

Disc. Apert. UVA 94/95

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

JUAN AYALA MONTORO
CATEDRATICO DE ELECTROMAGNETISMO

**ONDAS
ELECTROMAGNETICAS
Y MEDIO AMBIENTE**

LECCIÓN DE APERTURA DEL CURSO ACADÉMICO 1994 - 95

VALLADOLID
1994

Disc. Apert. UVA 94/95

Disc. Apert. UVA 94/95 BiCe

5>0 0 0 0 2 1 2 2 5 9

~~Disc. Apert. UVA 94/95~~ BiCe
~~~~
1>0 0 0 2 1 2 2 5 9

ONDAS ELECTROMAGNETICAS Y MEDIO AMBIENTE

LECCIÓN DE APERTURA DEL CURSO ACADÉMICO 1994 - 95

A: 18.7.15

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ONDAS ELECTROMAGNETICAS Y MEDIO AMBIENTE

LECCIÓN DE APERTURA DEL CURSO ACADÉMICO 1994 - 95

JUAN AYALA MONTORO
CATEDRATICO DE ELECTROMAGNETISMO

Disc. Asign. 21A 94/95



VALLADOLID
1994

Mgfc. y Excmo. Sr. Rector
Excmos. e Ilmos. Sres.
Comunidad Universitaria
Sras. y Sres.

Dentro del riguroso turno que reglamentariamente establece la tradición universitaria para este acto solemne de Apertura de Curso me corresponde intervenir en la inauguración del curso 1994-95 y, como suele ocurrir en estas ocasiones, la primera preocupación que acude a la mente del conferenciante está relacionada con la toma de decisión sobre el contenido de su disertación, siempre difícil de plantear, pues la extensión y diversidad de los conocimientos humanos actuales han motivado una profunda especialización del profesorado universitario. De ahí la dificultad de compaginar la aridez de los contenidos de un área concreta de conocimiento con la necesidad de elegir un tema que pueda ser tratado de una forma más general y adecuada a una lección de apertura de curso.

En consecuencia, la búsqueda del tema apropiado me ha llevado a meditar sobre la utilización que actualmente se hace de los descubrimientos científicos que, en la mayoría de los casos, se traduce en innovaciones técnicas encaminadas a la búsqueda del bienestar próximo de nuestra sociedad, pero que olvida, en ocasiones, los posibles perjuicios o riesgos que esos descubrimientos científicos pueden crear, a largo plazo, a nuestro entorno e incluso a nosotros mismos.

Desde esta perspectiva, me he decidido por hablar, dentro de mi especialidad, de los posibles efectos o riesgos medioambientales que puede producir la manipulación humana de las ondas electromagnéticas, tema muy debatido en la actualidad y lo suficientemente importante como para sensibilizar a la opinión pública y motivarla, con el fin de que la sociedad adopte las medidas de protección necesarias para que la utilización de estas ondas se realice con las máximas garantías de seguridad.

Así, el tema concreto se puede enunciar como “Ondas Electromagnéticas y Medio Ambiente”, que afecta a un complejo sistema de factores físicos, bioquímicos, sociales, culturales, económicos y políticos que entretajan la actividad humana y de los que es muy difícil obtener resultados claros y concretos. El gran número de intereses que intervienen dan lugar a que, en muchas ocasiones, se escondan resultados convincentes, mientras que en otras, se provoquen alarmas injustificadas. Por todo ello, procuraré mantener el hilo de la disertación dentro de unos términos de descripción de hechos, evitando tomar posiciones extremas.

ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS Y MEDIO AMBIENTE

El mundo físico en el que vivimos está gobernado por cuatro interacciones de distinta naturaleza: las fuerzas nucleares fuertes, las fuerzas nucleares débiles, las fuerzas gravitatorias y las fuerzas electromagnéticas. Cada una de estas fuerzas ejerce su influencia principalmente sobre un orden de magnitud distinto. Así, las fuerzas nucleares, fuertes y débiles, de muy corto alcance son responsables a escala microscópica de la estabilidad y de los fenómenos radiactivos en los núcleos atómicos. Las fuerzas gravitatorias son fundamentales a escala cósmica, donde existen grandes concentraciones de materia eléctricamente neutra, por lo que intervienen como la parte más importante en el equilibrio de nuestro universo.

