

10 - Radiación Electromagnética (cont.)

Introducción

En este Capítulo completamos el análisis introductorio a antenas analizando la radiación emitida por un agujero en un plano conductor sobre el que incide una onda electromagnética. Esta es la idea subyacente en las llamadas antenas de abertura de gran aplicación práctica.

Se presenta el método de Kirchhoff-Huygens para el cálculo del campo lejano emitido por una abertura en función del campo sobre la abertura.

Se introduce la noción de corrientes equivalentes, que se utiliza para lograr un esquema de cálculo general y optimizado en el análisis numérico de las estructuras radiantes.

Se introduce la fórmula de Friis para el cálculo de un enlace sencillo de comunicaciones. Se presentan diversos enlaces a sitios que analizan el problema de las radio-comunicaciones.

Se presenta una muy breve introducción a los problemas de compatibilidad electromagnética (EMC) que surgen de los fenómenos de interferencia. Se analizan las fuentes comunes de interferencia, la posibilidad de interferencia radiada o conducida y se dan varios ejemplos. Finalmente se mencionan brevemente algunas de las normas internacionales sobre el tema y se presentan varios enlaces con mayor información.

Se presenta una introducción a los efectos biológicos de los campos electromagnéticos, en particular sobre la salud humana. Se describen las distintas regiones del espectro electromagnético y se explica la diferencia entre la radiación ionizante y no ionizante.

Se presentan algunos organismos internacionales y organizaciones no gubernamentales que estudian los efectos de los campos electromagnéticos sobre la salud humana y sus planes de trabajo.

Se discuten brevemente los criterios metodológicos para el estudio científico y la evaluación del riesgo de agentes ambientales sobre la salud humana.

Se presenta un resumen de las pautas para limitar la exposición a campos electromagnéticos entre 30 Hz y 300 GHz elaboradas por la ICNIRP en 1998, y que son la base para la mayoría de las normas nacionales en vigencia.

Se comenta brevemente la declaración del IEE (Institution of Electrical Engineers - UK) de mayo de 2002 sobre la evaluación de trabajos científicos sobre el impacto de campos electromagnéticos de baja frecuencia sobre la salud humana publicados en los últimos dos años.

Se presenta información más detallada sobre posibles efectos, mecanismos de acoplamiento y estudios epidemiológicos en tres casos: campos estáticos, campos de frecuencia industrial y campos asociados a la telefonía celular, que se están estudiando con gran detenimiento en los últimos años.

Antenas de abertura

Las antenas de abertura explotan la posibilidad de la radiación generada por agujeros o aberturas en superficies conductoras. Se usan antenas de este tipo en UHF y frecuencias mayores, y son el tipo preferido para obtener alta ganancia. Las características esenciales de las antenas de abertura es el aumento en ganancia con la frecuencia, en muchos casos en forma cuadrática, y que su impedancia de entrada es prácticamente real a toda frecuencia.

Método de Kirchhoff-Huygens

El cálculo de los campos emitidos por una abertura radiante es complejo. Salvo en casos de geometría sencilla no existen soluciones analíticas y es necesario recurrir a métodos numéricos. Sin embargo, desde el punto de vista conceptual la formulación es sencilla y se basa en el **principio de Huygens** que hemos descripto brevemente en relación al análisis introductorio de la difracción. Según este principio cada punto en el frente de onda de una onda que se propaga se puede considerar como un centro secundario de emisión de ondas esféricas. La superposición coherente de los campos emitidos por estos centros secundarios define el nuevo frente de onda. Este principio fue presentado por Christiaan Huygens en 1690 para explicar la difracción de la luz alrededor de un objeto.

El principio de Huygens puede demostrarse rigurosamente a partir de las ecuaciones de Maxwell y el teorema de Green de las funciones analíticas, como vemos a continuación.

Consideremos una función $\psi(\mathbf{r})$ que es solución de la **ecuación escalar** de ondas de Helmholtz $\nabla^2\psi + k^2\psi = 0$ en un recinto V cualquiera, que contiene al origen de coordenadas y cuya frontera es la superficie S . Sea $\phi(\mathbf{r})$ otra función diferenciable dentro de V . Entonces dentro de V vale el llamado teorema de Green (APENDICE 1):

$$\int_V (\psi \nabla^2 \phi - \phi \nabla^2 \psi) dV = \oint_S \left(\psi \frac{\partial \phi}{\partial n} - \phi \frac{\partial \psi}{\partial n} \right) dS$$

donde las derivadas en el integrando del segundo miembro son las derivadas direccionales en la dirección normal a la superficie S : $\partial\psi/\partial n = \nabla\psi \cdot \hat{\mathbf{n}}$

El teorema de Green es una consecuencia del teorema de la divergencia.

Introducimos la ecuación de Helmholtz en la expresión del teorema de Green y elegimos como ϕ a la onda esférica elemental¹ $\phi(\mathbf{r}) = e^{-ikr}/r$ con lo que tenemos:

$$\int_V \left(\nabla^2 \left(\frac{e^{-ikr}}{r} \right) + k^2 \frac{e^{-ikr}}{r} \right) \psi dV = \oint_S \left(\psi \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{e^{-ikr}}{r} \right) - \frac{\partial \psi}{\partial n} \frac{e^{-ikr}}{r} \right) dS$$

Pero: $\nabla^2(fg) = \nabla \cdot \nabla(fg) = \nabla \cdot (f\nabla g + g\nabla f) = f\nabla^2 g + 2\nabla f \cdot \nabla g + g\nabla^2 f$ y entonces:

$$\begin{aligned} \nabla^2 \left(\frac{e^{-ikr}}{r} \right) &= \frac{1}{r} \nabla^2(e^{-ikr}) + 2\nabla(e^{-ikr}) \cdot \nabla \left(\frac{1}{r} \right) + e^{-ikr} \nabla^2 \left(\frac{1}{r} \right) = \frac{1}{r^3} \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{d}{dr} e^{-ikr} \right) - 2(ik e^{-ikr} \hat{\mathbf{r}}) \cdot \left(-\frac{\hat{\mathbf{r}}}{r^2} \right) - 4\pi e^{-ikr} \delta(r) \\ &= e^{-ikr} \left[-\left(\frac{2ik}{r^2} + \frac{k^2}{r} \right) + \frac{2ik}{r^2} - 4\pi \delta(r) \right] = -e^{-ikr} \left(\frac{k^2}{r} + 4\pi \delta(r) \right) \end{aligned}$$

donde se ha usado el laplaciano en esféricas y las propiedades de la delta de Dirac.

La integral de volumen resulta así:

$$\int_V \left(-e^{-ikr} \left(\frac{k^2}{r} + 4\pi \delta(r) \right) + k^2 \frac{e^{-ikr}}{r} \right) \psi dV = -4\pi \int_V \psi e^{-ikr} \delta(r) dV = -4\pi \psi(0)$$

¹ Esta función es singular en el origen de coordenadas, de modo que en rigor se debe quitar del recinto de integración un entorno de $\mathbf{r} = 0$ porque las funciones que aparecen en el teorema de Green deben ser analíticas dentro del recinto de integración.

porque el origen de coordenadas se halla dentro del recinto de integración.

Entonces:

$$\psi(0) = -\frac{1}{4\pi} \oint_S \left(\psi \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{e^{-ikr}}{r} \right) - \frac{\partial \psi}{\partial n} \frac{e^{-ikr}}{r} \right) dS$$

donde S encierra al origen de coordenadas. Como la elección del sistema de coordenadas es totalmente arbitrario, podemos correrlo a otro punto cualquiera. Entonces:

$$\psi(0) \rightarrow \psi(\mathbf{r}') \quad , \quad r \rightarrow R \quad \text{con} \quad R = |\mathbf{R}| = |\mathbf{r} - \mathbf{r}'| :$$

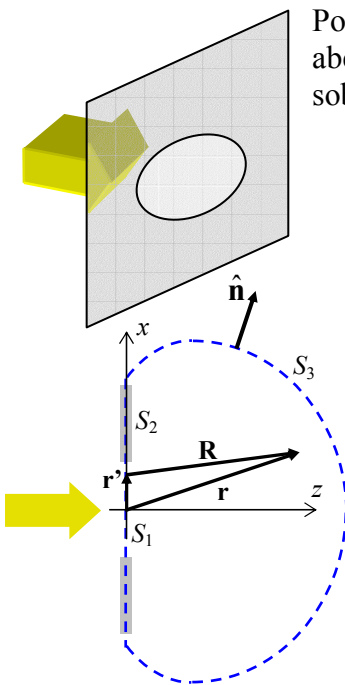
$$\psi(\mathbf{r}) = -\frac{1}{4\pi} \oint_S \left(\psi \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{e^{-ikR}}{R} \right) - \frac{\partial \psi}{\partial n} \frac{e^{-ikR}}{R} \right) dS'' \quad \text{con} \quad \mathbf{r} \text{ interior a la superficie } S.$$

Esto significa que la función $\psi(\mathbf{r})$, que satisface la ecuación de Helmholtz dentro de un recinto V , calculada en un punto cualquiera dentro del recinto, se puede obtener a partir de los valores de ψ y su derivada normal sobre la superficie S que encierra a V . Además se ve que los factores que multiplican a ψ y su derivada normal son funciones de onda esféricas elementales, y la integral representa una superposición. Entonces la ecuación obtenida, que se conoce como **integral de Kirchhoff**, es la expresión matemática del principio de Huygens.

Para obtener una integral de Kirchhoff para la **ecuación vectorial** de ondas observamos que en coordenadas cartesianas cada componente de los campos satisface la correspondiente ecuación escalar de Helmholtz y entonces es posible escribir:

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = -\frac{1}{4\pi} \oint_S \left(\frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{e^{-ikR}}{R} \right) \mathbf{E} - \frac{e^{-ikR}}{R} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial n} \right) dS'$$

En este esquema es necesario conocer el campo y su derivada normal sobre la superficie del recinto para calcular los integrales, pero habitualmente estos valores no se conocen. Una de las formas de resolver esta situación es admitir una forma de campo sencilla sobre el contorno.



Por ejemplo, si se quiere calcular el campo creado por una antena de abertura en un plano conductor, se supone que una onda plana incide sobre el sistema, y sobre la superficie el campo es:

$$\begin{aligned} \mathbf{E} &= 0 && \text{sobre el plano conductor} \\ \mathbf{E} &= E_0 \hat{\mathbf{x}} e^{i(\omega t - kz)} && \text{(el campo de la onda plana original)} \\ &&& \text{sobre la abertura.} \end{aligned}$$

Sorprendentemente, esta elección un tanto arbitraria produce resultados que coinciden con las mediciones con poco error. Prácticamente todos los cálculos realizados en problemas de difracción y de radiación por aberturas se han realizado hasta hace pocos años usando estas hipótesis (o similares) en lo que se conoce como el **método de Kirchhoff**. Para aplicar el método de Kirchhoff-Huygens al cálculo de la radiación por una abertura, consideramos una superficie formada por S_1 , sobre la abertura, S_2 , sobre el conductor, y S_3 para completar la superficie cerrada. Tomamos $S_3 \rightarrow \infty$, de modo que el campo se anula sobre ella. El campo también se anula sobre el conductor, que tomamos como perfecto, de modo que la integral de superficie cerrada del principio de Huygens se reduce a la integral sobre la superficie de la abertura solamente:

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = -\frac{1}{4\pi} \oint_S \left(\frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{e^{-ikR}}{R} \right) \mathbf{E} - \frac{e^{-ikR}}{R} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial n} \right) dS' = -\frac{1}{4\pi} \int_{S_1} \left(\frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{e^{-ikR}}{R} \right) \mathbf{E} - \frac{e^{-ikR}}{R} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial n} \right) dS'$$

Sobre la superficie de la abertura ($z' = 0$, $\hat{\mathbf{n}} = -\hat{\mathbf{z}}$) admitimos que existe un campo similar a una onda plana, pero introducimos una dependencia (en principio desconocida) respecto de las

coordenadas transversales:

$$\mathbf{E} = E_s(x', y') \hat{\mathbf{x}} e^{i(\omega t - kz')} = E_s(x', y') \hat{\mathbf{x}} e^{i\omega t} \quad \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial n} = -\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial z'} = ikE_s(x', y') \hat{\mathbf{x}} e^{i\omega t}$$

y además:

$$\frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{e^{-ikR}}{R} \right) = \nabla' \left(\frac{e^{-ikR}}{R} \right) \cdot \hat{\mathbf{n}} = \left(\frac{\nabla' e^{-ikR}}{R} + e^{-ikR} \nabla' \frac{1}{R} \right) \cdot \hat{\mathbf{n}} = \left(-\frac{ik e^{-ikR}}{R} + \frac{e^{-ikR}}{R^2} \right) \hat{\mathbf{R}} \cdot \hat{\mathbf{z}} = \frac{e^{-ikR}}{R} \left(-ik + \frac{1}{R} \right) \cos \alpha$$

donde α es el ángulo entre \mathbf{R} y \mathbf{z} . Entonces:

$$\begin{aligned} \mathbf{E}(\mathbf{r}) &= -\frac{1}{4\pi} \hat{\mathbf{x}} e^{i\omega t} \int_{S_1} \left(E_s(x', y') \frac{e^{-ikR}}{R} \left(-ik + \frac{1}{R} \right) \cos \alpha - ik \frac{e^{-ikR}}{R} \right) dS' \\ &= -\frac{1}{4\pi} \hat{\mathbf{x}} e^{i\omega t} \int_{S_1} \left(E_s(x', y') \frac{e^{-ikR}}{R} \left(-ik + \frac{1}{R} \right) \cos \alpha - ik \frac{e^{-ikR}}{R} \right) dS' \approx \frac{ik}{2\pi} \hat{\mathbf{x}} e^{i\omega t} \int_{S_1} E_s(x', y') \frac{e^{-ikR}}{R} (1 + \cos \alpha) dS' \end{aligned}$$

donde se ha despreciado el término que depende como $1/R^2$ para el cálculo del campo lejano.

También para puntos lejanos: $kR \approx \mathbf{k} \cdot \mathbf{R} = \mathbf{k} \cdot (\mathbf{r} - \mathbf{r}')$ con $\mathbf{k} = k \hat{\mathbf{R}}$, y podemos escribir:

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) \approx \frac{i}{2\pi} \hat{\mathbf{x}} e^{i(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r})} \int_{S_1} E_s(x', y') \frac{e^{i\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}'}}{R} (k + k \cos \alpha) dS' = \frac{i}{2\pi} \hat{\mathbf{x}} e^{i(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r})} \int_{S_1} E_s(x', y') \frac{e^{i\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}'}}{R} (k + k_z) dS'$$

Finalmente, para puntos lejanos podemos aproximar a cero la amplitud en el integrando y suponer que el vector de onda es aproximadamente constante sobre la superficie de la abertura, con lo que nos queda:

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) \approx \frac{i(k + k_z)}{2\pi r} \hat{\mathbf{x}} e^{i(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r})} \int_{S_1} E_s(x', y') e^{i\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}'} dS'$$

Esta expresión es extremadamente importante, porque relaciona el campo lejano y el campo en la abertura (o campo cercano)²:

El campo lejano creado por la abertura radiante es la transformada de Fourier de la distribución de campo en la abertura.

Desde el punto de vista de la óptica, la difracción para puntos lejanos, respecto del tamaño del obstáculo difractor, se conoce como **difracción de Fraunhofer**. Para puntos más cercanos o situaciones donde la distancia del obstáculo al punto de observación no es muy grande respecto del tamaño del obstáculo, estamos en la **difracción de Fresnel**, de descripción matemática más compleja³.

El cálculo que hemos hecho para la radiación de una abertura finita es entonces un caso de difracción de Fraunhofer.

Ejemplo 10.9: Analizar la radiación lejana de una abertura rectangular de lados a y b usando el método de Kirchhoff-Huygens

En la hipótesis del método de Kirchhoff-Huygens, sobre la superficie de la abertura el campo es el de la onda plana incidente. Entonces suponemos el campo constante sobre la abertura: $E_s(x', y') = E_0$. La expresión del campo lejano es así:

$$\begin{aligned} \mathbf{E}(\mathbf{r}) &\approx \frac{i(k + k_z)E_0}{2\pi r} \hat{\mathbf{x}} e^{i(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r})} \int_{S_1} e^{i\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}'} dS' = \frac{i(k + k_z)E_0}{2\pi r} \hat{\mathbf{x}} e^{i(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r})} \int_{-a/2}^{a/2} dx' \int_{-b/2}^{b/2} dy' e^{i(k_x x' + k_y y')} \\ &= \frac{i(k + k_z)E_0}{2\pi r} \hat{\mathbf{x}} e^{i(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r})} \frac{2}{k_x} \text{sen} \left(\frac{k_x a}{2} \right) \frac{2}{k_y} \text{sen} \left(\frac{k_y b}{2} \right) \end{aligned}$$

² Nótese que, aunque la integral se extiende al área de la abertura, se puede pensar en una integral sobre todo el plano xy con una antitransformada de Fourier $E_s(x, y)$ de banda limitada.

³ La difracción por un borde, que vimos en el Capítulo 6, es siempre una difracción de Fresnel, porque el obstáculo es un plano semi-infinito.

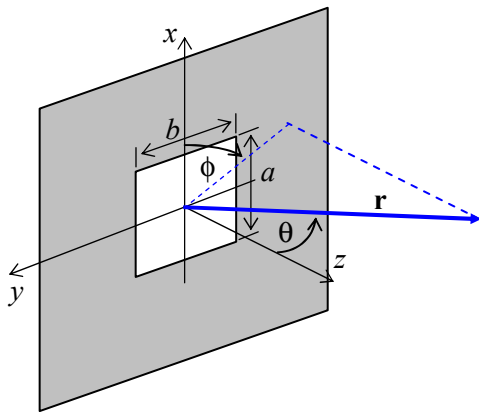
y finalmente:
$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) \approx \frac{i2(k+k_z)E_0}{\pi k_x k_y r} \text{sen}\left(\frac{k_x a}{2}\right) \text{sen}\left(\frac{k_y b}{2}\right) \hat{\mathbf{x}} e^{i(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r})}$$

Asociado a este campo eléctrico de radiación habrá un campo magnético a lo largo del eje $\hat{\mathbf{y}}$ ligado a través de la impedancia intrínseca. Para calcular el diagrama de radiación

partimos de:

$$r^2 \langle N \rangle = r^2 \frac{\langle E^2 \rangle}{2\eta_0} \approx \frac{(k+k_z)S^2 |E_0|^2}{4\pi^2} \frac{\text{sen}^2\left(\frac{k_x a}{2}\right)}{\left(\frac{k_x a}{2}\right)^2} \frac{\text{sen}^2\left(\frac{k_y b}{2}\right)}{\left(\frac{k_y b}{2}\right)^2}$$

En esta ecuación: $k_x = k \text{sen } \theta \cos \phi$ $k_y = k \text{sen } \theta \text{sen } \phi$ $k_z = k \cos \theta$ y $S = ab$ es el área de la abertura. Obsérvese en la figura cómo se definen los ángulos.



Sobre un plano vertical $xz(\phi = 0)$ tenemos $k_y = 0$ y:

$$r^2 \langle N \rangle \approx \frac{k^2 (1 + \cos \theta)^2 S^2 |E_0|^2}{4\pi^2} \frac{\text{sen}^2\left(\frac{\pi a}{\lambda} \text{sen } \theta\right)}{\left(\frac{\pi a}{\lambda} \text{sen } \theta\right)^2}$$

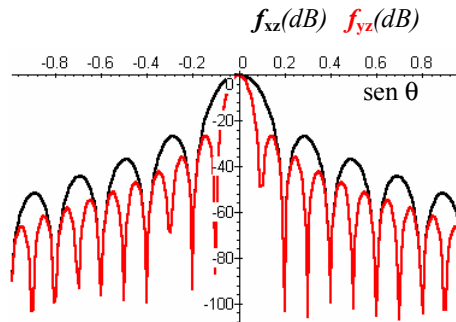
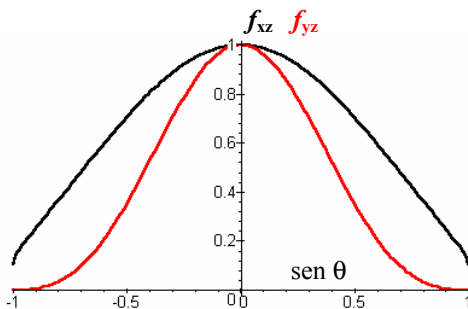
El valor máximo de esta expresión se da para $\theta = 0$:

$$r^2 \langle N \rangle_{\max} \approx \frac{k^2 S^2 |E_0|^2}{\pi^2} \text{ y el diagrama de radiación es:}$$

$$f_{xz}(\theta) \approx \frac{(1 + \cos \theta)^2}{4} \text{sen}^2\left(\frac{\pi a}{\lambda} \text{sen } \theta\right) \Big/ \left(\frac{\pi a}{\lambda} \text{sen } \theta\right)^2$$

Sobre un plano horizontal $yz(\phi = \pi/2)$ tenemos $k_x = 0$ y procediendo de igual manera:

$$f_{yz}(\theta) \approx \frac{(1 + \cos \theta)^2}{4} \text{sen}^2\left(\frac{\pi b}{\lambda} \text{sen } \theta\right) \Big/ \left(\frac{\pi b}{\lambda} \text{sen } \theta\right)^2$$



En las figuras se muestran diagramas de radiación para ambos planos de corte. La figura de la izquierda es para $a = \lambda/2, b = \lambda$ y la figura de la derecha, que se ha graficado en escala logarítmica (en $\text{dB} - 20 \log_{10}(f)$) para que se noten los lóbulos secundarios, es para $a = 5\lambda, b = 10\lambda$.

Corrientes equivalentes

Hemos visto antenas que consisten en hilos de corriente. Es posible expresar la radiación de una abertura mediante una distribución de **corrientes equivalentes**, lo que permite usar los métodos numéricos desarrollados para antenas de hilos de corriente, fundamentalmente el método de momentos, para analizar antenas de abertura.

Las ecuaciones de Maxwell del rotor pueden escribirse:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad \text{donde} \quad \mathbf{J} = \mathbf{j} + \partial \mathbf{D} / \partial t \quad \text{es una densidad de corriente eléctrica, y}$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\mathbf{M} \quad \text{donde} \quad \mathbf{M} = \partial \mathbf{B} / \partial t \quad \text{es una densidad de corriente magnética, que equipara conceptualmente la ley de Faraday a la de Maxwell-Ampere.}$$

¿Cuál es la ventaja de definir estas corrientes equivalentes? Para puntos donde $\mathbf{J}=0$, podemos escribir:

$$\mathbf{H}(\mathbf{r}, t) = \nabla \times \mathbf{A}(\mathbf{r}, t) \quad \text{con} \quad \mathbf{A}(\mathbf{r}, t) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_V \frac{\mathbf{J}(\mathbf{r}', t')}{R} dV'$$

Análogamente, para puntos donde $\mathbf{M} = 0$, podemos escribir:

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \nabla \times \mathbf{F}(\mathbf{r}, t) \quad \text{con} \quad \mathbf{F}(\mathbf{r}, t) = \frac{\varepsilon_0}{4\pi} \int_V \frac{\mathbf{M}(\mathbf{r}', t')}{R} dV'$$

Obsérvese que estas son soluciones formales de las ecuaciones inhomogéneas, pero permiten desarrollar métodos numéricos únicos para tratar con el campo eléctrico y el magnético de igual manera.

Un esquema general de cálculo puede ser el siguiente:

Si hay corrientes eléctricas equivalentes:

1) Considerar soluciones armónicas: $\mathbf{J}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{J}_s(\mathbf{r}) e^{i\omega t}$

$$\mathbf{A}(\mathbf{r}, t) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_V \frac{\mathbf{J}(\mathbf{r}', t')}{R} dV' = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_V \frac{\mathbf{J}_s(\mathbf{r}') e^{i(\omega t - kR)}}{R} dV' = \frac{\mu_0 e^{i\omega t}}{4\pi} \int_V \frac{\mathbf{J}_s(\mathbf{r}') e^{-ikR}}{R} dV'$$

2) Aproximar a **orden cero en amplitud** y a **orden uno en la fase**: $kR \approx kr - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r}'$

$$\mathbf{A}(\mathbf{r}, t) = \frac{\mu_0 e^{i\omega t}}{4\pi} \int_V \frac{\mathbf{J}_s(\mathbf{r}') e^{-ikR}}{R} dV' \approx \frac{\mu_0 e^{i(\omega t - kr)}}{4\pi r} \int_V \mathbf{J}_s(\mathbf{r}') e^{-i\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}'} dV'$$

3) Calcular el campo eléctrico de radiación a partir de la componente transversal del potencial vectorial \mathbf{A} : $\mathbf{E}_{rad}(\mathbf{r}, t) = i\omega \mathbf{A}_T(\mathbf{r}, t)$

4) Calcular el campo magnético a partir de la relación con \mathbf{E} :

$$\mathbf{H}_{rad}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{r} \times \mathbf{E}_{rad}(\mathbf{r}, t) / \eta_0$$

Si hay corrientes magnéticas equivalentes:

1) Considerar soluciones armónicas: $\mathbf{M}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{M}_s(\mathbf{r}) e^{i\omega t}$

$$\mathbf{F}(\mathbf{r}, t) = \frac{\varepsilon_0}{4\pi} \int_V \frac{\mathbf{M}(\mathbf{r}', t')}{R} dV' = \frac{\varepsilon_0}{4\pi} \int_V \frac{\mathbf{M}_s(\mathbf{r}') e^{i(\omega t - kR)}}{R} dV' = \frac{\varepsilon_0 e^{i\omega t}}{4\pi} \int_V \frac{\mathbf{M}_s(\mathbf{r}') e^{-ikR}}{R} dV'$$

2) Aproximar a orden cero en amplitud y a orden uno en la fase: $kR \approx kr - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r}'$

$$\mathbf{F}(\mathbf{r}, t) = \frac{\varepsilon_0 e^{i\omega t}}{4\pi} \int_V \frac{\mathbf{M}_s(\mathbf{r}') e^{-ikR}}{R} dV' \approx \frac{\varepsilon_0 e^{i(\omega t - kr)}}{4\pi r} \int_V \mathbf{M}_s(\mathbf{r}') e^{-i\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}'} dV'$$

3) Calcular el campo magnético de radiación a partir de la componente transversal del potencial vectorial \mathbf{F}^4 : $\mathbf{H}_{rad}(\mathbf{r}, t) = i\omega \mathbf{F}_T(\mathbf{r}, t)$

4) Calcular el campo eléctrico a partir de la relación con \mathbf{H} :

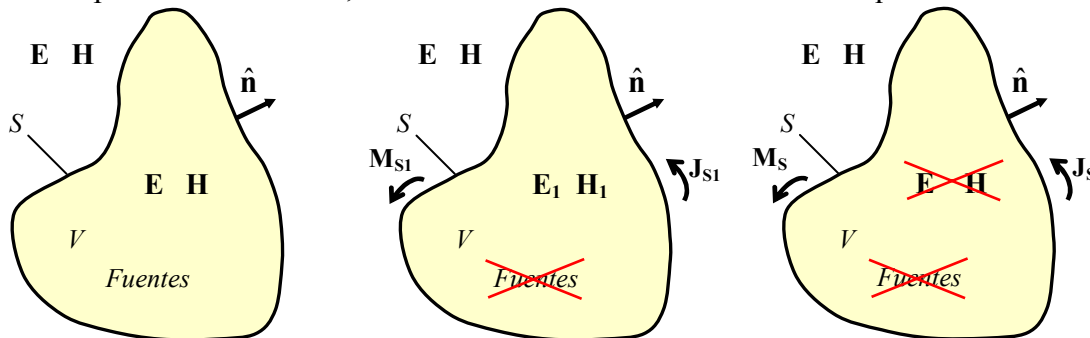
$$\mathbf{E}_{rad}(\mathbf{r}, t) = -\eta_0 \mathbf{r} \times \mathbf{H}_{rad}(\mathbf{r}, t)$$

⁴ Estas ecuaciones surgen por dualidad respecto al comportamiento del campo eléctrico.
 Juan C. Fernández - Departamento de Física – Facultad de Ingeniería
 Universidad de Buenos Aires – www.fi.uba.ar

Si hay ambos tipos de corriente se superponen los campos correspondientes.

El uso de corrientes equivalentes en los problemas de radiación surge del llamado **principio de equivalencia**, que se ilustra en los siguientes gráficos.

En el gráfico de la izquierda se muestra el problema original: un conjunto de fuentes dentro de un recinto de volumen V y superficie frontera S crea campos \mathbf{E} y \mathbf{H} en todo el espacio. El problema, como siempre, es calcular los campos fuera del recinto V . En este caso los campos se calculan a partir de las fuentes, como en el caso de las antenas lineales que hemos visto.



