayor inconsistencia, pero las muestras en los análisis eran pequeños. Para los tumores del tejido nervioso, Floderus y col. (1993) encontraron un exceso de glioblastoma (astrocytoma III.IV), mientras que Theriault y col. (1994) y Savitz y

INTERNATIONAL COMMISSION ON NON-IONIZING RADIATION PROTECTION e.V.

Loomis (1995) encontraron solamente la evidencia sugestiva para un aumento en el glioma (astrocytoma I.II). Si hay verdaderamente una conexión entre la exposición ocupacional a los campos magnéticos y el cáncer, mayor consistencia y asociaciones más fuertes deberían esperarse de los estudios recientes basados en datos más sofisticados de la exposición.

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

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

Estudios de laboratorio. Los párrafos siguientes proporcionan una evaluación resumida y crítica de los estudios de laboratorio en los efectos biológicos de campos eléctricos y magnéticos de

frecuencias debajo de los 100 kHz. Hay discusiones separadas sobre los resultados obtenidos en estudios en voluntarios expuestos bajo condiciones controladas y en laboratorio estudiándose en células, tejido, y sistemas animales.

Estudios en voluntarios. La exposición a un campo eléctrico variable en el tiempo puede dar lugar a la percepción del campo como un resultado de la carga eléctrica alterna inducida en la superficie del cuerpo, el cual causa que los vellos del cuerpo vibren. Varios estudios han mostrado que la mayoría de gente puede percibir campos eléctricos de 50/60 Hz mayores que 20 kV m^{-1} , y que una pequeña minoría puede percibir campos por debajo de 5 kV m^{-1} (UNEP/ OMS/ IRPA 1984; Tenforde 1991).

Pequeños cambios en la función cardíaca ocurrieron en los humanos voluntarios expuestos a campos eléctricos y magnéticos combinados de 60-Hz (9 kV m^{-1} , $20 \text{ }\mu\text{T}$) (Cook y col. 1992; Graham y col. 1994). El ritmo cardíaco de descanso estaba levemente, pero significativamente, reducido (por 3 a 5 latidos por minuto) durante o inmediatamente después de la exposición. Esta respuesta estaba ausente en contacto con campos más fuertes (12 kV m^{-1} , $30 \text{ }\mu\text{T}$) o más débiles (6 kV m^{-1} , $10 \text{ }\mu\text{T}$) y reducida si el sujeto estaba mentalmente alerta. Ningunos de los sujetos en estos estudios podían detectar la presencia de los campos, y no hubo resultados consistentes en una batería de pruebas sensoriales y perceptivas.

No se observó ningún tipo de efectos fisiológicos o psicológicos adversos en estudios del laboratorio de la gente expuesta a los campos de 50-kHz en el rango de 2 a 5 mT (Sander y col. 1982; Ruppe y col. 1995). No hubo cambios observados en la química de la sangre, cantidad de células de la sangre, gases de la sangre, niveles del lactato, electrocardiograma, electroencefalograma, temperatura de la piel, o niveles de la hormona de la circulación en estudios realizados por Sander y col. (1982) y Graham y col. (1994). Estudios recientes en voluntarios no pudieron mostrar algún efecto de la

exposición a campos magnéticos de 60 Hz en el nivel nocturno de melatonina en la sangre (Graham y col. 1996, 1997; Selmaoui y col. 1996).

Campos magnéticos suficientemente intensos de ELF pueden provocar en los nervios periféricos y en el tejido muscular una estimulación directa, y se han utilizado clínicamente pulsos cortos del campo magnético para estimular los nervios en las extremidades para chequear la integridad de los caminos nerviosos. El estímulo de los nervios periféricos y de los músculos también ha sido reportado en voluntarios expuestos a gradientes de campos magnéticos de 1 kHz en sistemas experimentales de proyección de imagen de resonancia magnética. Las densidades de flujo magnético umbral eran varios militesla, y las densidades de corriente inducidas correspondientes en los tejidos periféricos eran cerca de 1 A m^{-2} ; para los pulsos de campo producidos por gradientes rápidamente conmutadas. Los campos magnéticos variables en el tiempo que inducen densidades de corriente sobre 1 A m^{-2} en el tejido, producen la excitación de los nervios y son capaces de producir efectos biológicos irreversibles tales como fibrilación cardiaca (Tenforde y Kaune 1987; Reilly 1989). En un estudio que utilizaba grabaciones electromiográficas del brazo humano (Polson y col. 1982), se encontró que un campo pulsado con dB/dt mayor de 10^4 T s^{-1} era necesario para estimular el tronco nervioso medio. También se ha encontrado que un parámetro importante en el estímulo de tejidos excitables es la duración del estímulo magnético.

Umbrales menores que 100 mA m^{-2} se pueden derivar de estudios de las funciones visuales y mentales en voluntarios humanos. Cambios en el tiempo de respuesta para las pruebas de razonamiento complejo, han sido señalados en los voluntarios sujetos a corrientes eléctricas débiles en frecuencias de potencia pasadas a través de electrodos colocados en la cabeza y los hombros; las densidades de corriente fueron estimadas entre 10 y 40 mA m^{-2} (Stollery 1986, 1987). Finalmente, muchos estudios han señalado que los voluntarios

experimentaron sensaciones visuales débiles y titilantes, conocidas como fosfenos magnéticos, durante la exposición a los campos magnéticos de ELF entre 3 a 5 mT (Silny 1986). Estos efectos visuales también se pueden inducir por la aplicación directa de corrientes eléctricas débiles a la cabeza. En 20 Hz, densidades de corriente de cerca de 10 mA m^{-2} en la retina han sido estimadas como el umbral para la inducción de fosfenos, que está por encima de las densidades de corriente endógena típicas en tejidos eléctricamente excitables. Umbrales más altos se han observado para frecuencias más bajas y más altas (Lovsund y col. 1980; Tenforde 1990).

Algunos estudios han sido desarrollados en 50 Hz sobre potenciales visualmente evocados que exhibieron umbrales para los efectos en densidades de flujo del orden de 60 mT (Silny 1986). Consistentemente con estos resultados, no se obtuvo ningún efecto para potenciales visualmente evocados que fueron obtenidos por Sander y col. (1982), usando campos de 50-Hz y 5 mT, o Graham y col. (1994), con campos eléctricos y magnéticos combinados en 60 Hz de 12 kV m^{-1} y $30 \mu\text{T}$, respectivamente.

Estudios celulares y animales. A pesar de que se han emprendido un gran número de estudios para detectar efectos biológicos de los campos eléctricos y magnéticos de ELF, pocos estudios sistemáticos han definido las características del umbral del campo que produce perturbaciones significativas en las funciones biológicas. Esta bien establecido que la corriente eléctrica inducida puede estimular el tejido nervioso y muscular directamente una vez que la densidad de corriente inducida excede los valores del umbral (UNEP/ OMS/ IRPA 1987; Bernhardt 1992; Tenforde 1996). Densidades de corriente que no pueden estimular tejidos excitables directamente; pueden sin embargo afectar la actividad eléctrica en curso e influenciar la excitabilidad neuronal. Se sabe que la actividad del sistema nervioso central es sensible a los campos eléctricos endógenos generados por la acción de las

células nerviosas adyacentes, a niveles por debajo de los requeridos para el estímulo directo.

Muchos estudios han sugerido que la transducción de señales eléctricas débiles en el rango de ELF implica interacciones con la membrana de la célula, conduciendo a respuestas bioquímicas citoplásmicas que a su vez implican cambios en estados funcionales y proliferativos de la célula. A partir de modelos simples del comportamiento de células en campos débiles se ha calculado que una señal eléctrica en el campo extracelular debe ser mayor que aproximadamente $10\text{-}100\text{ mV m}^{-1}$ (que corresponde a una densidad corriente inducida de cerca de $2,20\text{ mA m}^{-2}$) para exceder el nivel del ruido físico y biológico endógeno en membranas celulares (Astumian y col. 1995). La evidencia existente también sugiere que varias características estructurales y funcionales de las membranas se pueden alterar en respuesta a los campos inducidos de ELF en o debajo de 100 mV m^{-1} (Sienkiewicz y col. 1991; Tenforde 1993). Se han señalado alteraciones neuroendocrinas (Ej. supresión de la síntesis de melatonina nocturnal) como respuesta a los campos eléctricos inducidos de 10 mV m^{-1} o menos, correspondientes a densidades de corriente inducidas de aproximadamente 2 mA m^{-2} o menos (Tenforde 1991, 1996). Sin embargo, no hay evidencia clara que estas interacciones biológicas de los campos de baja frecuencia conducen a efectos de salud adversos.

Se ha mostrado que los campos eléctricos y las corrientes inducidas en niveles que excedían a los de las señales bioeléctricas endógenas presentes en los tejidos, causan un número de efectos fisiológicos que aumentan en severidad conforme aumenta la densidad de corriente inducida (Bernhardt 1979; Tenforde 1996). En el rango $10\text{-}100\text{ mA m}^{-2}$ de densidad de corriente, se han señalado efectos en los tejidos y en las funciones cognitivas del cerebro (NRPB 1992; NAS 1996). Cuando la densidad de corriente inducida excede de 100 a varios cientos de mA m^{-2} , para las frecuencias aproximadamente entre 10 Hz y 1 kHz, se exceden los umbrales para el estímulo neuronal y neuromuscular. Las densidades

de corriente umbral aumentan progresivamente en las frecuencias debajo de varios Hz y por encima de 1 kHz. Finalmente, en densidades de corriente extremadamente altas que exceden a 1 A m^{-2} pueden ocurrir problemas severos y potencialmente peligrosos para la vida, pudiendo ocurrir efectos tales como extrasístoles cardiacos, fibrilación ventricular, tétanos muscular, y fallas respiratorias. La severidad y la probabilidad de irreversibilidad de los efectos en los tejidos llegan a ser mayores con la exposición crónica a densidades de corrientes inducidas del nivel $10\text{ - }100\text{ mA m}^{-2}$. Por lo tanto parece apropiado limitar la exposición humana a los campos que inducen densidades de corrientes no mayores que 10 mA m^{-2} en la cabeza, el cuello, y el tronco en frecuencias de pocos Hz hasta 1 kHz.

Se ha postulado que las fuerzas magnetomecánicas oscilatorias y los torques en partículas biogénicas de magnetita en tejido cerebral podrían proporcionar un mecanismo para la transducción de señales de campos magnéticos de ELF. Kirschvink y col. (1992b) propusieron un modelo por el cual las fuerzas magnéticas de ELF en partículas de magnetita se visualizan como producto de la apertura y cierre de los canales sensibles a la presión iónica en membranas. Sin embargo, una dificultad con este modelo es la dispersión de las partículas de magnetita concerniente al número de células en tejido del cerebro. Por ejemplo, se ha reportado que el tejido del cerebro humano contiene algunos millones de partículas de la magnetita por gramo, distribuido en 10^5 clusters discretos de 5-10 partículas (Kirschvink y col. 1992a). El número de células en el tejido cerebral excede al número de partículas de magnetita por un factor de alrededor de 100, y es difícil considerar cómo la interacción magnetomecánica oscilante de un campo ELF con magnetita de cristal puede afectar a un número significativo de canales iones sensibles a la presión en el cerebro. Claramente se necesitan estudios adicionales para revelar el papel biológico de la magnetita y de los mecanismos posibles a través de los cuales este mineral podría desempeñar un papel

en la transducción de las señales magnéticas de ELF.

Un tema importante para evaluar los efectos de campos electromagnéticos es la posibilidad de efectos teratogénicos y en el desarrollo. En base a las evidencias científicas publicadas, es improbable que los campos de baja frecuencia tengan efectos nocivos en el desarrollo embrionario y postnatal de las especies mamíferas (Chernoff y col. 1992; Brent y col. 1993; Tenforde 1996). Además, la evidencia actualmente disponible indica que las mutaciones somáticas y los efectos genéticos son poco probables como resultado de la exposición a los campos eléctricos y magnéticos con frecuencias por debajo de 100 kHz (Cridland 1993; Sienkiewicz y col. 1993).

Hay numerosos informes en la literatura acerca de los efectos *in vitro* de los campos de ELF en las propiedades de la membrana de la célula (transporte de iones e interacción de mitógenos con los receptores superficiales de la célula) y cambios en las funciones celulares y las características del crecimiento (Ej. incremento de la proliferación y las alteraciones del metabolismo, la expresión de genes, la biosíntesis de proteínas, y las actividades enzimáticas) (Cridland 1993; Sienkiewicz y col. 1993; Tenforde 1991, 1992, 1993, 1996). Una atención considerable se ha centrado en efectos de los campos de baja frecuencia sobre el transporte del Ca^{++} a través de la membrana de la célula y de la concentración intracelular de este ión (Walleczek y Liburdy 1990; Liburdy 1992; Walleczek 1992), RNA mensajero y patrones de síntesis de proteína (Goodman y col. 1983; Goodman y Henderson 1988, 1991; Greene y col. 1991; Phillips y col. 1992), y la actividad de las enzimas tales como la ornitina descarboxilasa (ODC) que se relacionan con la proliferación de las células y la formación de tumores (Byus y col. 1987, 1988; Litovitz y col. 1991, 1993). Sin embargo, antes de que estas observaciones se puedan utilizar para definir límites de exposición, es esencial establecer su reproductibilidad y su importancia para ocasionar cáncer u otros resultados adversos de la salud. Este

punto es subrayado por el hecho de que han habido dificultades en la replica de algunas de las observaciones dominantes de los efectos del campo sobre la expresión de genes y la síntesis de proteínas (Lacy-Hulbert y col. 1995; Saffer y Thurston 1995). Los autores de estos estudios de replicación identificaron varias deficiencias en los estudios anteriores, incluyendo un control de temperatura pobre, carencia en las muestras de un control interno apropiado, y el uso de técnicas de baja resolución para analizar la producción de transcriptos del RNA mensajero. Se reportó que el aumento transitorio en la actividad del ODC como respuesta a la exposición del campo es de pequeña magnitud y no se asocia con la síntesis del novo de la enzima (a diferencia de los promotores químicos de los tumores tales como ésteres del phorbol) (Byus y col. 1988). Los estudios sobre ODC han implicado sobre todo preparaciones celulares; mayores estudios son necesarios para demostrar si hay efectos sobre ODC *in vivo*, aunque hay un informe que sugiere efectos sobre ODC en un análisis de la proliferación del tumor mamario de la rata (Mevissen y col. 1995).

No hay evidencia que los campos de ELF alteran la estructura del DNA y de la cromatina, y no se espera ninguno efecto como mutaciones ni transformaciones neoplásicas. Esto es sustentado por resultados de los estudios de laboratorio diseñados para detectar daños en el DNA y a nivel cromosómico, presencia de mutaciones e incremento en la frecuencia de transformación en respuesta a la exposición del campo de ELF (NRPB 1992; Murphy y col. 1993; McCann y col. 1993; Tenforde 1996). La carencia de efectos sobre la estructura del cromosoma sugiere que los campos de ELF, si tienen algún efecto en el proceso de la carcinogénesis, lo más probable es que actúen como promotores y no como los iniciadores, realizando la proliferación de células genéticamente alteradas más bien que causando la lesión inicial en DNA o la cromatina. Una influencia en el desarrollo de los tumores se podría realizar mediante efectos epigenéticos de estos campos, tales como

alteraciones en los caminos de las señales de las células o la expresión de genes. El foco de estudios recientes por lo tanto se ha centrado en la detección de efectos posibles de los campos de ELF en las fases de la promoción y de la progresión del desarrollo del tumor seguido de una iniciación por cancerígenos químicos.

Estudios *in vitro* de crecimiento en células tumorales y el desarrollo de tumores trasplantados en roedores no han proporcionado ninguna evidencia fuerte para los posibles efectos cancerígenos de la exposición a los campos de ELF (Tenforde 1996). Varios estudios que se centran en la relevancia directa del cáncer humano han desarrollado pruebas *in vivo* para la actividad de promoción de los tumores por los campos magnéticos de ELF en piel, hígado, cerebro, y tumores mamarios en roedores. Tres estudios acerca de la promoción del tumor en la piel (McLean y col. 1991; Rannug y col. 1993a, 1994) no pudieron mostrar ningún efecto de la exposición continua o intermitente a los campos magnéticos en frecuencias de potencia en la promoción de tumores químicamente inducidos. Se reportó un efecto de co-promoción del desarrollo del tumor de piel en ratón, de un campo de 60 Hz y 2 mT, con un éster del phorbol para en las etapas iniciales del experimento, pero la significancia estadística de ello fue perdida por la terminación del estudio en la semana 23 (Stuchly y col. 1992). Los estudios anteriores realizados por los mismos investigadores mostraron que para una, exposición del campo de 60 Hz y 2 mT no se promovió el crecimiento de las células de la piel con DMBA-iniciado (McLean y col. 1991).

Los experimentos en el desarrollo de los focos transformadores del hígado iniciados por un cancerígeno químico y promovidos por el éster del phorbol en ratas parcialmente hepatectomizadas no revelaron ningún efecto de la promoción o de la co-promoción de la exposición a campos de 50 Hz en un rango de intensidad de 0,5 a 50 μ T (Rannug y col. 1993b, 1993c).