Las fuerzas electromagnéticas intervienen, principalmente, a una escala intermedia entre las indicadas anteriormente; es decir, son fuerzas fundamentales en todos los procesos físicos que ocurren en nuestro mundo próximo. Tanto las propiedades físicas y químicas de la materia como las leyes que rigen la biología a escala molecular tienen una gran dependencia con el comportamiento de este tipo de fuerzas. Basta indicar que estas fuerzas son las responsables directas del orden repetitivo y preciso de las estructuras cristalinas, de las complicadas cadenas tridimensionales de las proteínas, de las órdenes neuronales en el sistema nervioso de los seres vivos, e incluso se sugiere actualmente que los animales multicelulares usan algún tipo de sistema de comunicación electromagnética para mantener su forma.

Vista la importancia de estas interacciones en el mundo que nos rodea parece interesante profundizar un poco en el electromagnetismo y esbozar los posibles efectos de las ondas electromagnéticas sobre los seres vivos. Sobre todo, teniendo en cuenta que, si bien, la vida animal se ha desarrollado en presencia de campos geoelectrónicos y geomagnéticos cuasiestáticos, en este siglo se ha producido la manipulación humana de este tipo de radiación, utilizada como medio de comunicación o transmisión de energía, que atraviesa la superficie terrestre, introduciendo una amplia gama de frecuencias e intensidades no existentes anteriormente y cuyos efectos directos sobre los seres vivos se discuten actualmente. Las conclusiones son controvertidas debido a diversos factores como la propia complejidad del fenómeno, la relativa proximidad de la iniciación de su manipulación y la cantidad de intereses económicos, políticos y sociales en los que repercute su estudio.

El electromagnetismo, como cualquier otra rama de las Ciencias Naturales, nace a través de una etapa previa de descripción cualitativa de fenómenos eléctricos y magnéticos

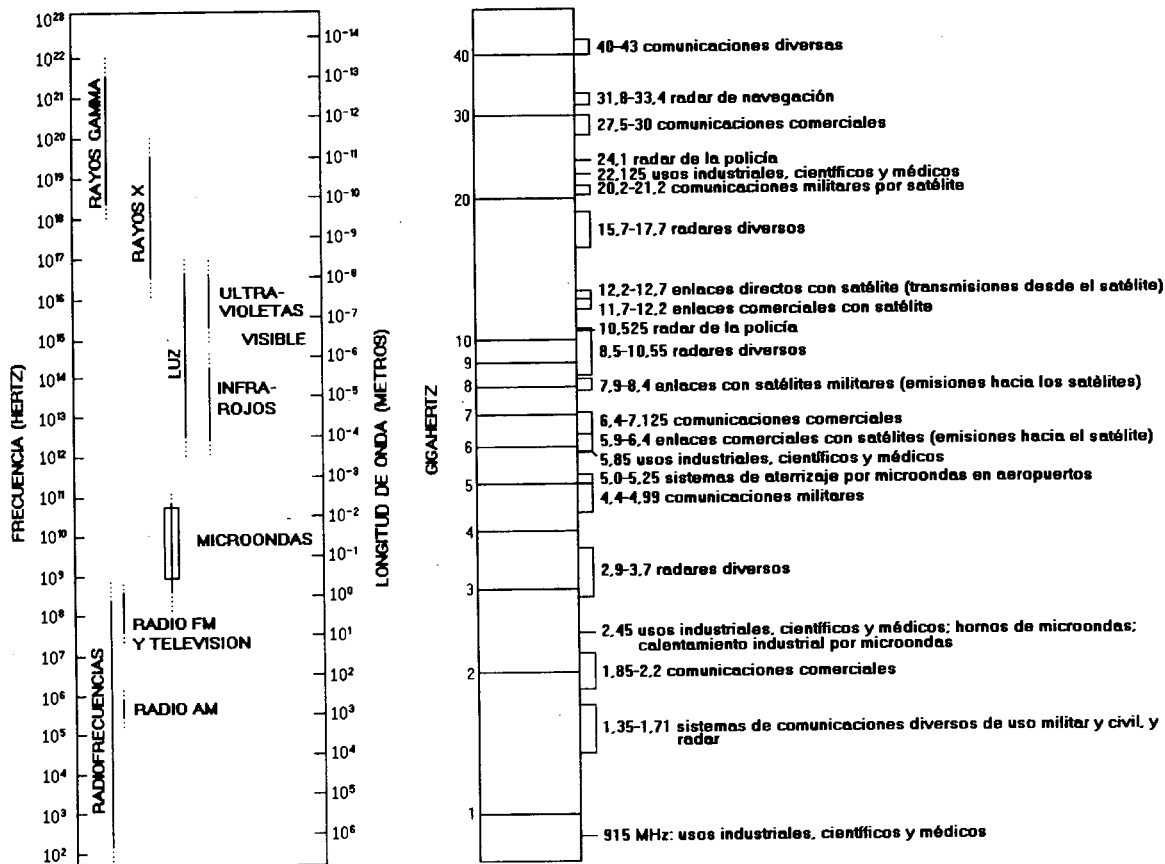
aislados y su posterior clasificación mediante analogías que los hacen afines. Se puede decir que toma entidad propia, como ciencia dentro de la física, a partir del año 1600 con la obra “De Magnete” de William Gilbert. Su estudio cuantitativo se fundamenta con la Ley de Coulomb para la electrostática, entre 1785 y 1789, y posteriormente, la experimentación con la pila descubierta por Volta (1800) permite fundamentar el magnetismo a partir de la corriente eléctrica mediante la ley de acciones electrodinámicas establecida por Ampere en 1826.