En el gráfico del centro tenemos un sistema equivalente. Se eliminan las fuentes internas a V , lo que modifica los campos internos y para satisfacer las condiciones de contorno de los campos sobre la superficie del recinto, se introducen hipotéticas corrientes equivalentes tales que:

$$\begin{aligned} \mathbf{J}_{S1} &= \hat{\mathbf{n}} \times (\mathbf{H} - \mathbf{H}_1) && \text{sobre } S \\ \mathbf{M}_{S1} &= -\hat{\mathbf{n}} \times (\mathbf{E} - \mathbf{E}_1) && \text{sobre } S \end{aligned}$$

La corriente \mathbf{J}_{S1} es una corriente superficial eléctrica, mientras que \mathbf{M}_{S1} es una **corriente superficial magnética**, un ente hipotético que sólo sirve para ajustar las condiciones de borde sin un significado físico real.

Dado que estas corrientes son inventadas, podemos elegir las, **al único fin de calcular los campos fuera de V** , de manera de anular los campos internos, y entonces estamos en el problema equivalente de la derecha, donde se cumple que:

$$\begin{aligned} \mathbf{J}_S &= \hat{\mathbf{n}} \times \mathbf{H}_S && \text{sobre } S \\ \mathbf{M}_S &= -\hat{\mathbf{n}} \times \mathbf{E}_S && \text{sobre } S \end{aligned}$$

Dado que los campos se anulan dentro de V , podemos introducir cualquier tipo de material. En particular, si asumimos que S es un **conductor eléctrico perfecto** ($\sigma \rightarrow \infty$), \mathbf{J}_S se anulará, y se deberá modificar la corriente magnética \mathbf{M}_S para que genere por sí sola los campos externos. Si, por otra parte, asumimos que S es un **conductor magnético perfecto** ($\mu \rightarrow \infty$), \mathbf{M}_S se anulará, y se deberá modificar la corriente eléctrica \mathbf{J}_S para que genere por sí sola los campos externos.

Se plantean entonces dos modelos equivalentes más que pueden usarse, aunque son generalmente de más difícil solución que el problema mezclado, dado que si S contiene partes de conductores verdaderos, sobre esas partes existe sólo \mathbf{J}_S (que coinciden con las corrientes verdaderas), mientras que en aberturas existirán ambas \mathbf{J}_S y \mathbf{M}_S simultáneamente.

Existe también la posibilidad de definir superficies de conductor eléctrico o magnético perfecto dentro del recinto donde no se requiere obtener los campos, lo que lleva a simplificar el cálculo introduciendo corrientes equivalentes imagen. Esto conduce a tener solamente corrientes eléctricas equivalentes o corrientes magnéticas equivalentes. Por otra parte, si suponemos que existen corrientes de ambos tipos sobre la abertura, de las ecuaciones del rotor, sobre la abertura:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \Rightarrow \mathbf{J}_S = \hat{\mathbf{n}} \times \mathbf{H}_a \quad \nabla \times \mathbf{E} = -\mathbf{M} \Rightarrow \mathbf{M}_S = \mathbf{E}_a \times \hat{\mathbf{n}}$$

donde \mathbf{E}_a y \mathbf{H}_a son los campos en la superficie de la abertura. Entonces, las ecuaciones de cálculo de los campos de radiación son:

$$\mathbf{E}_{rad_1}(\mathbf{r}, t) \approx \frac{i\omega\mu_0}{4\pi r} e^{i(\omega t - kr)} \int_S \mathbf{J}_s(\mathbf{r}') e^{-i\mathbf{k}\cdot\mathbf{r}'} dS' = \frac{i\omega\mu_0}{4\pi r} e^{i(\omega t - kr)} \hat{\mathbf{n}} \times \int_S \mathbf{H}_a(\mathbf{r}') e^{-i\mathbf{k}\cdot\mathbf{r}'} dS'$$

$$\mathbf{H}_{rad_1}(\mathbf{r}, t) \approx \frac{i\omega\epsilon_0}{4\pi r} e^{i(\omega t - kr)} \int_S \mathbf{M}_s(\mathbf{r}') e^{-i\mathbf{k}\cdot\mathbf{r}'} dS' = -\frac{i\omega\epsilon_0}{4\pi r} e^{i(\omega t - kr)} \hat{\mathbf{n}} \times \int_S \mathbf{E}_a(\mathbf{r}') e^{-i\mathbf{k}\cdot\mathbf{r}'} dS'$$

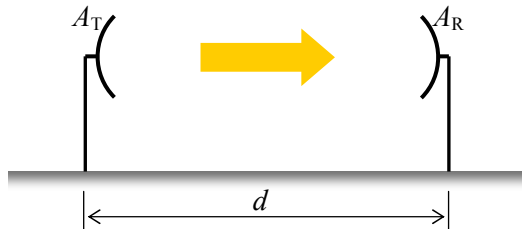
Los campos totales de radiación resultan así:

$$\mathbf{E}_{rad}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{E}_{rad_1}(\mathbf{r}, t) - \eta_0 \hat{\mathbf{r}} \times \mathbf{H}_{rad_1}(\mathbf{r}, t) \quad \mathbf{H}_{rad}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{H}_{rad_1}(\mathbf{r}, t) + \hat{\mathbf{r}} \times \mathbf{E}_{rad_1}(\mathbf{r}, t) / \eta_0$$

Las integrales se extienden a la superficie de la abertura, y de nuevo observamos que el campo de radiación lejano es la transformada de Fourier del campo sobre la superficie de la ranura (difracción de Fraunhofer). Estas ecuaciones ligan el tratamiento que usa las corrientes equivalentes con el tratamiento de Huygens-Kirchhoff.

Radio propagación

En comunicaciones inalámbricas el problema básico es definir las pérdidas del **enlace** entre una estación transmisora y una estación receptora. Otros problemas se derivan de estos cálculos. El caso más simple es la propagación directa en el vacío entre una antena emisora de potencia radiada P_T y abertura efectiva A_T . La antena receptora tiene a su vez una abertura efectiva A_R . La densidad de potencia por unidad de área (vector medio de Poynting) es:



La densidad de potencia por unidad de área (vector medio de Poynting) es:

$$\langle N \rangle = \frac{P_T}{4\pi r^2} D = \frac{P_T}{4\pi r^2} \frac{4\pi}{\lambda^2} A_T = \frac{P_T A_T}{\lambda^2 r^2}$$

La potencia que recibe la antena receptora es:

$$P_R = \langle N \rangle A_R = \frac{P_T A_T A_R}{\lambda^2 d^2} \Rightarrow \frac{P_R}{P_T} = \frac{A_T A_R}{\lambda^2 d^2} \quad \text{que es la **fórmula de Friis**.$$

La fórmula de Friis describe la transmisión de potencia entre una estación transmisora y una receptora en un enlace directo (enlace **LOS** – Line Of Sight link). Se observa que la relación de potencias es inversamente proporcional al cuadrado de la longitud de onda de la radiación (o directamente proporcional al cuadrado de la frecuencia), lo que surge de la dependencia de la abertura de antena con la longitud de onda. También esta relación de potencias es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre estaciones del enlace.

Para antenas isotrópicas $A_e = \lambda^2 / 4\pi \Rightarrow \frac{P_R}{P_T} = \frac{\lambda^2}{16\pi^2 d^2} = \frac{c^2}{16\pi^2 f^2 d^2}$

La fórmula de Friis también se puede escribir en dB:

$$-20 \log\left(\frac{P_R}{P_T}\right) = -20 \log\left(\frac{c^2}{16\pi^2}\right) + 40 \log(f) + 40 \log(d) \approx -295.116 + 40 \log(f d)$$

con f en Hz y d en m .

La fórmula de Friis describe la situación ideal de propagación directa en el vacío. Sin embargo, la propagación por un medio (p.ej., el aire) produce pérdidas de absorción que dependen de la frecuencia, y refracción de la radiación debido a que el índice de refracción varía ligeramente con la altura por la variación de densidad del aire con la altura.

Además, existen fenómenos de interferencia que se dan por la reflexión de las ondas en el suelo, que, en primera aproximación, puede considerarse de alta conductividad. Hay interferencia por reflexión en edificios, construcciones o accidentes naturales. Estas interferencias dan lugar al fenómeno de **desvanecimiento** (fading). La reflexión (oblicua) de las ondas en el suelo cau-

sa interferencia con el haz directo de LOS y modifica la polarización del haz reflejado, lo que puede generar dificultades para sistemas (como el radar) donde la información de polarización es importante. También hay absorción en edificios, follaje, y para frecuencias de microondas, en el vapor de agua, lluvia o nieve presente en la atmósfera.

Otros efectos de modificación de la simple fórmula de Friis surgen de la difracción en obstáculos cercanos a la LOS. De acuerdo a la distancia del obstáculo a la antena receptora se debe analizar la difracción de Fresnel (habitual para la mayoría de los enlaces comunes) o la difracción de Fraunhofer (en los casos de comunicaciones intercontinentales con rebotes ionosféricos). En muchos casos es posible aproximar los efectos de la difracción de Fresnel con la difracción por un borde que vimos en el Capítulo 6.

Los radioaficionados y los equipos técnicos de las emisoras comerciales deben manejar instante a instante la información atmosférica y climática para mantener los enlaces activos. Esto se hace normalmente en forma semi-automática a partir de programas computacionales que reciben los datos de organismos estatales o internacionales y modifican las características del enlace de acuerdo a esas variaciones.

Siguen algunos enlaces a direcciones de la Web con información sobre radio propagación:

- <http://www.rnw.nl/realradio/links/html/propagation.html> - Radio Netherlands Wereldomroep. Enlaces a sitios vinculados con propagación.
- <http://www.keele.ac.uk/depts/por/psc.htm> - Propagation Studies Committee of the Radio Society of Great Britain - Tutoriales, enlaces, e información general.
- <http://www.sel.noaa.gov/radio> - Space Environment Center's Radio User's Page. Del Servicio NOAA (National Oceanic & Atmospheric Administration) de EEUU.
- <http://dx.qsl.net/propagation> - Indices de actividad solar, flujo de rayos X, actividad auroral, etc.
- <http://www.ips.gov.au> - IPS. Servicio australiano de radio propagación y medio ambiente espacial. Datos y tutoriales.
- <http://www.tapr.org/tapr/html/ve3jf.dcc97/ve3jf.dcc97.html> - VHF/UHF/Microwave Radio Propagation: A primer for digital experimenters. Una introducción a los problemas mencionados en esta sección.
- <http://www.scnt01426.pwp.blueyonder.co.uk/Articles/Propagation/Propagation.htm> - Otra serie de páginas con información introductoria a la radio propagación.

Compatibilidad electromagnética

La diversidad de instalaciones que usan campos y señales electromagnéticas en nuestra sociedad ha causado la necesidad de investigar las posibles interacciones de estos campos para asegurar que los dispositivos funcionen según su diseño, lo que lleva a la incorporación de medidas que disminuyan las radiaciones y efectos no deseados creados por dispositivos e instalaciones que hacen uso de campos electromagnéticos y el uso de medidas de protección de dispositivos frente a la acción de campos foráneos.

El campo de la Compatibilidad Electromagnética (**EMC**) ha surgido como el área de la ingeniería eléctrica de crecimiento más explosivo en los últimos años, fundamentalmente ligado al crecimiento de las comunicaciones y la computación.

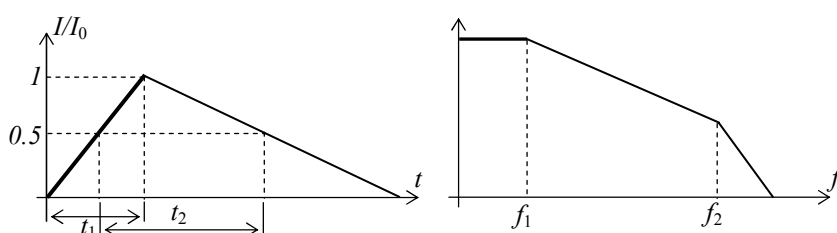
El concepto central en estos estudios es el de **interferencia**, que aquí puede definirse como todo agente electromagnético que cause el mal funcionamiento de un dispositivo, equipo o instalación. Un dispositivo, equipo o instalación que, colocado en un medio ambiente donde existan campos electromagnéticos foráneos, es víctima de interferencia, tiene **susceptibilidad electromagnética**. Modificando el nivel de los campos en el medio ambiente se encontrará habitualmente que por debajo de un umbral cesa la interferencia. Esto permite definir el **nivel de susceptibilidad electromagnética** del dispositivo, equipo o instalación en cuestión. Recientemente hay una tendencia a cambiar el término de susceptibilidad por el de **inmunidad electromagnética**, que indica exactamente lo contrario: la habilidad de un dispositivo, equipo o instalación para soportar la acción de un ambiente electromagnéticamente activo. El nivel de inmunidad se define exactamente como en el caso previo.

La habilidad de dos dispositivos, equipos o instalaciones para trabajar conjuntamente en proximidad se conoce como **compatibilidad electromagnética**. Esto requiere que los campos creados por uno de los sistemas estén por debajo del nivel de inmunidad del otro.

Fuentes de interferencia

Además de los artefactos de creación humana, hay fuentes naturales de interferencia, como:

- **ruido térmico**. Se produce por las fluctuaciones estadísticas del movimiento electrónico en los conductores debido a la temperatura. De acuerdo a la teoría cuántica, a cualquier temperatura por encima de $0K$ los electrones de un conductor se hallan en movimiento al azar. Al circular una corriente, este movimiento aleatorio se superpone al movimiento ordenado producido por las fuentes de fem. Estas fluctuaciones, de muy baja intensidad, puede crear efectos de ruido en señales de baja intensidad y producir fallas de funcionamiento en circuitos muy sensibles. En particular, se puede definir una tensión eficaz de ruido térmico sobre una resistencia de valor R : $V_N = \sqrt{4kT \Delta f R}$ donde Δf es el ancho de banda de interés (el ruido térmico es “blanco”, es decir, de igual intensidad en todo el espectro de frecuencias), $k = 1.38 \times 10^{-23} J/K$ es la constante de Boltzmann y T la temperatura absoluta en Kelvins. Para dar una idea de la importancia relativa del ruido térmico, calculamos la tensión equivalente de ruido en una resistencia de $10K\Omega$ a $300K$ ($\sim 27^\circ C$) en una banda de $1 KHz$ de ancho: $V_N \cong 0.4 \mu V$.
- **rayos y campos atmosféricos**. Las tormentas eléctricas (deberían llamarse electromagnéticas) crean descargas por ruptura dieléctrica del aire ante los campos eléctricos producidos



entre nubes y/o entre nubes y la tierra, dado que las nubes acumulan carga eléctrica estática. La corriente de un rayo típico es de 3 a 200

KA , el 80% de los casos medidos excede los 50 KA . En las figuras se esquematizan la forma de onda temporal y el espectro de frecuencias de un rayo. La forma de onda es cuasi-triangular, con un tiempo de subida de alrededor de $t_1 \cong 500 \text{ ns}$ y un tiempo entre medias de subida y caída de $t_2 \cong 20 \text{ } \mu\text{s}$. A $f_1 \cong 16 \text{ KHz}$ se produce una caída del espectro a una pendiente de 20 db/década y a $f_2 \cong 640 \text{ KHz}$ se cambia a una pendiente de 40 db/década . Estos valores indican un rico contenido armónico y un gran potencial de interferencia.

Las tormentas y actividad electromagnética atmosférica inducen cambios en las partes altas de la atmósfera, donde existen regiones de partículas cargadas por la radiación solar y la radiación cósmica. Estas regiones (tropósfera e ionósfera) actúan como guías de onda para radiaciones de RF y generan también campos electromagnéticos propios que varían a lo largo del año y de acuerdo a la situación geográfica.

- **ruido cósmico.** Los fenómenos extraterrestres, como las manchas solares, generan radiación cósmica en forma de partículas de alta energía que interactúan con los átomos y moléculas de la alta atmósfera. La presencia del campo magnético terrestre ejerce fuerzas sobre estas partículas modificando su trayectoria y “enfocándolas” hacia los polos, donde las interacciones producen las llamadas auroras. La mayor parte de la radiación cósmica proviene de la actividad solar, aunque hay fuentes de partículas elementales extrasolares y aún extragalácticas, pero su intensidad es muy baja. La actividad solar presenta ciclos de aproximadamente 11 años, donde se produce un máximo en la actividad de las manchas solares y aumenta la producción de partículas de alta energía, causando interferencias apreciables en sistemas de comunicaciones satelitales y aviónicos. El año 2001 fue un año de máxima actividad solar.

Dentro de las interferencias producidas por la actividad humana, debe señalarse que todos los equipos que usan campos electromagnéticos producen algún tipo de interferencia, pero su importancia varía con muchos factores ligados a la susceptibilidad (o inmunidad) de los equipos posibles víctimas de esa interferencia, fundamentalmente dependientes de la frecuencia e intensidad de los campos de interferencia.

Interferencia radiada o conducida

Suele clasificarse el origen de la interferencia como **radiada** o **conducida**. La interferencia radiada es la producida por los campos electromagnéticos (deseados o no) creado por el agente que interfiere. La interferencia conducida se produce por las señales eléctricas que viajan por conductores que conectan (a propósito o no) los dispositivos, equipos o instalaciones que se interfieren.

La **interferencia radiada** está asociada a campos creados por el agente que interfiere en su vecindad. Estos campos pueden ser, en nuestra nomenclatura, campos de inducción (cuasi-estáticos o cercanos) o verdaderos campos de radiación (que transporta potencia neta). Puede disminuirse la susceptibilidad de dispositivos, equipos o instalaciones a campos externos mediante técnicas de **apantallado** o **blindaje**. Estas técnicas son particularmente efectivas en el caso de los campos eléctricos, pero son poco eficaces para campos magnéticos de baja frecuencia, que podrían inducir corrientes y tensiones parásitas sobre el equipo susceptible.

La **interferencia conducida** se clasifica según el camino de las corrientes sean los **puertos de señal** o los **puertos de alimentación** de un circuito, y aún más de acuerdo si la interferencia es en **modo común** (entre los caminos de señal y tierra) o en **modo diferencial** (entre los propios caminos de señal). La interferencia conducida se puede disminuir utilizando distintos tipos de **filtros**, en el caso de la interferencia de modo común o mediante **acoples optoelectrónicos** que son inmunes a interferencias electromagnéticas.

De particular importancia es la interferencia inducida en cables y conectores del equipo por campos externos, y que luego es conducida por los mismos cables y conectores al equipo. Esta situación requiere un adecuado diseño de los cables para aumentar su inmunidad frente a seña-

les espurias y del uso de los conectores indicados para la aplicación. Muchas causas de interferencia conducida se deben a líneas bus o de tierra mal diseñadas, soldaduras imperfectas, inadecuados contactos o conectores y diafonía (cross-talk) entre caminos de señal dentro del mismo circuito.

Un caso de mucha importancia es el diseño de **plaquetas de circuito impreso** (Printed Circuit Board - **PCB**) donde el aumento progresivo de las frecuencias de señal ha llevado a que la distribución geométrica de las líneas y los caminos de señal y la colocación de los componentes adheridos a la plaqueta deban calcularse con mucho cuidado para evitar las interferencias conducidas, diafonía y emisión de radiación electromagnética que interfiera con otros circuitos. Técnicas de desacoplamiento entre distintas plaquetas y entre partes de la misma plaqueta son imprescindibles. De acuerdo a los criterios generales de diseño se deben tener en cuenta las siguientes características:

- elección adecuada del formato de la PCB (mono-, bi- o multicapa) y del material soporte
- cuidado de que cada camino de señal tenga su retorno cercano
- desacoplamiento adecuado de cada CI o grupos de Cis.
- no superar las longitudes de camino ni las áreas de lazos máximas de acuerdo a las frecuencias involucradas
- colocación adecuada de los conectores
- elección adecuada del tipo de cable y/o conector
- uso y ubicación apropiados de filtros

Para el diseño se debe considerar que además de la resistividad de los caminos conductores, debe tenerse en cuenta su autoinductancia y la capacidad e inductancia mutua con caminos cercanos para conocer cómo se comportarán frente a la señal. Habitualmente las trazas sobre la plaqueta deben considerarse más como líneas de transmisión (sistemas de parámetros distribuidos) que como conductores equipotenciales. Por otra parte, los caminos y los lazos generan radiación electromagnética que puede interferir otros equipos (y a otras partes de la misma plaqueta). De acuerdo a las normas internacionales (FCC, IEC CISPR) la emisión de una PCB debe limitarse a $100 \mu V/m$ a $10 m$ de distancia y por encima de $30 MHz$. Parte de esta emisión puede estimarse a partir de todas las posibles fuentes del circuito que forman lazos. Estos lazos se modelizan como antenas dipolares magnéticas y a partir de este análisis se determinan las máximas corrientes que pueden circular a la/s frecuencia/s de trabajo para no superar el límite de las normas. Análogamente, cada traza de la PCB que no constituya lazo puede modelizarse como una antena dipolar eléctrica, cuya radiación debe sumarse a las de los lazos para calcular las máximas corrientes. El efecto de los conectores, entre plaquetas o entre partes de la misma es aumentar las interferencias de modo común, por lo que debe minimizarse la longitud de los conductores ligados a los conectores y usar el adecuado tipo de cable y conductor para minimizar la diafonía o interferencia por inducción. En algunos casos es necesario separar la zona de conectores de la zona de manejo de señales en la plaqueta mediante planos o cintas de tierra que se conectan a la carcasa del equipo para proveer de un camino de retorno de las señales.

Un capítulo aparte es el tema del **blindaje** de los equipos. Los blindajes contra campos eléctricos realizados con materiales conductores son generalmente muy eficientes, aunque las juntas, aberturas de conexiones o de ventilación, las uniones y la deposición de suciedad o humedad disminuyen esta eficiencia. Hay actualmente mucho interés en el cálculo de la radiación electromagnética producida por equipos y que sale por juntas, agujeros y conectores, de manera que se han desarrollado métodos numéricos para esta simulación.

Otro aspecto de gran importancia es el diseño adecuado de las **instalaciones eléctricas** de alimentación de los equipos y el estudio del ambiente en que van a operar. Esto lleva a analizar las **tomas de tierra** (que supuestamente es común a todos los equipos interconectados), las interferencias que se producen dentro del edificio en que se hará la instalación (ascensores,

motores de bombeo, etc.) y habitualmente requiere el uso de filtros de línea o UPS para que no haya alteración del funcionamiento.

Existen capítulos dedicados a la **arquitectura** de sitios para minimizar los efectos de las interferencias y se garantice la EMC de los equipos a operar, el diseño de vehículos de transporte (los motores a explosión de ciclo naftero requieren una chispa eléctrica que genera mucha radiación e interferencias). En el caso de la **aviónica** el análisis de la ECM y la inmunidad a interferencia de los equipos de vuelo, control y comunicaciones es esencial. También es esencial el análisis de posibles interferencias en equipamiento de uso médico y el control de las emisiones, posiblemente dañinas a la salud, de muchos de estos equipos.

Otros aspectos se hallan en el uso de equipos que generan campos electromagnéticos en ambientes peligrosos como aquéllos donde existen instalaciones de gas, combustible, explosivos u otros donde puedan producirse explosiones, deflagraciones u otras reacciones químicas de potencial peligro.

Finalmente, los artefactos de iluminación (luminarias y equipos de control y comando) es otra área de interés en la medición y mitigación de las interferencias.

Normas

Existen diversas normas nacionales e internacionales que regulan las emisiones y la inmunidad de los equipos que usan campos electromagnéticos. Estas regulaciones son de mucha importancia en Europa y EEUU, de modo que los equipos que allí se fabrican o que se pretende comercializar deben cumplir estas normas. No existe una única norma internacional, pero las normas de la FCC (Federal Communications Commission) en EEUU y las Directivas de la CEE (89/336, 72/245 y 75/322 y otras) parecen funcionar de hecho como normas a nivel mundial. Organizaciones internacionales como ISO e IEC se hallan desde hace años en proceso de compatibilización y búsqueda de acuerdos para lograr normas más abarcativas y genéricas, que además sean lo suficientemente flexibles para cubrir tecnologías que van apareciendo a una velocidad incompatible con el análisis de su impacto y posterior normatización. El caso típico es el de la telefonía celular, donde prácticamente hasta hace un par de años no existían normas de frecuencias, máxima emisión de radiaciones (salvo las genéricas de todos los equipos), ancho de banda, etc., compartidas, ya que, de hecho, eran las compañías las que imponían sus estándares de facto. Un caso similar ocurrió con las PC en la década anterior.

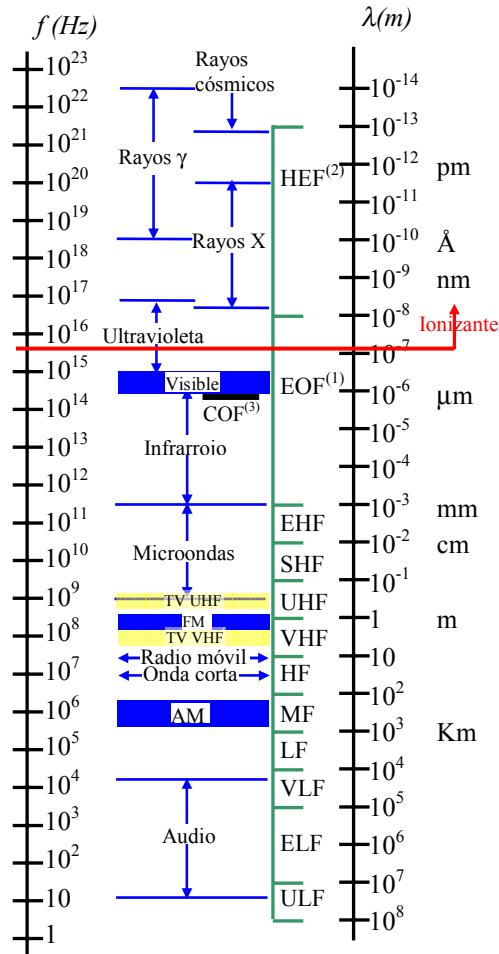
Desde el punto de vista de la seguridad en el uso de los artefactos eléctricos, está en vigencia la LVD (Low Voltage Directive) que, aunque no regula sobre cuestiones de EMC e interferencia, tiene que ver con la seguridad de los usuarios de los equipos eléctricos, electrodomésticos y otros.

Siguen algunos enlaces a direcciones de la Web con información sobre compatibilidad electromagnética:

- <http://www.emclab.umn.edu> - Laboratorio de Compatibilidad Electromagnética. Univ. de Missouri-Rolla. Programas de investigación y desarrollo, documentos, enlaces y herramientas.
- <http://www.esda.org/index.htm> - ESD Association. Organización dedicada a la difusión de normas y trabajo profesional sobre descarga electrostática.
- <http://www.fda.gov/cdrh/emc> - Center for Devices and Radiological Health, de la FDA (Food and Drug Administration) de los EEUU. Se encarga de analizar problemas de compatibilidad electromagnética de equipos médicos.
- http://europa.eu.int/comm/enterprise/electr_equipment/emc/index.htm - La directiva europea 89/336/EEC.
- <http://www.dti.gov.uk/strd/strdpubs.htm> - Sitio del Department of Trade & Industry del Reino Unido. Se trata de un directorio de standards y regulaciones técnicas, entre ellas algunas referentes a EMC.
- <http://www.safetylink.com> - The Safety Link. Inmensa cantidad de enlaces a temas de seguridad y EMC.

Efectos biológicos de los campos electromagnéticos

El espectro electromagnético



- 1) EOF - Rango de frecuencia electroóptica
- 2) HEF - Rango de frecuencia de alta energía
- 3) COF - Comunicaciones por fibra óptica

Clasificación de bandas de la ITU

Banda	Abreviatura	Rango de frecuencia
Frecuencia extra alta	EHF	30 - 300 GHz
Frecuencia super alta	SHF	3 - 30 GHz
Frecuencia ultra alta	UHF	300 - 3000 MHz
Frecuencia muy alta	VHF	30 - 300 MHz
Frecuencia alta	HF	3 - 30 MHz
Frecuencia media	MF	300 - 3000 kHz
Frecuencia baja	LF	30 - 300 kHz
Frecuencia muy baja	VLF	3 - 30 kHz
Frecuencia de voz	VF	300 - 3000 Hz
Frecuencia extrema-mente baja	ELF	30 - 300 Hz

En la normativa internacional el espectro asociado a ondas sub-ópticas se extiende convencionalmente desde 30 Hz a 300 GHz. La International Telecommunications Union (ITU) ha dividido el espectro en bandas como se muestra en la tabla.

