

CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS MEDIOAMBIENTALES

ANTONIO HERNANDO GRANDE *

* Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. C/ Valverde, 22. 28004 Madrid

INTRODUCCIÓN

Este artículo pretende, en primer lugar, explicar, en un lenguaje inteligible para el profano a la Física, el contexto en el que el Consejo de la Comunidad Europea ha elaborado una Recomendación con fecha 12 de Julio de 1999 relativa a la exposición del público a radiaciones no ionizante o de frecuencia comprendida entre 0 hercios y 300 gigahercios. Se pretende también, en segundo lugar, establecer con la máxima claridad y en diferentes unidades los valores límites de exposición que el Consejo recomienda, con un amplio margen de seguridad, para que los campos eléctricos y magnéticos de frecuencia industrial o 50 hercios, no produzcan efectos nocivos sobre la salud del público en general.

Las bases del Informe y su conclusión son las siguientes:

1) Existe una presión social fundada en la hipersensibilidad hacia los posibles efectos nocivos sobre la salud de la exposición a campos electromagnéticos.

2) Esta hipersensibilidad se genera en torno a una serie de artículos científicos de carácter exclusivamente epidemiológico, que aparecen entre finales de los setenta y la actualidad, y más acusadamente en la traducción que de estos artículos han realizado para el gran público personas a veces desinformadas. Más confusas son aún algunas interpretaciones personales de carácter alarmista que se hacen públicas desde el desconocimiento del más elemental rigor científico

3) En el problema de los efectos sobre la salud de las radiaciones no ionizantes existen dos tipos de componentes que por razones de claridad científica deben

clasificarse según dos grandes grupos: A) **Las científicamente conocidas** son: i) La naturaleza de **las interacciones electromagnéticas y las leyes que rigen su funcionamiento**. Estas leyes están perfectamente establecidas y forman parte acabada y cerrada de la Física actual. ii) Algún tipo de daños graves y menos graves que se derivan de la acción de los campos electromagnéticos no ionizantes sobre la materia viva (denominados en el texto de Recomendaciones del Consejo como *efectos comprobados*). Tales son, esencialmente, **la inducción de corrientes eléctricas** que según su intensidad causan desde daños al sistema nervioso central y cardiovascular a sensación desagradable llegando a veces a producir la muerte (piénsese en muerte por un rayo atmosférico o cualquier electrocución por descarga en una instalación eléctrica de potencia) y **la posible inducción de aumentos de temperatura**, efecto conocido como daño térmico y asociado a campos de frecuencias de miles de millones de hercios o campos del rango de microondas. B) **Las científicamente desconocidas** que constituyen el objeto de investigaciones médico-biológicas en curso y ante las cuales se debe adoptar una actitud de cautela, sin regatear precauciones, y no de alarma social infundada. Este desconocimiento proviene de la dificultad inherente a la complejidad de los detalles físico químicos típicos de los mecanismos que constituyen la vida y nunca a propiedades ocultas de los campos electromagnéticos.

4) La interacción electromagnética es la base de la química y la biología y **existen campos electromagnéticos naturales** en forma de radiación solar y campos estáticos desde la formación del Planeta, **sin los cuales la vida desaparecería**; sin embargo, desde comienzos del siglo XX el hombre puede también

crear artificialmente campos electromagnéticos con relativa facilidad. La intensidad de estos campos artificiales crece con el progreso. Este aumento artificial de campos de frecuencia variable abarca todo el rango del espectro no ionizante desde las bajas frecuencias, como la industrial y doméstica de 50 hercios, pasando por las frecuencias de cientos de miles y millones de hercios de emisoras de radio y televisión, hasta alcanzar el rango de las microondas de miles de millones de hercios características del radar en sus distintas bandas y de la telefonía móvil. El consecuente incremento de la densidad medioambiental de energía electromagnética por unidad de frecuencia es una de las causas justificadas de la mencionada hipersensibilidad social.

5) Ante esta situación la Comunidad Europea, consciente tanto del derecho de las personas a una información rigurosa y honesta como el derecho a que su salud sea protegida, ha reunido a especialistas en Física, Biología y Medicina y tras analizar exhaustivamente la literatura científica, ha establecido una serie de restricciones básicas y niveles de referencia **basados en la certeza de evitar los efectos nocivos comprobados** y, al introducir enormes márgenes de seguridad, abarcar implícitamente los posibles efectos a largo plazo en caso de existir. Las restricciones indicadas por el Consejo están basadas en la Guía de la Comisión Internacional de Protección contra Radiaciones No Ionizantes y avaladas por el Comité Científico Director de la Comisión. Es destacable que la Recomendación del Consejo establece que solo se han considerado efectos comprobados y no los que como el cáncer, citado explícitamente, no han sido comprobados

6) Para la frecuencia de 50 hercios, que es la frecuencia de la red eléctrica industrial, y por tanto la frecuencia de los campos magnéticos y eléctricos producidos por la conducción industrial, estos valores (Niveles de Referencia en la Recomendación del Consejo) son: a) campo magnético límite **100 microteslas**¹. El campo magnético terrestre, estático, es aproximadamente la mitad y b) campo eléctrico límite **5000 V/m**, siendo el campo eléctrico terrestre normal estático y de intensidad 150 V/m pero alcanzando en las tormentas valores de 10000 V/m.

7) Los Niveles de Referencia son más restrictivos que las Restricciones básicas, por lo que, como indica

el documento del Consejo, la superación de los valores de los Niveles de Referencia no implica que se sobrepasen las Restricciones básicas.