Los estudios sobre el desarrollo del cáncer mamario en roedores tratados con un iniciador

químico sugirieron un efecto de promoción del cáncer de la exposición a los campos magnéticos en frecuencias de potencia en el rango 0,01 a 30 mT (Beniashvili y col. 1991; Löscher y col. 1993; Mevissen y col. 1993, 1995; Baum y col. 1995; Löscher y Mevissen 1995). Estas observaciones de la incidencia creciente del tumor en las ratas expuestas a los campos magnéticos se ha presumido están relacionadas con la supresión inducida por el campo de la melatonina pineal y la consecuente elevación en los niveles de hormonas esteroides y el riesgo de cáncer de pecho (Stevens 1987; Stevens y col. 1992). Sin embargo, son necesarios esfuerzos de replicación por laboratorios independientes antes de que se puedan trazar las conclusiones con respecto a las implicaciones de estos resultados para definir un efecto promotor de los tumores mamarios por parte de los campos magnéticos de ELF. Debe también notarse que los estudios recientes no han encontrado ninguna evidencia de un efecto significativo de la exposición a los campos magnéticos de ELF sobre los niveles de melatonina en seres humanos (Graham y col. 1996, 1997; Selmaoui y col. 1996).

Efectos indirectos de los campos magnéticos y eléctricos

Los efectos indirectos de los campos electromagnéticos pueden ser resultado de un contacto físico (Ej. tacto o roce) entre una persona y un objeto, tal como una estructura metálica en el campo, con un potencial eléctrico diferente. El resultado de tal contacto es el flujo de carga eléctrica (corriente del contacto) que pudo haberse acumulado en el objeto o en el cuerpo de la persona. En el rango de frecuencia hasta aproximadamente 100 kHz, el flujo de corriente eléctrica de un objeto en el campo al cuerpo del individuo puede dar lugar al estímulo de los músculos y/o los nervios periféricos. Con el aumento de niveles de la corriente esto se puede manifestar como una percepción, dolor por descarga eléctrica y/o quemadura, falta de habilidad para soltar el objeto, dificultad en la respiración y en corrientes muy altas, fibrilación ventricular cardiaca (Tenforde y

de Kaune 1987). Los valores de umbral para estos efectos dependen de la frecuencia, el umbral más bajo ocurre en las frecuencias entre 10 y 100 Hz. Los umbrales para las respuestas de los nervios periféricos permanecen bajos para frecuencias de hasta varios kHz. Con la ingeniería y/o controles de administración apropiados, e incluso mediante el uso de ropa de protección para el personal, se puede evitar que estos problemas ocurran.

Descargas de chispa pueden ocurrir cuando un individuo se acerca a un objeto con un potencial eléctrico diferente, sin realmente tocarlo (Tenforde y Kaune 1987; UNEP/WHO/IRPA 1993). Cuando un grupo de los voluntarios, quienes estaban aislados eléctricamente de la tierra, mantuvieron la punta de un dedo cerca de un objeto puesto a tierra, el umbral para la percepción de descargas de chispa era tan bajo como 0,6-1,5 kV m⁻¹ en el 10% de casos. El nivel de umbral del campo reportado como causante de molestia bajo estas condiciones de exposición estuvo en el orden de 2,0-3,5 kV m⁻¹. Corrientes de contacto grandes pueden dar lugar a la contracción de los músculos. En los voluntarios masculinos, el umbral del percentil 50 para no poder soltar un conductor cargado ha sido reportado como 9 mA en 50/60 Hz, 16 mA en 1 kHz, cerca de 50 mA en 10 kHz, y cerca de 130 mA en 100 kHz (UNEP/ OMS/ IRPA 1993).

Las corrientes de umbral para varios efectos indirectos de campos con frecuencias hasta 100 kHz se resumen en la Tabla 2. (UNEP/ OMS/ IRPA 1993).

Tabla 2

Rangos de corriente 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
Percepción al tocar	0,2- 0,4	04- 0,8	25- 40
Dolor en el dedo que hace contacto	0,9- 1, 8	1,6- 3,3	33-55
Descarga dolorosa/ umbral let-go [translation?]	8-16	12-24	112- 224
Descarga severa/ dificultad para respirar	12- 23	21- 41	160- 320

Resumen de los efectos biológicos y de los estudios epidemiológicos (hasta 100 kHz)

Con la posible excepción de tumores mamarios, hay poca evidencia proveniente de los estudios de laboratorio que los campos magnéticos en frecuencias de potencia tienen un efecto de promover tumores. Aunque son necesarios estudios futuros en animales para clarificar los efectos posibles de los campos de ELF en las señales producidas en células y en la regulación endocrina - ambas podrían influenciar el desarrollo de tumores promoviendo la proliferación de células iniciadas - solamente se puede concluir que actualmente no hay evidencia convincente para los efectos cancerígenos de estos campos y que estos datos no se pueden utilizar como base para desarrollar las recomendaciones para la exposición.

Los estudios de laboratorio en sistemas celulares y animales no han encontrado ningún efecto establecido de los campos de baja frecuencia que indiquen efectos adversos en la salud cuando la densidad de corriente inducida está en o debajo de 10 mA m⁻². A niveles más altos de densidad de corriente inducida (10-100 mA m⁻²), más efectos significativos sobre el tejido se han observado consistentemente- por ejemplo cambios funcionales en el sistema nervioso y otros efectos del tejido (Tenforde 1996).

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

tendrían que ser relacionados a las líneas de potencia de manera indeterminada. En ausencia de una base de estudios de laboratorio, los datos epidemiológicos son escasos para permitir que se establezcan recomendaciones para la exposición.

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

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

humanos expuestos a los campos de ELF bajo condiciones controladas. Estudios que implicaban exposiciones a campos magnéticos de 60 Hz, hasta $20 \mu\text{T}$, no han señalado efectos confiables sobre niveles del melatonina en sangre.

BASE BIOLÓGICA PARA LIMITAR LA EXPOSICIÓN (100 kHz- 300 GHz)

Los párrafos siguientes proporcionan una revisión general de la literatura relevante de los efectos biológicos y los efectos potenciales en la salud de campos electromagnéticos de frecuencias de 100 kHz a 300 GHz. Revisiones más detalladas pueden ser encontradas en (NRPB 1991; UNEP/ OMS/ IRPA 1993; McKinlay y col. 1996; Polk y Postow 1996; Repacholi 1998).

Efectos directos de los campos electromagnéticos

Estudios epidemiológicos. Solamente un número limitado de estudios se ha realizado sobre los efectos en la reproducción y el y el riesgo de cáncer en individuos expuestos a la radiación de microonda. Un resumen de la literatura fue publicado por UNEP/ OMS/ IRPA (1993).

Resultados en la la reproducción. Dos estudios extensos en mujeres tratadas con microondas diatérmicas para calmar el dolor de contracciones uterinas durante el trabajo no encontraron ninguna evidencia de efectos nocivos sobre el feto (Daels 1973, 1976). Sin embargo, los resultados de siete estudios del embarazo entre trabajadoras expuestas a la radiación de microondas cuyos objetivos eran investigar defectos de nacimiento entre su descendientes produjeron resultados positivos y negativos. En algunos de los estudios epidemiológicos más grandes de soldadores femeninos de plástico y de fisioterapeutas que trabajaban con dispositivos de diatermia de onda corta, no encontraron efectos estadístico significativos sobre índices del aborto o de la malformación fetal (Kallen y col. 1982). Por el contrario, otros estudios en poblaciones similares de mujeres trabajadoras encontraron un incremento del

riesgo de aborto y defectos en el nacimiento (Larsen y col. 1991; Ouellet-Hellstrom y Stewart 1993). Un estudio de trabajadores masculinos en radares no encontró ninguna asociación entre la exposición a microondas y el riesgo de síndrome de Down en su descendencia (Cohen y col. 1977).

Evaluando integralmente, los estudios reproductivos y de exposición a microondas son pocos y generalmente sufren de una pobre evaluación de la exposición y, en muchos casos, de un pequeño número de sujetos. A pesar de los resultados generalmente negativos de estos estudios, será difícil emitir conclusiones firmes sobre el riesgo en la reproducción sin tener otros datos epidemiológicos sobre individuos altamente expuestos y una evaluación más exacta de exposición.

Estudios del cáncer. Los estudios sobre el riesgo de cáncer y la exposición a microondas son pocos y generalmente falta la evaluación cuantitativa de la exposición. Dos estudios epidemiológicos de trabajadores en radares en la industria aeronáutica y en las fuerzas armadas los E.E.U.U. no encontraron ninguna evidencia de incremento de morbilidad o de mortalidad por alguna causa (Barron y Baraff 1958; Robinette y col. 1980; UNEP/ OMS/ IRPA 1993). Resultados similares fueron obtenidos por Lillienfeld y col. (1978) en un estudio de los empleados en la embajada de los E.E.U.U. en Moscú, quienes fueron crónicamente expuestos a una baja radiación de microonda. Selvin y col. (1992) no señalaron ningún aumento en el riesgo de cáncer entre los niños crónicamente expuestos a la radiación de un transmisor grande de microonda cerca de sus hogares. Estudios más recientes no pudieron mostrar aumentos significativos en tumores del tejido nervioso entre trabajadores y personal militar expuestos a los campos de microondas (Beall y col. 1996; Grayson 1996). Por otra parte, no hay exceso de mortalidad total evidente entre los usuarios de teléfonos móviles (Rothman y col. 1996a, 1996b), pero sigue siendo

demasiado temprano para observar un efecto sobre la incidencia o mortalidad de cáncer.

Ha habido un informe sobre el riesgo creciente de cáncer entre personal militar (Szmigielski y col. 1988), pero los resultados del estudio son difíciles de interpretar porque ni el tamaño de la población ni los niveles de exposición se indica claramente. En un estudio posterior, Szmigielski (1996) encontró un incremento en los índices de leucemia y de linfoma en el personal militar expuesto a los campos de CEM, pero la tasa de exposición de CEM no estaba bien definida.

Algunos estudios recientes de poblaciones que vivían cerca de transmisores de CEM han sugerido un aumento de incidencia local de leucemia (Hocking y col. 1996; Dolk et en 1997a, 1997b), pero los resultados son poco concluyentes. Como un todo, los resultados del pequeño número de estudios epidemiológicos publicados proporcionan solamente información limitada sobre el riesgo de cáncer.

Estudios de laboratorio. Los párrafos siguientes proporcionan una evaluación resumida y crítica de los estudios de laboratorio sobre los efectos biológicos de campos electromagnéticos de frecuencias en el rango 100 kHz - 300 GHz. Hay discusiones separadas sobre resultados de estudios en voluntarios expuestos bajo condiciones controladas y estudios de laboratorio sobre células, tejidos, y sistemas animales.

Estudios en voluntarios. Los estudios por Chatterjee y col. (1986) demostraron que, conforme la frecuencia aumenta de aproximadamente 100 kHz hasta 10 MHz, el efecto dominante de la exposición a un campo electromagnético de alta intensidad cambia del estímulo del nervio y del músculo a la calefacción. En 100 kHz la sensación primaria era la de un nervio que zumbaba, mientras que en 10 MHz era uno de calor en la piel. En este rango de frecuencia, por lo tanto, los criterios básicos de protección sanitaria deben ser por ejemplo evitar el estímulo de tejidos excitables y los efectos térmicos. En las frecuencias a partir de 10 MHz a 300 GHz, la

calefacción es el efecto principal de la absorción de la energía electromagnética, y las subidas de temperatura de más de 1-2 °C pueden tener efectos de salud adversos tales como agotamiento por calor y ataque de calor (ACGIH 1996). Los estudios de trabajadores en ambientes térmicos agotadores han mostrado el empeoramiento del funcionamiento de tareas simples conforme la temperatura del cuerpo se eleva a un nivel que se acerca al estrés de calor fisiológico (Ramsey y Kwon 1988). Una sensación de calor ha sido señalada por voluntarios que experimentaban una corriente de alta frecuencia de cerca de 100-200 mA a través de una extremidad. El valor del SAR resultante es poco probable que produzca un incremento localizado de la temperatura de más de 1 °C en las extremidades (Chatterjee y col. 1986; Chen y Gandhi 1988; Hoque y Gandhi 1988), que se ha sugerido como el límite superior de incremento de temperatura sin efectos perjudiciales a la salud (UNEP /OMS/ IRPA 1993). Datos sobre los voluntarios reportados por Gandhi y col. (1986) para las frecuencias hasta 50 MHz y por Tofani y col. (1995) para las frecuencias de hasta 110 MHz (el límite superior a la banda de la radiodifusión en FM) reportan un nivel de referencia para corrientes en las extremidades de 100 mA para evitar efectos térmicos excesivos (Dimbylow 1997).

Ha habido varios estudios de respuestas termorreguladoras de voluntarios en descanso expuestos a CEM en sistemas de proyección de imagen por resonancia magnética (Shellock y Crues 1987; Magin y col. 1992). En general, éstos han demostrado que la exposición por hasta 30 minutos, bajo condiciones en las cuales el SAR de todo el cuerpo era menos de 4 W kg⁻¹, causó un aumento en la temperatura del cuerpo de menos de 1 °C.

Estudios celulares y animales. Hay numerosos informes sobre respuestas del comportamiento y fisiológicas de los animales de laboratorio, incluyendo roedores, perros, y los primates, a interacciones térmicas de CEM en frecuencias por encima de los 10 MHz. La termosensibilidad y las respuestas termorreguladoras se asocian al hipotálamo y a los

receptores térmicos situados en la piel y en partes internas del cuerpo. Las señales aferentes que reflejan el cambio de temperatura convergen en el sistema nervioso central y modifican la actividad principal de los sistemas de control neuroendocrino, accionando las respuestas fisiológicas y del comportamiento necesarias para el mantenimiento de la homeostasis.

La exposición de animales de laboratorio a CEM que producían una absorción en exceso de aproximadamente 4 W kg⁻¹ ha revelado un modelo característico de la respuesta termorreguladora, en el cual la temperatura del cuerpo inicialmente sube y luego se estabiliza siguiendo la activación de los mecanismos termorreguladores (Michaelson 1983). La fase temprana de esta respuesta es acompañada por un aumento en el volumen de la sangre debido al movimiento del líquido del espacio extracelular hacia la circulación y por aumentos en el ritmo cardíaco y la presión intraventricular de la sangre. Estos cambios cardiodinámicos reflejan las respuestas termorreguladoras que facilitan la conducción del calor a la superficie del cuerpo. La exposición prolongada de animales a niveles de radiación de microondas que elevan la temperatura del cuerpo conduce en última instancia al colapso de estos mecanismos termorreguladores.

Varios estudios en roedores y monos también han demostrado un componente comportamental de las respuestas termorreguladoras. Una disminución del rendimiento para la realización de tareas por las ratas y los monos se ha observado en valores del SAR en el rango 1-3 W kg⁻¹ (Stern y col. 1979; Adair y Adams 1980; de Lorge y Ezell 1980; D'Andrea y col. 1986). En los monos, la alteración del comportamiento causada por el sistema termorregulador se inicia cuando la temperatura de la región hipotalámica se incrementa en valores tan pequeños como 0.2-0.3°C (Adair y col. 1984). El hipotálamo es considerado ser el centro control del proceso termorregulatorio normal, y su actividad puede ser modificada por un pequeño aumento de temperatura local bajo condiciones en que la

temperatura rectal se mantenga en un nivel constante.

A niveles de absorción de energía electromagnética que causa un aumento de la temperatura corporal en exceso de 1- 2 °C, una gran cantidad de efectos fisiológicos han sido caracterizados en estudios con células y sistemas animales (Michaelson y Elson 1996). Estos efectos incluyen alteraciones en funciones neurales y neuromusculares; incremento de la permeabilidad de la barrera sangre-cerebro; debilitamiento ocular (opacidad de la lente y anormalidades córneas); cambios en el sistema inmunológico asociados al estrés; cambios hematológicos; cambios reproductivos (Ej. producción reducida de esperma); teratogenicidad; y cambios en la morfología de la célula, agua y contenido electrolítico, y funciones de la membrana.

Bajo condiciones de exposición parcial del cuerpo a CEM intenso, los daños térmicos son significativos pudiendo ocurrir en tejidos sensibles tales como el ojo y los testículos. La exposición a las microondas de 2-3 horas de duración ha producido cataratas en los ojos de los conejos para valores del SAR entre 100-140 W kg⁻¹ que produjeron temperaturas lenticulares de 41-43°C (Guy y col. 1975). No se observó ninguna catarata en monos expuestos a los campos de microonda de intensidades similares o más altas, posiblemente debido a la diferencia entre los modelos de absorción de la energía en los ojos de monos y el de los conejos. A muy altas frecuencias (10-300 GHz), la absorción de la energía electromagnética se confina en gran parte de las capas epidérmicas de la piel, de los tejidos subcutáneos, y de la parte externa del ojo. En el extremo superior del rango de frecuencia, la absorción es cada vez más superficial. El daño ocular en estas frecuencias puede ser evitado si la densidad de potencia de la microonda es menor de 50 W m⁻² (Slaney y Wolbarsht el 1980; UNEP / OMS/ IRPA 1993).