Durante la segunda mitad del siglo XIX se introdujeron en este campo ideas nuevas, revolucionarias, que abrieron para la física un nuevo punto de vista filosófico, distinto del anterior mecanicista. Los resultados de los trabajos de Faraday (1831) y Maxwell (1837) condujeron a la creación de nuevos conceptos que permitieron establecer una imagen distinta de la realidad, formulada como leyes del campo electromagnético, cuya descripción cuantitativa está sintetizada en las ecuaciones de Maxwell, sobre la base de que los campos eléctrico y magnético están entrelazados entre sí, de forma que un campo eléctrico, variable con el tiempo, genera un campo magnético; a la vez que un campo magnético, variable con el tiempo, genera un campo eléctrico. La formulación de estas ecuaciones es el acontecimiento más importante que ocurre en la física desde los tiempos de Newton, pues, si bien, las leyes enunciadas por Newton permitieron un espectacular avance en la interpretación de la mecánica celeste, las ecuaciones de Maxwell establecen un nuevo concepto en la física, el campo, mediante unas ecuaciones que representan la estructura misma de dicho campo y que ha permitido durante el presente siglo un desarrollo técnico insospechado en la ingeniería eléctrica, en la electrónica y en el dominio de las comunicaciones.

Del mismo modo que la teoría de Newton permite seguir la historia de una partícula material, a partir de unas condiciones iniciales, las ecuaciones de Maxwell permiten conocer la historia del campo electromagnético. Las variaciones temporales de las fuentes del campo, cargas y corrientes, se propagan en el espacio en forma de onda electromagnética, con una velocidad finita, transportando la energía irradiada por la fuente como ocurre en todo fenómeno ondulatorio.

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LA RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA

Una fuente electromagnética, variable con el tiempo, produce a su alrededor un campo eléctrico y un campo magnético igualmente variables con el tiempo y ortogonales entre sí. Estos campos cuando se distancian de la fuente se propagan en el espacio en forma de onda electromagnética transversal, es decir, manteniendo los campos en un plano perpendicular a la dirección de propagación. Las características de este movimiento ondulatorio son su velocidad de propagación (v), que es única para todas ellas en el vacío y de valor $c=3 \cdot 10^8$ m/s (velocidad de la luz); su frecuencia (ν), que se define como el número de ondas completas que pasan por un punto cualquiera del espacio en la



IZQUIERDA: Espectro de ondas electromagnéticas. DERECHA: Zona correspondiente a la banda de microondas (en gigahertz).