8) El Documento tiene el enorme acierto de enfocar rigurosamente el auténtico núcleo del problema que consiste en determinar cuantitativamente los niveles de seguridad respecto a los efectos comprobados. Plantearse si son o no son nocivos los campos electromagnéticos no ionizantes o ionizantes es algo que carece de sentido. La radiación electromagnética solar es necesaria para la vida pero su exceso es nocivo. El beneficio derivado de las radiografías es bien conocido pero la exposición prolongada a rayos x tiene consecuencias graves. **La cuestión de la influencia de los campos sobre la salud solo admite de modo serio y riguroso una respuesta cuantitativa que delimite los valores de intensidad de radiación de cada intervalo de frecuencias en función de los efectos nocivos comprobados asociados a cada uno de esos intervalos de frecuencia.** Este es el esfuerzo realizado por la Comisión de expertos que ha recomendado las medidas recogidas por el Consejo de la Unión Europea.

CONTENIDO

- La interacción electromagnética como base de la materia y la vida
- Las radiaciones ionizantes y no ionizantes
- El electromagnetismo como ciencia
- El electromagnetismo como herramienta de desarrollo y bienestar: la revolución de Faraday y la posibilidad de crear campos electromagnéticos artificialmente
- El marco en que se encuadra la Recomendación europea
- Los campos electromagnéticos asociados a las líneas de alta tensión —electrodomésticos, ordenadores, trenes, motores y transformadores— comparados con los campos naturales

¹ 100 microteslas equivalen a 1 gauss ó 1000 miligauss.

- Daños conocidos o comprobados de los campos electromagnéticos sobre la salud. Las normas cautelares establecidas por la Unión Europea
- Daños o efectos a largo plazo no comprobados
- Conclusiones

LA INTERACCIÓN ELECTROMAGNÉTICA COMO BASE DE LA MATERIA Y LA VIDA

Según la teoría mas aceptada del origen del Universo, desde el comienzo de la Gran Explosión existía un número enorme de fotones, electrones, positrones y neutrinos y una pequeña contaminación de protones y neutrones. Los fotones son los cuantos del campo electromagnético. La interacción entre partículas cargadas, electrones, positrones y protones, conocida como *interacción electromagnética* es —junto a la *interacción fuerte* que mantiene unidas a las partículas que forman el núcleo atómico, la *interacción débil* y la *interacción gravitatoria* que gobierna la condensación de las galaxias y el movimiento de los planetas alrededor de las estrellas— una de las cuatro protagonistas de la historia del Universo. Pero es quizás la más familiar en la escala en que los humanos estamos habituados a movernos en el Planeta. La atracción electromagnética es la responsable de que electrones y protones se agrupen formando átomos y que posteriormente estos se condensen en moléculas y posteriormente en sólidos o en macromoléculas como las proteínas y los virus. La química y la biología son manifestaciones de la interacción electromagnética. La célula es el resultado del acoplamiento electromagnético de moléculas orgánicas mediante el denominado enlace químico que no es mas que el resultado de la atracción electromagnética entre átomos.

La vida puede existir exclusivamente en un medio electromagnético adecuado que gobierne los ritmos de radiación manteniendo los márgenes requeridos de temperatura. También la radiación electromagnética formada por fotones es componente indispensable de la función clorofílica responsable de la existencia de vida en su forma actual. La síntesis de agua y anhídrido carbónico genera azúcar que constituye un almacén de energía. El exceso de energía potencial que

la molécula de azúcar tiene respecto a las moléculas iniciales se obtiene de la energía electromagnética, o luz del Sol, que es absorbida durante la síntesis sólo si está presente la clorofila que actúa como catalizador. La formación de azúcar es la base de toda la síntesis de alimentos para las diversas formas de vida organizada.

Las radiaciones electromagnéticas consisten en fotones de distintas energías. Recientemente, a comienzos del siglo XX, Planck descubrió que la energía de un fotón depende de su frecuencia. La frecuencia del fotón o frecuencia de la onda electromagnética determina, por ejemplo, los colores. La diferencia entre la luz verde y la roja es su frecuencia. La capacidad de impresionar nuestro órgano visual queda restringida a una banda muy reducida de las frecuencias posibles. Si es f la frecuencia del fotón su energía E es proporcional a f con una constante de proporcionalidad que desde Planck se conoce con la letra h . Por tanto la fórmula que relaciona energía y frecuencia es sencillamente $E = hf$.

Sirva esta introducción para incrementar la conciencia sobre la relevancia de las interacciones electromagnéticas en el desarrollo del Universo, de la Tierra de la Naturaleza y de la Vida. Se puede afirmar que los campos y ondas electromagnéticos se encuentran en la textura mas íntima de toda materia y que intentar prescindir de ellos es prescindir de la materia, de la luz, de los alimentos y de la vida.

RADIACIONES IONIZANTE Y NO IONIZANTES

El Sol, como fuente de energía, es responsable directo de la vida sobre la Tierra en todas sus formas. La transmisión de la energía desde el Sol, donde se produce continuamente por fusión nuclear, hasta la Tierra se realiza mediante fotones o radiación. La atmósfera amortigua la radiación ultravioleta que correspondiendo a la banda más energética del entorno del espectro visible produciría quemaduras si actuara con mayor intensidad. Este es un primer ejemplo del equilibrio requerido para el desarrollo de la vida. Si bien necesitamos la radiación del Sol su exceso nos desintegraría. La dosis crítica de radiación ultravioleta la fija la capa de ozono atmosférica cuyo estado con tanta razón preocupa a una sociedad cada vez más