Ha habido un interés reciente en los posibles efectos cancerígenos de la exposición a los campos de microondas en el rango de frecuencia de los

sistemas de comunicaciones intensivamente usados, incluyendo los teléfonos móviles portátiles y los transmisores de las estaciones base. Los resultados de la investigación en esta área han sido resumidos por ICNIRP (1996). Brevemente, hay muchos informes que sugieren que los campos de microondas no son mutagénicos, y por lo tanto la exposición a estos campos es poco probable que pueda iniciar la carcinogénesis (NRPB 1992; Cridland 1993; UNEP /OMS/ IRPA 1993). Por el contrario, algunos informes recientes sugieren que la exposición de roedores a los campos de microondas en los niveles del SAR del orden de 1 W kg⁻¹ puede producir roturas del DNA de los tejidos del testículo y del cerebro (Sarkar y col. 1994; Lai y Singh 1995, 1996), aunque ICNIRP (1996) y Williams (1996) precisaron las deficiencias metodológicas que habrían podido influenciar perceptiblemente estos resultados.

En un estudio grande de ratas expuestas a las microondas por hasta 25 meses, un exceso de tumores malignos primarios fue observado en las ratas expuestas en relación al grupo de control (Chou y col. 1992). Sin embargo, la incidencia de tumores benignos no se diferenció entre los grupos, y no hay un tipo específico de tumor más frecuente en el grupo expuesto que en ratas de almacén de la misma variedad mantenidas bajo las mismas condiciones libres de patógenos. Tomado como un todo, los resultados de este estudio no se pueden interpretar como indicadores de un efecto iniciador de tumor de los campos de microondas.

Varios estudios han examinado los efectos de la exposición a las microondas en el desarrollo de células de tumor pre-iniciadas. Szmigielski y col. (1982) observaron una tasa incrementada de células trasplantadas del sarcoma del pulmón en ratas expuestas a las microondas a altas densidades de potencia. Es posible que ésta se produjo por un debilitamiento del sistema inmunológico en respuesta al estrés térmico de la exposición a las microondas. Estudios recientes usando niveles atérmicos de radiación de microondas no han encontrado ningún efecto sobre el desarrollo de

melanoma en ratones o del glioma cerebral en ratas (Santini y col. 1988; Salford y col. 1993).

Repacholi y col. (1997) han señalado que la exposición de 100 ratones hembras transgénicos $\text{E}\mu\text{-pim1}$ a los campos 900 de MHz, pulsantes en 217 Hz con anchos de pulso de 0,6 μs por hasta 18 meses, produjeron una incidencia doble de linfoma comparada con 101 controles. Ya que los ratones estuvieron libres para vagar en sus jaulas, la variación en el SAR fue amplia (0,01-4,2 W kg^{-1}). Dado que el índice metabólico de descanso de estos ratones es 7-15 W kg^{-1} , sólo el extremo superior del rango de la exposición pudo haber producido un calentamiento leve. Así, parece que este estudio sugiere que un mecanismo no-termal pueda actuar, y necesita ser investigado más a fondo. Sin embargo, antes de asumir cualquier riesgo sobre la salud, un número de preguntas deben ser tratadas. El estudio necesita ser replicado, limitando la movilidad de los animales para disminuir la variación del SAR de la exposición y para determinarse si hay una respuesta dependiente de la dosis. Estudios adicionales son necesarios para determinar si los resultados se pueden encontrar en otros modelos de animales, para poder generalizar los resultados a los seres humanos. Es también esencial evaluar si los resultados encontrados en animales transgénicos son aplicables a los seres humanos.

Consideraciones especiales para formas de onda pulsantes y de amplitud modulada

Comparadas con la radiación de onda continua (CW), los campos pulsantes de microondas con la misma tasa promedio de deposición 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). 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 m^{-2} para pulsos de duración menores de 30 μs en 2,45 GHz (que corresponde a un SAR de 4,16 mJ kg^{-1}). En exposiciones repetidas o prolongadas los efectos auditivos de la microonda pueden ser agotadores y potencialmente dañinos.

Algunos informes sugieren que la retina, el diafragma, y el endotelio córneo del ojo del primate son sensibles a niveles bajos de radiación de microondas pulsantes (Kues y col. 1985; UNEP/OMS/IRPA 1993). Los cambios degenerativos en las células sensibles a la luz de la retina fueron señalados para niveles de energía absorbidos de hasta sólo 26 mJ kg^{-1} . Después de la administración del timolol maleato, que se utiliza en el tratamiento del glaucoma, el umbral para el daño retiniano por los campos pulsantes cayó a 2,6 mJ kg^{-1} . Sin embargo, un intento en un laboratorio independiente de replicar parcialmente estos resultados para campos CW (es decir, no pulsantes) fracasaron (Kamimura y col. 1994), por lo tanto es imposible actualmente evaluar las implicaciones potenciales a la salud de los resultados iniciales (Kues y col. 1985).

Se ha reportado que la exposición a los campos pulsantes intensos de microonda suprime la respuesta de alarma en ratones conscientes y la evocación de movimientos del cuerpo (NRPB 1991; Sienkiewicz y col. 1993; UNEP/OMS/IRPA 1993). El nivel umbral de la absorción específica de energía en el cerebro medio que evocó los movimientos del cuerpo fue 200 J kg^{-1} para pulsos de 10 μs . El mecanismo para estos efectos de las microondas pulsantes permanece sin determinarse pero se cree que está relacionado con el fenómeno auditivo de las microondas. Los umbrales auditivos para los roedores están un orden de magnitud por debajo del umbral para los seres humanos, entre 1-2 mJ kg^{-1} para pulsos < 30 μs de duración. Se ha reportado que los pulsos de esta magnitud también

afectan el metabolismo de los neurotransmisores y la concentración de los receptores neurales implicados en las respuestas al estrés y a la ansiedad en diversas regiones del cerebro de la rata.

El tema de interacciones atómicas de CEM de alta frecuencia se ha centrado en gran parte en informes de efectos biológicos de los campos de amplitud-modulada (AM) bajo condiciones in vitro de valores de SAR muy por debajo de los que producen un calentamiento cuantificable del tejido. Estudios iniciales en dos laboratorios independientes reportaron que los campos VHF de amplitud modulada en frecuencias extremadamente bajas (6-20 Hz) produjeron una pequeña, pero estadísticamente significativa, liberación de Ca^{++} de las superficies de las células del cerebro de polluelo (Bawin y col. 1975; Blackman y col. 1979). Un intento subsecuente de replicar estos resultados, usando el mismo tipo de campo de AM, fracasó (Albert y col. 1987). Otros estudios de los efectos de los campos AM en la homeostasis del Ca^{++} han producido resultados positivos y negativos. Por ejemplo, los efectos de los campos AM en los enlaces de Ca^{++} a las superficies de la célula se han observado con células de neuroblastoma, células pancreáticas, tejido cardíaco, y células de cerebro de gato, pero no con células nerviosas de rata cultivadas, músculo esquelético del polluelo, o células cultivadas del cerebro de rata (Postow y Swicord 1996).

También se ha reportado que los campos de amplitud modulada alteran la actividad eléctrica del cerebro (Bawin y col. 1974), inhiben la actividad citotóxica del linfocito T (Lyle y col. 1983), disminuyen las actividades de la quinasa de AMP no cíclico-dependiente en los linfocitos (Byus y col. 1984), y causan un aumento transitorio en la actividad citoplásmica de la ornitina decarboxilasa que es una enzima esencial para la proliferación de las células (Byus et al. 1988; Litovitz y col. 1992). En contraste, no se ha observado ningún efecto en una variedad amplia de otros sistemas celulares y límites funcionales, incluyendo capping de linfocitos, transformación neoplásica de células, y las

características eléctricas y propiedades enzimáticas de varias membranas (Postow y Swicord 1996). De importancia relevante para los efectos cancerígenos potenciales de campos pulsantes es la observación de Balcer-Kubiczek y Harrison (1991) que la transformación neoplásica fue acelerada en las células C3H/10T1/2 expuestas a las microondas 2,450 MHz cuyos pulsos eran modulados a 120 Hz. El efecto era dependiente de la intensidad del campo, pero ocurría solamente cuando un químico promotor de tumor, TPA, estaba presente en el medio de cultivo de célula. Esto sugiere que las microondas pulsantes, pueden ejercer efectos co-cancerígenos conjuntamente con un agente químico que aumente el índice de la proliferación de células transformadas. Hasta la fecha, no han habido intentos de réplica, y su implicación para los efectos de salud humana no es clara.

La interpretación de varios efectos biológicos observados de los campos electromagnéticos AM es además complicada por la existencia aparente de "ventanas" de respuesta en los dominios de la densidad de potencia y de la frecuencia. No hay modelos aceptados que expliquen adecuadamente este fenómeno, que desafía el concepto tradicional de una relación monótona entre la intensidad de campo y la severidad de los efectos biológicos que resultan.

Como un todo, la literatura sobre efectos no térmicos de los campos electromagnéticos es compleja, la validez de los efectos reportados ha sido pobremente establecida, y la importancia de los efectos en la salud humana es tan incierta, que es imposible utilizar este cuerpo de información como base para fijar límites de exposición humana a estos campos.

Efectos indirectos de campos electromagnéticos

En el rango de frecuencia de cerca de 100 kHz.- 110 MHz, shocks eléctricos y quemaduras pueden darse en un individuo que toca un objeto de metal que no está conectado a tierra, y ha adquirido una carga en un campo, o del contacto de un individuo cargado y un objeto de metal puesto a

tierra. Debe observarse que la frecuencia superior para corrientes de contacto (110 MHz) es impuesta por una carencia de datos para frecuencias más altas, más bien que por la ausencia de estos efectos. Sin embargo, 110 MHz, es el límite superior de la frecuencia de la banda de radiodifusión en FM. Las corrientes de umbral que dan lugar a efectos biológicos, que se extienden en severidad desde la percepción hasta el dolor se han medido en experimentos controlados en voluntarios (Chatterjee y col. 1986; Tenforde y Kaune 1987; Bernhardt 1988); éstos se resumen en la Tabla 3. En general, se ha mostrado que las corrientes de umbral que producen la percepción y el dolor varían poco en el rango de frecuencia 100 kHz- 1 MHz y es poco probable que varíen significativamente en el rango de frecuencia hasta cerca de 110 MHz. Según lo observado anteriormente para frecuencias más bajas, las variaciones significativas entre las sensibilidades de hombres, mujeres, y niños también existen para los campos de frecuencia más altas. Los datos en Tabla 3 representan el rango de valores del percentil 50 para personas de diversas tallas y diversos niveles de la sensibilidad a corrientes de contacto.

Tabla 3

Rangos de corrientes umbral para efectos indirectos, incluyendo niños, mujeres y hombres

Efecto Indirecto	Umbral de corriente (mA) a una frecuencia dada	
	100 kHz	1 MHz
Percepción al tocar	25- 40	25-40
Dolor en el dedo que hace contacto	33- 55	28- 50
Descarga dolorosa/ umbral let-go	112- 224	No determinado
Descarga severa/ dificultad para respirar	160- 320	No determinado

Resumen de los estudios biológicos y estudios epidemiológicos (100 kHz-300 GHz)

La evidencia experimental disponible indica que la exposición a CEM de seres humanos en reposo por aproximadamente 30 minutos produciendo un SAR en todo el cuerpo entre de 1 y

4W kg⁻¹ resulta en un aumento de la temperatura del cuerpo de menos de 1°C. Datos sobre animales indican un umbral del SAR en el mismo rango. Para respuestas del comportamiento La exposición a campos más intensos, que producen valores del SAR por encima de 4 W kg⁻¹, pueden colapsar la capacidad termorreguladora del cuerpo y producir niveles dañinos de calentamiento de los tejidos. Muchos estudios de laboratorio con roedores y primates no humanos han demostrado el amplio espectro de daños a los tejidos resultantes de un calentamiento parcial o total del cuerpo que produce incrementos de temperatura mayores de 1-2°C. La sensibilidad al daño térmico de los diferentes tipos de tejido varía extensamente, pero el umbral para los efectos irreversibles en tejidos más sensibles es mayor de 4 W kg⁻¹, bajo condiciones ambientales normales. Estos datos forman la base para una restricción de la exposición ocupacional de 0,4 W kg⁻¹, que proporciona un margen grande de seguridad para otras condiciones limitantes, tales como temperatura ambiente, humedad, o niveles de actividad física.

Los datos del laboratorio y los resultados de un número limitado de estudios en humanos (Michaelson y Elson 1996), dejan claro que los ambientes térmicos agotadores y el uso de drogas o del alcohol pueden comprometer la capacidad termorreguladora del cuerpo. Bajo estas condiciones, se deben introducir factores de seguridad para proporcionar una protección adecuada a los individuos expuestos.

Datos sobre las respuestas humanas a los CEM de alta frecuencia que producen un calentamiento detectable se han obtenido de la exposición controlada de voluntarios y de estudios epidemiológicos en trabajadores expuestos a las fuentes tales como radares, equipos médico de diatermia, y selladores de calor. Estos datos soportan completamente las conclusiones del trabajo del laboratorio de que se pueden causar efectos biológicos adversos cuando el incremento de temperatura en el tejido excede 1°C. Los estudios epidemiológicos en trabajadores expuestos y en el

INTERNATIONAL COMMISSION ON NON-IONIZING RADIATION PROTECTION e.V.

público en general no han mostrado ningún efecto de salud importante asociado a los ambientes de exposición típicos. Aunque hay deficiencias en el trabajo epidemiológico, tal como una pobre evaluación de la exposición, los estudios no han arrojado ninguna evidencia convincente de que los niveles de exposición típicos conducen a resultados reproductivos adversos o a un incremento de riesgo de cáncer en individuos expuestos. Esto es consistente con los resultados de las investigaciones de laboratorio sobre modelos celulares y animales, que no han demostrado ni efectos teratogénicos ni cancerígenos de la exposición a los niveles atómicos de CEM de alta frecuencia.

La exposición a CEM pulsantes de suficiente intensidad conduce a ciertos efectos predecibles tales como el fenómeno auditivo de las microondas y varias respuestas del comportamiento. Los estudios epidemiológicos en trabajadores expuestos y público en general han proporcionado una información limitada y no han podido demostrar ningún efecto en la salud. Los informes del daño retiniano severo han sido desafiado posteriormente por intentos fallidos de replicar los resultados.

Una gran cantidad de estudios de los efectos biológicos de CEM de amplitud-modulada, conducidos sobre todo con niveles bajos de exposición, han dado lugar a resultados positivos y negativos. El análisis completo de éstos estudios revelan que los efectos de los campos varían extensamente con los parámetros de exposición, los tipos de células, los tejidos implicados, y los límites biológicos examinados. En general, los efectos de la exposición de sistemas biológicos a niveles atómicos de CEM de amplitud-modulada son pequeños y muy difíciles de relacionarse con potenciales efectos a la salud. No hay evidencia convincente de ventanas de densidad de potencia y de frecuencia en la respuesta a estos campos.

Shocks y quemaduras pueden ser efectos indirectos adversos de CEM de alta frecuencia que implican el contacto humano con objetos metálicos en un campo. En las frecuencias de 100 kHz.-110

MHz (el límite superior de la banda de radiodifusión en FM), los niveles umbral de la corriente de contacto que producen efectos significativos que se extienden de la percepción al dolor severo no varían perceptiblemente en función de la frecuencia del campo. El umbral para la percepción se extiende a partir del 25 a 40 mA en individuos de diversas tallas, y para el dolor desde aproximadamente 30 a 55 mA; sobre 50 mA puede haber quemaduras severas en el lugar de contacto del tejido con un conductor metálico en el campo.

RECOMENDACIONES PARA LIMITAR LA EXPOSICIÓN A LOS CEM

Limitaciones en la exposición ocupacional y del público en general

La población expuesta ocupacionalmente consiste de adultos que generalmente están expuestos bajo condiciones conocidas y que son entrenados para estar conscientes del riesgo potencial y para tomar las protecciones adecuadas. En contraste, el público en general comprende individuos de todas las edades y de estados de salud variables, y puede incluir grupos o individuos particularmente susceptibles. En muchos casos los miembros del público no están conscientes de sus exposición a los CEM. Más aún, no se puede esperar que los miembros individuales del público, tomen precauciones razonables para minimizar o evitar sus exposición. Son estas consideraciones que soportan la adopción de restricciones más estrictas a la exposición del público que para la exposición de la población expuesta ocupacionalmente.

Restricciones básicas y niveles de referencia

Las restricciones en los efectos de la exposición son basadas en los efectos sobre la salud ya establecidos y son llamadas restricciones básicas. Dependientes de la frecuencia, las cantidades físicas usadas para especificar las restricciones básicas de la exposición a los CEM, son la densidad de corriente, el SAR, la densidad de potencia. La protección contra efectos adversos



INTERNATIONAL COMMISSION ON NON-IONIZING RADIATION PROTECTION e.V.

sobre la salud requiere que estas restricciones básicas no sean excedidas.