unidad de tiempo y que se mide en número de ciclos por segundo o hertz (Hz). Otra magnitud característica es su longitud de onda (λ), que es la distancia, medida a lo largo de la línea de propagación, entre dos puntos adyacentes que están en cualquier instante en el mismo estado de perturbación. Se mide en unidades de longitud. Estas magnitudes están relacionadas por la ecuación $v=\lambda \cdot \nu$, o bien, para el vacío $c=\lambda \cdot \nu$.

El conjunto de todas las formas de energía radiante que existen en el universo componen el Espectro Electromagnético y en él se pueden establecer distintas regiones, asociadas a diferentes intervalos de longitud de onda o de frecuencia. Así, partiendo de las frecuencias más bajas (algunos hertz) se pueden distinguir las regiones de radiofrecuencias, microondas, infrarrojo, luz visible, ultravioleta, rayos X y radiaciones gamma; las zonas contiguas se solapan generalmente unas con otras

El campo electromagnético se propaga mediante las leyes de la mecánica ondulatoria, por tanto se comporta como una onda en cuanto a los procesos de superposición, reflexión, refracción, polarización, dispersión y difracción.

INTERACCIÓN CON LA MATERIA

La propagación de la radiación electromagnética se interpreta correctamente con el concepto de onda, mientras que su interacción con la materia requiere considerar a dicha radiación como un corpúsculo, e interpretarla a través de los postulados de la mecánica cuántica, según los cuales los intercambios de energía entre la radiación incidente y la materia tiene lugar mediante cantidades que son múltiplos enteros de una unidad fundamental llamada cuanto o fotón, de valor $h\nu$, donde h es la constante de Planck ($6,6 \cdot 10^{-34}$ Julios.s) y ν la frecuencia de la radiación incidente.

La interacción de la radiación con la materia depende, por consiguiente, de la frecuencia incidente. En el caso de incidir sobre seres vivos, las radiaciones con frecuencias elevadas del espectro - rayos X y radiaciones gamma - pueden poseer energía suficiente como para alterar la estructura interna molecular o romper los enlaces internos, dando lugar a que las moléculas neutras queden cargadas y produzcan, consecuentemente, un daño en los tejidos. Este tipo de radiación recibe el nombre de ionizante.

Las radiaciones de frecuencias más bajas - ultravioleta, luz visible, infrarrojo, microondas y radiofrecuencias - no poseen suficiente energía como para provocar la ionización de la materia, por lo que, en contraposición con las anteriores, reciben el nombre de no ionizantes.

En las interacciones de la radiación no ionizante con la materia viva molecular se produce una conversión de la energía radiante incidente en energía rotacional y vibracional, que puede llegar incluso a alterar los niveles eléctricos de las moléculas. La dependencia de esta energía con la frecuencia nos permite diferenciar estas acciones y asociarlas con las distintas bandas de frecuencia del espectro; así, la capacidad de producir cambios en los niveles electrónicos se produce en las radiaciones de frecuencias más elevadas (ultravioleta y visible). Los niveles vibracionales corresponden a frecuencias intermedias (infrarrojo) y finalmente los niveles rotacionales, en que la energía incidente

se emplea en movimientos de rotación de los átomos que componen la molécula, son características de las frecuencias inferiores (microondas y radiofrecuencias).

La energía asociada a rotaciones y vibraciones de las moléculas se transforma en última instancia en energía térmica. En el caso de transiciones electrónicas la energía puede transformarse en energía térmica o producir reacciones fotoquímicas.