consciente de este equilibrio frágil sobre el que descansa la posibilidad de vivir. Al encontrarse las moléculas que forman el organismo enlazadas por fuerzas electromagnéticas son susceptibles de romperse por fuerzas externas de la misma magnitud. Los fotones de alta energía, comprendida en el rango de órdenes de magnitud de 0.1 a 1 eV, son capaces de romper las moléculas ya que la energía del enlace químico está comprendida en el mismo intervalo. (Nota, 1 electrón-voltio, eV, es la energía que adquiere un electrón en un potencial de 1 voltio. La energía cinética con que se mueve una molécula de nitrógeno que forma parte del aire de nuestra habitación a 20 grados centígrados de temperatura es 0.026 eV). Los fotones con energía inferior a 0.1 eV no son capaces de romper los enlaces químicos y se denominan no ionizantes, ya que de la ruptura de los enlaces se deriva la formación de iones que son los átomos inicialmente enlazados tras separarse violentamente. Si uno considera que la constante de Planck es $h = 6.6 \cdot 10^{-34}$ Julio segundo ó $6.6 \cdot 10^{-15}$ eV segundo todos los fotones con frecuencias f inferiores a 10^{13}seg^{-1} ó 10^{13} Hz. (la unidad Hz significa herzio o uno dividido por segundo; el número de herzios es el número de veces que en un segundo se invierte el sentido del campo eléctrico del fotón; 10^{13} significa diez billones ya que indica que es una cantidad de trece cifras) tienen energías inferiores a 0.01 eV y pueden considerarse como radiaciones no ionizantes o no rompedoras de moléculas. Por esta razón las denominadas radiaciones no ionizantes abarcan el espectro de frecuencias que se extiende entre los campos estáticos —o no variables con el tiempo— para los que $f = 0$ y los de frecuencia 300 GHz ó 300 gigaherzios = $3 \cdot 10^{11}$ Hz (1 GHz son mil millones de herzios o 10^9 Hz).

Todos sabemos que la radiación gamma o los rayos x al ser ionizantes pueden producir efectos nocivos sobre los tejidos. Pero debe considerarse que no basta la incidencia de fotones de alta energía para derivarse daños, es también preciso que el número de fotones sea suficientemente elevado. La dependencia del daño con el número de fotones o *intensidad* de la radiación permite hablar de **dosis de tolerancia y dosis de seguridad** incluso para las radiaciones altamente energéticas o ionizantes.

Se puede concluir que todos los fotones u ondas electromagnéticas con frecuencias comprendidas entre

cero herzios y un billón de herzios no tienen energía suficiente para romper moléculas y por tanto se consideran no ionizantes. Son por tanto incapaces de generar *directamente* mutaciones genéticas mediante la ruptura de ADN

EL ELECTROMAGNETISMO COMO CIENCIA

Si bien desde el comienzo del Universo hace más de diez mil millones de años el electromagnetismo ya estaba ahí, los seres humanos hemos sabido adecuadamente de su existencia hace relativamente poco. El método experimental permitió que un conjunto de investigadores: Coulomb, Gauss, Poisson, Oersted, Ampère, Faraday y Maxwell que ocupan la etapa comprendida entre el fin del XVIII y la segunda mitad del XIX, descubrieran las leyes que gobiernan el funcionamiento de las interacciones electromagnéticas. Posteriormente Einstein, en su Teoría de la Relatividad Restringida concluyó que la velocidad de las ondas electromagnéticas (velocidad de la luz) es la misma en todos los sistemas de referencia mostrando así que la consistencia de las ecuaciones de Maxwell es superior a la de las leyes de la dinámica de Newton. El establecimiento posterior de la Electrodinámica Cuántica, constituyó el último peldaño que permitía cerrar la teoría electromagnética a nivel atómico y subatómico. Hoy el Electromagnetismo es una ciencia cerrada y acabada. Los efectos de los campos magnéticos sobre la materia, interacciones electromagnéticas, son perfectamente conocidos. Las fuerzas que los campos ejercen sobre las cargas eléctricas —tanto en reposo como en movimiento— y momentos magnéticos se pueden calcular con precisión.

El último aserto del párrafo anterior es especialmente importante para centrar con claridad el problema que representa la interacción de los campos electromagnéticos con la materia viva. Cualquiera que sea el efecto producido por un campo de una cierta intensidad y frecuencia debe poderse explicar como una consecuencia de las fuerzas electromagnéticas que son perfectamente conocidas. La dificultad para explicar sus efectos sobre la salud proviene de la falta de conocimiento suficientemente detallado sobre todos los mecanismos físico-químicos que constituyen la vida. Por supuesto que esta falta de conocimiento está

originada por la enorme complejidad en detalle de los fenómenos biológicos. Pero son estos los que deben investigarse. En otras palabras, es un error considerar que los campos electromagnéticos pueden producir efectos sobre la vida diferentes a los que producen sobre partículas cargadas. No hay que inventar nuevas propiedades de los campos electromagnéticos para justificar su acción sobre lo vivo, mas bien hay que profundizar en los mecanismos que gobiernan la marcha de las partículas cargadas, presentes en la célula, para partiendo de las fuerzas bien conocidas de los campos electromagnéticos sobre dichas cargas explicar su efecto sobre los mecanismos biológicos.

Como es común, a todos los avances del conocimiento teórico de una ciencia acompañan los avances tecnológicos. Recíprocamente los avances tecnológicos generan nuevos conocimientos básicos. En este marco dialéctico el establecimiento de las leyes del Electromagnetismo se vio acompañado de la génesis de un vasto panorama de posibilidades tecnológicas como las que se esbozan a continuación.