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

Justificación general de los factores de seguridad

Hay información insuficiente sobre los efectos biológicos producidos en personas y en animales de experimento debido a la exposición a CEM como para proporcionar factores de seguridad estrictas para todos los rangos de frecuencia y todas las modulaciones. Adicionalmente, parte de la incertidumbre con respecto al factor de seguridad apropiado proviene de la falta de conocimiento concerniente a la apropiada dosimetría (Repacholi 1998). Las siguientes variables fueron consideradas para determinar los factores de seguridad para campos de alta frecuencia:

- Efectos debido a la exposición a CEM bajo condiciones ambientales adversas (temperaturas altas, etc.), y/o niveles de actividad altos.
- La sensibilidad térmica potencialmente más alta en ciertos grupos de la población tales como las personas frágiles y/o ancianas, los infantes y los niños pequeños, y gente con enfermedades o que están tomando medicinas que comprometen su tolerancia térmica.

Los siguientes factores adicionales fueron tomados en cuenta para la obtención de los niveles de referencia para campos de alta frecuencia

- La absorción de la energía electromagnética varía según el tamaño y la orientación del campo.
- Se puede producir una mayor absorción localizada de la energía, debido a la reflexión, concentración y dispersión del campo incidente.

Restricciones básicas

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

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

En el rango de frecuencia de unos pocos Hz a 1 kHz, para niveles de densidad de corriente inducida por encima de 100 mA m^{-2} , los umbrales para cambios agudos en la excitabilidad del sistema nervioso central y otros efectos agudos como la reversión del potencial evocado visualmente, son excedidos. En vista de las condiciones de seguridad ya mencionadas, se decidió que en el rango de las frecuencias de 4Hz a 1 kHz, la exposición ocupacional debería estar limitada a campos que induzcan densidades de corriente menores a 10 mA m^{-2} , es decir para usar un factor de seguridad de 10. Para el público en general un factor adicional de 5 es aplicado, dando una restricción básica de la exposición de 2 mA m^{-2} . Por debajo de 4 Hz y por

encima de 1 kHz, la restricción básica basada en la densidad de corriente inducida se incrementa progresivamente, correspondiendo al incremento del

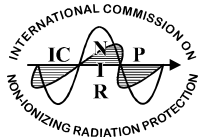
umbral para la estimulación de los nervios para estos rangos de frecuencia.

Tabla 4 Restricciones básicas para exposiciones a campos eléctricos y magnéticos para frecuencias hasta 10GHz

Características de la exposición	Rango de Frecuencias	Densidad de Corriente para cabeza y tronco (mA m ⁻²) (rms)	SAR promedio en todo el cuerpo (Wkg ⁻¹)	SAR localizado cabeza y tronco (Wkg ⁻¹)	SAR localizado (extremidades) (Wkg ⁻¹)
Exposición ocupacional	hasta 1 Hz	40	--	--	--
	1–4 Hz	40/ <i>f</i>	--	--	--
	4 Hz - 1 kHz	10	--	--	--
	1–100 kHz	<i>F</i> /100	--	--	--
	100 kHz - 10 MHz	<i>F</i> /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/ <i>f</i>	--	--	--
	4 Hz - 1 kHz	2	--	--	--
	1–100 kHz	<i>F</i> /500	--	--	--
	100 kHz - 10 MHz	<i>F</i> /500	0,08	2	4
	10 MHz - 10 GHz	--	0,08	2	4

Notas

1. *f* es la frecuencia en Hz
2. debido a que el cuerpo humano no es eléctricamente homogéneo, las densidades de corriente deberían ser promediadas sobre una sección transversal de 1 cm², perpendicular a la dirección de la corriente.
3. Para frecuencias hasta 100 kHz, los valores de la densidad de corriente pico pueden obtenerse multiplicando el valor rms (de la Tabla 4) por 1,414. Para pulsos de duración *t_p*, la frecuencia equivalente a aplicarse en las restricciones básicas debería ser calculado según: $f = 1/(2t_p)$.
4. Para frecuencias hasta 100 kHz y para campos magnéticos pulsantes, la densidad de corriente máxima asociada con los pulsos puede ser calculada de los tiempos de subida / bajada y la máxima tasa de cambio de la densidad de flujo magnético. Luego la densidad de corriente inducida puede ser comparada con la restricción básica apropiada
5. Todos los valores del SAR, deben ser promediados sobre cualquier periodo de 6 minutos.
6. La masa para promediar el SAR localizado es cualquier de tejido contiguo de 10 g de masa; el máximo SAR así obtenido debería ser el valor usado para la estimación de la exposición.
7. Para pulsos de duración *t_p*, la frecuencia equivalente a aplicarse en las restricciones básicas debería ser calculado según: $f = 1/(2t_p)$. Adicionalmente en el rango de frecuencias de 0,3 a 10 GHz y para exposición localizada en la cabeza, con el objeto de evitar el efecto auditivo causado por la expansión termoelástica, se recomienda una restricción básica adicional. Esta restricción es que la SA promediada sobre 10 g de tejido no debe exceder 10 mJ kg⁻¹ para trabajadores y 2 mJ kg⁻¹ para el público en general.



INTERNATIONAL COMMISSION ON NON-IONIZING RADIATION PROTECTION e.V.

Los efectos biológicos y a la salud establecidos en el rango de frecuencias de 10 MHz a unos pocos GHz son consistentes con las respuestas al incremento de temperatura del cuerpo en más de 1 °C. Este nivel de incremento de temperatura resulta de la exposición de individuos bajo condiciones ambientales moderadas a un SAR de cuerpo entero de 4 W kg^{-1} por cerca de 30 minutos. Por lo tanto se ha escogido un SAR de cuerpo entero promedio de $0,4 \text{ W kg}^{-1}$ como la restricción que provee protección adecuada para exposición ocupacional. Un factor de protección adicional de 5 es introducido para exposición al público dando un límite de SAR de cuerpo entero promedio de $0,08 \text{ Wkg}^{-1}$. Las restricciones básicas más bajas para exposición al público en general toman en cuenta el factor que sus edad o estado de salud puede diferir del de los trabajadores .

Tabla 5 Restricciones Básicas para densidad de potencia para frecuencias entre 10 y 300 GHz

Tipo de Exposición	Densidad de Potencia (Wm^{-2})
Exposición Ocupacional	50
Exposición a Público en General	10

Notas:

1. Las densidades de potencia deben ser promediadas sobre cualquier área expuesta de 20 cm^2 y sobre cualquier periodo de $68/f^{1,05}$ minutos (f en GHz) para compensar la profundidad de penetración progresivamente corta conforme se incrementa la frecuencia.

2. Las densidades de potencia máximos espaciales, promediadas sobre 1 cm^2 no deberían exceder 20 veces los valores antes mencionados

En el rango de baja frecuencia, actualmente hay pocos datos relativos a los efectos en la salud de los transitorios de corriente. El ICNIRP, por lo tanto recomienda que las restricciones basadas en las densidades de corrientes inducidas provenientes de campos transitorios o picos de muy corta duración, sean consideradas como valores instantáneos que no deberían ser promediados.

Las restricciones básicas para densidades de corriente , SAR de cuerpo entero promedio, y SAR localizado para frecuencias entre 1Hz y 10 GHz son presentadas en la Tabla 4, y aquellas para densidades de potencia para frecuencias de 10 – 300 GHz son presentadas en la Tabla 5.

NIVELES DE REFERENCIA

Los niveles de referencia son obtenidos, cuando es apropiado, a partir de las restricciones básicas mediante el uso de modelos matemáticos y por extrapolación de los resultados de las investigaciones de laboratorio en frecuencias específicas.

Para el caso de campos de baja frecuencia, se desarrollaron diversos modelos de medición y de cómputo para derivar los niveles de referencia de intensidad de campo a partir de las restricciones básicas.



INTERNATIONAL COMMISSION ON NON-IONIZING RADIATION PROTECTION e.V.

Tabla 6

Niveles de referencia para exposición ocupacional a campos eléctricos y magnéticos (valores rms no perturbados)

Rango de Frecuencias (MHz)	Intensidad de Campo Eléctrico (Vm ⁻¹)	Intensidad de Campo Magnético (Am ⁻¹)	Densidad de Flujo Magnético (μT)	Densidad de Potencia (Wm ⁻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	24,4	30,7	–
0,065 – 1 MHz	610	1,6 / f	2 / f	–
1 – 10 MHz	610 / f	1,6 / f	2 / f	–
10 – 400 MHz	61	0,16	0,2	10
400 – 2000 MHz	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

Tabla 7.

Niveles de referencia para exposición poblacional a campos eléctricos y magnéticos (valores rms no perturbados)

Rango de Frecuencias	Intensidad de Campo Eléctrico (Vm ⁻¹)	Intensidad de Campo Magnético (Am ⁻¹)	Densidad de Flujo Magnético (μT)	Densidad de Potencia (Wm ⁻²)
Hasta 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	4000/ f	5000/ f	–
0,025 – 0, 8 kHz	250 / f	4/ f	5/ f	–
0,8 – 3 kHz	250 / f	5	6,25	–
3 – 150 kHz	87	5	6,25	–
0,15– 1 MHz	87	0,73/ f	0,92 / f	–
1 – 10 MHz	87/ f ^{0,5}	0,73/ f	0,92/ f	–
10 – 400 MHz	28	0,073	0,092	2
400 – 2000 MHz	1,375f ^{0,5}	0,0037f ^{0,5}	0,0046f ^{0,5}	f/ 200
2 - 300 GHz	61	0.16	0.20	10

Notas

1. f esta en la frecuencia que se indica en la columna Rango de Frecuencias
2. Asumiendo que se cumplen las restricciones básicas y que se pueden excluir los efectos indirectos adversos los valores de las intensidades de campo pueden ser excedidos.
3. Para frecuencias entre 100 kHz y 10 GHz, S_{eq} , E^2 , H^2 , y B^2 , deben ser promediados sobre cualquier periodo de 6 minutos.
4. Para valores pico en frecuencias hasta 100 kHz ver Tabla 4, nota 3
5. Para valores pico en frecuencias mayores a 100 kHz, ver las Figuras 1 y 2. Entre 100 kHz y 10 MHz los valores pico de las intensidades de campo son obtenidas de la interpolación desde 1,5 veces el valor de pico en 100 kHz hasta 32 veces el valor de pico en 10 MHz. Para frecuencias mayores a 10 MHz se sugiere que el valor de pico de la densidad de potencia de onda plana equivalente, promediada sobre el ancho del pulso, no exceda por 1000 veces las restricciones de S_{eq} , o que la intensidad de campo no exceda en 32 veces los niveles de exposición en intensidad de campo dados en esta tabla.
6. Para frecuencias mayores a 10 GHz, S_{eq} , E^2 , H^2 , y B^2 , deben ser promediados sobre cualquier periodo de $68/f^{1.05}$ minutos (f en GHz).
7. No se provee valores de campo eléctrico para frecuencias menores a 1 Hz, los cuales efectivamente son campos eléctricos estáticos. Para la mayoría de gente la molesta percepción de cargas electricas en su superficie no ocurrira para intensidades de campo menores a 25 kV/m^{-1} . Las descargas tipo chispas causantes de estrés y molestia deberían ser evitadas

Figura 1 : Niveles de Referencia ICNIRP para exposición a campos eléctricos variables en el tiempo

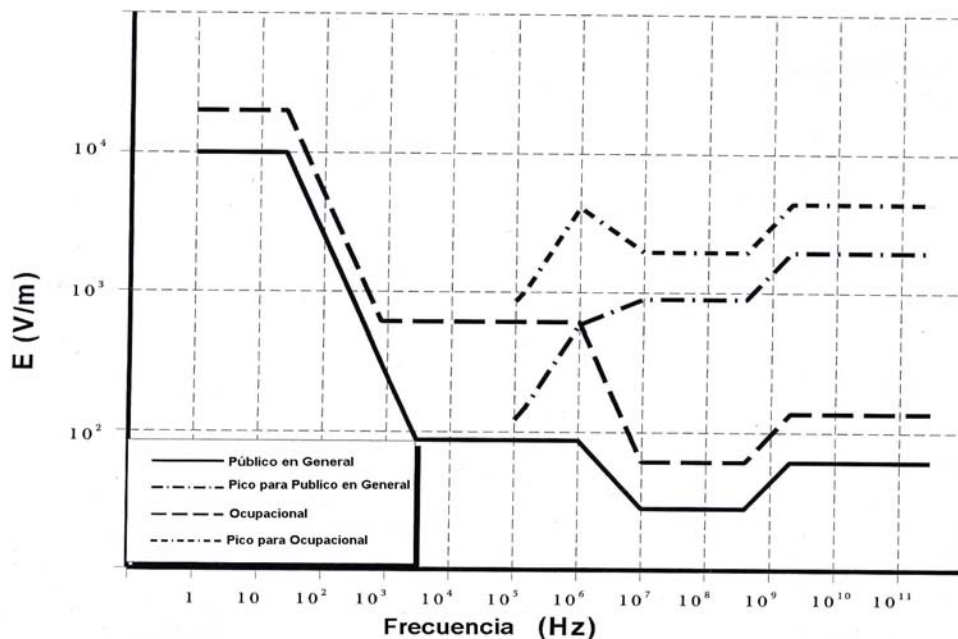
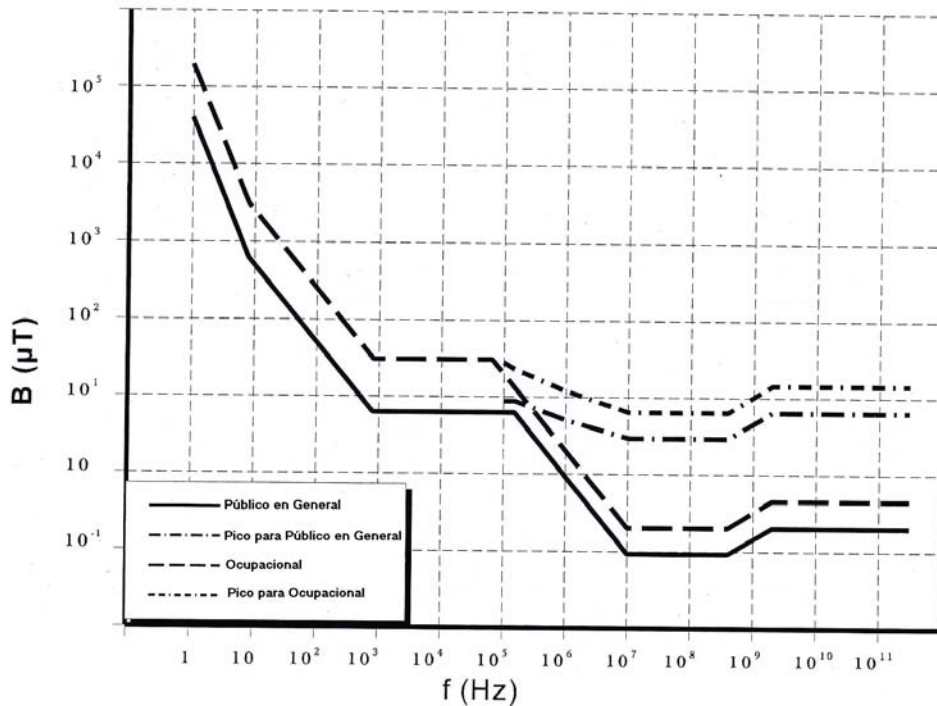


Figura 2 : Niveles de Referencia ICNIRP para exposición a campos magnéticos variables en el tiempo



Los modelos de campo magnético asumen que el cuerpo tiene una conductividad homogénea e isotrópica y aplica modelos de lazos conductores simples y circulares para estimar la corriente inducida en diferentes órganos y regiones del cuerpo; por ejemplo para la cabeza se utiliza la siguiente ecuación para un campo sinusoidal a la frecuencia f derivada de la ley de inducción de Faraday :

$$J = \pi R f \sigma B \quad (4)$$

donde B es la densidad de flujo magnético y R es el radio del lazo para inducción de la corriente. Modelos más complejos utilizan modelos elipsoidales para representar el tronco o todo el cuerpo para estimar las densidades de corriente inducida en la superficie del cuerpo. (Reilly 1989, 1992).

Si, por simplicidad, se asume una conductividad homogénea de $0,2 \text{ S m}^{-1}$, una densidad de flujo magnético a 50 Hz de $100 \mu\text{T}$ genera densidades de corriente entre $0,2$ y 2 mA m^{-2} en el área periférica del cuerpo del cuerpo (CRP 1997). Según otro análisis (NAS 1986), niveles de exposición de $100 \mu\text{T}$ a 60 Hz, corresponden a densidades de corriente promedio de $0,28 \text{ mA m}^{-2}$ y a densidades de corriente máximas de aproximadamente 2 mA m^{-2} . Cálculos más realistas basados en modelos anatómicamente y eléctricamente refinados (Xi y Stuchly 1994) resultaron en densidades de corriente máximas que excedieron 2 mA m^{-2} para campos de $100 \mu\text{T}$ a 60 Hz. Sin embargo, la presencia de células biológicas afecta el patrón espacial de campos y corrientes inducidas resultando en diferencias significativas en magnitud (un factor mayor a 2)

INTERNATIONAL COMMISSION ON NON-IONIZING RADIATION PROTECTION e.V.

y en los patrones de flujo de corrientes inducidas comparados con aquellos predichos por los análisis simplificados (Stuchly y Xi 1994).