Nótese que las frecuencias por debajo de 30 Hz no se consideran aptas para las comunicaciones, aunque hay muchos efectos naturales (p.ej., el campo magnético terrestre, campos electromagnéticos atmosféricos y subterráneos) y artificiales (p.ej., imanes permanentes, transporte) que producen campos estáticos o de frecuencias por debajo de este valor.

cuencias por debajo de este valor.

Radiación ionizante y no ionizante

La naturaleza de la interacción entre campos electromagnéticos y el material biológico depende de la frecuencia de la emisión, así que los diferentes tipos de emisiones electromagnéticas deben ser evaluados de forma individual.

Los rayos X, luz ultravioleta, luz visible, campos eléctricos y magnéticos generados por los sistemas de energía eléctrica (campos de frecuencia industrial) y campos magnéticos estáticos son todas emisiones electromagnéticas diferentes, caracterizadas por su frecuencia o su longitud de onda.

La interacción del material biológico con una emisión electromagnética depende de la frecuencia de la emisión. A muy altas frecuencias, características del ultravioleta lejano y los rayos X, los fotones del campo tienen suficiente energía para romper los enlaces químicos. Esta ruptura de los enlaces es conocida como **ionización**, y a esa parte del espectro electromagnético se le denomina **radiación ionizante**. Los bien conocidos efectos biológicos de los rayos X están asociados con la ionización de las moléculas. A frecuencias más bajas, como las de la luz visible, radio y microondas, la energía de un fotón está muy por debajo de la que es necesaria para romper enlaces químicos. Esta parte del espectro se conoce como **radiación no ionizante**. Como la energía electromagnética no ionizante no puede romper los enlaces químicos, no existe analogía entre los efectos biológicos de la energía electromagnética ionizante y

no ionizante. La frontera entre ambos efectos se coloca convencionalmente en energías de $10eV$ (la energía de enlace químico de muchas moléculas biológicas es de este orden). Como $E = hf$ la frecuencia y longitud de onda en el vacío límites son del orden de:

$$f = \frac{E}{h} = \frac{1.602 \times 10^{-18}}{6.63 \times 10^{-34}} \text{ Hz} \approx 2.42 \times 10^{15} \text{ Hz} \Rightarrow \lambda = \frac{c}{f} \approx 0.124 \mu\text{m}$$

Esta frontera convencional cae en el ultravioleta lejano.

Las emisiones de energía electromagnética no ionizante pueden producir efectos biológicos. Muchos de los efectos biológicos del ultravioleta cercano, luz visible e infrarrojos dependen también de la energía del fotón, pero están relacionados con la excitación electrónica más que con la ionización, y no se producen a frecuencias inferiores al infrarrojo (por debajo de 3×10^{11} Hz). Las radiofrecuencias y microondas pueden causar efectos en los tejidos, por la producción de calor. La eficiencia con la que una emisión electromagnética puede inducir corrientes eléctricas, y por tanto generar calor, depende de la frecuencia de la emisión y del tamaño y la orientación del objeto que está siendo calentado. A frecuencias inferiores a las utilizadas por la radio en AM (alrededor de 10^6 Hz) las emisiones electromagnéticas se acoplan débilmente con los cuerpos humanos y de animales y, por lo tanto, son muy ineficientes para inducir corrientes eléctricas y generar calor.

De este modo, en términos de posibles efectos biológicos, el espectro electromagnético se puede dividir en dos regiones:

1. La **región ionizante**, donde puede haber un **daño químico directo (rayos X, ultravioleta lejano)**.
2. La **región no ionizante**, que puede subdividirse en:
 - a. La región de la **radiación óptica**, donde pueden darse fenómenos ligados a la excitación electrónica (**ultravioleta cercano, luz visible, infrarrojo**).
 - b. La región donde **la longitud de onda es más pequeña o de tamaño similar al del cuerpo**, en la que se puede producir calentamiento a través de corrientes inducidas (**microondas y ondas de radio de alta frecuencia**).
 - c. La región donde **la longitud de onda es mucho mayor que el tamaño del cuerpo**, y el calentamiento por corrientes inducidas es muy bajo (**ondas de radio de baja frecuencia, campos de frecuencia industrial y estáticos**).

Efectos sobre la salud humana

Organizaciones internacionales

El problema de evaluar los posibles efectos nocivos de los campos electromagnéticos (**EMF** - en la jerga) sobre la salud humana es muy difícil por la complejidad del sujeto biológico y las interacciones y por las consecuencias sociales, económicas y éticas que un diagnóstico equivocado o tendencioso pudieran tener sobre la sociedad industrial moderna, fuertemente dependiente de dispositivos e instalaciones eléctricas para su funcionamiento.

Por este motivo se han establecido a nivel internacional y nacional una serie de organismos cuyo objetivo es realizar esta evaluación. La **Organización Mundial de la Salud** (World Health Organization - **WHO**) es uno de estos organismos internacionales que tiene un programa llamado International Electromagnetic Fields (EMF) Project, establecido en 1996. Este programa se halla actualmente (octubre 2001) revisando resultados de investigación y realizando evaluaciones de riesgo de exposiciones a campos eléctricos y magnéticos estáticos y de frecuencias ultrabajas (ELF). Se planea realizar una evaluación de todos los efectos sobre la salud de la exposición a campos ELF en el bienio 2002-2003.

Debido a que uno de los efectos de los EMF sobre la salud más estudiados es su relación con la aparición y/o proliferación de distintos tipos de enfermedades cancerosas, la **International**

Agency for Research on Cancer (IARC), organismo dependiente de WHO ha concluido en 2001 el primer paso en el proceso de evaluación de riesgo clasificando los campos ELF de acuerdo a la fuerza de la evidencia existente de sus posibles efectos cancerígenos en humanos.

En 1974, la **International Radiation Protection Association (IRPA)** estableció un grupo de estudio sobre los efectos sanitarios y protección contra radiación no ionizante. En 1992 este grupo se convirtió en la organización no gubernamental **International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP)**, que es reconocida por la WHO, la Organización Internacional del Trabajo (International Labour Organization - **ILO**) y la Unión Europea como el organismo experto de consulta en temas de radiaciones no ionizantes. En 1998 ICNIRP produjo un documento titulado "**Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields (up to 300 Ghz)**"⁵ que se ha convertido en el documento base para múltiples legislaciones sobre máximos valores de exposición a campos electromagnéticos. Analizamos brevemente este documento más abajo.

Estas tres organizaciones (WHO, IARC e ICNIRP) han generado acuerdos de trabajo conjunto y un calendario de revisión formal de la literatura sobre EMF:

2001	Identificación y evaluación carcinogénica de campos estáticos y ELF (IARC)
2002	Evaluación de riesgo sanitario de campos estáticos y ELF (WHO/ICNIRP)
2003	Identificación y evaluación carcinogénica de campos de RF (IARC)
2004	Evaluación de riesgo sanitario de campos de RF (WHO/ICNIRP)

Se espera que los reportes de esta evaluación se publiquen para el año 2005.

Además de estos organismos a nivel internacional, hay organismos nacionales que realizan estudios y evaluaciones de riesgo propias. Se pueden mencionar por el nivel de trabajo a los organismos estadounidenses. En EEUU se creó en 1992 el **Electric and Magnetic Fields Research and Public Information Dissemination Program (EMF-RAPID Program)** y el Congreso instruyó al **National Institute of Environmental Health Sciences (NIEHS)**, National Institutes of Health y el Departamento de Energía a dirigir un programa de investigación y análisis con el objetivo de proveer evidencia científica para aclarar los potenciales riesgos sanitarios de la exposición a campos ELF. Este programa concluyó el 31 de diciembre de 1998 y las conclusiones se publicaron en mayo de 1999.

Más abajo presentamos las conclusiones del Reporte Final del NIEHS.

Metodología de la investigación y evaluación de riesgos

Es enorme la cantidad de trabajos de investigación, reportes, informes, estudios y demás literatura que se publica anualmente sobre los efectos sanitarios de los EMF. La calidad y relevancia de estos trabajos también es muy variada. Aunque la variedad de temas y enfoques utilizadas es muy grande, podemos clasificar los estudios en las siguientes categorías:

- Estudios epidemiológicos.
- Estudios de laboratorio.
- Estudios sobre humanos.
- Estudios sobre animales.
- Estudios de los mecanismos biológicos.
- Revisiones y evaluación de la literatura existente.

⁵ Publicado en Health Physics, Vol.74, No.4, pp. 494-522, Abril 1998. **ICNIRP1998.PDF**
 Juan C. Fernández - Departamento de Física – Facultad de Ingeniería
 Universidad de Buenos Aires – www.fi.uba.ar

Estudios epidemiológicos

Este tipo de estudios es muy antiguo en la medicina. Trata de establecer correlaciones estadísticas entre una enfermedad y sus posibles factores causales. El problema fundamental es que habitualmente es imposible o muy difícil separar los efectos de las diversas (posibles) causas o **agentes** dado que ocurren simultáneamente y es también posible que lo importante sea la concurrencia de distintos agentes que, aisladamente, serían inocuos. Una vez establecida la relación estadística el problema consiste en descubrir si esta relación indica una relación causal. Para ello se requieren otros estudios no epidemiológicos. Podemos resumir en forma muy incompleta un estudio epidemiológico en la siguiente tabla:

Proceso	Ejemplo
1. Se reúne un grupo de personas que tienen una determinada enfermedad. Estos son los casos . Se reúne otro grupo similar (edad, sexo, etc.) que no tiene la enfermedad. Estos son los controles .	1. Supongamos un conjunto de 300 casos de la enfermedad y 300 controles. Se desea evaluar un potencial factor de riesgo X.
2. Se estima el número de casos y de controles que fueron expuestos al agente X. Habitualmente esta es la parte más complicada del estudio porque la exposición pudo haber ocurrido muchos años atrás.	2. Si 71 de los 300 casos fueron expuestos a X (229 no) la tasa de exposición de casos será $t_1 = 71/229 = 0.31$. Si también 71 controles fueron expuestos, la tasa de exposición de control será $t_2 = 0.31$.
3. El cociente entre estas dos cifras da el riesgo relativo . Si el riesgo relativo es del orden de 1 no hay asociación. Si el riesgo relativo es mayor que 1 hay una asociación positiva y X puede ser causa de la enfermedad. Si el riesgo relativo es menor que 1 hay una asociación negativa y X puede proteger de la enfermedad.	3. En este caso $t_1/t_2 = 1$. Este valor indica que no hay asociación entre X y la enfermedad. Si el riesgo es mayor que 1, eso indica que X ha incidido más sobre los casos que sobre los controles.

Se debe analizar también el **significado estadístico** del estudio, que está relacionada con el porcentaje de casos y controles expuestos respecto del total. Si los cálculos involucran un gran número de sujetos, el estudio es significativo y merece que se evalúe con más pruebas la incidencia de X sobre la enfermedad. Si el número de expuestos es bajo, el riesgo relativo no es significativo y puede indicar una mera coincidencia.

Criterios de Hill

Para determinar si un agente ambiental, por ejemplo, un campo electromagnético, produce o contribuye al desarrollo de una enfermedad, hay ciertos criterios ampliamente aceptados a menudo denominados **criterios de Hill**, que se emplean para evaluar los estudios epidemiológicos y de laboratorio sobre posibles agentes. Bajo estos criterios se examina la fuerza, consistencia y especificidad de la asociación entre exposición e incidencia de la enfermedad, la evidencia de una relación dosis-respuesta, evidencia de laboratorio, la plausibilidad biológica de una asociación y la coherencia de la asociación propuesta con lo que se conoce sobre el agente y sobre la enfermedad.

1. **Fuerza de la asociación**: si existe un claro incremento de la incidencia de la enfermedad asociado con la exposición. Una asociación fuerte es aquella con un riesgo relativo de 5 o superior. Fumar tabaco, por ejemplo, tiene un riesgo relativo de cáncer de pulmón 10 - 30 veces superior que no fumar.
2. **Consistencia**: si la mayoría de los estudios muestran el mismo incremento de la incidencia del mismo tipo de enfermedad. Utilizando el ejemplo del fumador, básicamente todos los estudios sobre fumar y cáncer han mostrado un incremento de la incidencia del cáncer de pulmón y de cabeza y cuello.

3. **Relación dosis-respuesta:** si aumenta la incidencia de la enfermedad cuando aumenta la exposición. De nuevo, cuanto más fuma una persona mayor es el incremento de la incidencia de cáncer de pulmón.
4. **Evidencia de laboratorio:** si existe evidencia experimental que sugiera que la enfermedad está asociado con la exposición. Las asociaciones epidemiológicas se refuerzan cuando hay evidencia de laboratorio que apoye tal asociación.
5. **Mecanismos biológicos plausibles:** si hay algún dato biológico o mecanismos biofísicos que sugieran que debe existir una asociación entre el agente y la enfermedad. Cuando se entiende cómo algo causa una enfermedad es mucho más fácil interpretar la epidemiología ambigua. En el caso de fumar, mientras que las pruebas directas de laboratorio relacionando fumar y cáncer eran débiles en el momento en el que se publicaba el informe del Cirujano General (Surgeon General), la asociación era altamente plausible porque había conocidos agentes causantes de cáncer en el humo del tabaco.
6. **Coherencia:** si la asociación entre exposición a un agente y la enfermedad es consistente con lo que se sabe sobre la biofísica del agente y la biología de la enfermedad.

Estos criterios deben aplicarse con precaución:

- Es necesario analizar toda la literatura publicada al respecto; no es aceptable elegir sólo aquellos informes que concluyen la existencia (o la inexistencia) de un riesgo para la salud.
- Es necesario revisar directamente los documentos originales importantes; no es aceptable basar los juicios únicamente en revisiones académicas o legislativas.
- Cumplir un criterio individual no es una cuestión de un sí o un no; el respaldo para un criterio puede ser fuerte, moderado, débil o inexistente.
- Los criterios deben contemplarse como un conjunto; ningún criterio individual es ni necesario ni suficiente para concluir que existe una relación causal entre exposición a un agente y una enfermedad.

Estudios de laboratorio

Limitaciones importantes de los estudios epidemiológicos son que no es posible separar la acción del agente bajo investigación de otros potenciales agentes, que los sujetos puede manifestar predisposiciones o debilidades naturales desconocidas, que las circunstancias de la exposición (ambientales, meteorológicas, psicológicas, etc.) pueden ser desconocidas por haber ocurrido en el pasado, etc. Por este motivo los estudios de laboratorio, donde se trabaja en un ambiente controlado y a menudo simplificado, pueden dar información más concluyente sobre la asociación de posibles agentes y enfermedades.

En laboratorio se puede colocar un tejido u órgano bajo la influencia de campos de valor, frecuencia y variación en el tiempo controlados y repetir el experimento muchas veces para hallar comportamientos repetitivos.

En relación con campos electromagnéticos, una de la asociaciones posibles más estudiada ha sido (y es) la asociación con diversos tipos de cáncer. En este contexto es importante señalar las diferencias entre agentes genotóxicos y epigenéticos.

Por ejemplo, los **carcinógenos**, agentes que producen cáncer, pueden ser genotóxicos o epigenéticos (en la terminología antigua eran iniciadores y promotores). Los agentes **genotóxicos** (genotoxinas) pueden dañar directamente el material genético de las células. Las genotoxinas a menudo afectan a muchos tipos de células, y pueden provocar más de un tipo de cáncer. Las genotoxinas generalmente no tienen un valor umbral para sus efectos; así que al disminuir la dosis de la genotoxina se reduce el riesgo, pero puede que nunca desaparezca. Por lo tanto, la evidencia de genotoxicidad a cualquier intensidad de campo sería relevante para evaluar su potencial carcinogénico.

Por otra parte, un agente **epigenético** es algo que incrementa la probabilidad de que una genotoxina dañe el material genético de las células o de que provoque cáncer. Los **promotores** son un tipo particular de agente epigenético que incrementa el riesgo de cáncer en animales ya expuestos a un carcinógeno genotóxico. Los agentes epigenéticos (incluyendo promotores) pueden afectar sólo a ciertos tipos de cáncer. Los agentes epigenéticos generalmente tienen valores umbral para producir efectos; así que al disminuir la dosis de un agente epigenético se alcanza un nivel en el que no hay riesgo. Por lo tanto, la evidencia de actividad epigenética a intensidades de campo muy por encima de las que se encuentran en ambientes residenciales y laborales no sería claramente relevante para evaluar su potencial carcinogénico.

Los estudios de laboratorio no dan necesariamente información de los efectos de determinado posible agente sobre la salud, sino que permiten inferir los mecanismos de interacción entre el agente y el sujeto biológico, los que a su vez permiten evaluar el potencial riesgo que involucra el agente.

Estudios sobre humanos y animales

Los estudios sobre humanos y animales permiten analizar efectos que no surgen de los estudios epidemiológicos ni de laboratorio. En el caso de los humanos están limitados por la necesidad de evitar daños al sujeto. Un caso típico fueron los estudios de influencia de los campos electromagnéticos sobre la melatonina, que describimos más abajo. Los estudios sobre animales pueden ser más agresivos pero su utilidad está limitada por las diferencias biológicas entre especies. Nuevamente, se realizaron muchos estudios sobre ratas para analizar el efecto sobre la melatonina y efectos hormonales.

Como en los estudios de laboratorio, estos estudios permiten inferir mecanismos de interacción entre el agente y el sujeto.

Estudios de los mecanismos biológicos

En última instancia, si se conociera en detalle la forma de interacción del agente con el sujeto biológico, sería posible determinar con gran seguridad si el agente es dañino o no. Pero la elucidación de estos mecanismos biológicos está lejos de ser completa. Por ello, los estudios básicos en biología y en las interacciones son de fundamental importancia en la evaluación de riesgo, la prevención y, eventualmente, la terapia.

Además de los posibles efectos carcinógenos de los campos, es sabido que las radiaciones, en general, producen efectos ionizantes (que pueden ser carcinógenos) y efectos no ionizantes. En la gran mayoría de las situaciones prácticas los EMF son de frecuencias dentro del rango de las radiaciones no ionizantes. Sin embargo, como se observa fácilmente en un horno a microondas, pueden producir otros efectos notablemente dañinos, que deben evaluarse.

En general, estos efectos se pueden dividir en **efectos térmicos** y **efectos no térmicos**. Como señalamos en la introducción, a frecuencias de RF y microondas (el extremo alto del espectro electromagnético industrial) se producen corrientes inducidas (corrientes de Foucault) que pueden producir daño por calentamiento, alterando los procesos bioquímicos fundamentales de las células. En el caso extremo, este calentamiento puede matar células. Si mueren suficientes células se pueden producir quemaduras y, posiblemente, otros daños permanentes en los tejidos. Las células que no mueren por el calor vuelven gradualmente a su estado normal cuando cesa el calentamiento; no se conocen daños no letales permanentes en las células. En un animal, pueden esperarse alteraciones en los tejidos y otros efectos inducidos térmicamente cuando la cantidad de energía absorbida es similar, o excede, a la cantidad de calor generada por los procesos corporales normales. Algunos de estos efectos térmicos son muy sutiles y se estima que no representan riesgos biológicos. Otros se utilizan normalmente en terapias, especialmente en síndromes traumatológicos o reumáticos, dado que se ha comprobado que un

leve calentamiento acelera los mecanismos naturales de reparación de fracturas y fisuras óseas y de accidentes musculares o tendinosos.

La presencia de EMF debería alterar otros procesos biológicos que se basan en el **intercambio de iones**, que es un mecanismo fundamental de la biología celular, producido a través de la membrana, y que es responsable de la mayoría de las actividades colectivas del cuerpo. A pesar de la gran cantidad de estudios sobre estos posibles efectos no térmicos, no se tiene aún una noción clara de su importancia y eventual riesgo, tal vez por la complejidad de los mecanismos de intercambio celular y su redundancia. Hay muchas hipótesis de eventuales efectos que se estudian actualmente y que detallamos más abajo.

El cuerpo humano se puede pensar (groseramente) como un conductor de conductividad moderada a alta, debido a su gran contenido de agua y electrolitos. En consecuencia, hay una profundidad de penetración dependiente de la frecuencia, que hace que, salvo para campos de frecuencia ultrabaja (por debajo de los 30 Hz), la penetración del campo eléctrico es despreciable. Como sabemos, las ondas electromagnéticas en un conductor presentan fundamentalmente energía magnética, que se traduce en corrientes de Foucault y otros efectos. **Por lo tanto, la mayoría de los estudios se ha concentrado en los efectos del campo magnético sobre la salud.**

Revisiones y evaluación de la literatura existente

Una importante cantidad de trabajos, especialmente los realizados por agencias gubernamentales, comisiones especiales y los organismos internacionales, tratan de analizar los trabajos científicos especializados que se publican anualmente de a miles para encontrar patrones comunes, evaluar el peso de la evidencia para caracterizar el riesgo y recomendar líneas de acción. Habitualmente un comité de expertos revisa la literatura y saca conclusiones. Debido a la variedad de tamaño, experiencia científica y tiempo de trabajo de estas comisiones, los resultados son también variados y, quizás porque los expertos son conscientes de sus limitaciones, las publicaciones utilizan un lenguaje muy cuidado y a veces críptico para el lector casual. La frase común en todos estos trabajos es la necesidad de seguir estudiando los temas en discusión. Adjuntamos a este capítulo varios informes:

- NIEHS (USA) 1999 - **Health Effects from Exposure to Power-Line Frequency Electric and Magnetic Fields**. Campos de frecuencia industrial. (NIEHS1999.PDF).
- ICNIRP 2001 - **Review of the Epidemiologic Literature on EMF and Health**. Campos de frecuencia industrial (ICNIRP2001.PDF).
- IEE (Institution of Electrical Engineers) 2002 - **The Possible Harmful Biological Effects of Low Level Electromagnetic Fields of Frequencies up to 300 GHz**. General. (IEE2002.PDF)

Para tener una idea de la profundidad de la controversia sobre los efectos de los EMF sobre la salud humana citamos el caso del llamado "California Report" donde un comité de tres expertos concluyó que hay evidencia suficiente para considerar probables (más del 50%) los efectos dañinos de campos ELF sobre la salud, en particular en el caso de la leucemia infantil y los abortos.

Este reporte se halla publicado en "versión borrador" en la Web desde julio de 2001 (<http://www.dhs.ca.gov/ps/deodc/ehib/emf/RiskEvaluation/riskeval.html>), ya que continúan las discusiones sobre la seriedad y alcance de las conclusiones y hay al menos una acción legal para suprimir su publicación. Se adjunta un comentario y resumen del Prof. D.L.Henshaw, de la Univ. De Bristol, de octubre de 2001 (HENSHAW.PDF).

Pautas de la ICNIRP

Probablemente el documento más influyente en el establecimiento de límites a la exposición a campos electromagnéticos, base de las legislaciones nacionales de la gran mayoría de los países sobre el tema, es la guía que publicó la ICNIRP en Abril de 1998 (**ICNIRP1998.PDF**). Lo que sigue son extractos del texto.

Se describen estudios de efectos directos e indirectos de los EMF. Los **efectos directos** resultan de la interacción directa de los campos con el cuerpo, mientras que los **efectos indirectos** involucran interacciones con un objeto a una potencial eléctrico diferente al del cuerpo.

Se discuten resultados de estudios de laboratorio y epidemiológicos, criterios básicos de exposición y niveles de referencia para evaluación práctica de los peligros y las recomendaciones se aplican a exposiciones ocupacionales o públicas.

IRPA/INIRC publicó pautas para EMF de alta frecuencia y de 50/60 Hz en 1988 y 1990, respectivamente, pero estas pautas se reemplazan por las presentes que cubren el rango entero de frecuencia para EMF (hasta 300 GHz). Los **campos magnéticos estáticos** fueron considerados en las pautas de la ICNIRP publicadas en 1994.

"Al establecer límites de exposición, la Comisión reconoce la necesidad de reconciliar un número de opiniones diferentes de expertos. Debe considerarse la validez de los informes científicos y se deben hacer extrapolaciones de experimentos sobre animales a efectos sobre humanos. Las restricciones en estas pautas se basaron solamente en datos científicos; sin embargo, los conocimientos actualmente disponibles indican que estas restricciones proveen un nivel adecuado de protección ante la exposición a EMF variables en el tiempo. Dos clases de guía se presentan:

- **Restricciones básicas.** Las restricciones a la exposición a campos eléctricos, magnéticos y electromagnéticos variables en el tiempo que se basan directamente en efectos establecidos sobre la salud se denominan "restricciones básicas". Dependiendo de la frecuencia del campo, las cantidades físicas usadas para especificar estas restricciones son: densidad de corriente (J), tasa de absorción específica de energía (SAR⁶) y densidad de potencia (S⁷). Sólo la densidad de potencia en el aire, fuera del cuerpo, puede medirse fácilmente en individuos expuestos.
- **Niveles de referencia.** Estos niveles se proveen para **propósitos de evaluación práctica de la exposición** para determinar si es probable que se excedan las restricciones básicas. Algunos niveles de referencia se derivan de las restricciones básicas relevantes usando técnicas de medición y/o computacionales, y otras se dirigen a la percepción y efectos indirectos adversos de la exposición a EMF. Las cantidades derivadas son: intensidad de campo eléctrico (E), intensidad de campo magnético (H), densidad de flujo magnético (B), densidad de potencia (S) y las corrientes que fluyen por los miembros (I_L). Las cantidades que se dirigen a la percepción y otros efectos indirectos son la corriente de contacto (I_c) y, para campos pulsados, la absorción específica de energía (SA⁸). En cualquier situación de exposición particular, valores medidos o calculados de cualquiera de estas cantidades pueden compararse con el apropiado nivel de referencia. **El cumplimiento de los niveles de referencia asegurará el cumplimiento de la relevante restricción básica.** Si el valor medido o calculado excede el nivel de referencia, no necesariamente se sigue que se excederá la restricción básica. Sin embargo, cuando un nivel de referencia se excede es necesario probar el cumplimiento de la relevante restricción básica y determinar si son necesarias medidas adicionales de protección."

En la zona de campo cercano es necesario conocer la intensidad de los campos E y H (o B), mientras que en la región de campo lejano, se supone que la radiación se comporta como una onda plana TEM, de manera que el conocimiento de la densidad de potencia (intensidad del

⁶ La SAR se define como la potencia electromagnética absorbida por el tejido por unidad de masa:

$$SAR = dW/dm = \sigma E^2 / \rho \quad \text{donde } \sigma \text{ es la conductividad y } \rho \text{ la densidad del tejido. } [SAR] = \text{W/Kg.}$$

⁷ El vector de Poynting.

⁸ La SA considera la energía, en lugar de la potencia que se toma en la SAR. [SA] = J/Kg.

vector de Poynting) es equivalente a conocer los campos mismos⁹.

"La exposición a EMF variables en el tiempo da lugar a corrientes internas en el cuerpo y absorción de energía en los tejidos que dependen de los mecanismos de acoplamiento y la frecuencia involucrada.

El campo eléctrico y la densidad de corriente internos están relacionados por la ley de Ohm:

$$J = \sigma E \quad (3)$$

donde σ es la conductividad eléctrica del medio. Las cantidades dosimétricas usadas en estas pautas, tomando en cuenta los distintos rangos de frecuencias y formas de onda, son:

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

A continuación describe las bases para la limitación de las exposiciones:

" Estas pautas para limitar la exposición han sido desarrolladas siguiendo una revisión exhaustiva de toda la literatura científica publicada... sólo se usaron efectos establecidos como base para las restricciones propuestas. **La inducción de cáncer por una exposición prolongada a EMF no fue considerada como establecida, por lo que estas pautas se basan en efectos sobre la salud de corto plazo, inmediatos, como la estimulación de nervios y músculos periféricos, choques y quemaduras causados por tocar objetos conductores y elevadas temperaturas en los tejidos que resultan de la absorción de energía durante la exposición a EMF.** En el caso de los potenciales efectos de largo plazo de la exposición, como un incrementado riesgo de cáncer, ICNIRP concluyó que los datos disponibles son insuficientes para proveer una base de definición de restricciones a la exposición, aunque la investigación epidemiológica ha dado evidencia sugestiva, pero no convincente de una asociación entre posibles efectos carcinógenos y la exposición a niveles de densidades de flujo magnético de 50/60 Hz sustancialmente menores que los recomendados en estas pautas."