RADIACIONES DE MICROONDAS Y RADIOFRECUENCIAS

Este tipo de radiaciones, al que nos vamos a referir en lo sucesivo, corresponde a las frecuencias más bajas del espectro y por tanto son las portadoras de menor cantidad de energía, baste decir que la energía de un fotón de microondas de un gigahertz supone tan sólo la seismilésima parte de la energía cinética que posee una molécula del cuerpo como resultado de la agitación térmica. Esta energía es incapaz de romper el enlace químico más débil.

La tierra ha estado expuesta, durante milenios, a un “ruido de fondo” natural de origen eléctrico y magnético. A estos campos electromagnéticos les corresponden unos niveles de potencia muy bajos, aun en los casos más desfavorables como puede ser la proximidad de una tormenta con un fuerte aparato eléctrico. Por esta causa y porque dichos niveles de radiación son naturales y consustanciales con la vida misma, su repercusión sobre los seres humanos es prácticamente nula.

No obstante, la utilización cada vez mayor de estos sistemas de radiación electromagnética, en una gran variedad de aplicaciones técnicas, ha dado lugar a generar, transmitir y operar a altos niveles de potencia y en una amplia gama de frecuencias, en todo tipo de instalaciones, lo que puede conducir a que se produzcan alteraciones, directas o indirectas, en los tejidos humanos con el consiguiente riesgo para la salud.

Las hipótesis establecidas por Maxwell, en la segunda mitad del siglo pasado, le llevó a predecir la existencia de las ondas electromagnéticas, hecho que fue confirmado por Hertz, quien realizó las primeras demostraciones experimentales con las ondas electromagnéticas generadas y manipuladas por el hombre. Sólo cinco años después, en 1888, D'Arsonval realizó los primeros ensayos para su aplicación terapéutica.

A partir de esta fecha, apenas un siglo de separación de nuestros días, la utilización de dispositivos, en esta zona del espectro, ha crecido progresivamente. Se puede mencionar la adopción de la corriente alterna, frente a la continua, como medio de transmisión y suministro de energía para los dispositivos industriales y domésticos, cuyo inicio data de 1893, fecha en que se utilizó para iluminar la Exposición Mundial de Chicago, lo que motivó su rápida difusión y distribución a partir de generadores alimentados por las Cataratas del Niágara.

El invento del tubo de vacío en 1907 por De Forest permitió el nacimiento de la Radiodifusión al comienzo de los años veinte. Concretamente, en España comienzan las emisiones en forma experimental en 1923 y las emisiones regulares en 1924 (EAJ 1 Radio Barcelona).

La Segunda Guerra Mundial resultó decisiva para el incremento de la utilización de

los campos electromagnéticos en nuestro entorno, ya que, no sólo aumentaron sensiblemente las emisiones de Radio en Onda Corta sino que también favoreció el incremento de las radiaciones en la banda de las microondas, a causa de la eficacia de los dispositivos de Radar (que utilizan la propiedad que tienen las ondas electromagnéticas de reflejarse sobre superficies metálicas). El uso de este dispositivo se extendió ampliamente, después de la guerra, al sector civil.

No es difícil asegurar que, hoy en día, estamos rodeados por una amplia gama de radiaciones que, a estas frecuencias, emiten todo tipo de dispositivos fabricados por el hombre. El incremento de demanda de energía, distribuida en forma de energía eléctrica, y la importancia creciente de los medios de comunicación e información, ha hecho posible que sean habituales en nuestro entorno dispositivos de radar militar y de navegación, de control de tráfico aéreo y de sistemas de comunicación, televisión vía satélite, equipos telefónicos a larga distancia, emisiones de radio y televisión, líneas de distribución de energía eléctrica de alta y baja tensión, así como un gran número de equipos eléctricos, industriales y domésticos, en toda esta gama de frecuencias.

Todo esto pone de manifiesto que nuestro entorno electromagnético ha cambiado más que ningún otro en unas pocas decenas de años. Cabe por tanto preguntarse si esto es perjudicial para los seres vivos y en especial para la salud humana. La respuesta es compleja y complicada, motivo por el cual en la actualidad existe una fuerte controversia científica sobre todos estos temas.