Los modelos de campo eléctrico deben tomar en cuenta que, dependiendo de las condiciones de exposición, y del tamaño, forma y posición del cuerpo expuesto en el campo, la densidad de carga superficial puede variar en gran medida, resultando una distribución variable no uniforme de corriente dentro del cuerpo. Para campos eléctricos sinusoidales a frecuencias menores a 10 MHz, la magnitud de la densidad de corriente inducida dentro del cuerpo se incrementa con la frecuencia. La distribución de la densidad de la corriente inducida varía inversamente con la sección transversal del cuerpo y puede ser relativamente alta en el cuello y tobillos. Los niveles de exposición de 5 kV m^{-1} para exposición al público en general corresponden bajo las peores condiciones, a una corriente inducida de cerca de 2 mA m^{-2} en el cuello y el tronco del cuerpo si el vector de campo E es paralelo al eje del cuerpo (ILO 1994; CRP 1997). Sin embargo la densidad de corriente inducida por 5 kV m^{-1} cumplirá con las restricciones básicas bajo condiciones de exposición realistas del peor caso de trabajo.

Con el propósito de demostrar conformidad con las restricciones básicas, los niveles de referencia para campos magnéticos y eléctricos deben ser considerados en forma individual y no aditiva, ya que, para propósitos de protección, las corrientes inducidas por campos eléctricos y magnéticos no son aditivas.

Para el caso específico de exposiciones ocupacionales en frecuencias hasta 100 kHz, los campos eléctricos derivados pueden ser incrementados por un factor de 2 bajo condiciones para las cuales pueden ser excluidos efectos indirectos adversos provenientes del contacto con conductores cargados eléctricamente

Para frecuencias sobre los 10 MHz, las intensidades de campo eléctrico y magnético fueron obtenidas a partir de la restricción básica SAR de cuerpo entero, utilizando datos experimentales y de cómputo. En el peor caso, el acoplamiento de energía puede alcanzar su máximo entre 20 MHz y varios cientos de MHz. Las intensidades de campo magnético fueron calculadas a partir de la intensidad de campo eléctrico utilizando la relación para campo lejano entre E y H ($E/H = 377 \text{ ohms}$). En el campo cercano, las curvas de dependencia de la frecuencia del SAR ya no son válidas; además, las componentes de los campos eléctricos y magnéticos deben ser consideradas separadamente. Para una aproximación conservadora los niveles de exposición a los campos pueden ser utilizados para evaluación de campo cercano dado que el acoplamiento de energía de las contribuciones de campos eléctricos y magnéticos no pueden exceder las restricciones de SAR. Para una evaluación menos conservadora, las restricciones básicas para el SAR promedio de cuerpo entero y local deberían ser usadas

Los niveles de referencia para la exposición al público en general han sido obtenidos a partir de los datos para exposición ocupacional mediante el uso de varios factores en todo el rango de frecuencias. Estos factores han sido escogidos sobre la base de que son reconocidos como específicos y relevantes para para los varios rangos de frecuencias. Hablando de manera general los factores siguen las restricciones básicas sobre todo el rango de frecuencias, y sus valores corresponden a las relaciones matemáticas entre las cantidades de las restricciones básicas y los niveles derivados como se describe a continuación:

- Para el rango de frecuencias hasta 1 kHz., los niveles de referencia de campo eléctrico para público en general son la



INTERNATIONAL COMMISSION ON NON-IONIZING RADIATION PROTECTION e.V.

mitad de los valores para exposición ocupacional. Los valores para exposición ocupacional de 10 kV m^{-1} para 50 Hz o de 8.3 kV m^{-1} para 60 Hz incluye un margen suficiente de seguridad para prevenir los efectos de estimulación de las corrientes inducidas de contacto bajo todas las condiciones posibles. Para los niveles de referencia para el público en general fueron escogidos la mitad de estos valores, es decir 5 kV m^{-1} para 50 Hz o 4.2 kV m^{-1} para 60 Hz, para prevenir efectos adversos indirectos para más del 90 % de individuos expuestos.

- En el rango de baja frecuencia hasta 100 kHz., los niveles de referencia de campo magnético para el público en general son 5 veces menores que los niveles de referencia para exposición ocupacional
- En el rango de frecuencias de 100 kHz– 10 MHz, los niveles de referencia de campo magnético para público en general han sido incrementados comparado con los límites dados en la recomendación IRPA 1988. En esa recomendación los niveles de referencia de la intensidad de campo magnético fueron calculados a partir de los niveles de referencia de la intensidad de campo eléctrico usando la fórmula de campo lejano que relaciona E y H. Estos niveles de referencia son demasiado conservadores, debido a que el campo magnético a frecuencias menores que 10 MHz no contribuye significativamente al riesgo de shock, quemaduras, o efectos de carga superficial que forman las bases principales para limitar la exposición ocupacional de los campos eléctricos en este rango de frecuencia.
- En el rango de altas frecuencias de 10 MHz – 10 GHz los niveles de referencia de campo eléctrico y magnético para público en general son menores en un

factor de 2,2 con respecto a los niveles de exposición ocupacional. El factor de 2,2 corresponde a la raíz cuadrada de 5, el cual es un factor de seguridad entre las restricciones básicas para exposición ocupacional y exposición del público en general. La raíz cuadrada es usada para relacionar las cantidades de “intensidad de campo” y “densidad de potencia”.

- En el rango de altas frecuencias de 10 GHz- 300 GHz los niveles de referencia para público en general están definidos por la densidad de potencia, como en las restricciones básicas, y son menores en un factor de 5 frente a los niveles de referencia de exposición ocupacional.
- Aunque hay poca información disponible sobre la relación entre los efectos biológicos y los valores pico de los campos pulsantes, para frecuencias que exceden los 10 MHz se sugiere que el valor pico de la densidad de potencia de onda plana equivalente S_{eq} promediada sobre el ancho del pulso, no debería exceder 1000 veces los niveles de referencia o que la intensidad de campo no exceda 32 veces los niveles de intensidad de campo dados en las tablas 6 y 7 o mostrados en las figuras 1 y 2.

Para frecuencias entre 0,3 GHz y varios GHz, para exposiciones localizadas de la cabeza, para limitar o evitar efectos auditivos causados por la expansión termoelástica, la absorción específica de los pulsos debe ser limitada. En este rango de frecuencia, el umbral SA de 4 - 16 mJ kg^{-1} para producir este efecto corresponde, para pulsos de 30 μs , a valores picos de SAR entre 130 - 520 W kg^{-1} en el cerebro. Entre 100 kHz y 10 MHz, los valores pico para las intensidades de campo en las figuras 1 y 2 son obtenidos por la

interpolación desde 1,5 veces en 100 kHz hasta 32 veces en 10 MHz.

- En las tablas 6 y 7, así como en las figuras 1 y 2, ocurren diferentes puntos de quiebre para los niveles de referencia ocupacional y poblacional derivados de los niveles de referencia. Esto es consecuencia de los factores variables usados para derivar los niveles de referencia de público en general mientras la dependencia de la frecuencia es la misma para los niveles ocupacional y poblacional.

NIVELES DE REFERENCIA PARA CORRIENTES POR CONTACTO Y CORRIENTES INDUCIDAS

Hasta 110 MHz, que incluye la banda de frecuencias de transmisión de radio FM, se dan niveles de referencia para corrientes de contacto por encima de las cuales se tiene que practicar precaución con el fin de evitar shock y quemaduras.

Tabla 8. Niveles de referencia para corrientes de contacto variables en el tiempo de objetos conductores

Tipo de Exposición	Rango de Frecuencias	Corriente de Contacto Máxima (mA)
Exposición	Hasta 2,5 kHz.	1,0
Ocupacional	2,5 - 100 kHz.	0,4f
	100 kHz. – 110 MHz	40
Exposición de Público en General	Hasta 2,5 kHz.	0,5
	2,5 - 100 kHz.	0,2f
	100 kHz. – 110 MHz	20

En la Tabla 8. se indican los niveles de referencia para las corrientes de contacto. la exposición debido a que los límites de la corriente en los que se presentan respuestas biológicas en niños y mujeres en edad adulta por contacto, son aproximadamente 1/2 y 2/3, respectivamente, de los límites para el caso de los hombres en edad adulta.

f= frecuencia en Khz.

Nota : f es la frecuencia en kHz

Para el caso de frecuencias en el rango de 10 - 110 MHz, en la Tabla 9. se indican los niveles de referencia para las extremidades, que están por debajo de las restricciones básicas de SAR localizado.

EXPOSICIÓN SIMULTÁNEA A FRECUENCIAS MÚLTIPLES

Es importante determinar si, en situaciones de exposición simultanea a campos de diferentes frecuencias, estas exposiciones son aditivas en sus efectos. La aditividad debería ser examinada separadamente para los efectos de estimulación térmica y eléctrica, y las restricciones básicas a continuación deberían cumplirse. Las formulas que se presentan a continuación se aplican a las frecuencias relevantes bajo condiciones prácticas de exposición. Para estimulación eléctrica, relevante para frecuencias hasta 10 MHz , las densidades de corrientes inducidas deberían sumarse de acuerdo a:

$$\sum_{i=1\text{Hz}}^{10\text{MHz}} \frac{J_i}{J_{L,i}} \leq 1 \quad (5)$$

Tabla 9. Niveles de Referencia para corrientes inducidas en cualquier extremidad a frecuencias entre 10 y 110 MHz

Tipo de Exposición	Corriente (mA)
Exposición Ocupacional	100
Exposición a Público General	45

Notas

1. El nivel de referencia para público en general es igual al nivel de referencia ocupacional dividido por $\sqrt{5}$.
2. Para cumplir con las restricciones básicas referentes a SAR localizado, la raíz cuadrada de l valor promedio en el tiempo de los cuadrados de las corrientes inducidas sobre cualquier periodo de 6 minutos forma la base de los niveles de referencia

Para los efectos térmicos, aplicables sobre los 100 kHz, tanto el SAR y las densidades de potencia deben ser sumados según la siguiente fórmula:

$$\sum_{i=100\text{ kHz}}^{10\text{ GHz}} \frac{SAR_i}{SAR_L} + \sum_{i>10\text{ GHz}}^{300\text{ GHz}} \frac{S_i}{S_L} \leq 1 \quad (6)$$

donde

J_i es la densidad de corriente a la frecuencia i .

$J_{L,i}$ es la restricción de densidad de corriente a la frecuencia i según la Tabla 4

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

SAR_L es el SAR límite según la Tabla 4.

S_i es la densidad de potencia a la frecuencia i .

S_L =densidad de potencia límite según la Tabla 5

Para aplicaciones prácticas de las restricciones básicas, con respecto a los niveles de referencia de las intensidades de campo, el siguiente criterio debería ser aplicado

Para densidades de corrientes inducidas y efectos de la estimulación eléctrica, pertinentes hasta 10 MHz, los siguientes dos requerimientos deberían aplicarse a los niveles de campo

$$\sum_{i=1\text{ Hz}}^{1\text{ MHz}} \frac{E_i}{E_{L,i}} + \sum_{i>1\text{ MHz}}^{10\text{ MHz}} \frac{E_i}{a} \leq 1 \quad (7)$$

y

$$\sum_{j=1\text{ Hz}}^{65\text{ kHz}} \frac{H_j}{H_{L,j}} + \sum_{j>65\text{ kHz}}^{10\text{ MHz}} \frac{H_j}{b} \leq 1 \quad (8)$$

donde

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

$E_{L,i}$ es el nivel de referencia del campo eléctrico a la frecuencia i según Tablas 6 y 7.

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

$H_{L,j}$ es el nivel de referencia del campo magnético a la frecuencia j según las Tablas 6 y 7.

a es 610 V m^{-1} , para el caso de exposición ocupacional y 87 V m^{-1} , para el caso de exposición del público en general.

b es $24,4 \text{ A m}^{-1}$ ($30,7 \text{ } \mu\text{T}$), para el caso de exposición ocupacional y 5 A m^{-1} ($6,25 \text{ } \mu\text{T}$), para el caso de exposición del público en general.

Los valores constantes a y b son utilizados para frecuencias por encima de 1 MHz para el campo eléctrico y para frecuencias por encima de 65 kHz para el campo magnético, ya que la suma esta basada en las densidades de corrientes inducidas y no deberían ser mezcladas con consideraciones térmicas. Esta última es la base para E_{Li} y H_{Li} para frecuencias por encima de 1MHz y 65 kHz, respectivamente, encontradas en las Tablas 6 y 7

Debido a consideraciones térmicas concernientes a frecuencias superiores a los 100 kHz, los siguientes dos requerimientos deberían aplicarse

$$\sum_{i=100\text{ kHz}}^{1\text{ MHz}} \left(\frac{E_i}{c} \right)^2 + \sum_{i>1\text{ MHz}}^{300\text{ GHz}} \left(\frac{E_i}{E_{L,i}} \right)^2 \leq 1 \quad (9)$$

y

$$\sum_{j=100\text{ kHz}}^{1\text{ MHz}} \left(\frac{H_j}{d} \right)^2 + \sum_{j>1\text{ MHz}}^{300\text{ GHz}} \left(\frac{H_j}{H_{L,j}} \right)^2 \leq 1 \quad (10)$$

donde:

E_i es la intensidad de campo eléctrico en la frecuencia i .

$E_{L,i}$ es el nivel de referencia del campo eléctrico a la frecuencia i según Tablas 6 y 7.

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

$H_{L,j}$ es el nivel de referencia del campo magnético a la frecuencia j según Tablas 6 y 7.

C es $610/f \text{ Vm}^{-1}$ (f en MHz), para el caso de exposición ocupacional y $87/f^{0.5} \text{ Vm}^{-1}$, para el caso de exposición del público en general.

d es $1,6/f \text{ Am}^{-1}$ (f en MHz), para el caso de exposición ocupacional y $0,73/f \text{ Am}^{-1}$, para el caso de exposición del público en general.

Para las corrientes en las extremidades y las corrientes de contacto, respectivamente, los siguientes requerimientos deberían ser aplicados:

$$\sum_{n=1\text{Hz}}^{110\text{MHz}} \frac{I_n}{I_{C,n}} \leq 1 \quad \sum_{k=10\text{MHz}}^{110\text{MHz}} \left(\frac{I_k}{I_{L,k}} \right)^2 \leq 1 \quad (11)$$

donde

I_k es la corriente en la extremidad a la frecuencia k .

$I_{L,k}$ es el nivel de referencia de la corriente de extremidad (ver Tabla 9).

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

$I_{C,n}$ es el nivel de referencia de la corriente de contacto a la frecuencia n (ver Tabla 8)

Las fórmulas de suma anteriores asumen las condiciones del peor de los casos para campos resultantes de fuentes múltiples. Como resultado, las situaciones típicas de exposición pueden en la práctica requerir niveles de exposición menos restrictivos que los indicados por las fórmulas anteriores para los niveles de referencia.

Medidas de Protección

ICNIRP aclara que las industrias causantes de la exposición a campos eléctricos y magnéticos son las responsables de asegurar el cumplimiento de todos los aspectos de estas recomendaciones.

Las medidas de protección para los trabajadores incluyen controles de ingeniería y administrativos, programas de protección personal y vigilancia médica (ILO 1994). Medidas apropiadas de protección deben ser implementadas cuando la exposición en el lugar de trabajo excede las restricciones básicas. Como primer paso deberían iniciarse controles de ingeniería donde sea posible, para reducir las emisiones de campos de los dispositivos a niveles aceptables. Tales controles deben incluir diseños seguros y donde sea necesario el uso de apantallamientos o mecanismos similares de protección.

Los controles administrativos tales como la limitación de acceso, advertencias audibles y visibles deberían ser usadas en conjunción con controles de ingeniería. Medidas personales de protección tales como ropa apropiada, aunque útiles en ciertas circunstancias, debería ser consideradas como el último recurso para garantizar la seguridad del trabajador; se deben priorizar a los controles de ingeniería y administrativos donde sea posible. Además, cuando se utilizan productos tales como guantes aislantes son usados para proteger a los individuos de shocks y quemaduras a altas frecuencias, las restricciones básicas no deben ser excedidas, puesto que el aislante protege solo contra efectos indirectos de los campos. Con la excepción de las ropas de protección y otras protecciones de tipo personal, las mismas medidas pueden ser aplicadas para público en general, siempre que haya la posibilidad de exceder los niveles de referencia del público en general. También es esencial establecer e implementar reglas para prevenir:

- La interferencia con equipos y dispositivos médicos electrónicos (incluyendo marcapasos).
- La detonación de dispositivos electro-explosivos (detonadores)



INTERNATIONAL COMMISSION ON NON-IONIZING RADIATION PROTECTION e.V.

- El fuego y las explosiones resultantes de la ignición de materiales inflamables por chispas causadas por campos inducidos, corrientes de contacto o descargas eléctricas.