Esta última frase es muy significativa. A continuación se indican cuáles se consideran los **mecanismos de acoplamiento** entre los EMF y el cuerpo, que se dividen en mecanismos directos y mecanismos indirectos:

"**Hay tres mecanismos de acoplamiento básicos** establecidos a través de los cuales los campos eléctrico y magnético variables en el tiempo interactúan directamente con la materia viva (UNEP/WHO/IRPA 1993):

- **acoplamiento a campos eléctricos de baja frecuencia.**

La interacción de campos eléctricos variables en el tiempo con el cuerpo humano resulta en el flujo de carga eléctrica (corriente eléctrica), la polarización de carga ligada (formación de dipolos eléctricos) y la reorientación de dipolos eléctricos ya presentes en el tejido. Las magnitudes relativas de estos diferentes efectos dependen de las propiedades eléctricas del cuerpo, es decir, a conductividad eléctrica (que gobierna el flujo de corriente eléctrica) y la permitividad (que gobierna la intensidad de los efectos de polarización). La conductividad eléctrica y la permitividad varía con el tipo de tejido corporal y también dependen de la frecuencia del campo aplicado. Campos eléctricos externos al cuerpo inducen una carga superficial sobre el cuerpo, que resulta en corrientes inducidas en el interior, cuya distribución depende de las condiciones de la exposición, el tamaño y forma del cuerpo y de la posición del cuerpo en el campo.

- **acoplamiento a campos magnéticos de baja frecuencia.**

La interacción de campos magnéticos variables en el tiempo con el cuerpo humano resulta en campos eléctricos inducidos y la circulación de corrientes eléctricas. Las magnitudes del campo inducido y la densidad de corriente son proporcionales al radio del lazo, la conductividad eléctrica del tejido y la tasa de variación y la magnitud de la densidad

⁹ Para una onda plana: $S = EH = E^2 / \eta_0 = \eta_0 H^2$

de flujo magnético. Para una dada magnitud y frecuencia de campo magnético los campos eléctricos más fuertes se inducen cuando las dimensiones del lazo son mayores. El camino y magnitud exactos de la corriente resultante inducida en cualquier parte del cuerpo dependerá de la conductividad eléctrica del tejido. El cuerpo no es eléctricamente homogéneo. Sin embargo, las densidades de corriente inducida pueden calcularse usando modelos anatómica y eléctricamente realistas del cuerpo y adecuados métodos computacionales, con un alto grado de resolución anatómica.

- **absorción de la energía de campos electromagnéticos.**

La exposición a campos eléctricos y magnéticos de baja frecuencia normalmente resulta en una absorción de energía despreciable y ninguna elevación observable de la temperatura corporal. Sin embargo, la exposición a EMF a frecuencias por encima de alrededor de 100 kHz pueden llevar a una significativa absorción de energía e incremento de temperatura. En general, la exposición a un campo electromagnético uniforme (una onda plana) resulta en una deposición y distribución de energía altamente no uniforme dentro del cuerpo, que debe evaluarse por medición y cálculo dosimétrico. En lo referente a la absorción de energía por el cuerpo humano, los EMF pueden dividirse en cuatro rangos (Durney et al. 1985):

- frecuencias desde alrededor de 100 kHz a menos de alrededor de 20 MHz, a las cuales la absorción en el tronco decrece rápidamente a medida que decrece la frecuencia, y puede ocurrir absorción significativa en el cuello y piernas;
- frecuencias desde alrededor de 20 MHz a 300 MHz, a las cuales puede ocurrir absorción relativamente alta en el cuerpo entero, y aún a mayores valores si se consideran resonancias parciales (p.ej., en la cabeza);
- frecuencias desde alrededor de 300 MHz a algunos GHz, a las cuales ocurre absorción local y no uniforme significativa; y
- frecuencias por encima de alrededor de 10 GHz, a las cuales la absorción de energía ocurre primariamente sobre la superficie corporal.

En el tejido la SAR es proporcional al cuadrado de la intensidad de campo eléctrico interno. El promedio y distribución de SAR pueden calcularse o estimarse a partir de mediciones de laboratorio. Los valores de SAR dependen de los siguientes factores:

- los parámetros del campo incidente: frecuencia, intensidad, polarización y configuración fuente-objeto (campo cercano o lejano);
- las características del cuerpo expuesto: su tamaño y geometría interna y externa y las propiedades dieléctricas de los distintos tejidos; y
- efectos de tierra y reflectores de otros objetos situados en el campo cerca del cuerpo expuesto.

Cuando el eje longitudinal del cuerpo humano es paralelo al vector eléctrico, y bajo condiciones de exposición de onda plana (campo lejano), la SAR de cuerpo entero alcanza sus valores máximos. La cantidad de energía absorbida depende de un número de factores, incluyendo el tamaño del cuerpo expuesto. El “Standard Reference Man” (ICRP 1994), si no está conectado a tierra, tiene una frecuencia de absorción resonante cercana a los 70 MHz. Para individuos más altos la frecuencia de absorción resonante es algo menor, y para adultos más bajos, niños, infantes e individuos sentados puede exceder los 100 MHz. Los valores de los niveles de referencia de campo eléctrico se basan en la dependencia de la frecuencia de la absorción humana; en individuos conectados a tierra las frecuencias de resonancia son menores por un factor de 2 (UNEP/WHO/IRPA 1993).

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

La utilidad de los cálculos de modelización numérica, así como las mediciones de corriente corporal inducida e intensidad del campo tisular para la evaluación de exposiciones a campos cercanos ha sido demostrada para teléfonos celulares, walkie-talkies, torres de transmisión radial, fuentes de comunicación a bordo y calentadores dieléctricos (Kuster and Balzano 1992; Dimbylow and Mann 1994; Jokela et al. 1994; Gandhi

1995; Tofani et al. 1995). **La importancia de estos estudios reside en haber demostrado que la exposición a campos cercanos puede resultar en una alta SAR local (p.ej., en la cabeza, muñecas, tobillos) y que los valores globales y locales de SAR dependen fuertemente de la distancia de separación entre la fuente de alta frecuencia y el cuerpo.** Finalmente, datos de SAR obtenidos por medición son consistentes con datos obtenidos de cálculos con modelos numéricos. El valor promedio de SAR de cuerpo entero y el valor local son cantidades convenientes para comparar efectos bajo varias condiciones de exposición. Una discusión detallada de la SAR se puede encontrar en otra parte (UNEP/WHO/IRPA 1993).

A frecuencias mayores que alrededor de 10 GHz, la profundidad de penetración del campo en los tejidos es pequeña, y la SAR no es una buena medida para evaluar la energía absorbida. La densidad de potencia incidente del campo (en W/m^2) es una cantidad dosimétrica más apropiada."

"Hay dos mecanismos de acoplamiento indirecto:

- corrientes de contacto que resultan cuando el cuerpo humano se pone en contacto con un objeto a un diferente potencial eléctrico (es decir, cuando el cuerpo o el objeto se cargan por un EMF): y
- acoplamiento de un EMF a dispositivos médicos usados por o implantados en un individuo (no considerado en este documento).

La carga de un objeto conductor por un EMF causa que corrientes eléctricas pasen a través del cuerpo humano en contacto con el objeto (Tenforde and Kaune 1987; UNEP/WHO/IRPA 1993). La magnitud y distribución espacial de tales corrientes dependen de la frecuencia, el tamaño del objeto, el tamaño de la persona y el área de contacto. Descargas transitorias - chispas - pueden ocurrir cuando un individuo y un objeto conductor expuesto a un campo intenso se ponen en proximidad."

A continuación el documento presenta las bases biológicas para las limitaciones en la exposición, en dos tramos: hasta 100 KHz (campos de relativamente baja frecuencia) y desde 100 KHz a 300 GHz (campos de alta frecuencia). Estas "bases biológicas" incluyen estudios epidemiológicos, de laboratorio, ocupacionales, en animales y en células, estudios de cáncer y abortos y otros, que no mencionamos aquí porque se presentarán en secciones posteriores.

Las pautas para limitar la exposición a EMF se pueden dividir en límites para **exposición ocupacional** ("**individuos adultos que están generalmente expuestos bajo condiciones conocidas y están entrenados para ser conscientes de los riesgos potenciales y para tomar precauciones apropiadas**") y límites para **exposición pública** ("**el público general comprende individuos de todas las edades y status de salud variable, y puede incluir grupos o individuos particularmente susceptibles. En muchos casos, miembros del público general no son conscientes de su exposición a EMF, y, más aún, no puede esperarse razonablemente que individuos del público general tomen precauciones para minimizar o evitar la exposición. Son estas consideraciones que subyacen en la adopción de restricciones de exposición más exigentes para el público general que para la población expuesta ocupacionalmente**").

Se describen los criterios científicos usados en la determinación de las restricciones básicas y los niveles de referencia:

"Restricciones básicas

Se usaron diferentes bases científicas en el desarrollo de las restricciones básicas a la exposición para varios rangos de frecuencia:

- Entre 1 Hz y 10 Mhz se proveen restricciones básicas sobre la densidad de corriente para prevenir efectos sobre funciones del sistema nervioso.
- Entre 100 kHz y 10 GHz se proveen restricciones básicas sobre la SAR para prevenir tensiones corporales por calor y excesivo calentamiento local tisular, en el rango 100 kHz - 10 MHz se proveen restricciones tanto sobre la densidad de corriente como sobre la SAR; y
- Entre 10 y 300 GHz se proveen restricciones básicas sobre la densidad de potencia para prevenir excesivo calentamiento tisular sobre o cerca de la superficie del cuerpo."

Las **restricciones básicas** se presentan en las Tablas 4 y 5:

Tabla 4. Restricciones básicas para campos eléctrico y magnético variables en el tiempo para frecuencias hasta 10 GHz

Características de la exposición	Rango de frecuencia	Densidad de corriente para cabeza y tronco (mA m ⁻²) (rms)	SAR promedio cuerpo entero (W kg ⁻¹)	SAR localizado (cabeza y tronco) (W kg ⁻¹)	SAR localizado (miembros) (W kg ⁻¹)
Exposición Ocupacional	Hasta 1 Hz	40	—	—	—
	1 - 4 Hz	40/f	—	—	—
	4 Hz - 1 kHz	10	—	—	—
	1 - 100 kHz	f/100	—	—	—
	100 kHz - 10 Mhz	f/100	0.4	10	20
	10 MHz - 10 GHz	—	0.4	10	20
Exposición de público general	Hasta 1 Hz	8	—	—	—
	1 - 4 Hz	8/f	—	—	—
	4 Hz - 1 kHz	2	—	—	—
	1 - 100 kHz	f/500	—	—	—
	100 kHz - 10 Mhz	f/500	0.08	2	4
	10 MHz - 10 GHz	—	0.08	2	4

Notas:

1. f es la frecuencia en hertz.
2. Debido a la inhomogeneidad eléctrica del cuerpo, las densidades de corriente deben promediarse sobre una sección recta de 1 cm² perpendicular a la dirección de la corriente.
3. Para frecuencias hasta 100 kHz, los valores pico de densidad de corriente pueden obtenerse multiplicando el valor eficaz (rms) por $\sqrt{2}$ (~1.414). Para pulsos de duración t_0 la frecuencia equivalente a aplicar en las restricciones básicas debería calcularse como $f = 1/(2 f_p)$.
4. Para frecuencias hasta 100 kHz y para campos magnéticos pulsados, la máxima densidad de corriente asociada con los pulsos puede calcularse a partir de los tiempos de subida/caída y la máxima tasa de cambio de la densidad de flujo magnético. La corriente inducida se puede entonces comparar con la apropiada restricción básica.
5. Todos los valores de SAR se deben promediar sobre un periodo cualquiera de 6 minutos
6. La masa para promediar SAR localizado es cualquier 10 g de tejido contiguo; la SAR máxima así obtenida debe ser el valor usado para la estimación de la exposición.
7. Para pulsos de duración t_p la frecuencia equivalente a aplicar en las restricciones básicas debería calcularse como $f = 1/(2 f_p)$. Adicionalmente, para exposiciones pulsadas en el rango de frecuencia 0.3 a 10 GHz y para exposición localizada de la cabeza, para limitar o evitar efectos auditivos causados por la expansión termoelástica, una restricción básica adicional se recomienda. Esta es que la SA no debe exceder 10 mJ kg⁻¹ para trabajadores y 2 mJ kg⁻¹ para el público general, promediada sobre 10 g de tejido.

Tabla 5. Restricciones básicas de densidad de potencia para frecuencias entre 10-300 GHz

Características de la exposición	Densidad de potencia (W/m ²)
Exposición Ocupacional	50
Exposición de público general	10

Notas:

1. Las densidades de potencia se promediarán sobre cualquier área expuesta de 20 cm² y cualquier periodo de $68/f^{1.05}$ minutos (donde f está en GHz) para compensar la progresivamente menor profundidad de penetración a medida que la frecuencia aumenta.
2. Las densidades de potencia máxima espaciales, promediadas sobre 1 cm², no deberían exceder 20 veces los valores tabulados.

En las Tablas 6 y 7 se presentan los **niveles de referencia**:

Tabla 6. Niveles de referencia para **exposición ocupacional** a campos eléctricos y magnéticos variables en el tiempo (valores eficaces rms no perturbados)

Rango de frecuencia	Intensidad de campo E (V m ⁻¹)	Intensidad de campo H (A/m)	Intensidad de campo B (μT)	Densidad de potencia equivalente de onda plana S_{eq} (W m ⁻²)
Hasta 1 Hz	—	1.63×10^5	2×10^5	—
1-8 Hz	20000	$1.63 \times 10^5 / f^2$	$2 \times 10^5 / f^2$	—
8-25 Hz	20000	$2 \times 10^4 / f$	$2.5 \times 10^4 / f$	—
0.025-0.82 kHz	$500 / f$	$20 / f$	$25 / f$	—
0.82-65 kHz	610	24.4	30.7	—
0.065-1 MHz	610	$1.6 / f$	$2.0 / f$	—
1-10 MHz	$610 / f$	$1.6 / f$	$2.0 / f$	—
10-400 MHz	61	0.16	0.2	10
400-2000 MHz	$3f^{1/2}$	$0.008f^{1/2}$	$0.01f^{1/2}$	$f/40$
2-300 GHz	137	0.36	0.45	50

Notas:

1. f indicada en la columna de rango de frecuencia.
2. Siempre que las restricciones básicas se cumplan y que se puedan excluir efectos indirectos adversos, los valores de intensidad de campo pueden excederse.
3. Para frecuencias entre 100 kHz y 10 GHz, S_{eq} , E^2 , H^2 , y B^2 se deben promediar sobre cualquier período de 6 minutos.
4. Para valores pico a frecuencias hasta 100 kHz ver Tabla 4, nota 3.
5. Para valores pico a frecuencias por encima de 100 kHz ver Figs. 1 and 2. Entre 100 kHz y 10 MHz, los valores pico para las intensidades de campo se obtienen por interpolación desde el pico de 1.5 a 100 kHz al pico de 32 a 10 MHz. Para frecuencias por encima de 10 MHz se sugiere que la densidad pico de potencia de onda plana equivalente, promediada sobre el ancho del pulso, no exceda 1,000 veces las restricciones de S_{eq} , o que la intensidad de campo no exceda 32 veces los niveles de exposición de intensidad de campo dados en la tabla.
6. Para frecuencias por encima de 10 GHz, S_{eq} , E^2 , H^2 , y B^2 se deben promediar sobre cualquier período de $68/f^{1.05}$ minutos (f en GHz).
7. No se proveen valores de campo E para frecuencias <1 Hz, que son efectivamente campos eléctricos estáticos. Los choques eléctricos de fuentes de baja impedancia se previenen mediante procedimientos de seguridad eléctrica establecidos para tales equipos."

Tabla 7. Niveles de referencia para **exposición pública general** a campos eléctricos y magnéticos variables en el tiempo (valores eficaces rms no perturbados)

Rango de frecuencia	Intensidad de campo E (V/m)	Intensidad de campo H (A/m)	Intensidad de campo B (μ T)	Densidad de potencia equivalente de onda plana S_{eq} ($W m^{-2}$)
Hasta 1 Hz	—	3.2×10^4	4×10^4	—
1-8 Hz	10000	$3.2 \times 10^4 / f^2$	$4 \times 10^4 / f^2$	—
8-25 Hz	10000	$4 \times 10^3 / f$	$5 \times 10^3 / f$	—
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	$87 / f^{1/2}$	$0.73 / f$	$0.92 / f$	—
10-400 MHz	28	0.073	0.092	2
400-2000 MHz	$1.375 f^{1/2}$	$0.0037 f^{1/2}$	$0.0046 f^{1/2}$	$f / 200$
2-300 GHz	61	0.16	0.2	10

Notas:

1. f indicada en la columna de rango de frecuencia.
2. Siempre que las restricciones básicas se cumplan y que se puedan excluir efectos indirectos adversos, los valores de intensidad de campo pueden excederse.
3. Para frecuencias entre 100 kHz y 10 GHz, S_{eq} , E^2 , H^2 , y B^2 se deben promediar sobre cualquier período de 6 minutos.
4. Para valores pico a frecuencias hasta 100 kHz ver Tabla 4, nota 3.
5. Para valores pico a frecuencias por encima de 100 kHz ver Figs. 1 and 2. Entre 100 kHz y 10 MHz, los valores pico para las intensidades de campo se obtienen por interpolación desde el pico de 1.5 a 100 kHz al pico de 32 a 10 MHz. Para frecuencias por encima de 10 MHz se sugiere que la densidad pico de potencia de onda plana equivalente, promediada sobre el ancho del pulso, no exceda 1,000 veces las restricciones de S_{eq} , o que la intensidad de campo no exceda 32 veces los niveles de exposición de intensidad de campo dados en la tabla.
6. Para frecuencias por encima de 10 GHz, S_{eq} , E^2 , H^2 , y B^2 se deben promediar sobre cualquier período de $68/f^{1.05}$ minutos (f en GHz).
7. No se proveen valores de campo E para frecuencias <1 Hz, que son efectivamente campos eléctricos estáticos. La percepción de cargas eléctricas superficiales no ocurrirá a intensidades de campo menores que $25 kV m^{-1}$. Las descargas de chispa que produzcan stress o molestias deben evitarse."

A continuación se dan niveles de referencia para corrientes de contacto e inducidas variables en el tiempo:

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

Característica de la exposición	Rango de frecuencia	Máxima corriente de contacto (mA)	Característica de la exposición	Rango de frecuencia	Máxima corriente de contacto (mA)
Exposición ocupacional	Hasta 2.5 kHz	1.0	Exposición pública general	Hasta 2.5 kHz	0.5
	2.5-100 kHz	$0.4 f$		2.5-100 kHz	$0.2 f$
	0.1-110 MHz	40		0.1-110 MHz	20

Nota:

1. f es la frecuencia en kHz."

"Tabla 9. Niveles de referencia para **corrientes inducidas** en cualquier miembro a frecuencias entre 10 y 110 MHz.

Característica de la exposición	Corriente (mA)
Exposición ocupacional	100
Público general	45

Notas:

1. El nivel de referencia público es igual al nivel de referencia ocupacional dividido por $\sqrt{5}$.
2. Para cumplir con la restricción básica sobre SAR localizada, la raíz cuadrada del valor promediado en el tiempo del cuadrado de la corriente inducida sobre cualquier periodo de 6 minutos forma la base de los niveles de referencia."

En la siguiente sección se detalla cómo **"sumar" efectos** para la exposición a campos de múltiples frecuencias. Se dividen los efectos por rango de frecuencia y por tipo: corrientes inducidas, efectos térmicos, corrientes sobre los miembros y corrientes de contacto. Finalmente se hace un breve comentario sobre las medidas de protección y la responsabilidad de la industria de asegurar el cumplimiento de las pautas.

Las pautas de ICNIRP han sido criticadas por ambientalistas que sugieren que los valores publicados son muy altos según su interpretación de la literatura científica, y también por los sectores industriales que se quejan de que los valores son exageradamente bajos, según su interpretación de la literatura científica, y para cumplirlos se deberían realizar inversiones exorbitantes.

En noviembre de 2001 se realizó la Conferencia de Campos Electromagnéticos y Salud, ¿cuál marco regulatorio para la Comunidad Europea?, organizada por el Health & Consumer Protection Directorate-General de la Comisión Europea. La conferencia estuvo dirigida a discutir aspectos técnicos, científicos y legales de campos electromagnéticos y salud a la luz de las recientes opiniones científicas. En la introducción a las conclusiones se lee:

"En conclusión, se acordó que el conocimiento científico disponible a la fecha se reflejaba bien en la opinión del Comité Científico sobre Toxicidad-Ecotoxicidad y el Ambiente de la Comisión. No hubo ninguna propuesta de cambiar los límites actuales definidos por la recomendación del 12th July Council, que limita la exposición del público general a campos electromagnéticos. Se estableció que cualquier modificación a límites más estrictos sin una más fuerte base científica negaría el trabajo realizado y los estudios de alta calidad financiados desde hace muchos años para explorar los riesgos de salud asociados con la exposición a la radiación no ionizante. Esto no significa que los hallazgos recientes en el área de frecuencias extremadamente bajas no deban tenerse en cuenta, sino que deben ser evaluadas más aún y que futuras medidas, si fueran necesarias, deberán ser proporcionadas a los riesgos establecidos."

Jarmo Elovaara, portavoz de la "Recomendación sobre Campos Electromagnéticos y la Realidad de las Compañías de Transmisión Eléctrica de Potencia" de la Comisión Europea dice:

"En las empresas de servicios públicos creemos que la Recomendación de la ICNIRP y la Comisión Europea contienen márgenes de seguridad innecesariamente altos y que uno debería discutir la validez de esos valores. En la realidad, los valores presentes establecidos por la Recomendación se ven ya excedidos. En Finlandia sería un problema muy grande tomar literalmente las presentes recomendaciones debido a que reconstruir las líneas de potencia existentes es extremadamente caro. Hay necesidad de preparar una metodología para implementar límites, especialmente los campos de banda ancha son tratados en una forma demasiado pesimista. También debería reconocerse la falta de equipos comerciales de medición apropiados."

El informe del IEE

El informe del IEE (Institution of Electrical Engineers) del Reino Unido es una actualización de informes realizados cada dos años desde 1994 y contiene conclusiones a partir de la revisión de 798 trabajos científicos en el área. El resumen indica:

" El Grupo Consejero de Políticas sobre los Efectos Biológicos de Campos electromagnéticos de Bajo Nivel, del IEE ha concluido que todavía no hay evidencia científica convincente que muestre efectos dañinos de campos electromagnéticos de bajo nivel sobre los humanos. Es-

ta conclusión es la misma que alcanzó en sus declaraciones previas, la última realizada en mayo de 2000 y no ha sido cambiada por la revisión por pares de la literatura de los últimos dos años..."

" A bajas frecuencias, la evidencia acumulada del gran cuerpo de literatura construido en los últimos veinte años sugiere que la existencia de efectos dañinos a la salud es general es improbable. Sin embargo, recientes análisis conjuntos de estudios epidemiológicos han sugerido una asociación con leucemia infantil, que requiere una mayor investigación. A mayores frecuencias hay menos datos disponibles. Mientras los datos existentes no muestran efectos dañinos, el Grupo es de la opinión que investigaciones adicionales, tanto epidemiológicas como de laboratorio, deberían financiarse. Esta visión es consistente con las conclusiones de importantes revisiones publicados en otra parte, y está basada más en la preocupación pública y la naturaleza ubicua de nuestra exposición a tales campos que en una probabilidad de que tales efectos dañinos existan. El programa de investigación del Reino Unido sobre Telecomunicaciones Móviles y Salud avanza en cierta medida para enfrentar esta necesidad de mayor investigación con unos quince proyectos que se inician en 2002."

Continúa realizando un resumen de la literatura revisada, de la cual la sección más interesante es quizás la que presenta otras revisiones recientes:

" En los dos años pasados diversos cuerpos nacionales e internacionales revisaron la evidencia científica sobre campos electromagnéticos de baja frecuencia:

- En marzo de 2001 un Grupo Consejero de la National Radiological Protection Board (NRPB - UK) publicó una revisión sobre cáncer, que concluyó que, aunque la evidencia no es suficientemente fuerte para justificar conclusiones firmes, permanece la posibilidad que los campos magnéticos puedan incrementar el riesgo de leucemia en niños.
- Una conclusión similar fue alcanzada en junio por la International Agency for Research on Cancer, que clasificó a los campos magnéticos de baja frecuencia como 'posiblemente carcinógenos'. Esta opinión se basó en evidencia epidemiológica 'limitada' para leucemia infantil, pero 'inadecuada' para todos los otros tipos de cáncer, evidencia 'inadecuada' a partir de estudios animales y evidencia 'inadecuada' para campos eléctricos. En Diciembre, una revisión de la International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) llegó a conclusiones muy similares para cáncer, y también analizó varias otras enfermedades, concluyendo que no hay una enfermedad para la cual los campos electromagnéticos puedan considerarse como una causa establecida.
- En California, los Servicios del Departamento de Salud emitieron una revisión borrador concluyendo que hay una probabilidad significativa, en varios casos superior al 50%, que los campos de baja frecuencia causen un número de diferentes enfermedades. Esta conclusión está claramente fuera de línea con las otras revisiones mencionadas arriba, y aparece ser injustificada por el balance de evidencia científica.
- El informe Zmirou a la Dirección General de Salud francesa consideró los efectos sobre la salud de teléfonos móviles y estaciones base. Revisó las revisiones principales incluyendo el informe Stewart inglés y el informe de la Royal Society of Canada. También revisó la literatura científica y escuchó evidencia de un número de expertos de los sectores científico e industrial. Sus conclusiones principales concuerdan con las del informe Stewart en relación al estado del conocimiento, la adecuación de los estándares actuales y la necesidad de un programa de investigación bien planeado. El informe concluye que los niños no son una categoría de alto riesgo pero que los padres deben usar el sentido común y aconsejar a sus niños adecuadamente.]
- Un informe del Consejo de Salud de los Países Bajos titulado "Mobile telephones - An evaluation of health effects", se publicó en enero de 2002. Concuerda con revisiones previas sobre el estado del conocimiento y la adecuación de los estándares. En un significativo apartamiento de las conclusiones del informe Stewart no recomienda la aplicación del principio de precaución relativo a los efectos no térmicos y no ve justificación para recomendar la restricción en el uso de teléfonos móviles por niños."

El informe Stewart que se menciona repetidamente es un informe realizado en 2000 por un Grupo Independiente de Expertos en telefonía Móvil, liderado por Sir William Stewart, por encargo de la National Radiological Protection Board (NRPB - UK). En el prefacio se dice:

" El informe señala que el balance de la evidencia no sugiere que las tecnologías de telefonía móvil ponen en riesgo la salud de la población en general del Reino Unido. Hay alguna evidencia preliminar que los productos de las tecnologías de telefonía móvil pueden causar, en

algunos casos, sutiles efectos biológicos, aunque, es importante, esto no necesariamente significa que la salud se vea afectada. Hay también evidencia de que en algunos casos el bienestar de la gente puede verse afectado desfavorablemente por la ubicación no sensata de estaciones base. Deben proveerse nuevos mecanismos para prevenir estos hechos. En resumen, el informe propone que se adopte una aproximación con precauciones hasta que se halle disponible información científica más robusta y que el tema sea revisado nuevamente en tres años, o antes si las circunstancias así lo exigen."

El **principio de precaución** recomendado por el informe Stewart sugiere adoptar las pautas de la ICNIRP, más exigentes que las pautas inglesas al momento, revocar los permisos de instalación de antenas de telefonía móvil en lugares "sensibles" como áreas residenciales, escuelas y hospitales y elaborar protocolos en acuerdo entre el gobierno, la industria y los consumidores, para conceder futuros permisos de erección de antenas y estaciones base y asegurar el no uso de teléfonos móviles en lugares como hospitales o escuelas donde la interferencia podría ser muy peligrosa.

En las siguientes secciones vamos a presentar resultados de estudios en tres aspectos: campos estáticos, campos de frecuencia industrial y campos asociados con la telefonía celular.

Campos electromagnéticos estáticos

Sólo la componente magnética del campo estático es relevante para posibles efectos en la salud.

Los campos magnéticos asociados con campos estáticos sólo existen cuando hay un flujo de corriente. Estos campos magnéticos son difíciles de apantallar y penetran fácilmente en edificios y personas. Los campos eléctricos asociados con fuentes electromagnéticas estáticas existen siempre que exista tensión, independientemente de que la corriente fluya o no.

A diferencia de los campos magnéticos, estos campos eléctricos tienen poca capacidad de penetración en la piel o edificios. Como los campos eléctricos estáticos no penetran en el cuerpo, está asumido que cualquier efecto biológico por exposición habitual a campos estáticos tiene que ser debido a la componente magnética del campo, o a los campos eléctricos y corrientes que estos campos magnéticos inducen en el cuerpo.