A pesar de la controversia y el gran número de trabajos publicados no existen pruebas concluyentes de que los bajos niveles de energía, que soporta la mayor parte de la población, puedan causar daños perceptibles para la salud, pero, de todas formas, es conveniente que esta misma población conozca la posibilidad de riesgo y sea sensible a que este aspecto del medio ambiente se vigile, regule y cuide convenientemente con el objeto de que no suponga peligro alguno para la salud pública.

Por todo ello, sin tomar posición sobre las situaciones no claras de riesgo, vamos a limitarnos a describir los riesgos analizados y descritos en los últimos años.

INTERACCIÓN DE LA RADIACIÓN CON LOS SISTEMAS BIOLÓGICOS

Las radiaciones ionizantes que, como hemos dicho anteriormente, constituyen las zonas de frecuencia más elevada del espectro electromagnético, son muy energéticas y consecuentemente pueden causar daños irreparables sobre los seres vivos que incluso pueden ser transmisibles genéticamente. El conocimiento de la peligrosidad de estas radiaciones ha llevado a adoptar normas que establecen fuertes medidas de seguridad y protección para su manipulación como ocurre, por ejemplo, en el uso médico de los isótopos radiactivos y de los rayos X así como en las instalaciones de centrales nucleares.

Las radiaciones en zonas del espectro de frecuencias más bajas, de la que nos

ocupamos, transportan menor cantidad de energía, por lo que son menos agresivas que las anteriores y sus posibles efectos son distintos y generalmente menos visibles.

La interacción de las ondas de radiofrecuencia y microondas con la materia viva es muy compleja y el simple conocimiento de la radiación incidente no es suficiente para caracterizarla, ya que parte de ésta se refleja, parte se absorbe y parte se transmite, lo que lleva a establecer estimaciones de radiación, en el interior del medio receptor, mediante hipótesis simplificadoras que lógicamente representan situaciones parciales y están supeditadas a críticas. Por tanto, hay que limitarse a considerar sólo algunos de los factores característicos tanto de la onda como del medio receptor, tales como las propiedades dieléctricas o conductoras del tejido, el tamaño y forma geométrica del objeto receptor (fenómenos de resonancia), la posición relativa de la onda incidente con el objeto (polarización), la frecuencia e incluso la forma de la onda, que está supeditada a que los campos incidentes sean próximos al generador o alejados, en cuyo caso las ondas son planas.

Basta decir, para analizar la complejidad del proceso, que una de las polémicas suscitadas sobre los posibles efectos nocivos de las radiaciones en los seres humanos gira en torno a la extrapolación de resultados mediante experiencias realizadas con animales pequeños, ratas, sobre la base de la potencia incidente y a una determinada frecuencia. Los que aluden a falta de rigor en la experimentación, alegan que las diferencias de tamaño y forma no permiten extrapolar los resultados a los humanos, por suponer factores distintos debidos a las posibles resonancias de la radiación e incluso a que la acción de una onda puede conducir a distintos resultados en sujetos que adoptan posiciones habituales diferentes, horizontal o vertical. Los que defienden los efectos nocivos de la radiación alegan que dichas diferencias pueden compensarse con factores de escala y dosimetría adecuados

Atendiendo a las características de propagación y al uso de las ondas que estamos describiendo se suele utilizar distinta nomenclatura, generalmente aceptada, para designar las diferentes bandas de frecuencias que componen esta zona del espectro, que se han establecido entre los límites indicados en la tabla.

Banda	Frecuencias	Límites
ELF	Extremadamente Baja	0-3 kHz
ULF	Ultra Baja	3-30 kHz
LF RF	Baja	30-300 kHz
MF	Media	300-3000 kHz
HF	Alta	3-30 MHz
VHF	Muy Alta	30-300 MHz
UHF	Ultra Alta	300-3000 MHz
SHF MO	Super Alta	3-30 GHz
EHF	Extremadamente Alta	30-300 GHz

Las tres últimas bandas, UHF, SHF y EHF, se conocen con el nombre genérico de microondas, MO, y las restantes como radiofrecuencias, RF. La red de distribución de energía eléctrica utiliza la banda de LF, 60 hertz en América y de 50 hertz en Europa. La radiodifusión emite en la banda de HF y las emisiones de televisión se realizan en las bandas VHF y UHF. Las bandas de microondas, de 300 megahertz a 300 gigahertz, se utilizan profusamente en sistemas de comunicación.