Reconocimientos: El apoyo recibido por ICNIRP por parte de la Asociación Internacional de Protección contra la Radiación, la Organización Mundial de la Salud, del Programa Ambiental de las Naciones Unidas, Oficina Internacional del Trabajo, la Comisión Europea y el Gobierno Alemán es reconocido con gratitud.

Durante la preparación de este documento ICNIRP, fue apoyado por los siguientes expertos externos: S. Allen (Reino Unido), J. Brix (Alemania), S. Eggert (Alemania), H. Garn (Austria), K. Jokela (Finlandia), H. Korniewicz (Polonia), G.F. Mariutti (Italia), R. Saunders (Reino Unido), S. Tofani (Italia), P. Vecchia (Italia), E. Vogel (Alemania). Muchos valiosos comentarios proporcionados por otros expertos internacionales son reconocidos con gratitud.

REFERENCIAS

- Adair, E. R.; Adams, B. W.; Akel, G. M. Minimal changes in hypothalamic temperature accompany microwave-induced alteration of thermoregulatory behavior. *Bioelectromagnetics*; 5:13-30; 1984
- Adair, F. R.; Adams, B. W. Microwaves modify thermoregulatory behavior in squirrel monkey. *Bioelectromagnetics*; 1:1-20; 1980.
- Albert, F. N.; Slaby, F.; Roche, J.; Loftus, J. Effect of amplitude modulated 147 MHz radiofrequency radiation on calcium ion efflux from avian brain tissue. *Radiat. Res*; 109:19~27.. 1987.
- Allen, S. C.; Bernhardt, J. H.; Driscoll, C. M. H.; Grandolfo, M.; Mariutti, C. F.; Matthes, R.; McKinlay, A. F.; Steinmetz, M.; Vecchia, P.; Whillock, M. Proposals for basic restrictions for protection against occupational exposure to electromagnetic non-ionizing radiations. Recommendations of an International Working Group set up under the auspices of the Commission of the European Communities. *Phys. Med.*; 7:77-89; 1991.
- American Conference of Government Industrial Hygienists. Threshold limit values for chemical substances and physical agents and biological exposure indices. Cincinnati, OH; American Conference of Governmental Industrial Hygienists; 1996.
- Astumian, R. D.; Weaver, I. C.; Adair, R. K. Rectification and signal averaging of weak electric fields by biological cells. *PNAS*; 92:374(>3743; 1995
- Balcer-Kubiczek, E. K.; Harrison, G. H. Neoplastic transformation of C3H/10T1/2 cells following exposure to 120 Hz modulated 2.45 GHz microwaves and phorbol ester tumor promoter. *Radiation Res.*; 126:65-72; 1991.
- Baris, D.; Armstrong, B.C.; Deadman, J.; Thériault, G. A mortality study of electrical utility workers in Quebec. *Occ. Environ. Med.*; 53:25-31; 1996.
- Barron, C. I.; Baraff, A. A. Medical considerations of exposure to microwaves (radar). *J. Am. Med. Assoc.*; 168:1194-1199; 1958.
- Baum, A.; Mevissen, M.; Kamino, K.; Mohr, U.; Lidscher, W. A histopathological study on alterations in DMBA-induced mammary carcinogenesis in rats with 50 Hz, 100 μ T magnetic field exposure. *Carcinogenesis*; 16:119-125; 1995.
- Bawin, S. M.; Gavalas-Medici, R. J.; Adey, W. R. Reinforcement of transient brain rhythms by amplitude modulated VHF fields. In: *Biological and clinical effects of low frequency magnetic and electric fields* (Laurado, J. G.; Sances, A.; Battocletti, J. H., eds.). Springfield, IL, Charles C. Thomas:172-186; 1974.
- Bawin, S. M.; Kaczmarek, L. K.; Adey, W. R. Effects of modulated VHF fields on the central nervous system. *Ann. NY Acad. Sci.*; 274:74-81; 1975.
- Beall, C.; Delzell, F.; Cole, P.; BriH, I. Brain tumors among electronics industry workers. *Epidemiology*; 7:125-130; 1996.
- Beniashvili, G. S.; Bilanishvili, V.G.; Menabde, M. Z. The effect of low-frequency electromagnetic fields on the development of experimental mammary tumors. *Vopr. Onkol.*; 37:937-941; 1991.
- Bergqvist, U. Pregnancy outcome and VDU work - a review. In: Luczak, H.; Cakir, N.; An Cakir, G., eds. *Work with Display Units '92 Selected Proceedings of the 3rd International Conference WWDO '92*, Berlin Germany IA Sept. 1992. Amsterdam, Elsevier, 70-76; 1993.
- Bernhardt, J. H. The direct influence of electromagnetic fields on nerve and muscle cells of man within the frequency range of 1 Hz to 30 MHz. *Radiat. Environ. Biophys.*; 16:309-323; 1979.
- Bernhardt, J. H. The establishment of frequency dependent limits for electric and magnetic fields and evaluation of indirect effect. *Radiat. Environ. Biophys.*; 27:1-2; 1988.
- Bernhardt, J. H. Basic criteria of ELF-standards: worldwide achievement in public and occupational health protection against



INTERNATIONAL COMMISSION ON NON-IONIZING RADIATION PROTECTION e.V.

- radiation. Proceedings of the Eighth International Congress of the International Radiation Protection Association, 933-936; 1992.
- Blackman, C. F.; Elder, J. A.; Weil, C. M.; Benane, S. G.; Eichinger, D. C.; House, D. E. Induction of calcium-ion efflux from brain tissue by radiofrequency radiation: effects of modulation frequency and field strength. *Radio Sci.*; 14:93-98; 1979.
- Blank, M., ed. *Electromagnetic fields: biological interactions and mechanisms*. Washington, DC; American Chemical Society Press; 1995.
- Bracken, M. B.; Belanger, K.; Hellenbrand, K.; Dlugosz, L.; Holford, T. R.; McSharry, J. F.; Adesso, K.; Leaderer, B. Exposure to electromagnetic fields during pregnancy with emphasis on electrically heated beds: association with birthweight and intrauterine growth. *Epidemiol.*; 6:263-270; 1995.
- Brent, R. L.; Beckman, G. A.; Landel, C. P. Clinical teratology. *Cuff. Opin. Pediatr.*; 5:201-211; 1993.
- Byus, C. V.; Lundak, R. L.; Fletcher, R. M.; Adey, W. R. Alterations in protein kinase activity following exposure of cultured human lymphocytes to modulated microwave fields. *Bioelectromagnetics*; 5:341-351; 1984.
- Byus, C. V.; Pieper, S. F.; Adey, W. R. The effects of low-energy 60 Hz environmental electromagnetic fields upon the growth-related enzyme ornithine decarboxylase. *Carcinogenesis*; 8:1385-1389; 1987.
- Byus, C. V.; Kartun, K.; Pieper, S.; Adey, W. R. Increased ornithine decarboxylase activity in cultured cells exposed to low energy modulated microwave fields and phorbol ester tumor promoters. *Cancer Res.*; 48:4222A226; 1988.
- Chatterjee, I.; Wu, G.; Gandhi, O. P. Human body impedance and threshold currents for perception and pain for contact hazards analysis in the VLF-MF band. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*; BME-33:48-94; 1986.
- Chen, J. Y.; Gandhi, O. P. Thermal implications of high SARs in the body extremities at the ANSI-recommended MF-VHF safety levels. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*; BME-35:435A41; 1988.
- Chemoff, N.; Rogers, J. M.; Kavet, R. A review of the literature on potential reproductive and developmental toxicity of electric and magnetic fields. *Toxicology*; 74:91-126; 1992.
- Chou, C.-K.; Guy, A. W.; Kunz, L. I.; Johnson, R. B.; Crowley, J. J.; Krupp, J. H. Long-term, low-level microwave irradiation of rats. *Bioelectromagnetics*; 13 :469A96; 1992.
- Cohen, B. H.; Lillienfeld, A. M.; Kramer, A. M.; Hyman, L. C. C. Parental factors in Down's syndrome: results of the second Baltimore case control study. In: *Population cytogenetics studies in humans* (Hook, E. B; Porter, I. H., eds.). New York, Academic Press; 301-352; 1977.
- Coleman, N. P.; Bell, C. M. J.; Taylor, H. L.; Primic-Zakelj, M. Leukemia and residence near electricity transmission equipment: a case-control study. *Br. J. Cancer*; 60:793-798; 1989.
- Commission on Radiological Protection. Protection against low-frequency electric and magnetic fields in energy supply and use. Recommendation, approved on 16th 17th February 1995. In: *Berichte der Strahlenschutzkommission des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Heft 7*. Stuttgart, Fischer; 1997.
- Cook, N. K.; Graham, C.; Cohen 11.9.; Gerkovich, N. N. A replication study of human exposure to 60-Hz fields; effects on neurobehavioral measures. *Bioelectromagnetics*; 13:261-285; 1992.
- Cridland, N. A. *Electromagnetic fields and cancer; a review of relevant cellular studies*. Chilton, UK; National Radiological Protection Board; Report NRPB-R256; 1993.
- Daels, J. Microwave heating of the uterine wall during parturition. *Obstet. Gynecol.*; 42:76-79; 1973.
- Daels, J. Microwave heating of the uterine wall during parturition. *J. Microwave Power*; 11:16-167; 1976.
- D'Andrea, J. A.; DeWitt, J. R.; Gandhi, O. P.; Stensaas, S.; Lords, J. L.; Neilson, H. C. Behavioral and physiological effects of chronic 2450-MHz microwave irradiation of the rat at 0.5 mW/cm². *Bioelectromagnetics*; 7:45-56; 1986.
- De Lorge, J. O.; Ezell, C. S. Observing responses of rats exposed to 1.28- and 5.62-GHz microwaves. *Bioelectromagnetics*; 1:183-198; 1980.
- Demers, P. A.; Thomas, G. B.; Sternhagen, A.; Thompson, W. G.; Curnen, N. G. N.; Satariano, W.; Austin, D. F.; [ssacson, P.; Greenberg, R. S.; Key, C.; Kolonel, L. K.; West, G. W. Occupational exposure to electromagnetic fields and breast cancer in men. *Am. J. Epidemiol.*; 132:775-776;



INTERNATIONAL COMMISSION ON NON-IONIZING RADIATION PROTECTION e.V.

- 1991.
- Dimbylow, P. J. FOID calculations of the whole-body averaged SAR in an anatomically realistic voxel model of the human body from 1 MHz to 1 GHz. *Phys. Med. Biol.*; 42:479490; 1997.
- Dimbylow, P. J.; Mann, S. NI. SAR calculations in an anatomically realistic model of the head for mobile communication transceivers at 900 MHz and 1.8 GHz. *Phys. Med. Biol.*; 39:1537~1553; 1994.
- DiN VDE 0848, Teil 1, Sicherheit in elektromagnetischen Fe Idem, Mess- und Berechnungsverfahren. Beuth-Verlag, Berlin; 1995.
- Dolk, H.; Shaddick, H.; Walls, P.; Grundy, C.; Thakrar, B.; Kleinschmidt, I.; Elliot, P. Cancer incidence near radio and television transmitters in Great Britain, Part 1. Sutton Coldfield Transmitter. *Am. J. Epidemiol.*; 145:1-9; 1997a.
- Dolk, H.; Elliot, P.; Shaddick, G.; Walls, P.; Thakrar, B. Cancer incidence near radio and television transmitters in Great Britain, Part II. All high-power transmitters. *Am. J. Epidemiol.*; 145:10-17; 1997b.
- Durney, C. H.; Massoudi, H.; Iskander, NI. F. 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.
- Feychting, NI.; Ahibom, A. Nlagnetic fields and cancer in children residing near Swedish high voltage power lines. *Am. J. Epidemiol.*; 138:467-481; 1993.
- Feychting, NI.; Ahibom, A. Magnetic fields, leukemia, and central nervous system tumors in Swedish adults residing near high-voltage power lines. *Epidemiology*; 5:501-509; 1994.
- Feychting, NI.; Kaune, T.W.; Savitz, D.A.; Ahlbom, A. Estimating exposure in studies on residential magnetic fields and cancer. *Epidemiology*; 7:220-224; 1996.
- Floderus, B.; Persson, T.; Stenlund, C.; Wennberg, A.; Ost, A.; Knave, B. Occupational exposure to electromagnetic fields in relation to leukemia and brain tumors: a case-control study in Sweden. *Cancer Causes and Control*; 4:465476; 1993.
- Frey, A. NI. Auditory system response to radiofrequency energy. *Aerospace Med.*; 32:1140-1142; 1961.
- Frey, A. NI.; Messenger, R. Human perception of illumination with pulsed ultra-high-frequency electromagnetic radiation. *Science*; 181:356-358; 1973.
- Fulton, J. P.; Cobb, S.; Preble, L.; Leone, L.; Forman, E. Electrical wiring configurations and childhood leukemia in Rhode Island. *Am. J. Epidemiol.*; 111:292-295; 1980.
- Gandhi, O. P.; Chen, I. Y.; Riazi, A. Current induced in a human being for plane-wave exposure conditions 0-50 MHz and for RF sealers. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*; BNIE33(8):757-767; 1986.
- Gandhi, O. P. Some numerical methods for dosimetry: extremely low frequencies to microwave frequencies. *Radio Science*; 30:161-177; 1995.
- Goodman, K.; Bassett, C. A.; Henderson, A. S. Pulsing electromagnetic fields induce cellular transcription. *Science*; 220:1283-1285; 1983.
- Goodman, R.; Henderson, A. S. Exposure of salivary gland cells to low-frequency electromagnetic fields alters polypeptide synthesis. *Proc. Nat. Acad. Sci.*; 85:3928-3232; 1988.
- Goodman, R.; Henderson, A. S. Transcription and translation in cells exposed to extremely low frequency electromagnetic fields. *Bioelectrochem. Bioenerg.*; 25:335-355; 1991.
- Graham, C.; Cook, NI. K.; Cohen, H. 9.; Gerkovich, NI. M. Dose response study of human exposure to 60 Hz electric and magnetic fields. *Bioelectromagnetics*; 15:447463; 1994.
- Graham, C.; Cook, M. R.; Riffle, D. W.; Gerkovich, M. M.; Cohen, H. 9. Nocturnal melatonin levels in human volunteers exposed to intermittent 60 Hz magnetic fields. *Bioelectromagnetics*; 17:263~273; 1996.
- Graham, C.; Cook, M. R.; Riffle, D. W. Human melatonin during continuous magnetic field exposure. *Bioelectromagnetics*; 18:166-171; 1997.
- Grayson. J. K. Radiation exposure, socioeconomic status, and brain tumor risk in the LS Air Force: a nested case-control study. *Am. J. Epidemiol.*; 143:480486; 1996.
- Greene, J. J.; Skowronski, w. J.; Mullins, J. M.; Nardone, R. M. Delineation of electric and magnetic field effects of extremely low frequency electromagnetic radiation on transcription. *Biochem. Biophys. Res. Comm.*; 174:742-749; 1991.
- Guénel, P.; Nicolau, J.; Imbernon, E.; Chevalier, A.; Goldberg, M. Exposure to 50-Hz electric field and incidence of leukemia, brain tumors, and other cancers among French electric utility workers. *Am. J. Epidemiol.*; 144:1107-21; 1996.
- Gurney. J. G.; Mueller, B. A.; Davis, S.;



INTERNATIONAL COMMISSION ON NON-IONIZING RADIATION PROTECTION e.V.