EL ELECTROMAGNETISMO COMO HERRAMIENTA DE DESARROLLO Y BIENESTAR: LA REVOLUCIÓN DE FARADAY. LA POSIBILIDAD DE CREAR CAMPOS ELECTROMAGNETISMOS ARTIFICIALMENTE

El disco duro del ordenador, el vídeo, la cinta magnetofónica, la banda de las tarjetas de crédito, códigos de seguridad, los núcleos de los motores, transformadores y generadores, la televisión, los equipos de telecomunicaciones, todos estos elementos tan familiares en el año 2000 están basados en efectos de los campos eléctricos y magnéticos. Estos sistemas a diferencia de toda la química de la Naturaleza que es también esencialmente resultado de las leyes del Electromagnetismo no existen espontáneamente, han sido frutos del trabajo de investigación del hombre. Se puede afirmar que desde comienzos del siglo XX los campos magnéticos creados artificialmente por la humanidad se superponen a los campos electromagnéticos que naturalmente existen desde hace millones de años sobre la superficie de la Tierra.

La aplicación más revolucionaria de los campos electromagnéticos fue sin duda la llevada a cabo este

siglo gracias al descubrimiento de Faraday hacia la mitad del siglo XIX. Este genial físico experimental inglés descubrió en su laboratorio que los campos eléctricos, de los que hasta entonces se sabía que eran creados por cargas eléctricas, también se creaban, sin necesidad de contar con carga eléctrica, con campos magnéticos variables en el tiempo. La posibilidad de crear campos magnéticos variables mediante artilugios mecánicos que hagan girar, por ejemplo, imanes, es inmediata. De este modo se podrían construir “*fábricas*” de campo eléctrico y mediante conductores transportar la electricidad a distancias alejadas de ellas. Este transporte era en realidad un transporte de energía que, por su principio de conservación, consistía en la energía que gastaba el artilugio mecánico para hacer girar el campo magnético. La energía se podía almacenar como energía química, o mecánica, convertir en campo eléctrico, transmitir a distancia —análogamente a como la energía nuclear del Sol se transmite a la Tierra mediante fotones— y entonces volver a reconvertir en energía utilizable en los lugares de consumo, viviendas, oficinas y fábricas. La posibilidad de utilizar la energía en cualquier parte sin necesidad de aproximación a la fuente constituye el resultado científico que más ha contribuido a alcanzar el nivel de bienestar, cultura, seguridad sanitaria y capacidad industrial de los pueblos mas desarrollados. Da vértigo comenzar a vislumbrar como cambiaría el mundo si no hubiera suministro de energía en las viviendas, en los hospitales o en las fábricas. Este ejemplo ilustra perfectamente como el descubrimiento de las leyes que rigen los fenómenos electromagnéticos inherentes a la materia desde que el Universo es Universo, permite a la sociedad utilizar dichos fenómenos para mejorar su cultura y su estilo de vida. Es fácil comprobar que todo avance positivo contiene contraindicaciones en su propia esencia. Si utilizamos energía hay que pagar un coste. Este coste es la estética del campo y la ciudad dañada por las torres que sustentan los conductores de suministro, la perturbación ecológica del lugar en que se almacena la energía (presa hidráulica, central térmica o nuclear), el aumento de la intensidad ambiental de campos electromagnéticos de 50 Hz, la posibilidad de electrocutarse etc. Afortunadamente muchos de estos factores pueden evaluarse con precisión de modo riguroso. Otros no, como, por ejemplo los estéticos. A la hora de enmarcar la envergadura de la dialéctica que conduce a esa cuestión radical: ¿Merece la pena el progreso? sería

bueno tener presente que los daños derivados de una tecnología, por ejemplo la de los campos electromagnéticos, no pueden nunca ser mayores *en media* que aquellos a los que estamos expuestos por la existencia natural de los campos electromagnéticos. La cuestión pues solo admite una respuesta tras un balance riguroso. La razón beneficio/riesgo debe analizarse desapasionadamente y con perspectiva. Como en el caso de la radiación ultravioleta solar debemos buscar la condición crítica de equilibrio en la limitación de intensidades que dependerá de cada rango de frecuencias.

Un dato a considerar con vista a elaborar un detallado análisis de los riesgos que permite estimar el estado actual del conocimiento de los fenómenos biológicos es el que se refiere a las intensidades de campo magnético asociado a la transmisión de la energía en forma eléctrica. Los campos eléctricos generados por los conductores que forman las líneas de transmisión son de 50 Hz. El campo magnético que existe debajo de una línea normal nunca supera los 20 microteslas. El campo magnético continuo en el que nosotros nacemos y vivimos oscila de un punto a otro de la superficie de la Tierra pero es del orden de 50 microteslas. El campo magnético que actúa sobre un paciente en un experimento de Resonancia Magnética Nuclear es de cuatro millones de microtesla ó cuatro teslas.

EL MARCO EN QUE SE ENCUADRA LA RECOMENDACIÓN EUROPEA

Ante: 1) El aumento casi exponencial de la densidad de energía electromagnética asociada a los dispositivos que continuamente se crean y se utilizan socialmente, 2) la existencia de una presión social auténtica que exige, con todo derecho, información fiable y que está basada en una hipersensibilidad hacia los efectos de los campos electromagnéticos, 3) La realidad del problema, desde el lado de la biología, debido a que no se conocen en detalle todos los mecanismos físico-químicos que constituyen la vida. 4) La también evidente realidad de que muchos de los ingredientes del problema, concretamente los relacionados con la física de los campos electromagnéticos son científicamente conocidos de forma rigurosa y bien establecida. Así son, por ejemplo, las fuerzas que los

campos eléctricos y magnéticos producen sobre partículas cargadas.

Urge: un esfuerzo de las clases dirigentes por escuchar a los científicos de mayor prestigio, no los que gozan de título académico-administrativos, sino a aquellos de prestigio ganado en sus comunidades internacionales respectivas. Deberían éstos separar lo que es conocimiento científicamente incontestable de lo que es materia de opinión o de investigación y filtrar y ayudar a corregir las decisiones emanadas de los poderes públicos.