La exposición residencial y ambiental a campos magnéticos estáticos está dominada por el campo natural de la Tierra, que varía entre 0.03 y 0.07 mT , dependiendo de la localización. Los campos magnéticos estáticos justo debajo de líneas de transporte de energía eléctrica continua están alrededor de 0.02 mT . Pequeñas fuentes artificiales de campos estáticos (imanes permanentes) son comunes, desde los especializados (componentes de altavoces, motores con batería, hornos de microondas) hasta triviales (imanes de refrigeradores). Estos pequeños imanes pueden producir campos de $1-10$ mT a 1 cm de sus polos magnéticos. La exposición más elevada a campo magnético estático por parte del público en general proviene de las imágenes de resonancia magnética (en inglés, **MRI**), donde los campos varían entre $150-2000$ mT .

Los efectos directos en objetos ferromagnéticos y equipos electrónicos es lo único que la mayoría de la gente notaría por debajo de unos 1000 mT . Realmente, no hay un valor umbral para efectos en objetos ferromagnéticos; una buena brújula girará en presencia de campos de hasta 0.01 mT , pero se requiere un campo mucho más intenso (por encima de 1 mT) para que los objetos ferromagnéticos se muevan de forma peligrosa. La electrónica puede verse afectada por campos bastante bajos; un monitor en color de alta resolución, por ejemplo, puede mostrar distorsiones con campos magnéticos de hasta 0.1 mT .

Una fuente de exposición a campos estáticos que empaña la distinción entre exposición residencial y laboral son los trenes eléctricos. Los campos estáticos en trenes eléctricos pueden llegar a 0.2 mT .

Las personas expuestas laboralmente a campos estáticos incluyen operadores de unidades de resonancia magnética (MRI), personal de instalaciones de física especializada y biomédicas (por ejemplo, aquéllos que trabajan en aceleradores de partículas) y trabajadores involucrados en procesos electrolíticos, como la producción de aluminio. Algunos trabajadores de la industria del aluminio están expuestos a campos de $5 - 15$ mT durante largos periodos de tiempo, con exposiciones máximas de hasta 60 mT ; pero otro estudio muestra campos promedio de sólo $2 - 4$ mT . Se ha informado de que los trabajadores de plantas que usan celdas electrolíticas están expuestos a campos de $4 - 10$ mT durante largos periodos de tiempo, con exposiciones máximas de hasta 30 mT . Las personas que trabajan en aceleradores de partículas están expuestas a campos por encima de 0.5 mT durante largos periodos de tiempo, con exposiciones por encima de 300 mT durante muchas horas y exposiciones máximas de hasta 2000 mT .

Otra fuente de exposición a campos magnéticos estáticos son los campos residuales que pueden quedar **después** de retirar campos magnéticos fuertes. Por ejemplo, después de retirar una unidad de resonancia magnética de la habitación puede quedar un campo residual de hasta 2 mT en el acero de la estructura que ha sido permanentemente magnetizado. Tales campos no son lo suficientemente fuertes para constituir una preocupación para la salud humana, pero

pueden ser lo bastante fuertes como para interferir con el funcionamiento de equipos electrónicos sensibles. Estos campos residuales pueden reducirse (aunque no eliminarse por completo) de forma profesional.

Se han realizado relativamente pocos estudios sobre incidencia de cáncer en trabajadores expuestos a campos magnéticos estáticos. Budinger y col. no han encontrado un exceso de cáncer en trabajadores expuestos a campos de 300 mT generados por aceleradores de partículas, y Barregard y col. no han encontrado un incremento de cáncer en trabajadores expuestos a campos de 10 mT en una planta de producción de cloro.

También hay estudios en trabajadores de plantas de reducción de aluminio. En general, los estudios en trabajadores de estas plantas no estaban diseñados para analizar los efectos de los campos estáticos, pero estos trabajadores están expuestos a campos de $5 - 15\text{ mT}$. En los estudios en estas plantas el único incremento de cáncer detectado fueron tumores linfocelulares, y esto sólo fue observado en un estudio. El único estudio en plantas de reducción de aluminio que investigó específicamente la exposición a campos estáticos y cáncer no encontró ningún exceso de cáncer del sistema nervioso o hematopoyético.

Estudios epidemiológicos

La aplicación de los criterios de Hill muestra que actualmente la evidencia epidemiológica de una relación entre campos magnéticos estáticos y cáncer es débil o inexistente.

1. Primero, sólo hay una **débil asociación** entre campos magnéticos estáticos y cáncer. Sólo hay un estudio que muestra alguna indicación de una asociación entre campos estáticos y cáncer, la asociación no es fuerte y sólo se observa con un tipo de cáncer.
2. Segundo, la asociación entre campos magnéticos estáticos y cáncer **no es consistente**. Los estudios en trabajadores expuestos a campos magnéticos estáticos en industrias que no sean plantas de reducción de aluminio no muestran asociación entre exposición a campos estáticos y cáncer, y todos los estudios, excepto uno, entre la industria del aluminio no muestran asociación entre exposición a campos magnéticos estáticos y cáncer.
3. Tercero, como sólo un estudio informa de una asociación entre exposición a campos estáticos y cáncer, el **tema de la especificidad es irrelevante**.
4. Cuarto, **no hay evidencia de una relación dosis-respuesta** entre exposición a campos estáticos e incidencia de cáncer. El único estudio que señala una asociación entre exposición a campos estáticos y cáncer no muestra evidencia de relación dosis-respuesta.

Por lo tanto, la evidencia epidemiológica de una asociación entre campos magnéticos estáticos y cáncer es débil e inconsistente, y no consigue mostrar una relación dosis-respuesta.

Estudios de laboratorio

Cuando la evidencia epidemiológica de una relación causal oscila entre débil e inexistente, como en el caso de los campos magnéticos estáticos y el cáncer, los estudios de laboratorio tendrían que proporcionar una evidencia muy fuerte de carcinogénesis para equilibrar la balanza.

Se han llevado a cabo un amplio rango de estudios sobre genotoxicidad de los campos estáticos en organismos completos y células. En conjunto, estos estudios ofrecen una evidencia convincente de que los campos magnéticos estáticos no son genotóxicos.

Los estudios de genotoxicidad en organismos completos han sido algo limitados. Beniashvili y col. no encontraron un incremento de la incidencia de cáncer de mama en ratones expuestos a campos de 0.02 mT . Mahlum y col. hallaron que la exposición de ratones a campos de 1000 mT no producía mutaciones, y otros investigadores encontraron una ausencia similar de mutagénesis en moscas de la fruta expuestas a campos de $1000 - 3700\text{ mT}$.

Hay un estudio de posible genotoxicidad. En ese estudio, Koana y col. encontraron indicios de un incremento de mutaciones en moscas de la fruta que no tenían capacidad para reparar daños, al ser expuestas a campos de 600 mT durante 24 horas. No se observaron efectos en moscas de la fruta con capacidad normal de reparar los daños del ADN.

Los estudios de genotoxicidad celular han sido más extensivos. Los estudios de laboratorio publicados han mostrado que los campos magnéticos estáticos no producen ninguno de los efectos que indican genotoxicidad. Los campos magnéticos estáticos no producen roturas en hebras de ADN, aberraciones cromosómicas, intercambio de cromátides hermanas, transformación celular, mutaciones o formación de micronúcleos.

También se han llevado a cabo algunos estudios sobre campos eléctricos estáticos. Estos estudios han sido revisados por McCann y col., quienes concluyeron que a pesar de que había algunos informes de genotoxicidad de los campos eléctricos estáticos, "todos los informes de resultados positivos han utilizado condiciones de exposición que posiblemente han sido acompañadas de otros fenómenos, como efecto corona, chispazos y transitorios, mientras que los negativos no."

En general, los campos magnéticos estáticos no parecen tener este tipo de actividad epigenética. Hay unos pocos estudios que sugieren que los campos magnéticos estáticos podrían amplificar los efectos de otros agentes genotóxicos, pero ninguno de estos estudios ha podido ser replicado.

Tres estudios han encontrado que campos estáticos de $140 - 3700\text{ mT}$ no incrementan los efectos mutagénicos de la radiación ionizante; pero un cuarto estudio señala que campos estáticos de $1100 - 1400\text{ mT}$ produjeron un ligero incremento en el número de aberraciones cromosómicas producidas por la exposición a dosis altas de radiación ionizante, y un quinto estudio informó de que un campo de 4000 mT incrementó ligeramente la muerte celular radioinducida.

La reparación del daño producido por la radiación no resultó afectada por un campo de 140 mT , hasta que fue inhibida a 4000 mT . Dos estudios informaron de que campos estáticos de $1300 - 4700\text{ mT}$ no amplificaron los efectos mutagénicos de una conocida genotoxina química, e incluso puede que inhiban tal actividad.

Dos estudios hallaron que campos estáticos de $150 - 800\text{ mT}$ no amplificaban el desarrollo de tumores de mama inducidos químicamente, pero un tercer estudio informó de que un campo estático de 0.02 mT incrementó el desarrollo de tumores de mama inducidos químicamente.

Los estudios de laboratorio sobre los efectos de los campos magnéticos estáticos muestran que estos campos no tienen el tipo de efectos sobre el crecimiento tumoral, crecimiento celular, funcionamiento del sistema inmunológico o balance hormonal que ha sido asociado con la carcinogénesis.

Crecimiento tumoral: En general, campos magnéticos estáticos de $13 - 1150\text{ mT}$ no parecen tener efecto en el crecimiento de tumores inducidos químicamente o trasplantados. Sin embargo, hay un estudio que sugiere que un campo magnético estático de 15 mT incrementa la tasa de crecimiento de tumores inducidos químicamente.

Crecimiento celular: En general, campos magnéticos estáticos de $45 - 2000\text{ mT}$ no parecen tener efecto en el crecimiento de células humanas, animales o de levadura. Sin embargo, hay cuatro estudios de efectos de los campos estáticos en el crecimiento celular:

- inhibición del crecimiento de linfocitos humanos a $4000 - 6300\text{ mT}$;
- inhibición del crecimiento de células tumorales a 7000 mT ;
- estimulación del crecimiento de células de mamíferos a 140 mT ;
- tanto estimulación como inhibición de la síntesis de ADN en fibroblastos a 610 mT .

Efectos en el sistema inmunológico: En la mayoría de los estudios, campos magnéticos estáticos de $13 - 2000 \text{ mT}$ no parecen tener efectos en el sistema inmunológico de animales, aunque un estudio informa que la implantación de pequeños imanes en el cerebro de ratas incrementa su respuesta inmunológica. Dos estudios en humanos han informado de que los trabajadores de plantas de reducción de aluminio, donde la exposición a campos magnéticos estáticos es común, tienen pequeñas alteraciones en el número de algunos tipos de células inmunológicas. Estas alteraciones en el número de células no tienen una significación clínica conocida, y puede que incluso no estén relacionadas con la exposición a campos magnéticos.

Efectos hormonales: Hay algunos estudios de que los campos magnéticos estáticos del nivel del campo natural de la Tierra (alrededor de 0.05 mT) pueden afectar a la producción de melatonina en ratas, aunque otros estudios con campos más intensos (por ejemplo, 2000 mT) no han observado tales efectos. No está claro que esta observación tenga ninguna significación para la salud humana. Aunque se ha sugerido que la melatonina podría tener actividad "preventiva del cáncer", no hay evidencia de que los campos magnéticos estáticos afecten al nivel de melatonina en humanos, o de que la melatonina tenga actividad anticancerígena en humanos.

La aplicación de los criterios de Hill muestra que la evidencia de una asociación causal entre exposición a campos estáticos y la incidencia de cáncer es débil o inexistente.

1. La revisión de la evidencia epidemiológica muestra una **asociación débil o inexistente** entre exposición a campos magnéticos estáticos y cáncer.
2. **No hay evidencia de laboratorio** de que los campos estáticos produzcan el tipo de efectos en células, tejidos o animales que apuntan a que produzcan o contribuyan al cáncer.
3. De lo que se conoce sobre la biofísica de los campos magnéticos estáticos y sus efectos en los sistemas biológicos, la hipótesis de que causan o contribuyen al cáncer **no tiene plausibilidad biofísica**.

Mientras que las pruebas de laboratorio no sugieren una conexión entre campos magnéticos estáticos y cáncer, los estudios han mostrado que los campos magnéticos estáticos tienen "bioefectos", particularmente a intensidades de campo por encima de 2000 mT . Estos bioefectos no tienen una relación obvia con el cáncer.

Por otra parte, no existe evidencia convincente de que los campos estáticos puedan tener efectos sobre la fertilidad, causen defectos o malformaciones congénitas o incrementen las tasas de aborto.

Recientemente se han publicado varias revisiones de la literatura epidemiológica y de laboratorio. Ninguna de estas revisiones ha concluido que los campos magnéticos o eléctricos estáticos de la intensidad que se encuentra en ambientes residenciales y laborales sean un riesgo para la salud humana.

Una revisión de 1993 realizada por el **Consejo Nacional de Protección Radiológica del Reino Unido** (National Radiological Protection Board - **NRPB**) concluyó que para campos eléctricos estáticos "no hay evidencia biológica a partir de la cual se puedan deducir restricciones básicas de exposición humana a campos eléctricos estáticos..." y que "para la mayoría de la población, la percepción de cargas eléctricas superficiales molestas... no tendrá lugar por exposición a campos eléctricos estáticos por debajo de 25 kV/m ."

Para campos magnéticos estáticos, el NRPB concluyó que "no hay evidencia experimental directa de ningún efecto adverso agudo en la salud, efectos adversos en la salud debidos a exposición de corta duración a campos magnéticos estáticos de hasta $2T$... No se puede descartar efectos en el comportamiento o funcionamiento de marcapasos por exposición a campos magnéticos de densidad de flujo mucho mayor de $2T$... Hay poca información experimental sobre

los efectos de la exposición crónica. De momento no se ha descubierto ningún efecto a largo plazo... No hay evidencia convincente de que los campos magnéticos estáticos sean mutagénicos... La progresión tumoral, y consecuentemente la promoción tumoral, no parece verse afectada por exposición a campos estáticos de hasta $1T$ (1000 mT)."

En 1993, la **Conferencia Americana de Higienistas Industriales Gubernamentales** (American Conference of Governmental Industrial Hygienists - **ACGIH**) concluyó en su revisión de la literatura sobre campos magnéticos estáticos que "por el momento, no se han podido identificar órganos diana específicos para los efectos nocivos de los campos magnéticos... Aunque se han observado algunos efectos [de campos magnéticos estáticos] en humanos y animales, ningún efecto nocivo de campos magnéticos de hasta $2T$ ha sido demostrado de forma concluyente."

En 1994, la **Comisión Internacional de Protección contra la Radiación No Ionizante** (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection - **ICNIRP**) concluyó que "los conocimientos científicos actuales no sugieren efectos nocivos en los principales parámetros de desarrollo, comportamiento y fisiológicos en organismos superiores por exposición transitoria a campos estáticos de densidad hasta $2T$. A partir del análisis de las interacciones entre exposición a largo plazo, la exposición a densidades de flujo magnético de hasta 200 mT no debe tener consecuencias adversas." Las últimas recomendaciones de ICNIRP sobre campos magnéticos variables pueden ser relevantes también.

Cierto número de organizaciones gubernamentales y profesionales han desarrollado normas de exposición, o han modificado o confirmado sus normas anteriores.

- En 1987, el **Laboratorio Nacional Lawrence Livermore de Estados Unidos** desarrolló y publicó unas recomendaciones de exposición personal a campos magnéticos. Según estas recomendaciones, las personas con marcapasos y aparatos protésicos están limitadas a un campo máximo de 1 mT , se requiere formación y seguimiento médico para personas expuestas a campos por encima de 50 mT , y el campo medio ponderado en el tiempo se limita a 60 mT para todo el cuerpo y a 600 mT en brazos y piernas. La exposición máxima de pico se limita a 2000 mT .
- En 1987, la **Organización Mundial de la Salud (OMS)** publicó unos criterios de salud para trabajadores expuestos a campos magnéticos estáticos. Su informe concluía que "a partir de los datos disponibles no se puede concluir que la exposición a corto plazo a campos magnéticos estáticos por debajo de $2T$ suponga un riesgo para la salud."
- A finales de 1993, el **Consejo Nacional de Protección Radiológica del Reino Unido (NRPB)** estableció unas recomendaciones de exposición a campos estáticos. Para campos magnéticos estáticos los límites recomendados son 200 mT promediados durante 24 horas, un campo máximo en todo el cuerpo de 2000 mT y un campo máximo en brazos y piernas de 5000 mT .

Para campos eléctricos estáticos el límite recomendado es 25 kV/m . Estas normas se aplican tanto a exposición residencial como laboral.

- También en 1994, la **Conferencia Americana de Higienistas Industriales Gubernamentales (ACGIH)** estableció normas de exposición a campos magnéticos estáticos. El límite de la ACGIH para campos magnéticos estáticos es 0.5 mT para portadores de marcapasos, y para el resto el límite ponderado en el tiempo es de 60 mT para exposición de todo el cuerpo y 600 mT para las extremidades. Debido a la naturaleza de las normas de la ACGIH, esta normativa se aplica sólo en ambientes laborales.
- En 1994, la **Comisión Internacional de Protección contra la Radiación No Ionizante (ICNIRP)** publicó unas recomendaciones de exposición a campos magnéticos estáticos. Para el público en general la norma de exposición a campos magnéticos estáticos es 40 mT

para exposición continua, excepto para personas con marcapasos cardíacos y otros equipos médicos implantables, para los que la norma es menor (0.5 mT). Para exposición laboral la norma es 200 mT para exposición continua, 2000 mT para exposición breve en todo el cuerpo, y 5000 mT para exposición de brazos y piernas.

Esta normativa se basa en varias consideraciones.

- Un objetivo es mantener las corrientes eléctricas inducidas por el movimiento a través del campo magnético estático a niveles por debajo de las que se dan de forma natural en el cuerpo.
- Un segundo objetivo es mantener las corrientes inducidas por el flujo de corriente en los vasos sanguíneos grandes a niveles que no produzcan efectos hemodinámicos o cardiovasculares.

Más información y citas bibliográficas sobre la influencia de los campos electromagnéticos estáticos sobre la salud en:

<http://www.mcw.edu/gerc/cop/static-fields-cancer-FAQ/QandA.html>

de donde se ha tomado el texto (copyright © 1996-1999 de [John Moulder, Ph.D.](#) y el Medical College of Wisconsin)

Campos electromagnéticos industriales

Gran parte de la preocupación por las líneas eléctricas y el cáncer proviene de estudios sobre personas que viven cerca de líneas eléctricas y gente que trabaja en "profesiones eléctricas". Algunos de estos estudios parecen mostrar una relación entre la exposición a campos magnéticos de frecuencia industrial y la incidencia de cáncer.

Sin embargo, los estudios epidemiológicos más recientes muestran poca evidencia de que las líneas eléctricas estén asociadas a un aumento del cáncer, los estudios de laboratorio han mostrado poca evidencia de una relación entre campos de frecuencia industrial y cáncer y la conexión entre los campos generados por las líneas eléctricas y cáncer no es biofísicamente plausible.

Una revisión llevada a cabo en 1996 por un grupo de importantes científicos de la Academia Nacional de las Ciencias de Estados Unidos concluyó que:

"Ninguna evidencia concluyente y consistente muestra que la exposición residencial a campos eléctricos y magnéticos produzca cáncer, efectos neurocomportamentales adversos o efectos sobre la reproducción y el desarrollo." .

De forma similar, una revisión de 1999 por parte del Instituto Nacional de la Salud de Estados Unidos concluyó que:

"La evidencia científica que sugiere que la exposición [a campos electromagnéticos de frecuencia industrial] supone algún riesgo para la salud es débil." .

Más aún, los mayores estudios sobre leucemia infantil y líneas eléctricas realizados informaron en 1997 y 1999 de que no podían encontrar ninguna evidencia significativa de una asociación entre líneas eléctricas y leucemia infantil.

Finalmente, una serie de estudios han mostrado que la exposición de animales durante toda su vida a campos magnéticos de frecuencia industrial no produce cáncer.

En general, la mayoría de los científicos consideran que la evidencia de que los campos de las líneas eléctricas causen o contribuyan al cáncer va de débil a inexistente.

Los campos de frecuencia industrial se denominan también **campos de frecuencia extremadamente baja** (en inglés, **ELF**). Estrictamente, en ingeniería eléctrica se denomina así a las frecuencias entre 30 y 300 Hz, pero el término se usa a menudo en la literatura biológica y de salud laboral para cubrir el rango de 0 a 3000 Hz (todo lo que esté por encima de los campos estáticos y por debajo de las radiofrecuencias).

El principal mecanismo por el cual las emisiones de radio y microondas producen efectos biológicos es por calentamiento (**efectos térmicos**). Es posible producir efectos térmicos incluso con bajos niveles de energía absorbida. Un ejemplo es el fenómeno conocido como "oír las microondas"; son sensaciones auditivas que una persona experimenta cuando su cabeza está expuesta a microondas pulsadas, como las generadas por un radar. El efecto de oír las microondas es térmico, pero puede observarse con niveles energéticos muy bajos.

Como los efectos térmicos se deben a las corrientes inducidas, no a los campos eléctricos o magnéticos directamente, pueden ser producidos por campos de frecuencias muy diferentes. Existen normas de seguridad aceptadas para prevenir daños térmicos significativos en las personas expuestas a microondas y ondas de radio, y también para personas expuestas a rayos láser, luz infrarroja y ultravioleta.

Los campos eléctricos asociados con las fuentes de frecuencia industrial existen siempre que haya tensión, con independencia de que la corriente esté fluyendo, o no. Estos campos eléctricos tienen poca capacidad de penetración en edificios e incluso en la piel. Los campos magnéticos asociados con las fuentes de frecuencia industrial existen sólo cuando la corriente está fluyendo. Estos campos magnéticos son difíciles de apantallar y penetran fácilmente en edificios y personas. Como los campos eléctricos de frecuencia industrial no pueden penetrar en el

cuerpo, está ampliamente aceptado que cualquier efecto biológico por exposición residencial a campos de frecuencia industrial tiene que ser debido a la componente magnética del campo, o a los campos eléctricos y corrientes que estos campos magnéticos inducen en el organismo.

El argumento de que los efectos de los campos de frecuencia industrial tienen que ser debidos a la componente magnética del campo ha sido objeto de debate recientemente. En particular, King ha argumentado que los campos eléctricos procedentes de líneas eléctricas penetran en la mayoría de los edificios y que las corrientes inducidas en el cuerpo por los campos eléctricos de las líneas eléctricas puede ser mayor que las corrientes inducidas por los campos magnéticos.

A frecuencias industriales la energía del fotón es de 10^{10} veces más pequeña que la necesaria para romper incluso el más débil enlace químico. Sin embargo, existen mecanismos bien establecidos mediante los cuales los campos eléctricos y magnéticos de frecuencia industrial podrían producir efectos biológicos sin romper enlaces químicos. Los campos eléctricos de frecuencia industrial pueden ejercer fuerzas en moléculas cargadas y no cargadas, y en las estructuras celulares dentro de un tejido. Estas fuerzas pueden producir movimiento de partículas cargadas, orientar o deformar estructuras celulares, orientar moléculas dipolares o inducir voltajes a través de las membranas celulares. Los campos magnéticos de frecuencia industrial pueden ejercer fuerzas en estructuras celulares, pero como los materiales biológicos son esencialmente no magnéticos, estas fuerzas suelen ser muy débiles.

Los campos magnéticos de frecuencia industrial también pueden producir efectos biológicos a través de los campos eléctricos que inducen en el organismo. Estas fuerzas eléctricas y magnéticas se dan en presencia de la agitación térmica al azar (ruido térmico) y el ruido eléctrico procedente de muchas fuentes; y para producir cambios significativos en un sistema biológico los campos aplicados deben, en general, exceder con mucho los que existen en condiciones de exposición residencial típicas.

En general, los campos o corrientes inducidas en el organismo por campos eléctricos o magnéticos de frecuencia industrial son demasiado débiles para ser nocivos; y las normas de seguridad establecidas están para proteger a las personas de la exposición a campos de frecuencia industrial que puedan inducir corrientes peligrosas. Estas normativas de seguridad para campos (al contrario de las que protegen contra descargas por contacto con los conductores) se establecen para limitar las corrientes inducidas en el cuerpo a niveles por debajo de los que se dan de forma natural en el cuerpo. Los bien conocidos riesgos de la energía eléctrica, descargas y quemaduras, generalmente precisan que el sujeto entre en contacto directo con una superficie cargada (por ejemplo, un conductor cargado y el suelo), permitiendo que la corriente pase directamente por el cuerpo.

En las discusiones sobre efectos biológicos de las emisiones electromagnéticas no ionizantes se hace a menudo una distinción entre efectos no térmicos y térmicos. Esto se refiere al mecanismo del efecto: los efectos no térmicos son resultado de una interacción directa entre el campo y el organismo (por ejemplo, procesos fotoquímicos como la visión y la fotosíntesis) y los efectos térmicos son resultado del calentamiento (por ejemplo, calentamiento con hornos microondas o luz infrarroja). Se ha informado de muchos efectos biológicos de las emisiones electromagnéticas no ionizantes cuyos mecanismos son totalmente desconocidos, y es difícil (y no muy útil) intentar distinguir entre mecanismos térmicos y no térmicos para tales efectos.

Dentro de la calle (corredor o zona de paso; en inglés, **row** o **right of way**) de una línea eléctrica de alta tensión (115-765 kV) los campos pueden alcanzar $10 \mu T$ y 10 KV/m . En el borde de la calle los campos estarán entre $0.1\text{-}1 \mu T$ y $100\text{-}1000 \text{ V/m}$. A diez metros de una línea de distribución de 12 kV los campos estarán entre $0.2\text{-}1 \mu T$ y $2\text{-}20 \text{ V/m}$. Los campos magnéticos dependen de la distancia, la tensión, el diseño y la intensidad de corriente; los campos eléctricos solo se ven afectados por la distancia, la tensión y el diseño (no por el flujo de corriente).

Dentro de las viviendas los campos pueden variar desde $150 \mu T$ y $200 V/m$ a pocos cm de determinados electrodomésticos, hasta menos de $0.02 \mu T$ y $2 V/m$ en el centro de muchas habitaciones. Los electrodomésticos que tienen los campos magnéticos más altos son aquellos que necesitan una alta intensidad de corriente (por ejemplo, aspiradoras, hornos de microondas, lavadoras, lavavajillas, batidoras, abrelatas, afeitadoras eléctricas). Los relojes y radiorelojes eléctricos, que se decía eran fuentes importantes de exposición nocturna para los niños, no tienen un campo magnético especialmente elevado ($0.04-0.06 \mu T$ a $50 cm$). Los campos de los electrodomésticos disminuyen rápidamente con la distancia. De los electrodomésticos estudiados en casas británicas, sólo los hornos microondas, las lavadoras, lavavajillas y abrelatas generaban campos superiores a $0.2 \mu T$ medidos a $1 m$ de distancia.

Como los campos eléctricos de las líneas eléctricas tienen poca capacidad de penetrar en los edificios, hay muy poca correlación entre campos eléctricos y magnéticos dentro de las casas. En particular, mientras que los campos magnéticos en el interior de edificios situados cerca de líneas eléctricas están aumentados, los campos eléctricos no parecen ser igualmente elevados.

Se han observado exposiciones laborales superiores a $100 \mu T$ y $5000 V/m$ (por ejemplo, en soldadura al arco y montadores de cables). En trabajos "eléctricos" normales la exposición media varía desde 0.5 a $4 \mu T$ y $100-2000 V/m$. Las exposiciones a campos eléctricos y magnéticos de frecuencia industrial en ambientes laborales están muy poco correlacionadas.

Los trenes eléctricos también pueden ser una importante fuente de exposición, puesto que los campos de frecuencia industrial a la altura de los asientos en los vagones de pasajeros puede llegar hasta $60 \mu T$.

Existen una serie de técnicas de ingeniería que pueden utilizarse para reducir los campos magnéticos producidos por líneas eléctricas, subestaciones, transformadores e incluso el cableado doméstico y los electrodomésticos de las casas. Sin embargo, una vez que los campos se han generado, el apantallamiento es muy difícil. Se pueden apantallar pequeñas áreas utilizando Mu-metal (una aleación de níquel-hierro-cobre), pero es muy caro. Áreas más grandes pueden apantallarse con metales más baratos, pero sigue siendo caro y, por lo general, su uso adecuado requiere considerables conocimientos técnicos.

Aumentar la altura de las torres, y por lo tanto la altura de los conductores por encima del nivel del suelo, reduce la intensidad del campo en el borde de la calle. El tamaño, espaciamiento y configuración de los conductores puede ser modificado para reducir los campos magnéticos, pero este método tiene limitaciones desde el punto de vista de la seguridad eléctrica. Si se instalan múltiples circuitos en el mismo conjunto de torres también se reduce el campo, aunque ello requiere generalmente torres más altas. Otra manera de reducir los campos magnéticos consiste en reemplazar las líneas por otras de mayor tensión.