- Schwartz, S. M.; Stevens, R. G.; Kopecky, K. J. Childhood brain tumor occurrence in relation to residential power line configuration, electric heating sources, and electric appliance use. *Am. J. Epidemiol.*; 143:120-128; 1996.
- Guy, A. W.; Lin, J. C.; Kramar, P.O.; Emery, A. Effect of 2450-MHZ radiation on the rabbit eye. *IEEE Transactions on Microwave Theory Technique, MTT-23:492498*; 1975.
- Heath, C. W. Jr. Electromagnetic field exposure and cancer: a review of epidemiologic evidence. *Ca. Cancer J. Clin.*; 46:2944; 1996.
- Hocking, B.; Gordon, I. R.; Grain, M. L.; Hatfield, G.E. Cancer incidence and mortality and proximity to TV towers. *Mcd. J. Australia*; 165:601-605; 1996.
- Hoque, M.; Gandhi, O. P. Temperature distributions in the human leg for VLF-VHF exposures at the ANSI-recommended safety levels. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*; 35:442-449; 1988.
- International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Guidelines on limits of exposure to static magnetic fields. *Health Phys.*; 66:10w106; 1994.
- International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Health issues related to the use of hand-held radiotelephones and base transmitters. *Health Phys.*; 70:587-593; 1996.
- International Commission on Radiological Protection. Human respiratory tract model for radiological protection.. ICRP Publication 66, Table B.6:p 189, Oxford, Pergamon; 1994.
- Institute of Electrical and Electronic Engineers. Standard for safety levels with respect to human exposure to radiofrequency electromagnetic fields, 3 kHz to 300 GHz. New York, Institute of Electrical and Electronic Engineers; (IEEE C95. 1-1991); 1992.
- International Labour Organisation. Protection of workers from power frequency electric and magnetic fields. Geneva, International Labour Office; (Occupational Safety and Health Series, No.69); 1994.
- International Radiation Protection Association I International Non-Ionizing Radiation Committee. Guidelines on limits of exposure to radiofrequency electromagnetic fields in the frequency range from 100 lclz to 3000Hz. *Health Phys.*; 54:115-123; 1988.
- International Radiation Protection Association/International Non-Ionizing Radiation Committee. Interim guidelines on limits of exposure to 50/60 Hz electric and magnetic fields. *Health Phys.*; 58:113-121; 1990.
- Jokela, K.; Puranen, L.; Gandhi, O. P. Radio frequency currents induced in the human body for medium-frequency/high-frequency broadcast antennas. *Health Phys.*; 66:237-244; 1994.
- Källén, B.; Malmquist, G.; Moritz, U. Delivery outcome among physiotherapists in Sweden: Is non-ionizing radiation a fetal hazard? *Arch. Environ. Health*; 37:81-85; 1982.
- Kamimura, Y.; Sato, K.; Saiga, T.; Amemiya, Y. Effects of 2.45 GHz microwave irradiation on monkey eyes. *IEICE Trans. Communications, E77-B:762-765*; 1994.
- Kirschvink, J. L.; Kobayashi-Kirschvink, A.; Diaz Ricci, S. C.; Kirschvink, S. 3. Magnetite in human tissues: a mechanism for the biological effects of weak ELF magnetic fields. *Bioelectromagnetics; Suppl. 1:101-113*; 1992a.
- Kirschvink, S. L.; Kobayashi-Kirschvink, A.; Woodford, B. 3. Magnetite biomineralization in the human brain. *Proc. Nat. Acad. Sci.*; 89:7683-7687; 1992b.
- Kues, H. A.; Hirst, L. W.; Luty, O. A.; D'Anna, S. A.; Dunkelberger, O. R. Effects of 2.45-GHz microwaves on primate corneal endothelium. *Bioelectromagnetics*; 6:177-188; 1985.
- Kuster, N.; Balzano, Q. Energy absorption mechanisms by biological bodies in the near-field of dipole antennas. *IEEE Transactions on Vehicular Technology, VT-42:17-23*; 1992.
- Lacy-Hulbert, A.; Wilkins, R. C.; Hesketh, T. R.; Metcalfe, S. C. No effect of 60 Hz electromagnetic fields on MYC or beta-actin expression in human leukemic cells. *Rad Res.*; 144:9-17; 1995.
- Lai, H.; Singh, N. P. Acute low-intensity microwave exposure increases DNA single-strand breaks in rat brain cells. *Bioelectromagnetics*; 16:207-210; 1995.
- Lai, H.; Singh, N. P. Single- and double-strand DNA breaks in rat brain cells after acute exposure to radiofrequency electromagnetic radiation. *int. J. Radiation Biol.*; 69:513-521; 1996.
- Larsen, A. 1.; Olsen, J.; Svane, O. Gender-specific reproductive outcome and exposure to high-frequency electromagnetic radiation among physiotherapists. *Scand. J. Work Environ. Health*; 17:324-329; 1991.
- Li, D.; Ceckoway, H.; Mueller, B. A. Electric blanket use during pregnancy in relation



INTERNATIONAL COMMISSION ON NON-IONIZING RADIATION PROTECTION e.V.

- to the risk of congenital urinary tract anomalies among women with a history of subfertility. *Epidemiology*; 6:485~A89; 1995.
- Li, C. Y.; Thériault, G.; Lin, R. S. Epidemiological appraisal of studies of residential exposure to power frequency magnetic fields and adult cancers. *Occup. Environ. Med.*; 53:505-510; 1996.
- Liburdy, R. P. Biological interactions of cellular systems with time-varying magnetic fields. *Ann. NY Acad. Sci.*; 649:74-95; 1992.
- Lillienfeld, A. M.; Tonascia, J.; Tonascia, S.; Libauer, C. A.; Cauthen, M. Foreign service health status study evaluation of health status of foreign service and other employees from selected eastern European posts. Final report. Washington, DC, Department of State; Contract No.6025-61907³, NTIS PB-288163; 1978.
- Lin, J. C. Microwave auditory effects and applications. Springfield, IL, Charles C. Thomas; 1978.
- Lindbohm M. L.; Hietanen, M.; Kyrrönen, P.; Sallmen, M.; van Nandelstadh, P.; Taskinen, H.; Pekkarinen, M.; Ylikoski, M.; Hemminki, K. Magnetic fields of video display terminals and spontaneous abortion. *Am. J. Epidemiol.*; 136:1041-1051; 1992.
- Linnet, M. S.; Hatch, E. E.; Kleinerman, R. A.; Robinson, L. L.; Kaune, W. T.; Friedman, D. R.; Severson R. K.; Haines, C. M.; Hartsock, C. T.; Niwa, S.; Wacholder, S.; Tarone, R.E. Residential exposure to magnetic fields and acute lymphoblastic leukemia in children. *New Eng. J. Med.*; 337:1-7; 1997.
- Litovitz T. A.; Krause, D.; Mullins, J. M. Effect of coherence time of the applied magnetic field on ornithine decarboxylase activity. *Biochem. Biophys. Res. Comm.*; 178(3):862-865; 1991.
- Litovitz, T. A.; Montrose, C. J.; Wang, W. Dose-response implications of the transient nature of electromagnetic-field-induced bioeffects: theoretical hypotheses and predictions. *Bioelectromagnetics*; Suppl. 1:237-246; 1992.
- Litovitz T. A.; Krause, D.; Penafiel, M.; Elson, E. C.; Mullins, J. M. The role of coherence time in the effect of microwaves on ornithine decarboxylase activity. *Bioelectromagnetics*; 14:395A03; 1993.
- Löscher, W.; Mevissen, M.; Lehmacher, W.; Stamm, A. Tumor promotion in a breast cancer model by exposure to a weak alternating magnetic field. *Cancer Letters*; 71:75-81; 1993.
- Löscher, W.; Mevissen, M. Linear relationship between flux density and tumor co-promoting effect of prolonging magnetic exposure in a breast cancer model. *Cancer Letters*; 96:175-180; 1995.
- Lövsund, P.; C)berg, P.; Nilsson, S. E. G. Magneto- and electrophosphenes: a comparative study. *Med. Biol. Eng. Computing*; 18:758-764; 1980.
- London, S. i.; Thomas, D. C.; Bowman, J. 9.; Sobel, E.; Cheng, T. C.; Peters, J. M. Exposure to residential electric and magnetic fields and risk of childhood leukemia. *Am. J. Epidemiol.*; 134:923-937; 1991.
- Loomis, D. P.; Savitz, D. A.; Ananth, C. V. Breast cancer mortality among female electrical workers in the United States. *S. Nat. Cancer Inst.*; 86:921-925; 1994.
- Lyle, D. B.; Schechter, P.; Adey, W. R.; Lundak, R. L. Suppression of T-lymphocyte cytotoxicity following exposure to sinusoidally amplitude-modulated fields. *Bioelectromagnetics*; 4:281-292; 1983.
- Magin, R. L.; Liburdy, R. P.; Persson, B. Biological effects and safety aspects of nuclear magnetic resonance imaging and spectroscopy. *Ann. NY Acad. Sci.*; 649; 1992.
- Matanoski, G.M.; Breysse, P. N.; Elliott, E. A. Electromagnetic field exposure and male breast cancer. *Lancet*; 337:737; 1991.
- McCann, J.; Dietrich, F.; Rafferty, C.; Martin, A. A critical review of the genotoxic potential of electric and magnetic fields. *Mutation Res.*; 297:61-95; 1993.
- McDowall, M. Mortality in persons resident in the vicinity of electricity transmission facilities. *Br. J. Cancer*; 53; 271-279; 1985.
- McKinlay, A. F.; Andersen, S. B.; Bernhardt, S. H.; Grandolfo, M.; Hossmann, K.-A.; Mild, K. H.; Swerdlow, A. 3.; Van Leeuwen, M.; Verschaeve, L.; Veyret, B. Radiotelephones and human health - proposal for a European research programme. Report of a European Commission Expert Group. Brussels, European Commission Directorate General XIII; 1996.
- McLean, S.; Stuchly, M. A.; Mitchell, R. E.; Wilkinson, D.; Yang, H.; Goddard, M.; Lecuyer, D. W.; Schunk, M.; Callary, E.; Morrison, D. Cancer promotion in a mouse-skin model by a 60-Hz magnetic field: II. Tumor development and immune response. *Bioelectromagnetics*; 12:273-287; 1991.
- Mevissen, M.; Stamm, A.; Buntenkötter, S.; Zwingelberg, R.; Wahnschaffe, U.;



INTERNATIONAL COMMISSION ON NON-IONIZING RADIATION PROTECTION e.V.

- Lbscher, W. Effects of magnetic fields on mammary tumor development induced by 7,12-dimethylbenz(a)anthracene in rats. *Bioelectromagnetics*; 14:131-143; 1993.
- Mevisen, M.; Kietzmann, M.; Ldscher, W. *in vivo* exposure of rats to weak alternating magnetic field increases ornithine decarboxylase activity in the mammary gland by a similar extent as the carcinogen DMBA. *Cancer Letters*; 90:207-214; 1995.
- Michaelis, J.; Schtitz, J.; Meinert, R.; Menger, M.; Grigat, J.-P.; Kaatsch, P.; Kaletsch, U.; Miesner, A.; Stamm, A.; Brinkmann, K.; Karner, H.. Childhood leukemia and electromagnetic fields: results of a population-based case-control study in Germany. *Cancer Causes and Control*; 8:167-174;1997.
- Michaelson, S. M. Biological effects and health hazards of RF and MW energy: fundamentals and overall phenomenology. In: Grandolfo, M.; Michaelson, S. M.; Rindi, A., eds. *Biological effects and dosimetry of nonionizing radiation*. New York, Plenum Press; 337-357; 1983.
- Michaelson, S. M.; Elson, E. C. Modulated fields and window' effects. In: Polk, C.; Postow, E., eds. *Biological effects of electromagnetic fields*. Boca Raton, FL, CRC Press; 435-533; 1996.
- Milham, S., Jr. Mortality from leukemia in workers exposed to electrical and magnetic fields. *New Engl. J. Med.*; 307:249; 1982.
- Miller, A. B.; To, T.; Agnew, D. A; Wall, C.; Green, L. M. Leukemia following occupational exposure to 60-Hz electric and magnetic fields among Ontario electric utility workers. *Am. J. Epidemiol.*; 144:150-160; 1996.
- Murphy, J. C.; Kaden, D. A.; Warren, J.; Sivak, A. Power frequency electric and magnetic fields: a review of genetic toxicology. *Mutation Res.*; 296:221-240; 1993.
- Myers, A.; Cartwright, R. A.; Bonnell, J. A.; Male, J. C.; Cartwright, S. C. Overhead power lines and childhood cancer. *International Conference of Electric and Magnetic Fields in Medicine and Biology*, London, December45, 126; IEEE Conf. Publ. No.257; 1985
- National Academy of Science/National Research Council. Possible health effects of exposure to residential electric and magnetic fields. Washington, DC, National Academy Press; 1996
- National Council on Radiation Protection. Radiofrequency electromagnetic fields. Properties, quantities and units, biophysical interaction, and measurement. Washington, DC, National Council on Radiation Protection and Measurement; NCRP Report 67; 1981.
- National Council on Radiation Protection. A practical guide to the determination of human exposure to 1981 radiofrequency fields. Washington, DC, National Council on Radiation Protection and Measurement; NCRP Report 119; 1993
- National Radiological Protection Board. Biological effects of exposure to non-ionising electromagnetic fields and radiation: III: Radiofrequency and microwave radiation. Chilton, UK, National Radiological Protection Board; Report R-240; 1991.
- National Radiological Protection Board. Electromagnetic fields and the risk of cancer. Report of an Advisory Group on Non-ionising Radiation. Chilton, UK, National Radiological Protection Board; NRPB Documents 3(1); 1992.
- National Radiological Protection Board. Electromagnetic fields and the risk of cancer. Summary of the views of the Advisory Group on Non-ionising Radiation on epidemiological studies published since its 1992 report. Chilton, UK, National Radiological Protection Board; NRPB Documents 4(5); 1993.
- National Radiological Protection Board. Health effects related to the use of visual display units. Report by the Advisory Group on Non-ionising Radiation. Chilton, UK, National Radiological Protection Board; NRPB Documents 5(2); 1994a.
- National Radiological Protection Board. Electromagnetic fields and the risk of cancer. Supplementary report by the Advisory Group on Non-ionising Radiation of 12 April 1994. *Radiol. Prot. Bull.*; 154:10-12; 1994b.
- Olsen, J. H.; Nielsen, A.; Schulgen G. Residence near high-voltage facilities and the risk of cancer in children. *Danish Cancer Registry, AG-NIR: 1-26; 1993.*
- Oak Ridge Associated Universities. Health effects of low-frequency electric and magnetic fields. Oak Ridge, Oak Ridge Associated Universities, TE; ORAU'92/F9; 1992.
- Oueellet-Hellstrom, R.; Stewart, W. F. Miscarriages among female physical therapists, who report using radio- and microwave-frequency electromagnetic radiation. *Am. J. Epidemiol.*; 138:775-786; 1993.
- Phillips, J. L.; Haggren, W.; Thomas, W. J.;



INTERNATIONAL COMMISSION ON NON-IONIZING RADIATION PROTECTION e.V.

- Ishida-Jones, T.; Adey, W. R. Magnetic field-induced changes in specific gene transcription. *Biochim. Biophys. Acta*; 1132:14W144;1992.
- Polk, C.; Postow, E. Biological effects of electromagnetic fields, 2nd ed. Boca Raton, FL, CRC Press; 1996.
- Polson, M. J. R.; Barker, A. T.; Freeston, I. L. Stimulation of nerve trunks with time-varying magnetic fields. *Med. Biol. Eng. Computing*; 20:243-244; 1982.
- Postow, E.; Swicord, M. L. Modulated fields and 'window' effects. In: Handbook of biological effects of electromagnetic fields (Polk, C.; Postow, E., eds.). Boca Raton, FL, CRC Press; 535-580; 1996.
- Preston-Martin, S.; Peters, 3. M.; Yu, M. C.; Garabrant, D. H.; Bowman, 3. D. Myelogenous leukemia and electric blanket use. *Bioelectromagnetics*; 9:207-213; 1988.
- Preston-Martin, S.; Navidi, W.; Thomas, D.; Lee, P.-J.; Bowman, J.; Pogoda, J. Los Angeles study of residential magnetic fields and childhood brain tumors. *Am. J. Epidemiol.*; 143:105-119; 1996a.
- Preston-Martin S.; Gurney, J. G.; Pogoda, J. M.; Holly, E. A.; Mueller, B. A. Brain tumor risk in children in relation to use of electric blankets and water bed heaters; results from the United States West Coast Childhood Brain Tumor Study. *Am. J. Epidemiol.*; 143:1116-1122; 1996b.
- Ramsey, J. I.); Kwon, Y. C. Simplified decision rules for predicting performance loss in the beat. In: Proceedings Seminar on heat stress indices. Luxembourg, CEC 337; 1988.
- Rannug, A.; Ekstrbm, T.; Mild, K. H.; Holmberg, B.; Gimenez-Conti, I.; Slaga, T. J. A study on skin tumour formation in mice with 50 Hz magnetic field exposure. *Carcinogenesis*; 14:573-578; 1993a.
- Rannug, A.; Holmberg, B.; Ekstrbm, T.; Mild, K. H. Rat liver foci study on coexposure with 50 Hz magnetic fields and known carcinogens. *Bioelectromagnetics*; 14:17-27; 1993b.
- Rannug, A.; Holmberg, B.; Mild, K. H. A rat liver foci promotion study with 50-Hz magnetic fields. *Environ. Res.*; 62:223-229; 1993c.
- Rannug, A.; Holmberg, B.; Ekstrbm, T.; Mild, K. H.; Gimenez-Conti. 1.; Slaga, T. J. Intermittent 50 Hz magnetic field and skin tumour promotion in Sencar mice. *Carcinogenesis*; 15:153-157; 1994.
- Reilly, J. P. Peripheral nerve stimulation by induced electric currents: exposure to time-varying magnetic fields. *Med. Biol. Eng. Computing*; 3:101-109; 1989.
- Reilly, J. P. Electrical stimulation and electropathology. Cambridge, Cambridge University Press; 1992.
- Repacholi, M. H. Low-level exposure to radiofrequency fields: health effects and research needs. *Bioelectromagnetics*; 19:1-19; 1998.
- Repacholi, M. H.; Stolwijk, J. A. J. Criteria for evaluating scientific literature and developing exposure limits. *Rad. Protect. Austral.*; 9:79-84; 1991.
- Repacholi, M. H.; Cardis, F. Criteria for EMF health risk assessment. *Rad. Protect. Dosim.*; 72:305-312; 1997.
- Repacholi, M. H.; Basten, A.; Gebiski, V.; Noonan, D.; Finnie, J.; Harris, A. W. Lymphomas in Et{-Piml transgenic mice exposed to pulsed 900 MHz electromagnetic fields. *Rad. Res.*; 147:63 1½40; 1997.
- Robinette, C. D.; Silverman, C.; Jablon, S. Effects upon health of occupational exposure to microwave radiation (radar). *Am. J. Epidemiol.*; 112:39-53; 1980.
- Rothman, K. J.; Chou, C. K.; Morgan, R.; Balzano, Q.; Guy, A. W.; Funch, D. P.; Preston-Martin, S.; Mandel, J.; Steffens, R.; Carlo, G. Assessment of cellular telephone and other radio frequency exposure for epidemiologic research. *Epidemiology*; 7:291-298; 1996a.
- Rothman, K. J.; Loughlm, J. E.; Funch, 9. P.; Dreyer, N. A. Overall mortality of cellular telephone customers. *Epidemiology*; 7:303-305; 1 996b.
- Ruppe, 1.; Hentschel, K.; Eggert, S.; Goltz, S. Experimentelle Untersuchungen zur Wirkung von 50 Hz Magnetfeldern. Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsmedizin, Fb 11.003; 1995 (in German).
- Saffer, J. D.; Thurston, S. J. Cancer risk and electromagnetic fields. *Nature*; 375:22-23; 1995.
- Salford, L. G.; Brun, A.; Eberhardt, J. L. Experimental studies of brain tumor development during exposure to continuous and pulsed 915 MHz radiofrequency radiation. *Bioelectrochem. Bioenerg.*; 30:313-318; 1993.
- Sander, R.; Brinkmann, J.; Ktihne, B. Laboratory studies on animals and human beings exposed to 50 Hz electric and magnetic fields. CIGRE, International Congress on Large High Voltage Electric Systems, Paris, 1-9 September, CIGRE Paper 36-01; 1982.
- Santini, R.; Hosni, M.; Deschaux, P.; Packeco, H. B16 melanoma development in black mice exposed to low-level microwave radiation. *Bioelectromagnetics*; 9:105-107; 1988



INTERNATIONAL COMMISSION ON NON-IONIZING RADIATION PROTECTION e.V.