En definitiva estas consideraciones precedentes son las que han motivado la actuación del Consejo de la Unión Europea. Los especialistas han reaccionado ante la problemática planteada con el rigor requerido 1) Han reconocido el derecho de la población a la información rigurosa e inteligible y a la salvaguarda de su salud, 2) Han separado lo científicamente comprobado de lo científicamente incierto y 3) Han recomendado a la sociedad, legisladora indiscutible representada por la clase política dirigente, la adopción de medidas razonables cautelares con amplios márgenes de seguridad orientadas a evitar efectos sobre los aspectos desconocidos.

LOS CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS ASOCIADOS A LAS LÍNEAS DE ALTA TENSIÓN (LAT) COMPARADOS CON LOS CAMPOS NATURALES

Actualmente existen en España treinta mil kilómetros de LAT repartidos entre 14000 Km de 400 kV (kV o kilovoltio corresponde a mil voltios, el voltio mide el voltaje o tensión) y 16000 Km de 220 kV. A escala mundial la LAT de tensión mas elevada es de 765 kV. Las de corriente trifásica constan al menos de tres cables colocados a una determinada altura del suelo (líneas aéreas) o bajo el mismo (líneas subterráneas). Los cables conductores se agrupan según diversas configuraciones en delta, en horizontal, etc. Las diferentes configuraciones provocan diferentes campos electromagnéticos. El campo eléctrico que produce una LAT depende del voltaje y de la carga que a su vez para un voltaje dado depende de la capacitancia de la línea que está condicionada por su configuración geométrica. El campo eléctrico fluctúa poco en cada

línea, en torno a un 10% siguiendo las fluctuaciones de tensión. Los valores típicos del campo electromagnético bajo una LAT de 400 kV a nivel del suelo son de 5-10 kV/m para el campo eléctrico. El campo magnético depende de la intensidad y no directamente del voltaje por lo que fluctúa con el consumo y varía generalmente al nivel del suelo bajo la línea entre 1 y 20 microteslas. Ambos campos, eléctrico y magnético, disminuyen a medida que aumenta la distancia a la línea.

El campo eléctrico estático presente en la superficie de la Tierra, debido a una acumulación de carga negativa en el suelo de una milésima de culombio por kilómetro cuadrado, es del orden de 150 V/m y alcanza durante las tormentas el valor de 10 kV/m. Las partículas cargadas de la atmósfera disminuyen progresivamente la carga negativa superficial que recupera su valor durante las tormentas que actúan como baterías de mantenimiento del campo. El campo magnético estático terrestre se cree debido a corrientes eléctricas de convención generadas en el núcleo metálico del Planeta y es máximo en los polos, aproximadamente próximos a los geográficos, con valor 70 microteslas y mínimo en el ecuador, 30 microteslas. En algunos lugares próximos a suelos ferromagnéticos llega a alcanzar valores de 300 microteslas y en España su intensidad media es 45 microteslas. A estos campos naturales estáticos debemos sumar todos los campos de amplio espectro de frecuencias correspondientes a los pulsos de campos electromagnéticos asociados a las descargas eléctricas que continuamente se producen en la troposfera.

Se puede concluir que el campo eléctrico máximo de 50 Hz en las proximidades de una LAT puede ser 50 veces superior al campo terrestre estático habitual y del mismo orden que el generado en las tormentas, mientras que el campo magnético de 50 Hz próximo a la LAT es siempre inferior al campo magnético terrestre.

Los campos magnéticos asociados al suministro de energía se manifiestan no solo en las proximidades de las LAT sino en todos los electrodomésticos de las viviendas, ordenadores y en los motores, generadores y transformadores de las industrias que utilizan la energía de la red en su proceso productivo. Cerca de los electrodomésticos la intensidad de campo mag-

nético de 50 Hz puede alcanzar valores de miles de microteslas que decrecen rápidamente con la distancia.

La mayoría de los trenes y tranvías funcionan con energía eléctrica, continua o alterna. Los campos magnéticos producidos por trenes del ferrocarril suburbano pueden alcanzar fluctuaciones de 30 microteslas en los momentos de máxima aceleración o absorción de potencia. Estos campos fluctuantes, del orden del campo terrestre y cada vez más abundantes constituyen una perturbación indeseable para el funcionamiento de equipos electrónicos de alta sensibilidad como los microscopios electrónicos de barrido y transmisión.

DAÑOS CONOCIDOS O COMPROBADOS DE LOS CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS SOBRE LA SALUD. LAS NORMAS CAUTELARES ESTABLECIDAS POR LA UNIÓN EUROPEA

El protocolo de Recomendaciones en su doble aspecto de Restricciones Básicas y Niveles de Referencia está basado en los datos conocidos o comprobados relativos a los efectos de la corriente eléctrica en el organismo. Su base es limitar el nivel de corriente que se puede inducir en el interior de un organismo por el hecho de estar expuesto a un campo electromagnético. Se sabe que las corrientes naturales dentro de un organismo oscilan entre 1 y 10 mA/m². El umbral para producir claramente efectos nocivos es 100 mA/m², pero en el rango de 10 a 100 pueden producirse alteraciones biológicas no necesariamente nocivas. La Comisión ha establecido por tanto un primer margen de seguridad de 10 al decir que no deben superarse 10 mA/m²; más aún aumenta este margen de seguridad hasta 50 al establecer que no deben superarse 2 mA/m². Lo que pretende la Recomendación es proporcionar a todos los ciudadanos de la Comunidad Europea un alto nivel de protección de su salud frente a la exposición a los campos electromagnéticos medioambientales de modo que se evite la inducción de corrientes con intensidad de riesgo

Las corrientes eléctricas en un medio natural dependen de la conductividad del medio y del campo

eléctrico que actúa sobre él. Comenzaremos por estimar los valores del campo eléctrico producido en la membrana de las células por los campos electromagnéticos de 50 Hz de la intensidad máxima producidos por LAT.