Enterrar las líneas de transporte puede reducir de forma substancial los campos magnéticos. Esta reducción del campo magnético se debe a que las líneas subterráneas utilizan goma, plástico o aceite como material aislante en lugar de aire; esto permite que los conductores puedan situarse mucho más juntos, produciéndose una mayor cancelación de las fases. La reducción de los campos magnéticos en las líneas subterráneas no se debe al apantallamiento. Construir líneas de alta tensión subterráneas es muy caro, añadiendo costes que pueden superar el millón de dólares por milla.

La reducción del campo magnético al enterrar una línea aumenta con la distancia a la línea. En el centro del pasillo de una línea el campo generado por una línea enterrada puede ser superior que el generado por una línea aérea. Por ejemplo, en una comparación entre una línea aérea y otra subterránea de $400 kV$ el campo en el centro del pasillo era de $25 \mu T$ en la aérea y $100 \mu T$ en la subterránea, pero a 20 metros el campo era $10 \mu T$ para la aérea y $1-2 \mu T$ para la subterránea.

Diferentes métodos de cableado hogareño pueden afectar apreciablemente a los campos magnéticos dentro de las casas. Una estrategia para reducir los campos del cableado doméstico consisten en intentar evitar los bucles de tierra, y ocuparse de cómo están cableados los circuitos con múltiples interruptores. En general, las instalaciones que se hacen de acuerdo a los códigos de cableado eléctrico modernos tienen un campo magnético menor.

Algunos estudios han informado que los niños que residen cerca de ciertos tipos de líneas eléctricas (líneas de distribución de alta intensidad y líneas de transporte a alta tensión) tienen tasas de leucemia, de tumores cerebrales y/o tasa global de cáncer más alta que la media. Las correlaciones no son fuertes y, en general, los estudios no han mostrado una relación dosis-respuesta. Cuando se miden realmente los campos de frecuencia industrial, la asociación generalmente desaparece. Muchos otros estudios no han mostrado ninguna correlación entre residir cerca de las líneas eléctricas y riesgo de leucemia infantil, tumores cerebrales infantiles o tasa global de cáncer infantil.

Todos, excepto uno, los estudios más recientes sobre líneas y leucemia o tumores cerebrales infantiles han fracasado en encontrar asociaciones significativas. La excepción es un estudio canadiense que mostraba una asociación entre la incidencia de leucemia infantil y algunas medidas de la exposición.

Con dos excepciones, todos los estudios sobre correlaciones entre cáncer en adultos y residir cerca de líneas eléctricas han sido negativos. Las excepciones son Wertheimer y Leeper, quienes informaron de un exceso la tasa global de cáncer y de tumores cerebrales, pero no de leucemia; y Li y col. que hallaron un exceso de leucemia, pero no de cáncer de mama o tumores cerebrales.

Es imposible realizar una revisión sencilla de la epidemiología, porque las técnicas epidemiológicas y los métodos de evaluación de la exposición en los distintos estudios son muy diferentes. Se ha intentado el meta-análisis, un método para combinar distintos estudios, pero los resultados son problemáticos debido a la falta de consenso sobre la mejor forma de medir la exposición. La siguiente tabla resume los riesgos relativos (RR) de los estudios de exposición residencial.

Tipo de cáncer	Número de estudios	Mediana de RRs	Rango de RRs
Leucemia infantil	18	1,15	0,80-1,80
Tumor cerebral infantil	8	1,30	0,80-1,90
Linfoma infantil	7	2,00	0,80-5,00
Tasa global de cáncer infantil	6	1,40	0,90-1,70
Leucemia en adultos	6	1,15	0,85-1,65
Tumor cerebral en adultos	4	0,95	0,70-1,40
Tasa global de cáncer en adultos	8	1,10	0,80-1,35

Como base de comparación, la tasa de incidencia de cáncer en adultos, ajustada para la edad, en Estados Unidos es de 3 por 1000 por año para todos los tipos de cáncer (es decir, un 0.3% de la población desarrolla un cáncer en un año dado), y de 1 por 10000 por año para la leucemia.

Gran parte de la atención pública y científica se ha centrado en la leucemia infantil, prestando menos atención a la leucemia en adultos, tumores cerebrales en niños y en adultos, linfomas y tasa global de cáncer infantil. Los estudios originales que sugirieron una asociación entre líneas eléctricas y cáncer infantil utilizaron una combinación del tipo de cableado y la distancia a la vivienda como medida sustitutoria de la exposición, un sistema denominado "código de cables". Otros estudios han utilizado la distancia a las líneas de transporte o subestaciones como medida de la exposición, y algunos estudios han utilizado campos medidos en el momento o campos históricos calculados. En general, los diferentes métodos para evaluar la exposición

no están bien correlacionados ni entre sí ni con los campos medidos en el momento; ninguna de estas medidas de la exposición es manifiestamente superior, y ninguna es utilizada por la totalidad de los principales estudios.

Históricamente, una de las características más enigmáticas de los estudios de leucemia infantil era que la correlación de la exposición con la incidencia del cáncer parecía ser mayor cuando el código de cables o la proximidad a las líneas eléctricas se utilizaba como métrica de la exposición, más que cuando los campos eran medidos directamente en las casas. Esto ha llevado a sugerir que la asociación de cáncer infantil con residir cerca de líneas eléctricas podría ser debida a un factor distinto al campo de frecuencia industrial. Por ejemplo, se ha sugerido que el nivel socioeconómico podría ser un factor de confusión, ya que está relacionado con el riesgo de cáncer, y los grupos "expuestos" y "no expuestos" en algunos estudios pueden ser de niveles socioeconómicos distintos. Esto es particularmente importante en los estudios de exposición residencial en Estados Unidos que se basan en los códigos de cables, puesto que los tipos de código de cables relacionados con cáncer infantil se encuentran fundamentalmente en barrios más viejos y pobres, y/o en barrios con una alta proporción de casas alquiladas. Sin embargo, en 1997 y 1999, los mayores estudios realizados hasta la fecha sobre líneas eléctricas y leucemia infantil no encontraron ninguna asociación entre leucemia y código de cables o campos medidos; y los más recientes estudios sobre tumores cerebrales no han hallado ninguna relación con código de cables. Estos últimos estudios indican que la "paradoja del código de cables" no existe realmente.

Debido a la falta de consenso sobre el parámetro correcto de medida de la exposición, y a la falta de un parámetro común a la mayoría de los estudios, no se puede hacer un resumen sencillo de la epidemiología. Los intentos de hacer una revisión se han frustrado por el hecho de que no se puede realizar un único análisis. En su lugar, se obtienen un grupo de análisis basados en diferentes definiciones de exposición, la mayoría de los cuales excluyen algunos estudios, y ninguno de los cuales puede ser considerado como el mejor.

Por ejemplo, una revisión realizada en 1997 por el Consejo Nacional de Investigación de la Academia Nacional de las Ciencias de los Estados Unidos llevó a cabo un complejo meta-análisis y concluyó que: "los códigos de cables están asociados con un incremento estadísticamente significativo en, aproximadamente, un factor 1.5 de leucemia infantil". Esta conclusión está basada en sólo uno de los ocho diferentes meta-análisis sobre leucemia infantil llevados a cabo por el comité del Consejo Nacional de Investigación, un análisis que excluía siete de los once estudios y utilizaba un punto de corte arbitrario para definir quien estaba expuesto. Un segundo análisis de los mismos cuatro estudios utilizó un punto de corte superior y encontró un pequeño aumento no significativo. Los otros seis análisis realizados por el comité dieron riesgos relativos que variaban entre 0.8 y 1.7.

Los estudios de leucemia infantil en su conjunto no muestran una asociación consistente entre residir cerca de líneas eléctricas e incidencia de leucemia.

Los estudios que muestran una relación entre cáncer y líneas eléctricas no proporcionan ninguna guía consistente sobre qué distancia o nivel de exposición está asociado con un incremento en la incidencia de cáncer. Los estudios han utilizado una amplia variedad de técnicas para medir la exposición, y difieren en el tipo de líneas que han estudiado. Los estudios en Estados Unidos se han basado principalmente en líneas de distribución local, mientras que en los estudios europeos se han basado estrictamente en líneas de transporte de energía a alta tensión y/o transformadores.

Medidas de campo: Varios estudios han medido campos de frecuencia industrial en domicilios. Se han realizado medidas puntuales, de pico y promedios a lo largo de 24 horas y 48 horas. Sólo uno de los estudios que utilizan medidas del campo ha mostrado una relación entre exposición y cáncer. Dependiendo del tipo de línea y de su intensidad de corriente, los campos

magnéticos que genera a una distancia de 20-50 metros son menores que los de una vivienda típica.

Proximidad a las líneas: Muchos estudios han utilizado la distancia entre la línea y las viviendas como medida de los campos de frecuencia industrial. Cuando algo que podemos medir (la distancia a la línea) se utiliza como un índice de lo que realmente queremos medir (el campo magnético), lo denominamos "medida sustitutoria o subrogada ". Tres de los diez estudios que han utilizado la distancia a las líneas como una medida sustitutoria de la exposición han mostrado una relación entre proximidad a las líneas y cáncer. Los más importantes son un estudio en niños que mostró un incremento en la incidencia de leucemia infantil en viviendas situadas a menos de 50 m de las líneas de transporte a alta tensión, y un estudio en adultos que mostró un incremento en la incidencia de leucemia en viviendas situadas a menos de 100 metros de líneas de transporte a alta tensión.

Código de cables (o configuración de cables): Los estudios originales sobre líneas eléctricas en Estados Unidos usaban una combinación del tipo de cable (distribución frente a transporte, número y grosor de cables) y la distancia de los cables a la vivienda como medida sustitutoria de la exposición. Esta técnica se conoce como "código de cables". Tres estudios que han utilizado el código de cables han informado de una relación entre cáncer infantil y el código "configuración de alta intensidad". Dos de estos estudios no consiguieron encontrar una relación entre exposición y cáncer cuando se hicieron mediciones reales; el tercer estudio no hizo medidas reales. Los estudios más recientes sobre códigos de cables y cáncer infantil no han encontrado asociaciones significativas.

Los códigos de cables son estables a lo largo del tiempo, pero no se correlacionan bien con los campos medidos. El esquema de código de cables se desarrolló para áreas urbanas de Estados Unidos, y no es fácilmente aplicable en otros países. Se ha sugerido que los códigos de cables pueden ser una medida más apropiada para estimar los campos magnéticos a largo plazo que las medidas reales, pero los análisis han mostrado que esto es poco probable. Un problema más serio cuando se utiliza el código de cables para estimar la exposición al campo magnético es que el código de cables se correlaciona fuertemente con cosas que no tienen nada que ver con el campo magnético (como la antigüedad de la vivienda, densidad de tráfico y nivel socioeconómico).

Campos históricos calculados: Muchos estudios recientes han utilizado las bases de datos de las empresas eléctricas y mapas para calcular qué campos habrían sido generados en el pasado por líneas eléctricas de alta tensión. Normalmente, se utiliza como medida de exposición el campo calculado en el momento del diagnóstico o el campo promedio para un número de años previos al diagnóstico. Estas exposiciones calculadas excluyen explícitamente las contribuciones de otras fuentes, tales como líneas de distribución, cableado doméstico o electrodomésticos. No hay forma de comprobar la exactitud de los campos históricos calculados.

Varios estudios han publicado que las personas que trabajan en algunas profesiones eléctricas tienen una tasa más alta de lo que cabría esperar de algunos tipos de cáncer. Los estudios originales analizaron solamente leucemia. Algunos estudios posteriores también incluyeron tumores cerebrales, linfoma y/o cáncer de mama. Al igual que en los estudios residenciales, hay muchos estudios negativos, correlaciones débiles y relaciones dosis-respuesta inconsistentes. Además, muchos de esos estudios están basados en categorías laborales, no en exposiciones medidas.

El meta-análisis de los estudios laborales es todavía más difícil que para los residenciales. Primero, se utilizan varias técnicas epidemiológicas, y no se deberían combinar estudios que utilizan diferentes técnicas. Segundo, se utiliza una amplia gama de definiciones de "trabajos eléctricos", y muy pocos estudios miden realmente la exposición. Por último, no hay consenso

sobre la forma apropiada de medir la exposición. La siguiente tabla resume los riesgos relativos (RR) de los estudios de exposición laboral.

Tipo de cáncer	Número de estudios	Mediana de RRs	Rango de RRs
Leucemia (todos los estudios)	38	1,30	0,80-2,50
Leucemia (estudios basados en campos medidos)	8	1,20	0,60-2,50
Tumores cerebrales	29	1,20	0,90-2,20
Linfoma	11	1,20	0,90-1,80
Pulmón	14	1,05	0,65-1,45
Cáncer de mama en mujeres	8	1,10	0,85-1,50
Cáncer de mama en hombres	10	1,25	0,65-2,80
Todos los tipos de cáncer	15	1,05	0,85-1,15

Estudios de laboratorio

A pesar de que todavía se conoce poco sobre las causas de cánceres específicos, se comprenden lo suficientemente bien los mecanismos de la carcinogénesis como para que los estudios celulares y en animales puedan proporcionar información relevante para determinar si un agente causa o contribuye al cáncer. Actualmente, la investigación indica que la carcinogénesis es un proceso en varias fases causado por una serie de daños en el material genético de las células. No es sorprendente que este modelo se conozca como "**Modelo de carcinogénesis de múltiples etapas**".

En estudios que bordean la frontera entre epidemiología y laboratorio se pueden analizar las células blancas de la sangre (linfocitos) de trabajadores expuestos laboralmente a un agente en busca de aberraciones cromosómicas, intercambio de cromátides hermanas (SCE) o formación de micronúcleos. La interpretación de estos estudios es compleja, ya que todos tiene los mismos problemas de estimación de la dosis, factores de confusión y sesgos que caracterizan a los estudios epidemiológicos. Se han publicado algunos estudios de este tipo. A primera vista estos estudios parecen muy contradictorios, algunos estudios muestran efectos significativos y otros no.

Un aspecto estadístico de gran importancia que debe tenerse en cuenta es que todos los estudios analizan múltiples objetivos y subgrupos, creando un enorme problema de comparaciones múltiples. Skyberg y col., por ejemplo, observaron daño cromosómico en trabajadores expuestos; pero este incremento se encontró solamente en un subgrupo, y sólo en una de varias pruebas, y tiene un valor de probabilidad de sólo 0.04. Con cualquier ajuste para comparaciones múltiples, la significación estadística del efecto genotóxico observado por Skyberg y col. desaparece. El problema de las comparaciones múltiples también es aplicable a los hallazgos de Valjus y col.

Incluso con los problemas de las comparaciones múltiples, se pueden apreciar varios hechos. Los efectos observados se dan predominantemente en fumadores, grupo donde es de esperar un aumento de anomalías cromosómicas. Los efectos también se ven predominantemente en trabajadores expuestos a descargas eléctricas (las descargas eléctricas son fenómenos exclusivos de ambientes eléctricos con fuentes de alta tensión, donde los campos eléctricos alcanzan intensidades de hasta 20 kV/m, y las densidades de corriente corporales pueden alcanzar varios amperios). Finalmente, los aumentos referidos se limitan a aberraciones cromosómicas, sin efecto sobre el intercambio de cromátides hermanas (SCE); esto es algo sorprendente, ya que el análisis de SCE se considera generalmente más sensible a agentes genotóxicos que el análisis de aberraciones cromosómicas.

En resumen, los estudios citogenéticos de trabajadores expuestos a campos eléctricos y magnéticos intensos de frecuencia industrial no proporcionan evidencia consistente de que estos campos sean genotóxicos. Los indicios de efectos genotóxicos, no replicados, quedan confinados a fumadores, ex-fumadores, y a trabajadores expuestos a descargas eléctricas.

Por otra parte, los estudios en animales expuestos a largo plazo realizados hasta ahora no proporcionan pruebas que hayan sido replicadas de que la exposición prolongada a campos de frecuencia industrial esté asociada con leucemia, tumores cerebrales o cáncer de mama, o produzcan genotoxicidad. Es más, hay publicados unos 60 estudios sobre campos de frecuencia industrial y genotoxicidad, que incluyen unos 150 test distintos de actividad genotóxica. Estos análisis son mayoritariamente negativos, a pesar del hecho de que muchos han utilizado intensidades de campo muy elevadas. De los estudios que muestran indicios de genotoxicidad, la mayoría contienen una mezcla de resultados positivos y negativos, o resultados ambiguos. Como la mayoría de estas publicaciones contienen muchos subestudios, la presencia de algunos estudios con resultados positivos o mixtos es de esperar por simple azar. Ninguno de los estudios positivos ha sido replicado, y algunos de ellos no han podido ser replicados cuando se ha intentado. Muchos de los informes positivos han utilizado condiciones de exposición (por ejemplo, descargas eléctricas, campos pulsados, campos de $20T$ y superiores) que son muy diferentes de las que se encuentran en la vida real.

Además, hay poca evidencia de que los campos de frecuencia industrial tengan actividad epigenética en cultivos celulares, y ninguna evidencia de que tengan actividad epigenética bajo condiciones de exposición reales.

La hipótesis "Líneas eléctricas y melatonina": Algunos investigadores han formulado la hipótesis de que los campos de frecuencia industrial podrían suprimir la producción de la hormona melatonina, y que la melatonina podría tener actividad preventiva frente al cáncer. Existen informes de que los campos eléctricos y los campos magnéticos estáticos pueden afectar a la producción de melatonina, pero los estudios que han usado campos magnéticos de frecuencia industrial han mostrado claramente la ausencia de tales efectos. El segundo componente de la hipótesis, que niveles bajos de melatonina están asociados con un incremento de cáncer, tampoco está probado. En resumen, ninguno de los componentes de la hipótesis de la melatonina, es decir, que los campos de frecuencia industrial puedan reducir la melatonina, o que la reducción de la melatonina cause un incremento de cáncer, tienen un soporte experimental sólido. En seres humanos, no hay evidencias para apoyar ninguna de los componentes de la hipótesis. Lo que la evidencia sugiere es que cualquier efecto se limitaría al cáncer de mama, y posiblemente en otros cánceres hormonodependientes, como el cáncer de próstata.

Los mecanismos biológicos conocidos, a través de los cuales campos magnéticos de frecuencia industrial intensos (por encima de $500 \mu T$) causan efectos biológicos, no son relevantes para campos por debajo de, aproximadamente, $50 \mu T$. Los efectos de campos intensos tienen que ver con las corrientes eléctricas inducidas, y las corrientes inducidas en el organismo por campos menores de $50 \mu T$ son cualitativamente similares, pero mucho más débiles que las que se dan en el cuerpo de forma natural.

Las interacciones de los campos sinusoidales de frecuencia industrial con el cuerpo humano son muy débiles a los niveles ambientales típicos. Numerosos investigadores han especulado acerca de cómo los campos de frecuencia industrial podrían superar los problemas de la relación señal-ruido a través mecanismos de resonancia o de amplificación de señales:

Corrientes inducidas: Los campos eléctricos y magnéticos de frecuencia industrial pueden inducir corrientes eléctricas, y estas corrientes pueden producir efectos biológicos si son lo suficientemente fuertes. Sin embargo, las corrientes inducidas en el organismo por campos por debajo de $1 kV/m$ ó $50 \mu T$ son más débiles que los que existen de forma natural en el organismo. Por lo tanto, si los campos sinusoidales de frecuencia industrial de la magnitud que se encuentra en ambientes residenciales tienen efectos biológicos, es poco probable que sean debidos a las corrientes eléctricas inducidas.

Material biológico magnético: Se han encontrado pequeñas partículas magnéticas (magnetita Fe_3O_4) en bacterias que se orientan en el campo magnético de la Tierra; estas partícu-

las pueden también existir en peces, abejas y aves. La presencia de magnetita en las células de los mamíferos está todavía sin demostrar. Kirschvink ha sugerido que los campos magnéticos de frecuencia industrial podrían causar efectos biológicos al actuar directamente sobre estas partículas. Sin embargo, los cálculos muestran que eso requeriría campos de 50-60 Hz de 2-5 microT o superiores.

Reacciones con radicales libres: Los campos magnéticos estáticos (DC) pueden afectar al ritmo de las reacciones químicas donde intervengan pares de radicales libres. Como los radicales libres implicados tienen un tiempo de vida media en el rango de microsegundos y los campos de frecuencia industrial tienen ciclos en el rango de milisegundos, un campo de frecuencia industrial actúa como un campo estático en la escala de tiempo en la que estas reacciones tienen lugar. Los efectos de los campos de frecuencia industrial se sumarían a los del campo magnético terrestre (30-70 μT), por lo que no es de esperar efectos biológicos por debajo de 50 μT . Además, si se supone que los efectos biológicos provocados por estas reacciones con radicales libres estuvieran implicados en la carcinogénesis, los estudios relevantes serían los que utilizan campos estáticos; y los estudios sobre actividad genotóxica y epigenética de los campos estáticos han sido negativos en su inmensa mayoría (ver más arriba). Eichwald y Walleczek han desarrollado un argumento teórico que sugiere que los efectos bioquímicos mediados por el mecanismo de pares de radicales podría explicar los efectos de campos de frecuencia industrial de 1000 μT o superiores. Adair, por el contrario, ha presentado argumentos teóricos de que los efectos debidos al mecanismo de pares de radicales son bastante improbables a niveles de 5 μT o inferiores.

Teorías de resonancia: Algunas de las restricciones biofísicas podrían ser superadas si hubiera mecanismos de resonancia que hicieran a las células (u organismos) especialmente sensibles a los campos de frecuencia industrial. Se han propuesto diversos mecanismos de resonancia, el más reciente por Lednev y por Blanchard y Blackman. Hasta ahora, ninguna de estas teorías ha superado la crítica científica, y muchas de las evidencias experimentales que dieron lugar a estas teorías no pueden ser replicadas de forma independiente. Existen también severas incompatibilidades entre las características biofísicas conocidas de las células y las condiciones requeridas por dichas resonancias. Hay que señalar que las teorías de resonancia predecirían efectos biológicos distintos en Estados Unidos (60 Hz) que en el resto del mundo (50 Hz).

Los campos cercanos a electrodomésticos con motores eléctricos de corriente alterna (AC) pueden superar los 100 μT y 200 V/m. Si estos electrodomésticos se utilizan muy cerca del cuerpo, como por ejemplo maquinillas de afeitar eléctricas y secadores de pelo, pueden darse exposiciones muy altas en partes concretas del cuerpo. Se han realizado estudios epidemiológicos sobre la relación existente entre uso de electrodomésticos y cáncer. Estos estudios han mostrado una relación muy poco consistente entre el uso de electrodomésticos y cáncer, aunque uno de estos estudios ha mostrado una disminución de leucemias entre los adultos usuarios de electrodomésticos personales.

Estudios Recientes

En 1993-94 se publicaron cinco nuevos estudios residenciales en Europa. El estudio sueco sobre niños mostró los riesgos relativos más altos y obtuvo la mayor atención. En contraste con los estudios previos en Estados Unidos, que estimaron la exposición procedente de líneas tanto de transporte como de distribución, estos nuevos estudios se restringieron a líneas y subestaciones de alta tensión. La exposición se estimó con medidas puntuales, cálculos retrospectivos y distancia a las líneas eléctricas.

Los autores de los tres estudios escandinavos sobre cáncer en niños han efectuado un análisis combinado de sus datos. Este análisis está basado en los campos históricos calculados retrospectivamente, que fue la única medida común de exposición en los tres estudios. Los rangos

de riesgos relativos (RR) de este meta-análisis se muestran a continuación en comparación con los estudios anteriores y posteriores.

Tipo de Cáncer infantil	Rango de RRs en los estudios previos	Rango de RRs en los estudios escandinavos	Rango de RRs en los estudios posteriores
Leucemia	0.9-2.2	1.0-3.9	0.7-2.0
Linfoma	ninguno	0.3-3.7	1.2-2.5
Tumores cerebrales	1.7-3.5	0.7-3.2	0.6-1.4
Tasa global de cáncer	1.3-1.9	0.9-2.1	0.9-1.3

Dos estudios de 1996 sobre tumores cerebrales infantiles y residir cerca de líneas eléctricas no mostraron evidencia de una asociación ni con campos medidos ni con el código de cables. Un estudio europeo de 1997 sobre leucemia infantil, linfoma, tumores cerebrales y tasa global de cáncer no muestra evidencia alguna de asociación ni con la distancia a líneas eléctricas ni con los campos calculados. En 1997 un segundo estudio europeo encontró un aumento no significativo de leucemia en niños cuyos dormitorios tenían un promedio de campo magnético superior a $0.2 \mu T$. Un tercer estudio de 1997 no encontró asociación entre leucemia infantil con campos medidos ni códigos de cable. Un estudio de 1999 no halló una asociación entre leucemia infantil con campos medidos ni con código de cables.

Los estudios escandinavos en adultos que viven cerca de líneas de alta tensión no muestran incrementos en la tasa global de cáncer, leucemia o tumores cerebrales. Tan sólo el estudio de 1997 en Taiwan muestra algún indicio de asociación entre cáncer en adultos y residir cerca de líneas de transporte de energía eléctrica.

Se dice frecuentemente que Suecia o Dinamarca han decidido establecer una legislación sobre los niveles de campo magnético generados por las líneas de transporte de energía eléctrica, o que han decidido trasladar líneas lejos de los colegios. Sin embargo, declaraciones oficiales en ambos países a lo largo de los años muestran que ni están legislando respecto a los campos de las líneas ni trasladando líneas lejos de las escuelas.

En 1996 el gobierno Sueco anunció un "**principio de cautela**" o "**principio precautorio**":

- "Las autoridades nacionales [Suecas] recomiendan un principio de cautela basado principalmente en riesgos de cáncer que no se pueden descartar..."
- "Las investigaciones presentadas hasta el momento no proporcionan una base ni justifican el establecimiento de ningún valor límite u otras restricciones obligatorias sobre los campos eléctricos y magnéticos de baja frecuencia..."
- " Las autoridades nacionales se unen en recomendar los siguientes principios de cautela: Si se pueden adoptar medidas que reduzcan la exposición, con un gasto razonable y con consecuencias razonables en todos los demás aspectos, se debería hacer un esfuerzo para reducir los campos que estén muy por encima de lo que puede considerarse como normal en el ambiente en cuestión. En lo que concierne a nuevas instalaciones eléctricas, los esfuerzos deben hacerse en el momento de planificación, para diseñarlas y situarlas de forma que se limite la exposición..."

La declaración sueca incluye algunos ejemplos en los que se ha intentado medir el coste de la mitigación. Asumiendo una incidencia de leucemia infantil de 1 caso por 25.000 y año, y un riesgo relativo de 2,7; el coste de cada caso evitado varía entre 200.000 y 50.000.000 dólares estadounidenses. Para poner esto en perspectiva, el documento hace notar que se considera razonable gastar hasta 1.000.000 dólares para evitar una muerte debida a exposición a radiación ionizante.

Un estudio caso-control sobre líneas eléctricas y leucemia infantil, realizado por el Instituto Nacional del Cáncer de Estados Unidos, fue publicado en julio de 1997. Este era el mayor es-

tudio realizado hasta esa fecha, y no encuentra ninguna asociación entre campos medidos y leucemia infantil, ni entre códigos de cables y leucemia infantil.

- Para una media ponderada en el tiempo superior a $0.2 \mu\text{T}$ en los dormitorios, el estudio encuentra un riesgo relativo de $1.2 (0.9-1.8)$, con una tendencia estadísticamente no significativa.
- Para una "configuración muy alta intensidad" de código de cables (según lo definen Wertheimer y Leeper) el estudio encuentra un riesgo relativo de $0.9 (0.5-1.6)$.

El estudio era especialmente importante por la conclusión de un informe de la Academia Nacional de las Ciencias de Estados Unidos de 1996 que decía que la única evidencia epidemiológica para asociar líneas eléctricas y cáncer era la asociación entre categorías altas de códigos de cable y leucemia. El informe de la Academia Nacional de las Ciencias daba un riesgo relativo de $1.5 (1.2-1.8)$ para esta asociación, basándose en los cuatro estudios previos. Para esta misma definición de exposición, este estudio del Instituto Nacional del Cáncer encuentra un riesgo relativo de $1.0 (0.7-1.3)$.

McBride y col. (1999) es el estudio más amplio realizado hasta la fecha (399 casos y 399 controles emparejados), y no encuentra evidencia de ninguna asociación entre líneas eléctricas y leucemia infantil. El estudio es notable por su tamaño y por el amplio rango de métricas de la exposición probadas. Junto con el estudio del Instituto Nacional del Cáncer de Estados Unidos de 1997, este nuevo estudio en esencia elimina todas las bases de la sugerencia de una asociación causal entre exposición a campos generados por las líneas eléctricas y la incidencia de leucemia infantil.