- Sarkar, S.; Ah, S.; Behari, J. Effect of low power microwave on the mouse genome: a direct DNA analysis. *Mutation Res.*; 320:141-147; 1994.
- Savitz, 9. A. Overview of epidemiological research on electric and magnetic fields and cancer. *Am. Ind. Hyg. Ass. J.*; 54:197-204; 1993.
- Savitz, D. A.; Ahlbom, A. Epidemiologic evidence on cancer in relation to residential and occupational exposure. In: *Biologic effects of electric and magnetic fields, Vol.2.* New York, Academic Press; 233-262; 1994.
- Savitz, 9. A.; Loomis, 9. P. Magnetic field exposure in relation to leukemia and brain cancer mortality among electric utility workers. *Am. J. Epidemiol.*; 141:123-134; 1995.
- Savitz, 9. A.; Wachtel, H.; Barnes, F. A.; John, E. M.; Tyrdik, I. G. Case-control study of childhood cancer and exposure to 60-Hz magnetic fields. *Am. J. Epidemiol.*; 128:21-38; 1988.
- Savitz, D. A.; John, F.M.; Kleckner, R. C. Magnetic field exposure from electric appliances and childhood cancer. *Am. J. Epidemiol.*; 131:763-773; 1990.
- Schnorr, T. M.; Grajewski, B. A.; Hornung, R. W.; Thun, M. J.; Egeland, G. M.; Murray, W. F.; Conover, D. L.; Halperin, W. F. Video display terminals and the risk of spontaneous abortion. *New Eng. J. Med.*; 324:727-733; 1991.
- Schreiber, G. H.; Swaen, G.M.; Meijers 3. M.; Slangen, 3. J.; Sturmans, F. Cancer mortality and residence near electricity transmission equipment: a retrospective cohort study. *mt. J. Epidemiol.*; 22:9-15; 1993.
- Selmaoui, B.; Lambrozo, J.; Touitou, Y. Magnetic fields and pineal function in humans: evaluation of nocturnal acute exposure to extremely low frequency magnetic fields on serum melatonin and urinary 6-sulfatoxymelatonin circadian rhythms. *Life Sci.*; 58:1539-1549; 1996.
- Selvin, S.; Schulman, 3.; Merrill, D. W. Distance and risk measures for the analysis of spatial data: a study of childhood cancers. *Soc. Sci. Med.* 34:769-777; 1992.
- Severson, R. K.; Stevens, R. 6.; Kaune, W. T.; Thomas, D. B.; Housen L.; Davis, S.; Sever, L. F. Acute nonlymphocytic leukemia and residential exposure to power frequency magnetic fields. *Am. J. Epidemiol.* 128:1W20; 1988.
- Shaw, 6. W.; Croen, L. A. Human adverse reproductive outcomes and electromagnetic fields exposures: review of epidemiologic studies. *Environ. Health Persp.* 101:107-119; 1993.
- Shellock, F. 6.; Crues, 3. V. Temperature, heart rate, and blood pressure changes associated with clinical imaging at 1.5 T. *Radiology*; 163:259-262; 1987.
- Sienkiewicz, Z. J~; Saunders, R. D.; Kowalczyk, C. 1. The biological effects of exposure to non-ionising electromagnetic fields and radiation: II Extremely low frequency electric and magnetic fields. Chilton. UK, National Radiological Protection Board; NRPB R239; 1991.
- Sienkiewicz, 1.3.; Cridland, N. A.; Kowalczyk, C. I.; Saunders, R. D. Biological effects of electromagnetic fields and radiations. In: Stone, W. R.; Hyde, 6., eds. *The review of radio science: 1990-1992*; Oxford, Oxford University Press; 737-770; 1993.
- Silny, 3. The influence threshold of a time-varying magnetic field in the human organism. In: Bernhardt, 3. H. ed. *Biological effects of static and extremely-low-frequency magnetic fields.* Munich, MMV Medizin Verlag; 105-112; 1986.
- Sliney, D.; Wolbarsht, M. *Safety with laser and other optical sources.* London, Plenum Press; 1980.
- Sobel, E.; Davanipour, Z. EMF exposure may cause increased production of amyloid beta and eventually lead to Alzheimer's disease. *Neurology*; 47:1594-1600; 1996.
- Stern, S.; Margolin, L.; Weiss, B.; Lu, S. T.; Michaelson, S. M. Microwaves: effects on thermoregulatory behavior in rats. *Science*; 206:1198-1201; 1979.
- Stevens, R. 0. Electric power use and breast cancer: a hypothesis. *Am. J. Epidemiol.*; 125:556-561; 1987.
- Stevens, R. 6.; Davis, S.; Thomas, 9. B.; Anderson, L. E.; Wilson, B. W. Electric power, pineal function and the risk of breast cancer. *The FASEB Journal*; 6:853-860; 1992.
- Stevens, R. 6.; Davis, S. The melatonin hypothesis: electric power and breast cancer. *Environ. Health Persp.*; 104(Suppl. 1):135-140; 1996.
- Stollery, B. T. Effects of 50 Hz electric currents on mood and verbal reasoning skills. *Br. J. md. Med.*; 43:339-349; 1986.
- Stollery B. T. Effects of 50 Hz electric currents on vigilance and concentration. *Br. J. md. Med.*; 44:111-118; 1987.
- Stuchly, M. A.; McLean, J. R. N.; Burnett, R.; Goddard, M.; Lecuyer, 9. W.; Mitchel, R. F. 3. Modification of tumor promotion in the mouse skin by exposure to an alternating magnetic field. *Cancer Letters*; 65:1-7; 1992.



INTERNATIONAL COMMISSION ON NON-IONIZING RADIATION PROTECTION e.V.

- Stuchly, M. A.; Xi, W. Modelling induced currents in biological cells exposed to low-frequency magnetic fields. *Phys. Med. Bid.*; 39:1319-1330; 1994.
- Szmigielski, S. Cancer morbidity in subjects occupationally exposed to high frequency (radiofrequency and microwave) electromagnetic radiation. *Science of the Total Environment*; 180:9-17; 1996.
- Szmigielski, S.; Szudinski, A.; Pietraszek, A.; Bielec, M.; Wrembel, Z. K. Accelerated development of spontaneous and benzopyrene-induced skin cancer in mice exposed to 2450-MHz microwave radiation. *Bioelectromagnetics*; 3:179-191; 1982.
- Szmigielski, S.; Bielec, M.; Lipski, S.; Sokolska, G. Immunologic and cancer-related aspects of exposure to low-level microwave and radiofrequency fields. In: Marino, A. A., ed. *Modern bioelectricity*. New York, Marcel Dekker; 861-925; 1988.
- Tenforde, T. S. Biological interactions and human health effects of extremely-low-frequency magnetic fields. In: *Extremely low-frequency electromagnetic fields: the question of cancer*. (Anderson, L. E.; Stevens, R. G.; Wilson, B. W. eds.). Columbia, OH, Battelle Press; 291-315; 1990.
- Tenforde, T. S. Biological interactions of extremely-low-frequency electric and magnetic fields. *Bioelectrochem.*; 25:1-17; 1991.
- Tenforde, T. S. Biological interactions and potential health effects of extremely-low-frequency magnetic fields from power lines and other common sources. *Ann. Rev. Public Health*; 13:173-196; 1992.
- Tenforde, T. S. Cellular and molecular pathways of extremely - low - frequency electromagnetic field interactions with living systems. In: Blank, M., ed. *Electricity and magnetism in biology and medicine*. San Francisco, San Francisco Press; f-s; 1993.
- Tenforde, T. S. Interaction of ELF magnetic fields with living systems. In: Polk, C.; Postow, F., eds. *Biological effects of electromagnetic fields*. Boca Raton, FL, CRC Press; 185-230; 1996.
- Tenforde, T. S.; Kaune, W. T. Interaction of extremely low frequency electric and magnetic fields with humans. *Health Phys.*; 53:585-606; 1987.
- Thenault, G.; Goldberg, M.; Miller, A. B.; Armstrong, B.; Guénel, P.; Deadman, J.; Imbernon, E.; To, T.; Chevalier, A.; Cyr, D.; Wall, C. Cancer risks associated with occupational exposure to magnetic fields among electric utility workers in Ontario and Quebec, Canada, and France 1970-1989. *Am. J. Epidemiol.*; 139:550-572; 1994.
- Tofani, S.; d'Amore, G.; Fiandino, U.; Benedetto, A.; Gandhi, O. P.; Chen, J. Y. Induced foot-currents in humans exposed to VHF radio-frequency EM fields. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, EC-37:96; 1995.
- Tomenius, L. 50-Hz electromagnetic environment and the incidence of childhood tumors in Stockholm county. *Bioelectromagnetics*; 7:191-207; 1986.
- Tynes, T.; Andersen, A.; Langmark, F. Incidence of cancer in Norwegian workers potentially exposed to electromagnetic fields. *Am. J. Epidemiol.*; 136:81-88; 1992.
- Tynes, T.; Haldorsen, T. Electromagnetic fields and cancer in children residing near Norwegian high-voltage power lines. *Am. J. Epidemiol.*; 145:219-226; 1997.
- Ueno, S. (ed.). *Biological effects of magnetic and electromagnetic fields*. New York, Plenum Press; 1996.
- United Nations Environment Programme/World Health Organization/International Radiation Protection Association. *Extremely low frequency (ELF) fields*. Geneva, World Health Organization; Environmental Health Criteria 35; 1984.
- United Nations Environment Programme/World Health Organization/International Radiation Protection Association. *Magnetic fields*. Geneva, World Health Organization; Environmental Health Criteria 69; 1987.
- United Nations Environment Programme/World Health Organization/International Radiation Protection Association. *Electromagnetic fields (300 Hz to 300 GHz)*. Geneva, World Health Organization; Environmental Health Criteria 137; 1993.
- Vena, J. E.; Graham, S.; Hellman, R.; Swanson, M.; Brasure, J. Use of electric blankets and risk of post-menopausal breast cancer. *Am. J. Epidemiol.*; 134:180-185; 1991.
- Vena, J. E.; Freudenheim, J. L.; Marshall, J. R.; Laughlin, R.; Swanson, M.; Graham, S. Risk of premenopausal breast cancer and use of electric blankets. *Am. J. Epidemiol.*; 140:974-979; 1994.
- Verkasalo, P. K. Magnetic fields and leukemia: risk for adults living next to power lines. *Scand. J. Work Environ. Health*; 22 (Suppl. 2):7-55; 1996.
- Verkasalo, P. K.; Pukkala, E.; Hongisto, M. Y.;



INTERNATIONAL COMMISSION ON NON-IONIZING RADIATION PROTECTION e.V.

- Valjus, J. E.; J5rvinen, P.J.; Heikkil8, K. V.; Koskenvuo, M. Risk of cancer in Finnish children living close to power lines. *Br. Med.*; 307:895-899; 1993.
- Verkasalo, P. K.; Pukkala, E.; Kaprio, J.; Heikkila, K. V.; Koskenvuo, M. Magnetic fields of high voltage power lines and risk of cancer in Finnish adults: nationwide cohort study. *Br. Med. J.*; 313:1047-1051; 1996.
- Venreault, R.; Weiss, N. S.; Hollenbach, K. A.; Strader, C. H.; Daling, 3. R. Use of electric blankets and risk of testicular cancer. *Am. J. Epidemiol.*; 131:759-762; 1990.
- Walleczek, J. Electromagnetic field effects on cells of the immune system: the role of calcium signalling. *The FASEB Journal*; 6:3177-3185; 1992.
- Walleczek, J.; Liburdy, R. P. Nonthermal 60 Hz sinusoidal magnetic-field exposure enhances ⁴⁵Ca² uptake in rat thymocytes: dependence on mitogen activation. *FEBS Letters*; 271:157-160; 1990.
- Wertheimer, N.; Leeper, E. Electrical wiring configurations and childhood cancer. *Am. J. Epidemiol.*; 109:273-284; 1979.
- Williams, 6. M. Comment on 'Acute low-intensity microwave exposure increases DNA single-strand breaks in rat brain cells" by Henry Lai and Narendra P. Singh. *Bioelectromagnetics*; 17:165; 1996.
- Xi, W.; Stuchly, M. A. High spatial resolution analysis of electric currents induced in men by ELF magnetic fields. *Appl. Comput. Electromagn. Soc.* 3.; 9:127-134; 1994.



INTERNATIONAL COMMISSION ON NON-IONIZING RADIATION PROTECTION e.V.

APÉNDICE

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.

Efecto atermal. Cualquier efecto de la energía electromagnética en un cuerpo que no es un efecto relacionado al calor.

Barrera Hemato encefálica. Un concepto funcional se desarrollo para explicar porqué muchas sustancias que son transportadas por la sangre fácilmente entran en otros tejidos pero no entra en el cerebro; la " barrera " funciona como si fuera una membrana continua que alineaba con la vascularidad del cerebro. Estas células endoteliales capilares del cerebro forman una barrera a la entrada casi continua de sustancias en el cerebro.

Conductancia. El recíproco de la resistencia. Expresado en siemens (S). eléctrica.

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 ($S.m^{-1}$).

Onda continua. Una onda cuyas oscilaciones sucesivas son idénticas bajo condiciones de estado estacionario.

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 ($A m^2$).

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.

Constante dieléctrica. Vea permitividad.

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.

Fuerza del campo eléctrico. La fuerza (E) en una carga positiva estacionaria en un punto de un campo eléctrico; medido en voltios por metro ($V m^{-1}$).

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.

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.

Frecuencia. El número de ciclos sinusoidales completados por las ondas electromagnéticas en 1 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).

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 ($A m^{-1}$).



INTERNATIONAL COMMISSION ON NON-IONIZING RADIATION PROTECTION e.V.

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 ($H\ m^{-1}$). 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.

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.

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; caracterizado porque la energía por fotón es menos que 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.

Constante dieléctrica. Una constante que defina la influencia de un medio isotrópico en las fuerzas de la atracción o de repulsión entre cuerpos electrificados, y es expresado en faradios por

metro (Fm^{-1}); la permitividad relativa es la permitividad de una material o medio dividido entre la permitividad en el vacío.

Onda plana. Una onda electromagnética en la cual el vector 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 un unidad de área normal en la dirección de propagación de la onda; expresado en watio por metro cuadrado (Wm^2).

El vector de Poynting. Un vector, el flujo de el cual a través de cualquier superficie representa la potencia electromagnética instantánea transmitida a través de esta superficie; también llamada densidad de potencia.

Exposición pública. Toda exposición a CEM experimentado 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: En esta publicación, la radiofrecuencia 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 raíz cuadrada de la medida de la raíz cuadra 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



INTERNATIONAL COMMISSION ON NON-IONIZING RADIATION PROTECTION e.V.

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 ($J\ kg^{-1}$); la absorción específica de la energía es el integral del tiempo de la tasa específica de absorción de energía.

Tarifa específica de absorción de energía (SAR). La tasa en la cual la energía se absorbe en tejidos del cuerpo, en vatios por kilogramo ($W\ kg^{-1}$); El SAR es la medida dosimétrica que se ha adoptado extensamente en las frecuencias cerca de 100 kHz.

Longitud de onda. La distancia entre dos puntos sucesivas de una onda periódica en la dirección de propagación, en la cual la oscilación tiene la misma fase.