El cuerpo humano es conductor eléctrico para campos estáticos y de baja frecuencia cómo son los campos de 50 Hz. Cuando se introduce un conductor en un campo eléctrico las líneas del campo se distorsionan de tal modo que el campo en la superficie del conductor es perpendicular a ella y su valor se reduce varios ordenes de magnitud en el interior del conductor. El campo eléctrico es a su vez perpendicular a las superficies de potencial constante, por tanto estas superficies que eran paralelas a la superficie de la Tierra en ausencia de conductores se deforman en torno a los cuerpos conductores tomando su forma. En un campo eléctrico de 10 kV/m se produce por el cuerpo humano una reducción tal que en su interior la intensidad pasa a ser de 400 $\mu\text{V}/\text{m}$ (donde μV significa microvoltio o millonésima parte de voltio. La disminución es de 10^4 V a 10^{-4} V o de ocho ordenes de magnitud). Debido a que la membrana de las células tienen una mayor resistividad su valor en esta zona fundamental para los procesos biológicos queda reducida a 1 V/m.

Un campo magnético de 50 Hz y de 100 microteslas de intensidad, produce por inducción electromagnética un campo eléctrico equivalente en promedio a 5mV/m (mV es milivoltio o milésima de voltio), tomando en la superficie celular o membrana un valor de 14 V/m.

Los dos valores de campo eléctrico producidos en la membrana celular por los campos eléctricos y magnéticos máximos asociado a una LAT son 1 y 14 V/m respectivamente, sin embargo el campo fluctuante que debido al ruido térmico aparece en las membranas celulares es muy superior, del orden de 300 V/m.

Las corrientes eléctricas pueden producir a su paso por el cuerpo daños en el sistema cardiovascular y en el sistema nervioso central. Según la Recomendación su límite de seguridad, para largas duraciones, es de 8 miliamperios (mA) por metro cuadrado (m^2) para frecuencias inferiores a 1 Hz y de 2 mA/ m^2 para frecuencias comprendidas entre 4 y 1000 Hz. En el rango de frecuencias de interés la corriente máxima es de 0.5

mA. La corriente de corta duración umbral que detecta un organismo medio como sensación de calambre es de 25 a 40 mA. A 50 mA hay daños graves en el tejido en contacto con el conductor que origina la corriente. Para alcanzar la seguridad de que la intensidad de corriente de larga duración se mantiene inferior a este valor de 0.5 mA la intensidad de campo magnético en el rango comprendido entre 0.025 kilohertzios y 0.8 kilohertzios debe mantenerse inferior a $5/f$ microteslas donde, como explica el cuadro 2 de la Recomendación, f es la frecuencia del campo en kilohertzios. Al ser 50 hertzios = 0.05 kilohertzios, $5/f$ resulta ser $5/0.05$ igual a 100 microteslas.

Otro efecto comprobado de los campos electromagnéticos es el calentamiento que producen las microondas de frecuencia coincidente con la de oscilación interna de la molécula de agua en cuerpos que contengan agua. Este efecto de resonancia que permite absorber la energía de la radiación y transformarla en energía elástica de las moléculas es la base del calentamiento en hornos de microondas. Aunque su frecuencia se encuentra ocho ordenes de magnitud por encima de la frecuencia de la red de suministro industrial constituye un efecto de interés en el caso de la telefonía móvil donde la proliferación de uso podría llegar a plantear este tipo de problemas. En concreto se sabe que un aumento de la temperatura de 1 grado forzado por radiación electromagnética produce daño en los tejidos. Para este incremento de temperatura es preciso que el organismo reciba una dosis de 4 W/kg ó 4 watios por kilogramo. Cuando la energía de la radiación de microondas que alcanza al cuerpo es inferior a 0.4 W/kg no se producen efectos de daño térmico de ningún tipo con un amplio margen de seguridad. Este valor de la densidad de energía por unidad de masa constituye el límite recomendado.

En resumen, hoy día está comprobado i) que corrientes eléctricas, en el rango de frecuencias comprendido entre 5 Hz y 1 kHz, cuando superiores en densidad a 10 mA/ m^2 , pueden afectar las funciones normales del cuerpo humano (no sólo sistema nervioso central, puesto que pueden producir extrasístoles) ii) el aumento de temperatura por encima de 1 grado puede producir efectos biológicos adversos. El efecto de daño térmico solo puede ser generado por frecuencias del orden de gigahertzios o microondas y la restricción se define respecto a la potencia absorbida por unidad

de masa que debe permanecer por debajo de 0.4 W/kg^2 .

La medida de la respuesta biológica en laboratorio y en voluntarios ha mostrado la inexistencia de efectos adversos producidos por campos de baja frecuencia a los niveles de intensidad a los que normalmente se encuentra expuesto el público. Los efectos más consistentes apreciados por los voluntarios son la aparición de imágenes fosforescentes y la reducción temporal del ritmo cardiaco, sin que ambos síntomas parezcan guardar relación con trastornos de salud de largo alcance.