Los hallazgos del estudio de McBride y col. son:

- Los campos medidos con monitores personales (promedios de 48 horas) no estaban asociados con leucemia infantil, sino con:
 - un riesgo relativo de $0.6 (0.3-1.2)$ para aquellos con la exposición más elevada a campos magnéticos (superior a $0.27 \mu\text{T}$).
 - un riesgo relativo de $0.8 (0.5-1.5)$ para aquellos con la exposición más elevada a campos eléctricos (superior a 25 V/m).
- Los campos reales medidos en las viviendas no estaban asociados con leucemia infantil, sino con:
 - un riesgo relativo de $0.7 (0.4-1.3)$ para aquellos con la exposición más elevada a campos magnéticos (superior a $0.27 \mu\text{T}$).
- Las reconstrucciones históricas del campo magnético no estaban asociadas con leucemia infantil, sino con:
 - un riesgo relativo de $0.6 (0.3-1.1)$ para aquellos con la exposición más elevada 2 años antes del diagnóstico (superior a $0.27 \mu\text{T}$).
 - un riesgo relativo de $1.0 (0.6-1.9)$ para aquellos con la exposición media durante toda la vida más alta (superior a $0.27 \mu\text{T}$).
- Los códigos de cables no están asociados con leucemia infantil, sino con:
 - un riesgo relativo de $1.2 (0.6-2.3)$ para aquellos que residían en el momento del diagnóstico en una vivienda con una "configuración de muy alta intensidad" (según lo definen Wertheimer y Leeper).
 - un riesgo relativo de $0.8 (0.4-1.6)$ para aquellos que residían 2 años antes del diagnóstico en una vivienda con una "configuración de muy alta intensidad" (según lo definen Wertheimer y Leeper).
 - un riesgo relativo de $1.2 (0.7-1.9)$ para aquellos que residían en el momento del diagnóstico en una vivienda con una "configuración de alta intensidad" (según lo definen Kaune y Savitz).

El informe del NIEHS de 1999

La revisión de 1999 de la Academia Nacional de las Ciencias proporciona una visión de conjunto del amplio trabajo de laboratorio realizado en el programa **EMF-RAPID** de Estados Unidos, gran parte del cual no ha sido publicado todavía. El informe de 1999 del NIEHS para el Congreso de los Estados Unidos proporciona una compacta revisión de los campos de frecuencia industrial y la salud (**NIEHS1999.PDF**).

Del resumen ejecutivo:

La evidencia científica que sugiere que la exposición [a campos de frecuencia industrial] supone un riesgo para la salud es débil. La evidencia más fuerte de efectos en la salud proviene de asociaciones observadas en poblaciones humanas con dos formas de cáncer: leucemia infantil y leucemia linfocítica crónica en adultos profesionalmente expuestos. Mientras que el apoyo por parte de estudios individuales es débil, los estudios epidemiológicos muestran, para algunos métodos de medir la exposición, un patrón claramente consistente de un pequeño incremento del riesgo con el incremento de la exposición, que es algo más débil para la leucemia linfocítica crónica que para la leucemia infantil. Por el contrario, los estudios sobre mecanismos y la literatura sobre toxicología animal no consiguen mostrar ningún patrón consistente a lo largo de los estudios, aunque se ha informado de hallazgos esporádicos de efectos biológicos (incluyendo un incremento de cáncer en animales). No se ha observado ningún incremento de leucemias en animales de experimentación...

Los estudios epidemiológicos tienen serias limitaciones en su capacidad para demostrar una relación causa-efecto, mientras que los estudios de laboratorio, por su diseño, pueden mostrar claramente que causa y efecto son posibles. Virtualmente toda la evidencia de laboratorio en animales y humanos y la mayor parte del trabajo sobre mecanismos realizado en células no consiguen apoyar una relación causal entre exposición a niveles ambientales [de campos de frecuencia industrial] y cambios en la función biológica o enfermedades. La ausencia de hallazgos positivos en animales o en estudios sobre mecanismos debilita la creencia de que esta asociación [epidemiológica] sea realmente debida a campos de frecuencia industrial, pero los hallazgos epidemiológicos no pueden ser completamente desestimados.

El NIEHS concluye que la exposición [a campos de frecuencia industrial] no puede ser reconocida como completamente segura debido a la débil evidencia científica de que puede suponer un riesgo de leucemia. En nuestra opinión, este hallazgo es insuficiente para justificar el establecimiento de regulaciones agresivas. Sin embargo, puesto que virtualmente todo el mundo en Estados Unidos utiliza la energía eléctrica y, por lo tanto, está expuesto de forma rutinaria [a campos de frecuencia industrial], se justifican acciones regulatorias pasivas, como un énfasis continuado en la educación tanto del público como de la comunidad de cara a una reducción de la exposición.

De las Conclusiones y Recomendaciones del informe del NIEHS para el Congreso:

Como parte de la evaluación del programa EMF-RAPID sobre los efectos relacionados con la salud [de los campos de frecuencia industrial], un panel internacional de 30 científicos se reunió en junio de 1998 para revisar el peso de las evidencias científicas. Utilizando un criterio desarrollado por la Agencia Internacional para la Investigación sobre el Cáncer, ninguno de los miembros del Grupo de Trabajo consideró que la evidencia fuera suficientemente fuerte para etiquetar la exposición [a campos de frecuencia industrial] como un "conocido cancerígeno para humanos" o "probable cancerígeno para humanos". Sin embargo, la mayoría de los miembros de este grupo de trabajo (19 de los 28 miembros) concluyeron que la exposición a [los campos electromagnéticos generados por] las líneas eléctricas es un "posible cancerígeno para humanos". Esta decisión se basa fundamentalmente en la "limitada evidencia de un incremento del riesgo de leucemia infantil con la exposición residencial y un incremento de la incidencia de leucemias linfocíticas crónicas (CLL) asociado con la exposición laboral". Para otros cánceres o problemas de salud no relacionados con cáncer, el grupo de trabajo catalogó los datos experimentales como que proporcionan una

evidencia mucho más débil o ningún apoyo para efectos debidos a la exposición [a campos de frecuencia industrial].

El NIEHS coincide en que las asociaciones de leucemia infantil y leucemia linfocítica crónica observadas no pueden ser descartadas fácilmente como hallazgos debidos al azar o negativos. La falta de hallazgos positivos en animales o en estudios sobre mecanismos debilita la creencia de que esta asociación sea realmente debida a los campos de frecuencia industrial, pero este hallazgo no puede ser completamente desestimado. El NIEHS también está de acuerdo con la conclusión de que no hay suficiente evidencia de un riesgo de otros cánceres o problemas de salud no relacionados con cáncer para justificar la preocupación...

El Programa Nacional de Toxicología examina periódicamente las exposiciones ambientales para determinar hasta que punto constituyen un riesgo de cáncer para la salud y genera el "Informe sobre cancerígenos", un listado de agentes que son "conocidos cancerígenos para humanos" o "razonablemente se prevé que sean cancerígenos para humanos". En nuestra opinión, basándonos en la evidencia disponible hasta la fecha, la exposición [a campos electromagnéticos de frecuencia industrial] no estaría incluido en el "Informe sobre cancerígenos" como un agente que "razonablemente se prevé que sea cancerígeno para humanos". Esto se basa en la limitada evidencia epidemiológica y en los hallazgos del programa EMF-RAPID que no indicaban un efecto de la exposición [a campos electromagnéticos de frecuencia industrial] en animales experimentales o una base para un mecanismo para la carcinogénesis.

En relación a posibles acciones regulatorias, el informe del NIEHS para el Congreso indica:

El NIEHS sugiere que el nivel y la fuerza de la evidencia que apoya que la exposición [a campos de frecuencia industrial] es un peligro para la salud humana son insuficientes para justificar acciones regulatorias agresivas; por lo tanto, no recomendamos acciones como una normativa estricta sobre electrodomésticos y un programa nacional para enterrar todas las líneas de transporte y distribución. En su lugar, la evidencia sugiere medidas pasivas como un énfasis continuado en la educación tanto del público como de la comunidad de cara a una reducción de la exposición. El NIEHS sugiere que la industria eléctrica continúe con sus prácticas actuales al instalar líneas eléctricas para reducir la exposición y continúe investigando maneras de reducir la generación de campos magnéticos alrededor de las líneas de transporte y distribución sin crear nuevos riesgos. También alentamos el uso de tecnologías que reduzcan la exposición debida a líneas de distribución locales, siempre que no se incrementen otros riesgos, como los de electrocución accidental o fuego.

Conclusiones

De los estudios científicos se pueden extraer ciertas conclusiones:

- Existe un amplio consenso en la comunidad científica de que no se ha establecido una relación causal entre exposición residencial a campos de frecuencia industrial y riesgos para la salud humana.
- Existe un amplio consenso respecto a que **no ha sido y no puede ser demostrado que la exposición a estos campos sea absolutamente segura.**
- También existe un creciente consenso de que si hay un peligro para la salud, éste o es muy pequeño o está restringido a pequeños subgrupos; es decir, la posibilidad de un riesgo grande y generalizado ha sido descartada.
- La controversia científica se centra en si la peligrosidad de los campos de frecuencia industrial puede ser demostrada en futuros estudios; y otros aspectos, como qué estudios adicionales deben realizarse y qué prioridad hay que dar a estos estudios.

Un cierto número de organizaciones profesionales y gubernamentales han publicado recomendaciones de exposición. Las más relevantes son las emitidas por el Consejo Nacional de Protección Radiológica del Reino Unido (National Radiological Protection Board, **NRPB-UK**), la Comisión Internacional de Protección Contra la Radiación No Ionizante (International Commission on Non Ionizing Radiation Protection, **ICNIRP**), y la Conferencia Americana de Higie-

nistas Industriales Gubernamentales (American Conference of Governmental Industrial Hygienists, **ACGIH**).

Un resumen de estas recomendaciones es:

- Residencial
 - NRPB-UK:
 - 50 Hz: 1600 μT (16 G) y 12 kV/m
 - 60 Hz: 1330 μT (13.3 G) y 10 kV/m
 - Este documento también contiene recomendaciones para otras frecuencias.
 - ICNIRP
 - 50 Hz: 100 μT (1 G) y 5 kV/m
 - 60 Hz: 84 μT (0.84 G) y 4.2 kV/m
 - Este documento también contiene recomendaciones para otras frecuencias
- Industrial
 - NRPB-UK:
 - 50 Hz: 1600 μT (16 G) y 12 kV/m
 - 60 Hz: 1330 μT (13.3 G) y 10 kV/m
 - Este documento también contiene recomendaciones para otras frecuencias.
 - ACGIH:
 - A 60 Hz: 1000 μT (10 G)
 - Este documento también contiene recomendaciones para otras frecuencias.
 - ICNIRP
 - 50 Hz: 500 μT (5 G) y 10 kV/m
 - 60 Hz: 420 μT (4.2 G) y 8.3 kV/m
 - Este documento también contiene recomendaciones para otras frecuencias.

El funcionamiento de los marcapasos puede verse afectado por campos de frecuencia industrial. En algunos ambientes laborales pueden existir campos lo suficientemente elevados como para interferir con el funcionamiento de los marcapasos, y puede que incluso existan en algunos ambientes no laborales. La sensibilidad de los marcapasos cardíacos y la gravedad de los efectos dependen mucho del diseño y modelo. Esta es probablemente una situación en la que el campo eléctrico es por lo menos tan importante como el campo magnético.

ICNIRP calculó que campos de frecuencia industrial de 15 μT podían originar interferencias, pero declaró que sólo existe una "pequeña probabilidad" de un mal funcionamiento por debajo de 100-200 μT . NRPB-UK declaró que "es poco probable que ocurran interferencias" por debajo de 20 μT . ACGIH establece un límite laboral formal para portadores de marcapasos de 100 μT . Basándonos en estas fuentes, parece poco probable que una línea eléctrica produzca interferencias.

Sin embargo, por lo menos un estudio de marcapasos muestra que campos elevados de frecuencia industrial de 5000 V/m podrían causar interferencias en algunos modelos; y otro sugiere que puede haber interferencias con un campo eléctrico de 1500 V/m. Campos eléctricos tan altos no se dan en la gran mayoría de las viviendas o en las cercanías de una línea de distribución, pero este nivel podría sobrepasarse justo debajo de una línea de transporte a alta tensión.

Los portadores de marcapasos que trabajen o vivan en ambientes donde haya instalaciones capaces de producir una interferencia significativa deberían informar al médico que les realizó el implante. Debe aconsejarse a los portadores de marcapasos que tengan cierta precaución cuando estén cerca de líneas de transporte de energía eléctrica, en especial líneas con voltajes

de 230 KV o superiores. Las mismas precauciones son, probablemente, aplicables a defibriladores y dispositivos biomédicos implantables.

En 1999 la Academia Nacional de las Ciencias de Estados Unidos hizo unos comentarios adicionales sobre el tema, cuando se les pidió que revisaran la investigación dirigida por NIEHS bajo la Energy Policy Act de 1992 (el programa denominado **EMF-RAPID**). En este informe la Academia Nacional de las Ciencias concluyó:

- "El programa de investigación biológica de NIEHS llegó a dos importantes conclusiones que reducen en cierta manera la preocupación sobre si el uso de la energía eléctrica podría tener efectos nocivos para la salud...
 - La primera contribución fue el esfuerzo para replicar los informes anteriores de efectos biológicos... Todos los intentos de replicación en el programa EMF-RAPID han dado resultados negativos o equívocos...
 - La segunda contribución importante fue la finalización de varias investigaciones sobre la relación entre exposición a campo magnético y cáncer a través de experimentos controlados de laboratorio en animales. Casi todos los estudios en animales relevantes para la cuestión del cáncer [y los campos de frecuencia industrial] han aportado resultados negativos incluso a niveles de campo varios órdenes de magnitud más elevados que los niveles típicos de exposición humana."
- "La investigación biológica del EMF-RAPID ha aportado poca evidencia que apoye la hipótesis de que existe una relación entre campos de frecuencia industrial y cáncer...
 - Los resultados *in vivo* no apoyan la existencia de un efecto [de los campos de frecuencia industrial] en la iniciación, promoción o progresión del cáncer...
 - No existe evidencia ningún efecto fuerte y replicado sobre el desarrollo del cáncer."
- "Los resultados del programa EMF-RAPID no apoyan la suposición de que el uso de la energía eléctrica suponga un gran riesgo no reconocido para la salud pública."
- "El comité recomienda que se financie ningún programa de investigación especial adicional sobre los posibles efectos en la salud de los campos magnéticos de frecuencia industrial."

Más información y citas bibliográficas sobre la influencia de los campos electromagnéticos de baja frecuencia sobre la salud en:

<http://www.mcw.edu/gcrc/cop/powerlines-cancer-FAQ/QandA.html>

de donde se ha tomado el texto (copyright © 1996-1999 de [John Moulder, Ph.D.](#) y el Medical College of Wisconsin)

Campos electromagnéticos de alta frecuencia (RF)

Existe gran cantidad de estudios sobre la efectos biológicos y sobre la salud de la exposición a campos de RF . De estos estudios existe un consenso científico sobre los siguientes puntos clave:

- La investigación sobre ondas de radio es amplia y adecuada para establecer normas de seguridad.
- La exposición a ondas de radio puede ser peligrosa si es lo suficientemente intensa. Los posibles daños incluyen cataratas, quemaduras de piel, quemaduras internas y golpes de calor.
- La mayoría, si no todos los efectos biológicos conocidos por exposición a fuentes de radiofrecuencias de alta potencia son debidos al calentamiento. Ha habido algunos informes aislados de efectos que no parecen ser debidos al calentamiento, los denominados **efectos no térmicos**. Ninguno de estos efectos han sido replicados de forma independiente, y ninguno tiene conexiones obvias con riesgos para la salud humana.
- Los efectos biológicos de las ondas de radio dependen de la tasa de energía absorbida; y dentro de un amplio rango de frecuencias (de 1 a 10000 MHz), la frecuencia no tiene casi importancia.
- Los efectos biológicos de las ondas de radio son proporcionales a la tasa de energía absorbida; y la duración de la exposición no tiene casi importancia.
- No se han detectado efectos reproducibles por debajo de una cierta tasa de energía absorbida en todo el cuerpo.

Basándose en este consenso científico, diferentes organismos y países han tomado diferentes enfoques para establecer normas de seguridad. Un enfoque típico es el usado por **ANSI/IEEE** y por **FCC**.

ANSI/IEEE y **FCC** aplican un factor de seguridad de 10 para establecer recomendaciones de exposición laboral. Y después aplican un factor de seguridad adicional de 5 para exposición continua del público en general. Finalmente, se ha llevado a cabo estudios detallados para establecer una relación entre densidad de potencia, que puede ser medida de forma rutinaria, y absorción de energía, que realmente es lo que importa.

El resultado fue una recomendación de exposición muy conservadora, que fija un nivel que tan sólo es el 2% del nivel en el que se han observado realmente efectos biológicos reproducibles.

Para el caso de la telefonía celular (antenas y aparatos), otras normas han sido producidas por la Comisión Internacional sobre Radiación No Ionizante (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection - **ICNIRP**), y el Consejo Nacional de Protección Radiológica y Medidas (National Council on Radiation Protection and Measurements - **NCRP**).

Estas normas sobre radiofrecuencias se expresan en densidad de potencia en onda plana, que se mide en mW/cm^2 (milivatios por centimetro cuadrado). Para antenas de PCS, la norma **ANSI/IEEE** de 1992 sobre exposición del público en general es $1.2 mW/cm^2$. Para teléfonos celulares, la norma **ANSI/IEEE** para exposición del público en general es $0.57 mW/cm^2$. Las normas de **ICNIRP** son ligeramente más bajas y las de **NCRP** son esencialmente idénticas.

En 1996, la Comisión Federal de Comunicaciones de Estados Unidos (U.S. Federal Communications Commission - **FCC**) publicó unas recomendaciones para las radiofrecuencias que ellos regulan, incluyendo antenas de estaciones base de telefonía celular y PCS, esencialmente idénticas a las de **ANSI/IEEE**.

Las normas de exposición pública afectan sólo a las densidades de potencia promediadas sobre periodos de tiempo relativamente cortos, 30 minutos en el caso de las normas de **ANSI/IEEE**,

NCRP y **FCC** (a frecuencias de telefonía celular y PCS¹⁰). Si hay múltiples antenas, estas normas se aplican a la potencia total producida por todas las antenas.

Con un diseño adecuado, las antenas de estaciones base de telefonía celular y PCS pueden cumplir todas las normas de seguridad con un amplio margen.

Una antena de estación base de PCS y/o celular, instalada a 40 pies [12.2 m] por encima del suelo y funcionando a la máxima intensidad posible, podría producir una densidad de potencia de hasta 0.02 mW/cm^2 en el suelo cerca del emplazamiento de la antena; pero las densidades de potencia a nivel de suelo generalmente estarán en el rango de 0.0001 a 0.005 mW/cm^2 . Estas densidades de potencia están muy por debajo de todas las normas de seguridad, y las propias normas están muy por debajo de los niveles donde se ha observado peligros potenciales.

A menos de unos 500 pies [152.4 m] del emplazamiento de la antena la densidad de potencia puede ser mayor en sitios más elevados que la base de la antena (por ejemplo, en el segundo piso de un edificio o en una colina). Incluso con múltiples antenas, y con antenas tanto de telefonía celular como de PCS en la misma torre, las densidades de potencia estarán por debajo del 2% de las recomendaciones para todas las alturas y distancias a partir de 170 pies [51.8 m] del emplazamiento de la antena.

A partir de 500 pies [152.4 m] del emplazamiento de la antena la densidad de potencia no se incrementa al aumentar la elevación.

La densidad de potencia en el interior de un edificio será de 3 a 20 veces más baja que en el exterior.

Peterson y col. han medido la densidad de potencia alrededor de estaciones base de telefonía móvil. Las mediciones se realizaron en antenas de baja ganancia de 1600 W (ERP) instaladas en torres entre 120 y 250 pies [entre 36.6 y 76.2 m] de altura. La máxima densidad de potencia en el suelo era 0.002 mW/cm^2 , y estaba a una distancia de 50-200 pies [15.2-61.0 m] de la base de las torres. A menos de 300 pies [91.4 m] de la base de las torres la densidad de potencia media estaba por debajo de 0.001 mW/cm^2 .

Hay algunas circunstancias en las cuales un diseño inapropiado de las antenas de estaciones base de telefonía celular y PCS podrían incumplir las normas de seguridad.

Las normas de seguridad para exposición incontrolada (público) podrían incumplirse si las antenas se instalaran de tal manera que el público tuviera acceso a zonas situadas a menos de

¹⁰ Los teléfonos PCS (Personal Communication System) son radiotelefonos portátiles que utilizan un sistema de transmisión digital en vez de analógico, utilizado por la mayoría de los teléfonos celulares. En Estados Unidos, los teléfonos celulares operan a 860-900 MHz, mientras que los teléfonos PCS operan a 1.800-2.200 MHz. En apariencia, los teléfonos celulares y PCS y sus antenas de estaciones base son similares. En EEUU, los teléfonos inalámbricos operan a 46-60 MHz y los emisores/receptores en "banda ciudadana (BC)" operan a unos 27 MHz.

Nota internacional: En todo el mundo se utilizan una gama de frecuencias distintas para los transmisores/receptores portátiles y radiomóviles, tanto analógicos como digitales, y se dan distintos nombres a los sistemas. Las frecuencias más comunes para sistemas "celulares" son 800-900 MHz (analógico y digital) y 1.800-2.000 MHz (digital), pero existen transmisores/receptores portátiles que utilizan frecuencias desde 25 MHz hasta 2.500 MHz. La potencia de salida de las unidades portátiles raramente superan 5 W, pero la potencia de salida de las unidades instaladas en vehículos, como los empleados por las fuerzas de seguridad, pueden llegar a 100 W.

Canadá: Los teléfonos analógicos y digitales operan desde 824 a 849 MHz. Pronto se pondrá en funcionamiento un sistema digital a 2.000 MHz (similar o idéntico al servicio PCS en EEUU).

Australia: Los teléfonos analógicos AMPS operan a 825-890 MHz, y los digitales GSM operan a 890-960 MHz.

Europa: Los sistemas analógicos operan a unos 900 MHz, y los sistemas digitales (GSM) operan tanto a 900 MHz como a 1.800 MHz.

3. Las frecuencias específicas utilizadas por teléfonos celulares y PCS pueden denominarse microondas (MW), radiofrecuencias (RF) u ondas de radio. Para un examen de los efectos en la salud, la distinción entre ondas de radio y microondas es semántica, y el término ondas de radio (o radiofrecuencias o RF) se emplea en este documento para todas las frecuencias entre 3 kHz and 300 GHz.

20 pies [6 m] de las propias antenas. Esto podría producirse en antenas instaladas en, o cerca de, las azoteas de los edificios.

Las normas de seguridad para exposición controlada (laboral) también podrían incumplirse si las antenas se instalaran en una estructura donde se requiera el acceso de trabajadores a zonas situadas a menos de 10 pies [3 m] de la antena. Peterson y col., por ejemplo, han hallado que a 2-3 pies [0.6-0.9 m] de una antena de baja ganancia de 1600 W (ERP) instalada en la azotea, la densidad de potencia alcanzaba 2 mW/cm^2 (comparado con la norma ANSI de exposición del público de 0.57 mW/cm^2).

En un estudio que recibió una gran atención por parte de la prensa antes de que se publicara, Hardell y col. evaluaron el uso de teléfonos móviles en varios cientos de pacientes suecos con tumores cerebrales. No encontraron un incremento del riesgo de tumores cerebrales entre los usuarios de teléfonos móviles, con una razón de proporciones de 0.8-1.2 (es decir, no hay efecto). No se observó un incremento de la incidencia de tumores cerebrales en usuarios de teléfonos analógicos (NMT) ni digitales (GSM) y no había una tendencia a un incremento del riesgo al aumentar los años de uso o las horas de uso por año. Cuando se analizaron los datos teniendo en cuenta únicamente los tumores cerebrales en el lado de la cabeza en el que se usaba el teléfono, no había un incremento de la incidencia de tumores cerebrales. Los autores informan de que los usuarios de teléfonos móviles tenían más predisposición a contraer ciertos tipos de tumores cerebrales en el lado de la cabeza en el que se usaba el teléfono, pero la tendencia no era estadísticamente significativa, y sólo se halló entre los usuarios de teléfonos analógicos (sólo este último hallazgo fue mencionado en la mayoría de los artículos de prensa).

La ausencia de asociaciones entre exposición a ondas de radio y la tasa global de cáncer, y la falta de asociaciones consistentes entre exposición a ondas de radio y cualquier tipo específico de cáncer, sugiere que no es probable que las ondas de radio tengan una influencia causal fuerte sobre el cáncer.

En su reciente revisión de la literatura epidemiológica sobre radiofrecuencias, Elwood concluyó que:

Se ha informado de varias asociaciones positivas sugiriendo un incremento del riesgo de algunos tipos de cáncer entre aquellos que tienen una mayor exposición a emisiones de radiofrecuencia. Sin embargo, los resultados son inconsistentes: ningún tipo de cáncer ha sido asociado de forma consistente con la exposición a radiofrecuencias. La evidencia epidemiológica no tiene la fuerza y la consistencia necesaria para llegar a una conclusión razonable de que las emisiones de radiofrecuencia son una probable causa de uno o más tipos de cáncer en humanos. La evidencia es débil debido a su inconsistencia, el diseño de los estudios, la falta de detalles sobre la exposición real y las limitaciones de los estudios en lo relativo a su capacidad para tratar otros posibles factores relevantes. En algunos estudios puede haber sesgos en los usos de los datos.

Informes de congresos científicos recientes

En el congreso de 1998 de la Sociedad de Bioelectromagnetismo (Bioelectromagnetics Society, **BEMS**), el principal foro donde se tratan los efectos biológicos y en la salud de las ondas de radio, se presentaron numerosos artículos sobre ondas de radio y/o sistemas de comunicación personal. De igual forma, en el Segundo Congreso Mundial sobre Electricidad y Magnetismo en Medicina y Biología, celebrado en junio de 1997, se presentaron muchos artículos sobre ondas de radio y/o sistemas de comunicación personal. Ninguno de estos artículos informaba de resultados replicados que sugieran que la exposición a ondas de radio de los niveles permitidos por la norma ANSI de 1992 suponga un riesgo para la salud humana.

Algunos trataban temas de dosimetría para los propios teléfonos móviles. Entre ellos:

- Santani y col.: la exposición a radiofrecuencias generadas por los teléfonos digitales GSM europeos (y por analogía por los teléfonos digitales PCS de EEUU) era mayor durante el establecimiento de la llamada y cuando el usuario estaba en un área con mala calidad de recepción.

Algunos informes trataban temas de interferencia electromagnética, pero ninguno añadía mucha más información que la presentada en la publicación de Hayes y col.

Entre los estudios biológicos presentados en el congreso de la BEMS de 1998, los más relevantes para el tema de posibles efectos en la salud humana de las ondas de radio eran:

- Mild y col. y Sandstrom y col.: un estudio epidemiológico en usuarios de teléfonos móviles en Suecia informó de que los usuarios del sistema analógico antiguo (similar al al sistema celular de EEUU) se quejaban de más dolores de cabeza que los usuarios del nuevo sistema digital GSM (similar al sistema PCS de EEUU). No había grupo control de no usuarios, ya que los investigadores hallaron que era "absolutamente imposible encontrar controles" con un nivel de vida similar pero que no usaran teléfonos móviles.
- Bastide y col.: se ha observado un incremento de la mortalidad en embriones de pollo expuestos continuamente durante 21 días a radiofrecuencias generadas por teléfonos móviles comerciales. La exposición tuvo lugar 24 horas al día, utilizando teléfonos de 2 W (comparados con los $0.4\text{-}0.6\text{ W}$ de la mayoría de los teléfonos celulares y PCS de EEUU) situados a 1 cm de los huevos. No se informa de la densidad de potencia ni del SAR y no se pueden descartar efectos térmicos.

Lo que sigue es el Resumen Ejecutivo del informe preparado por un panel de expertos a pedido de la Royal Society of Canada (A Review of the Potential Health Risks of Radiofrequency Fields from Wireless Telecommunication Devices) en marzo de 1999.

"El uso de dispositivos de telecomunicaciones inalámbricas en Canadá se ha incrementado dramáticamente en la década pasada. Con el uso mayor ha ocurrido una mayor visibilidad de la tecnología y un aumento concomitante de la preocupación pública sobre su seguridad.