DAÑOS O EFECTOS A LARGO PLAZO NO COMPROBADOS

El origen de la alarma social creada en torno a la posible acción nociva de los campos electromagnéticos no proviene de los efectos científicamente comprobados y sobre los que reposa el fundamento de la Recomendación del Consejo de la Unión Europea. Antes al contrario se fundamenta históricamente en una serie de experimentos que por su intrincada naturaleza no han podido nunca verse confirmados hasta la actualidad. Desde final de los setenta se han realizado y publicado numerosos estudios sobre una gran variedad de efectos de los campos electromagnéticos sobre la salud que aportan resultados diversos. En cuanto al tema que más preocupa, que es el del cáncer, se puede decir que no existe ninguna evidencia de que los campos de 50 Hz puedan actuar como iniciadores del proceso canceroso. En cuanto a su capacidad promotora, los estudios sobre modelos animales también parecen descartarla; algunos mecanismos supuestamente promotores, como la interacción con la melatonina, están siendo investigados en la actualidad aunque en el caso del hombre no parecen ser demasiado relevantes

La controversia en este momento se centra por tanto única y exclusivamente en los resultados de un pequeño número de estudios epidemiológicos. Para analizar estos resultados conviene tener presente un índice denominado riesgo relativo de enfermedad que se define como el cociente obtenido de dividir el riesgo de contraer la enfermedad una persona expuesta y el riesgo de una persona no expuesta. Que el riesgo relativo sea superior a uno indica que es posible la exis-

tencia de una relación entre la enfermedad y la exposición. Por ejemplo, si la enfermedad es el cáncer de pulmón y la exposición es fumar el riesgo relativo es de treinta indicando así la existencia de una evidente relación entre la exposición, fumar, y la enfermedad. Se puede considerar que un riesgo relativo superior a 5 indica una fuerte correlación entre la exposición y la enfermedad.

Los estudios que encuentran un riesgo relativo de leucemia aumentado en niños que viven cerca de líneas de alta tensión, encuentran un riesgo relativo ligeramente aumentado de contraer leucemia. Alguno de los primeros estudios encontraron una relación con el tamaño de las líneas y su distancia a las casas, pero cuando realmente se medía el CEM al que estaban expuestos, ésta relación desaparecía. Esto incluye al famoso estudio del Instituto Karolinska de Suecia. En otros países nórdicos no se encontró relación alguna entre cáncer e instalaciones eléctricas.

En los tres últimos años se han publicado importantes nuevos estudios, financiados y dirigidos por Institutos del Cáncer de países como EE.UU., Canadá e Inglaterra. En ellos, se analizan cientos de casos de leucemias y otros cánceres y se miden las exposiciones de los niños a CEM, con aparatos instalados en sus casas o sus mochilas. Los resultados, son tranquilizadores y se pueden resumir con la conclusión del último y más amplio (más de 2000 casos de cáncer) estudio publicado por el UKCCS (Grupo de Estudio sobre Cáncer Infantil en Gran Bretaña) en Diciembre 1999: “el estudio no proporciona evidencia de que la exposición a campos magnéticos asociados con la distribución de electricidad en Gran Bretaña aumente el riesgo de leucemia infantil, cáncer del sistema nervioso central, o cualquier otro tipo de cáncer de la infancia”.

CONCLUSIONES

La normativa dictada en el documento del Consejo “Recomendación de 12 de Julio de 1999 relativa a la exposición del público en general a campos electromagnéticos (0 Hz a 300 GHz) “ al estar elaborada a partir de los datos más fiables e *interpretada posteriormente* por los científicos especialistas de mayor crédito constituye una pieza única para regular las dosis de campos electromagnéticos y evitar posibles riesgos a los ciudadanos. En el documento se diferencian

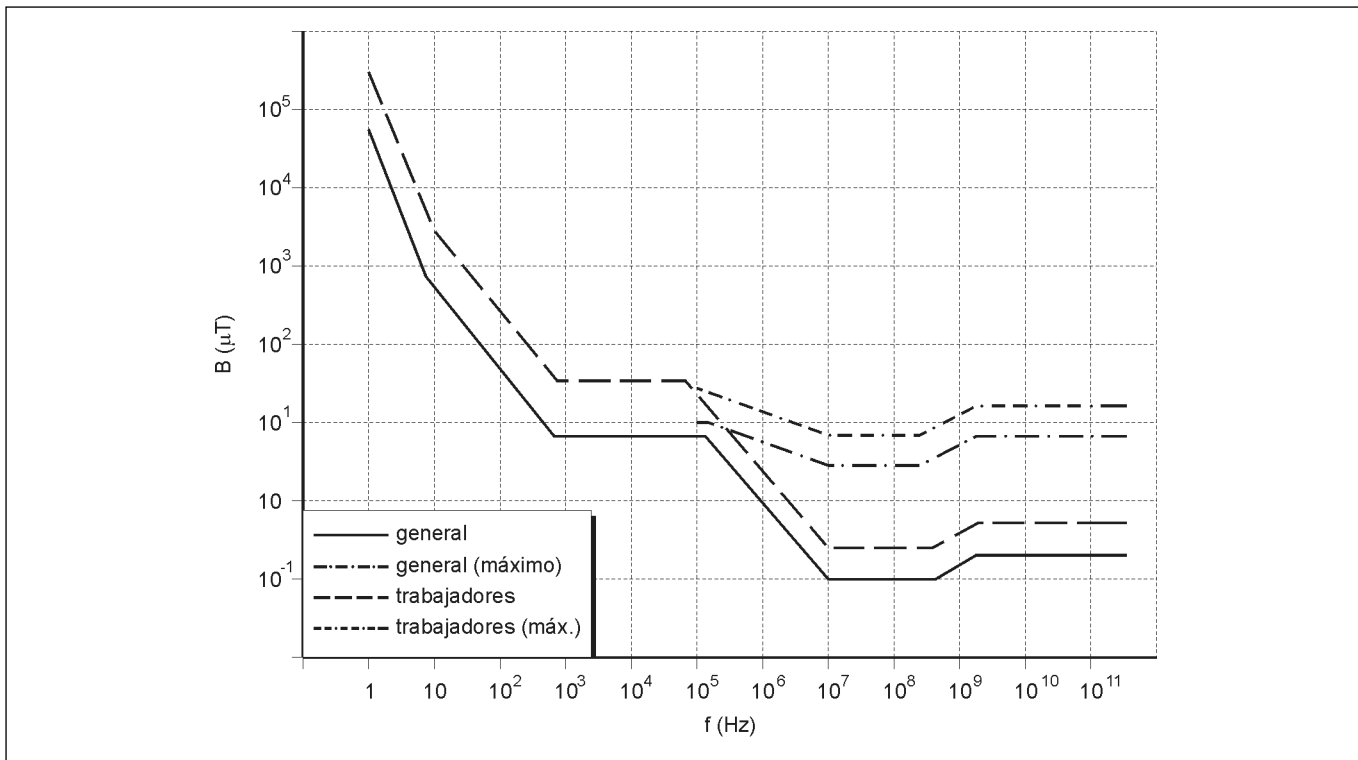


Figura 1. Niveles de Referencia del campo magnético en microteslas en función de la frecuencia en Hz.

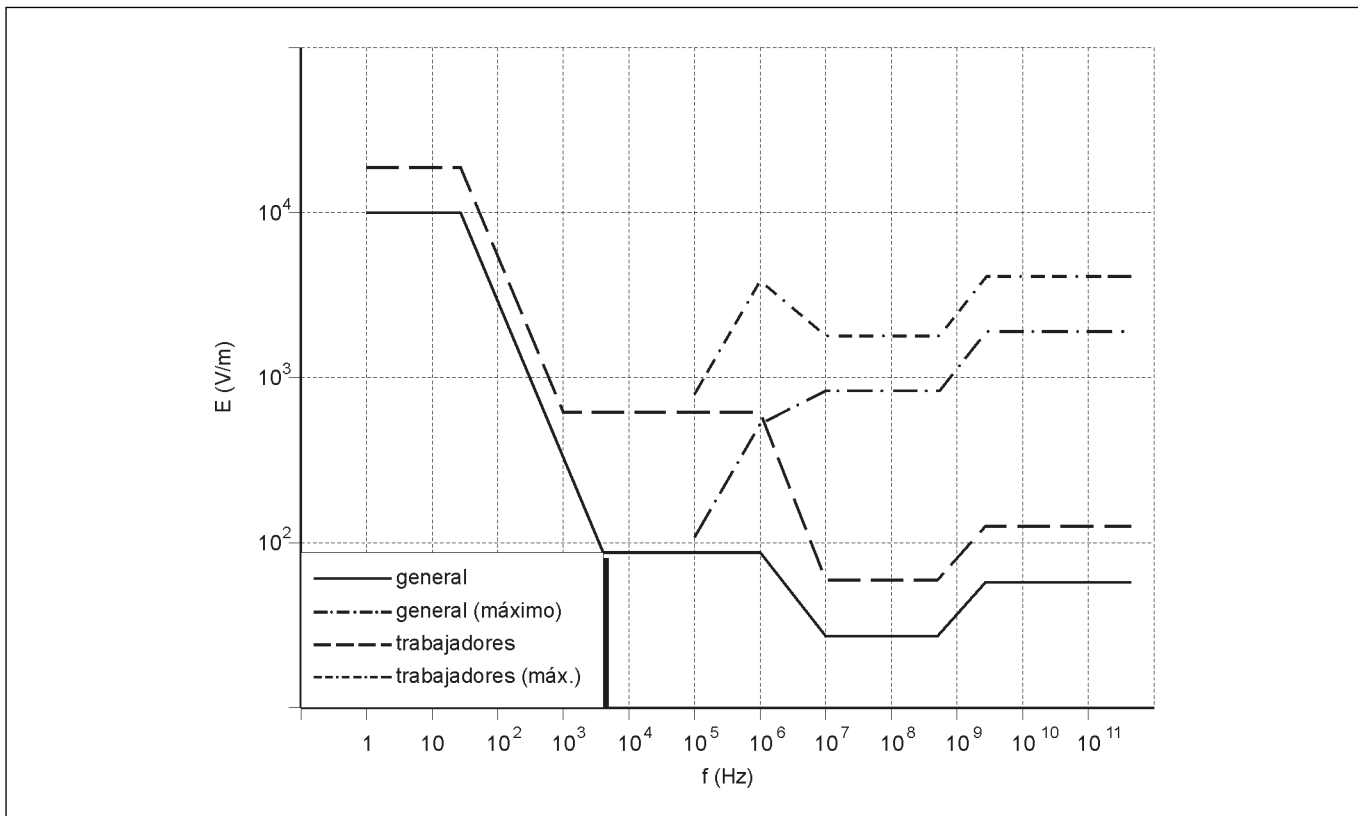


Figura 2. Niveles de Referencia del campo eléctrico en V/m en función de la frecuencia en Hz.

efectos comprobados y efectos no comprobados sobre la salud y se delimitan con un margen extremo de seguridad los valores límites recomendados. En lo concerniente a los campos de 50 Hz se señalan como límite de campo magnético **100 microteslas** y como límite de campo eléctrico **5000 V/m**. Cualquier valor de intensidad de campo o ligeramente superior parece ser dentro del marco de las observaciones actuales inocuo para la salud.

Quizás el aspecto más didáctico del Documento sea el énfasis con que se subraya la importancia de la dosis de riesgo para cada frecuencia del campo electromagnético en función de los daños comprobados generados por cada intervalo de frecuencias. La medida

precisa y rigurosa de los campos electromagnéticos y el incremento de la cultura media ciudadana acerca de los umbrales de riesgo es el mejor remedio contra los efectos nocivos de los campos.

BIBLIOGRAFÍA

1. Real Decreto 1066/2001. Boletín Oficial del Estado 29-Sept. 2001. p. 36217.
2. Recomendaciones sobre exposición a radiaciones no-ionizantes de la ICNIRP. Health Physics. 74 (1998) 494.