Se dan guías de acción para límites de exposición segura a campos de radiofrecuencia (RF) en el Health Canada's Safety Code 6. Se reunió el Panel de Expertos sobre campos de RF de la Royal Society of Canada para examinar los potenciales efectos biológicos y sanitarios de campos de RF resultantes del uso de tecnología de telecomunicaciones inalámbricas para revisar la adecuación del Safety Code 6.

Mediciones realizadas en proximidad a estaciones base que operan en Canadá indican que el público está expuesto a campos de RF de intensidad extremadamente baja en este ambiente. Las exposiciones son típicamente miles de veces menores que los niveles máximos de exposición recomendados en el Safety Code 6. Los trabajadores que realizan mantenimiento en las antenas de estas estaciones base puede experimentar exposiciones algo mayores, aunque éstas pueden controlarse mediante cuidadosas prácticas de trabajo.

Exposiciones que surgen de teléfonos celulares comerciales y dispositivos de comunicaciones inalámbricas están debajo de los límites dados en el Safety Code 6, aunque pueden ocurrir exposiciones cercanas a los niveles límites.

Al preparar este resumen, el panel usó como fuente primaria información obtenida de trabajos científicos publicados con referato. El panel se reunió con representantes de las dos agencias que financiaron el informe (Health Canada e Industry Canada). La Asociación de Telecomunicaciones Inalámbricas del Canadá (Canadian Wireless Telecommunications Association - CWTA) se consultó acerca del uso de dispositivos de telecomunicación inalámbrica en Canadá y por información de ingeniería y técnica. El panel también tomó nota de investigaciones, actualmente en curso, comunicándose con científicos involucrados en estudios de importancia en el tema.

Finalmente, se invitó a sectores interesados a enviar presentaciones escritas al panel. Aproximadamente se recibieron 30 presentaciones de organizaciones e individuos, y fueron vistos por todos los miembros del panel de forma que pudieran tenerse en cuenta al redactar este informe.

Los términos de referencia para el panel fueron especificados en la forma de una serie de preguntas acerca de los efectos potenciales sobre la salud de la exposición a campos de RF. A continuación se presentan estas preguntas, y las respuestas del panel.

¿Las provisiones del Safety Code 6 protegen a trabajadores en RF workers y a la población en general de los efectos térmicos asociados con la exposición a campos de RF?

Los efectos térmicos involucran el calentamiento directo de un organismo, tejido o célula por campos de RF. El Safety Code 6 fue explícitamente diseñado para proteger a trabajadores y a la población de exposiciones térmicas con niveles de exposición recomendados colocados a niveles muy por debajo de aquéllos para los cuales tales efectos térmicos podrían ocurrir para exposición de cuerpo entero a una distancia de la fuente radiante. Específicamente, el panel no encontró evidencia de que puedan ocurrir efectos térmicos a o debajo de los límites para exposición de cuerpo entero de 0.4 W/kg (trabajadores) o 0.08 W/kg (población general).

El panel notó que los límites locales para exposición parcial del cuerpo está situados a niveles mucho más alta: para trabajadores 8 W/kg en la cabeza, cuello y tronco, y 20 W/kg en las

extremidades. Las fuertes intensidades permitidos por tales exposiciones, aunque locales en naturaleza, y el hecho de que el Safety Code 6 no tiene límites de tiempo sobre tales exposiciones, crea una situación donde los efectos térmicos podrían ocurrir aún dentro de los límites del Safety Code 6. Las exposiciones locales al nivel térmico de estos límites pueden, en ciertos casos, producir efectos adversos a su salud. El panel reconoce que hay solamente datos limitados sobre los que definir los límites biológicos de la absorción de energía local. En ausencia de información adecuada, el panel concluyó que los límites de exposición local puede no proteger completamente de los efectos térmicos asociados a la exposición a RF. Se requiere investigación adicional para determinar si es necesario establecer límites en la duración de las exposiciones locales, particularmente para trabajadores, además de los límites en la intensidad de la exposición.

De be notarse que diversas aplicaciones diagnósticas de radiación de RF tales como dispositivos de imágenes por resonancia magnética y nuevas terapias para el tratamiento o ablación de tumores benignos y malignos pueden involucrar a pacientes a campos de RF por encima de los límites establecidos en el Safety Code 6. Sin embargo, el panel notó que las regulaciones para tales procedimientos (tales como en Safety Code 26 que se refiere a la exposición de pacientes en imágenes de resonancia magnética) limitan estas exposiciones más intensas a cortos periodos de tiempo. Por ejemplo, la FDA de los Estados Unidos limita exposiciones en la cabeza a 8 W/Kg , pero sólo por menos de 5 minutos, y 12 W/Kg en las extremidades también hasta 5 minutos. Es importante asegurar que el personal que opera estos dispositivos se hallen adecuadamente protegidos de sobreexposiciones.

¿Cuáles son los potenciales efectos adversos biológicos y/o de salud asociados con la exposición a campos de RF?

Se han realizado un número de estudios de laboratorio sobre potenciales efectos biológicos y adversos a la salud de campos de RF. Los efectos biológicos son cambios mensurables en sistemas biológicos que pueden o no estar asociados con efectos adversos a la salud. Un número de efectos biológicos se han observado a intensidades de campos de RF no térmicas que no producen calentamiento mensurable. Al presente, sin embargo, no se ha encontrado que estos efectos biológicos causen efectos adversos a la salud de humanos o animales expuestos. Los siguientes efectos biológicos fueron investigados por el panel:

Efectos Biológicos

Proliferación de Células

Se ha informado de varios hallazgos de efectos de RF sobre la proliferación celular. Hay evidencia de que la proliferación celular (específicamente células de glioma LN71) pueden incrementarse a través de la exposición a campos de RF de alta intensidad bajo rígidas condiciones de control térmico. Se han observado alteraciones en la cinética del ciclo celular bajo condiciones de exposición similares usando células del ovario de hamsters chinos. Sin embargo, otros estudios no han demostrado incrementos en el crecimiento celular. Se observó un decrecimiento de el crecimiento celular sólo después de 30 minutos de exposición o me-

nos. A bajas intensidades no térmicas los campos de RF no parecen alterar las tasas de proliferación celular.

Flujo de Calcio

Aunque los campos de RF que no está modelados por señales de muy baja frecuencia (ELF) no parecen realizar flujo de Ca_{2+} del tejido cerebral, la modulación de baja frecuencia de portadoras de RF y microondas por debajo de los límites dispuestos por el Safety Code 6 altera el flujo de Ca_{2+} . Exposiciones de baja densidad de potencia no fueron testeadas para proveer evidencia del efecto sobre el flujo de calcio a frecuencias por encima de 1 GHz. No está claro si la exposición a campos de RF de dispositivos de comunicaciones inalámbricas pueden afectar la regulación de calcio en el cerebro, o que efectos de este tipo tengan consecuencias en la salud.

Actividad de la Decarboxilasa de Ornitina (ODC)

Se ha observado aumento de la actividad de ODC en experimentos usando campos de RF en el rango de frecuencias de dispositivos de telecomunicaciones inalámbricas estándar a niveles de exposición por debajo de los recomendados por el Safety Code 6. Esta actividad incrementada ocurre solamente cuando la amplitud del campo de RF está modulado por ELF. Campos pulsados de telefonía digital con una componente de baja frecuencia también son capaces de aumentar la actividad de ODC. Se ha demostrado que la actividad de ODC aumenta con la intensidad del campo de RF. El panel notó that, mientras casi todos los factores capaces de causar cáncer llevan a elevada actividad de ODC, no todos los estímulos capaces de aumentar la actividad de ODC promueven el cáncer.

Melatonina

El efecto de campos eléctricos y magnéticos de ELF sobre la melatonina ha sido ampliamente estudiado en humanos y animales. Se ha hecho la hipótesis que campos de ELF podrían alterar procesos de enfermedades humanas a través de cambios en la melatonina. Debido a que los niveles de melatonina se ven fuertemente afectados por la exposición a la luz, y pueden ser afectados por la exposición a campos de ELF, es razonable considerar si la melatonina pueda ser afectada por la exposición a campos de ELF. Sin embargo, ha habido muy poca investigación sobre los efectos de RF sobre la melatonina y los pocos estudios existentes no proveen información clara sobre tales efectos.

Efectos sobre la Membrana Celular

Varios estudios han identificado influencias de la exposición a microondas (MW) sobre la liberación de Ca_{2+} desde las membranas celulares.. Estos estudios han documentado un aumento en la liberación de Ca_{2+} . Sin embargo, otros estudios no han hallado efecto alguno sobre la liberación de Ca_{2+} . También se han documentado efectos de campos de RF/MW sobre el transporte de cationes tales como Na^+ and K^+ a través de las membranas celulares. Es posible que estos efectos puedan ocurrir sin cambios mensurables de temperatura. Aunque parece que los campos de RF afectan los canales de la membrana, el mecanismo de interacción biofísico específicamente responsable de este efecto no ha sido descubierto. La manera en que campos de RF/MW interaccionan con las proteínas y lípidos de la membrana necesita ser investigada en mayor detalle.

Barrera Sangre-cerebro

Varios estudios han mostrado que la exposición a radiación de RF por debajo de los límites del Safety Code 6 incrementa la permeabilidad sangre-cerebro. Sin embargo, no todos los estudios han demostrado este efecto. Estas inconsistencias pueden indicar que efectos a exposiciones de bajo nivel de RF no son significativos, o que los cambios en la permeabilidad pueden estar relacionados a específicas frecuencias de RF o a la modulación de ELF de la frecuencia de portadora de RF.

Comportamiento

En algunos estudios, ratas expuestas a campos de RF han realizado no tan bien tareas de memoria espacial. Los investigadores han sugerido que estos efectos de comportamiento posiblemente se pueden relacionar a algún efecto de campos de RF sobre el sistema opioide endógeno.

Consideraciones Mecánicas

Al presente no se entiende bien el mecanismo detrás de los observados efectos no térmicos de la exposición a campos de RF y la influencia de la modulación de baja frecuencia de esos campos. Es importante entender los mecanismos biofísicos subyacentes de las interacciones entre campos de RF y las células y tejidos para aclarar mejor las posibles relaciones entre efectos biológicos y efectos sobre la salud.

Efectos sobre la Salud

Se han realizado también un número de estudios toxicológicos, epidemiológicos y clínicos para investigar potenciales efectos adversos a la salud de la exposición a campos de RF. La revisión del panel de la literatura científica disponible en la actualidad se resume en lo que sigue.

Estudios Toxicológicos

Tanto estudios *in vitro* como *in vivo* de los efectos de la exposición de ADN a campos de RF han producido resultados conflictivos. Mientras que algunos estudios han mostrado que células y animales expuestos experimentan significativamente más daño en el ADN que células no expuestas, otros no han hallado diferencias significativas. Otros estudios han hallado mucho menor daño en el ADN en células expuestas a señales de comunicaciones inalámbricas. Debido a que el daño en el ADN puede resultar en serias consecuencias para la salud, la posibilidad de que exposiciones a campos de RF de baja energía no térmica pueda producir daños en el ADN sigue siendo una preocupación. Se requiere más investigación para aclarar esta posibilidad. Un número de estudios toxicológicos se han enfocado en la habilidad de los campos de RF para inducir tumores en animales de laboratorio. Aunque algunos pocos estudios han demostrado elevadas tasas de tumores en animales expuestos a campos de RF, la mayoría no han encontrado diferencias significativas en la tasa de ocurrencia de tumores entre animales que han sido expuestos a campos de RF y controles no expuestos. Hay poca evidencia que la exposición a campos de RF a niveles no térmicos aumenta la tumorigénesis en animales. También hay poca evidencia que la exposición a campos de RF a niveles no térmicos promueve el crecimiento de tumores en animales. Aunque unos pocos estudios han encontrado un significativo incremento de la promoción de tumores en los grupos expuestos, la importancia de estos hallazgos no es claro por falta de replicación de estos resultados por otros investigadores. La mayoría de los estudios a la fecha no han encontrado diferencias significativas entre animales expuestos y no expuestos, ni evidencias claras de una relación entre exposición y respuesta.

El comité identificó sólo dos estudios publicados que examinan la relación entre la exposición a RF y la progresión de tumores. Ninguno de estos estudios encontró diferencias significativas en la progresión de tumores entre animales expuestos y no expuestos.

Aunque se ha observado una disminución de la longevidad en algunos estudios de animales expuestos a campos de RF, parece probable que estos efectos están relacionados a efectos térmicos de particulares regímenes de exposición. Reportes esporádicos de longevidad incrementada en animales expuestos a campos de RF puede ser resultado de la reducción de la ingesta calórica que se ha notado en animales expuestos.

Estudios Epidemiológicos

Los estudios epidemiológicos que examinan los efectos de salud de campos de RF que han sido publicados al presente son de valor limitado, principalmente debido a la dificultad en la medición de la exposición. De los estudios que tuvieron un adecuado diseño de la medición de la exposición no se observaron incrementos significativos consistentes en los riesgos de salud debido a la exposición a campos de RF. Sin embargo, estudios epidemiológicos han demostrado que el uso de teléfonos celulares mientras se conduce está asociado a un incremento en el riesgo de tener un accidente automovilístico.

Estudios Clínicos

Se han hecho algunos estudios clínicos sobre la relación entre campos de RF y el funcionamiento cerebral y la salud neurológica en humanos. Estos estudios, que han observado crisis epilépticas, desórdenes del sueño y el “síndrome RFR” han fallado en mostrar efectos adversos para la salud de la exposición a RF. Sin embargo, al contrario que en los estudios sobre animales, ciertas exposiciones a campos de RF parecen acortar la latencia de entrada al sueño en los humanos, un interesante efecto biológico, pero un resultado clínicamente irrelevante. En general, los resultados de los estudios epidemiológicos y clínicos actualmente disponibles son inconsistentes y no proveen un patrón claro de efectos adversos a la salud

relacionados a la exposición a RF. Debido al diseño de los estudios publicados, la información necesaria para describir las relaciones temporales entre la exposición y los efectos no está disponible. La evidencia epidemiológica existente no apoya una asociación entre la exposición a campos de RF y el riesgo de cáncer, problemas reproductivos, anomalías congénitas, epilepsia, jaqueca o suicidio. Al mismo tiempo, esta evidencia es inadecuada para permitir una evaluación comprehensiva de potenciales riesgos a la salud. Por lo tanto se requieren adicionales estudios epidemiológicos con adecuada información sobre la exposición a campos de RF.

¿Cuáles son los efectos biológicos y/o los efectos potencialmente adversos a la salud no térmicos asociados con la exposición a campos de RF emitidos desde dispositivos de telecomunicación inalámbrica como teléfonos inalámbricos y transmisores de estaciones base?

Debido a la baja intensidad de campos asociada con la exposición pública a campos de RF de transmisores de estaciones base de telecomunicaciones inalámbricas, ni efectos biológicos ni efectos adversos a la salud son de probable ocurrencia. Aunque los campos de RF de teléfonos celulares podrían ser de suficiente intensidad para causar el tipo de efectos biológicos descritos previamente, no se conoce que tales efectos biológicos estén asociados a efectos adversos a la salud. El panel notó que las características de los campos de RF emitidos por teléfonos celulares, incluyendo la modulación de baja frecuencia de la onda portadora de RF, puede ser importante en definir la naturaleza de los efectos biológicos causados por los campos de RF de dispositivos de telecomunicaciones inalámbricas.

Se ha expresado una preocupación particular acerca del potencial de la exposición a campos de RF de teléfonos celulares para causar riesgo de cáncer. Mientras los estudios toxicológicos y epidemiológicos llevados a la fecha no son definitivos sobre este tema, el peso de la evidencia no apoya la conclusión de que la exposición a campos de RF del tipo e intensidad producidos por dispositivos de telecomunicaciones inalámbricas contribuya a la producción del crecimiento de tumores en animales o humanos. Aunque algunas investigaciones han sugerido que los campos de RF pueden dañar al ADN, la mayoría de los estudios de genotoxicidad realizados a la fecha han sido negativos. Más investigación se debe hacer en esta área para clarificar la potencialidad genotóxica de los campos de RF.

Estudios clínicos han examinado el efecto potencial de los campos de RF sobre la función cerebral y la salud neurológica en humanos. Estos estudios, que han buscado crisis epilépticas, desórdenes del sueño y el síndrome RFR, también han fallado en mostrar efectos adversos a la salud consistentes. La exposición a campos de RF puede acortar el tiempo de entrada al sueño en humanos, aunque este efecto biológico no se considera que sea un efecto adverso.

¿Hay evidencia de que tales efectos no térmicos pudieran ser mayores para niños u otros subpoblos de la población?

Hay amplia evidencia de que los niños u otras subpoblaciones (tales como mujeres embarazadas o los ancianos) pueden ser más susceptibles a los efectos de la exposición a peligros químicos y radiológicos que adultos jóvenes y saludables. El tema de las subpoblaciones susceptibles ha recibido muy poco estudio con respecto a la exposición a campos de RF. Por lo tanto, futuros estudios de los riesgos potenciales de la exposición a RF deberían analizar la posibilidad de individuos particularmente susceptibles.

Los estudios epidemiológicos que se han enfocado en niños han sido de diseño ecológico, sin datos a nivel individual de exposición. En consecuencia estos estudios no son particularmente informativos acerca de potenciales riesgos a la salud de RF. Se han realizado ocho estudios clínicos para explorar la existencia de un síndrome de enfermedad de RF. Nadie encontró efecto alguno de los campos de RF en los síntomas asociados con este síndrome. Sin embargo, parece realmente que algunas personas pueden sentir si están expuestas a campos de RF.

¿Cuáles son las implicancias para el Safety Code 6 de la revisión científica de los datos actualmente disponibles realizada por el panel sobre los efectos biológicos y los potenciales efectos adversos sobre la salud de la exposición a campos de RF? En particular, ¿debería considerarse el fenómeno de los efectos no térmicos en Safety Code 6?

Basándose en su revisión de los datos científicos actualmente disponibles, el panel concluyó que el Safety Code 6 generalmente protege a trabajadores y la población general de efectos adversos a la salud asociados con exposiciones térmicas a campos de RF. Sin embargo, aunque los límites de exposición de cuerpo entero dados por Safety Code 6 aparecen protectores frente a efectos térmicos, el panel notó que prolongadas exposiciones de trabajadores a los límites locales de 8 W/kg para la cabeza, cuello y tronco y 20 W/kg para las extremidades podría conducir a efectos térmicos. Por lo tanto, el panel recomienda que estos límites de exposición local para trabajadores sean revisados, tanto en términos de la intensidad y duración de la exposición.

El establecimiento de la necesidad para una actualización de los límites de exposición localizada para la protección de los trabajadores requerirán estudios adicionales para definir los efectos conjuntos de la intensidad y la duración de la exposición. Debido a las características fisiológicas únicas del ojo, incluyendo su habilidad limitada para disipar el calor, el panel no está satisfecho de que el límite de exposición local para trabajadores de 8 W/kg para la cabeza, cuello y tronco sea adecuadamente protectora del ojo (El Safety Code 6 reconoce esta preocupación sugiriendo que aún menores exposiciones serían deseables). Aunque los datos disponibles son insuficientes para definir un límite preciso a la exposición localizada para el ojo, el panel sugiere que el límite de exposición local para la población general de 1.6 W/kg para la cabeza, cuello y tronco (incluyendo el ojo) dado en el Safety Code 6 sea considerado como una salvaguarda transitoria para los ojos de los trabajadores en RF. El panel identificó la generación de datos necesarios para aclarar los límites de exposición para el ojo como de alta prioridad.

El panel notó que pueden ocurrir efectos biológicos para exposiciones a niveles no térmicos, incluyendo niveles por debajo de los límites para exposiciones a campos de RF establecidos en el Safety Code 6. Aunque podría concebirse que tales efectos biológicos lleven a efectos adversos sobre la salud, no hay información suficiente para concluir que efectos adversos sobre la salud están asociados a los efectos biológicos causados por exposiciones a niveles no térmicos de campos de RF. El potencial significado sanitario de los efectos biológicos de los campos de RF observados a niveles no térmicos de exposición requiere aclaraciones antes de que efectos biológicos causados por exposiciones a niveles no térmicos sean considerados para su inclusión en el Safety Code 6. El panel recomienda que se realice investigación adicional sobre los efectos biológicos de los campos de RF, incluyendo los mecanismos por los cuales ocurren tales efectos.

¿Qué investigación es necesaria para entender mejor las potenciales consecuencias sobre la salud de los efectos no térmicos?

El comité ha identificado cuatro distintas líneas experimentales que se requieren para extender nuestro conocimiento de los campos de RF. Estas son:

- experimentos *in vivo* e *in vitro* sobre animales y células, para proveer información básica con la que evaluar cualesquiera efectos potenciales sobre la salud;
- estudios moleculares que examinen los mecanismos de los efectos biológicos;
- estudios clínicos, particularmente para evaluar efectos de subgrupos en humanos; y
- estudios epidemiológicos que monitoreen el potencial impacto de la exposición a RF sobre la salud humana.

Una agenda de investigación más detallada se incluye en la Sección 10 de este informe.

Se requerirá mayor investigación a medida que surjan nuevas tecnologías que usen frecuencias y modulaciones que no han sido estudiadas adecuadamente. Un hueco mayor en el conocimiento que el panel identificó es la falta de información sobre el rol de los efectos de la modulación de RF a frecuencias ELF.

Es esencial realizar continuos estudios epidemiológicos ya que éstos proveen los medios primarios de identificar y caracterizar directamente los efectos potenciales de los campos de RF en el medio ambiente sobre la salud humana. Los teléfonos celulares y dispositivos similares no han sido de uso general por un periodo de tiempo suficiente para permitir una investigación completa de todos los potenciales efectos sobre la salud. Más aún, no solamente está en expansión el uso de esta forma de comunicación, sino que sistemas futuros usarán diferentes frecuencias y protocolos. Se anticipa que en el futuro la exposición a campos de RF se verá reducida como consecuencia de la tendencia actual hacia la reducción de la po-

tencia de las emisiones de dispositivos de telecomunicaciones inalámbricas. Sin embargo, es probable que el rango de radiofrecuencias y las características de transmisión de futuros sistemas de comunicación serán diferentes de los actualmente en uso, y requerirán mayor evaluación para garantizar la seguridad. A la fecha, no se ha informado de estudios epidemiológicos rigurosos sobre los potenciales efectos adversos sobre la salud del uso de teléfonos celulares. El panel recomienda que los resultados de estudios en curso sean examinados cuidadosamente a medida que se hallen disponibles, incluyendo cualquier consecuencia sobre el Safety Code 6. El panel notó que faltan estudios epidemiológicos de poblaciones que viven cerca de estaciones base, pero considera tales estudios de menor prioridad debido a las muy bajas intensidades de campo en la vecindad de estaciones base transmisoras.

RESUMEN

- En relación al campo radiado por aberturas, se presenta el método de Kirchhoff-Huygens para el cálculo del campo lejano emitido por una abertura en función del campo sobre la abertura. Este método surge del teorema de Green y establece que el campo en un punto cualquiera interior a un recinto cerrado se puede expresar en términos de los valores del campo y su derivada normal sobre la frontera del recinto, si el campo cumple la ecuación de las ondas de Helmholtz:

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = -\frac{1}{4\pi} \oint_S \left(\frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{e^{-ikR}}{R} \right) \mathbf{E} - \frac{e^{-ikR}}{R} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial n} \right) dS'$$

Utilizando este resultado se puede relacionar el campo lejano emitido por la abertura con el campo sobre la abertura misma:

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) \approx \frac{i(k+k_z)}{2\pi r} \hat{\mathbf{x}} e^{i(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r})} \int_{S_1} E_s(x', y') e^{i\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}'} dS'$$

y se observa que ambos campos están asociados por una **transformación de Fourier**. Esta relación es extremadamente importante para el cálculo del campo cercano de cualquier estructura radiante a partir de su campo lejano.

- Se introduce la noción de corrientes equivalentes, que se utiliza para lograr un esquema de cálculo general y optimizado en el análisis numérico de las estructuras radiantes.

Las ecuaciones de Maxwell del rotor pueden escribirse:

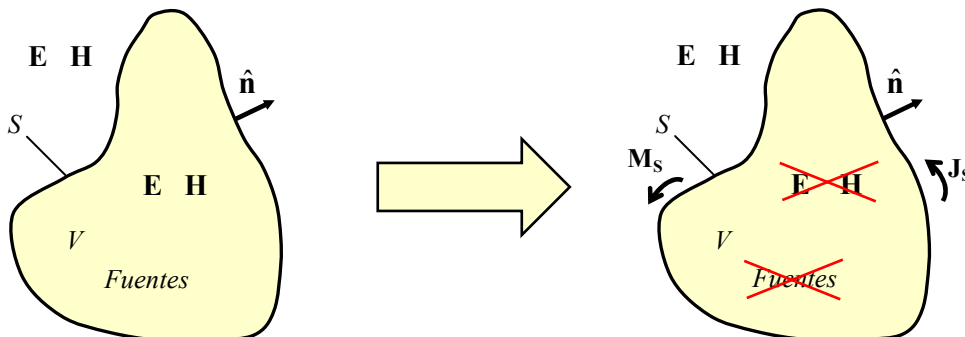
$$\begin{aligned} \nabla \times \mathbf{H} &= \mathbf{J} & \text{donde } \mathbf{J} &= \mathbf{j} + \partial \mathbf{D} / \partial t & \text{es una densidad de corriente eléctrica, y} \\ \nabla \times \mathbf{E} &= -\mathbf{M} & \text{donde } \mathbf{M} &= \partial \mathbf{B} / \partial t & \text{es una densidad de corriente magnética.} \end{aligned}$$

Entonces los campos se pueden calcular a partir de "potenciales":

$$\mathbf{H}(\mathbf{r}, t) = \nabla \times \mathbf{A}(\mathbf{r}, t) \quad \text{con} \quad \mathbf{A}(\mathbf{r}, t) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_V \frac{\mathbf{J}(\mathbf{r}', t')}{R} dV' \quad \text{y}$$

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \nabla \times \mathbf{F}(\mathbf{r}, t) \quad \text{con} \quad \mathbf{F}(\mathbf{r}, t) = \frac{\varepsilon_0}{4\pi} \int_V \frac{\mathbf{M}(\mathbf{r}', t')}{R} dV'$$

Las corrientes equivalentes se definen de manera de eliminar la necesidad de considerar las fuentes y campos internos al radiador para calcular los campos externos o radiados, usando el **principio de equivalencia**:



- Se introduce la fórmula de Friis para el cálculo de un enlace sencillo (LOS) de comunicaciones: $\frac{P_R}{P_T} = \frac{A_T A_R}{\lambda^2 d^2}$ donde A_T y A_R son respectivamente las aberturas de

la antena transmisora y receptora, λ la longitud de onda de la radiación y d la distancia.

Se presentan diversos enlaces a sitios Web que analizan el problema de las radio-comunicaciones.

- *Se presenta una muy breve introducción a los problemas de compatibilidad electromagnética (EMC) que surgen de los fenómenos de interferencia. Las ideas esenciales son:*
 - *Noción de susceptibilidad o inmunidad electromagnética.*
 - *Fuentes de interferencia: naturales (ruido térmico, campos atmosféricos, ruido cósmico) y artificiales.*
 - *Modos de interferencia: radiada o conducida. En la interferencia radiada se distinguen los campos cercanos (inducción) y los campos lejanos. La interferencia radiada se previene con apantallamientos y blindajes y la interferencia conducida con técnicas de filtrado. Se dan diversos ejemplos.*
 - *Finalmente se mencionan brevemente algunas de las normas internacionales sobre el tema y se presentan varios enlaces con mayor información.*
- *Se presenta una introducción a los efectos biológicos de los campos electromagnéticos, en particular sobre la salud humana. Se describen las distintas regiones del espectro electromagnético y se explica la diferencia entre la radiación ionizante y no ionizante.*

Se presentan algunos organismos internacionales y organizaciones no gubernamentales que estudian los efectos de los campos electromagnéticos sobre la salud humana y sus planes de trabajo.

Se discuten brevemente los criterios metodológicos para el estudio científico y la evaluación del riesgo de agentes ambientales sobre la salud humana.

Se presenta un resumen de las pautas para limitar la exposición a campos electromagnéticos entre 30 Hz y 300 GHz elaboradas por la ICNIRP en 1998, y que son la base para la mayoría de las normas nacionales en vigencia.

Se comenta brevemente la declaración del IEE (Institution of Electrical Engineers - UK) de mayo de 2002 sobre la evaluación de trabajos científicos sobre el impacto de campos electromagnéticos de baja frecuencia sobre la salud humana publicados en los últimos dos años.

Se presenta información más detallada sobre posibles efectos, mecanismos de acoplamiento y estudios epidemiológicos en tres casos: campos estáticos, campos de frecuencia industrial y campos asociados a la telefonía celular, que se están estudiando con gran detenimiento en los últimos años.