EFFECTOS BIOLÓGICOS DE LA RADIACIÓN NO IONIZANTE

Los efectos biológicos producidos por las ondas electromagnéticas en los seres vivos, dependen, en bastantes casos, de la cantidad de energía absorbida por el organismo. Esta cantidad de energía, que dependerá de las características eléctricas y geométricas del sujeto en relación con la frecuencia incidente, se degradará, en última instancia, en forma de calor en el interior del sujeto. Por tanto una clasificación primaria de los efectos biológicos de la radiación nos lleva a diferenciar entre dos tipos: efectos térmicos y efectos no térmicos.

Efectos Térmicos

Los efectos térmicos son los que mejor se conocen y, por consiguiente, los menos discutidos. Los fotones de energía absorbidos no tienen suficiente poder energético para ionizar las moléculas, pero sí son capaces de transformarse en energía rotacional, aumentando la energía cinética molecular y produciendo calentamiento.

En el cuerpo humano este incremento de la temperatura corporal se distribuye irregularmente dependiendo en gran medida del contenido en agua de cada tejido o, en otras palabras, de su mayor o menor comportamiento como dieléctrico o conductor. Como consecuencia se establecen gradientes térmicos en el interior del organismo.

No se puede predecir el efecto que esta absorción de energía provoca en la salud, si no se tiene en cuenta la acción de todos los mecanismos termorreguladores del cuerpo humano, los ciclos de irradiación a que está sometido y la capacidad de disipación con el entorno. Las regiones y órganos poco vascularizados, por ejemplo ojos y testículos, tienen más dificultades de termorregulación y son más sensibles a daños térmicos. La piel, que no supone ninguna barrera para las ondas electromagnéticas, juega un papel importante en estos mecanismos termorreguladores.

Cuando el calor acumulado exceda a la capacidad de disipación del sistema termorregulador del organismo, se producirá una hipertermia, que puede dar lugar a lesiones locales: quemaduras, hemorragias, necrosis o muerte tisular.

La absorción no uniforme de la radiación por el organismo humano da lugar a que los modelos de calentamiento no se puedan establecer a partir de las hipótesis simplificadoras de calor radiante, convectivo o de conducción, por lo que obliga a los investigadores, en la mayoría de los casos, a establecer modelos complejos o métodos comparativos estadísticos

mediante la utilización de grupos de control. Además, los gradientes de temperatura inducidos en órganos profundos del cuerpo pueden actuar como estímulos que alteren la función normal tanto del órgano calentado como la de otros órganos del sistema. Así, a partir de una acción primaria de calentamiento, se pueden producir otros efectos indirectos en órganos distantes.

Para que se produzcan estos efectos térmicos es necesario que el cuerpo expuesto tenga unas determinadas dimensiones (como mínimo una décima parte de la longitud de onda incidente) por lo que los efectos térmicos en la banda de frecuencias inferior a 15 megahertz (longitudes de onda superiores a 20 metros) son despreciables para el cuerpo humano. En contraposición, estos efectos son básicos en la banda superior de frecuencias, ocupada por las microondas.

Efectos no térmicos

En fechas más recientes se han observado problemas de salud pública, posiblemente relacionados con radiaciones electromagnéticas, que no son imputables a los efectos térmicos de la radiación. Los resultados de las investigaciones realizadas, más controvertidos que los anteriores, tratan de explicar estos efectos mediante distintos mecanismos, que podemos resumir en los grupos siguientes:

- Interacciones a nivel molecular, celular o tisular.
- Interferencias directas con procesos bioeléctricos, en órganos que muestren una actividad eléctrica especialmente modulada (alteraciones registradas en electroencefalogramas y en electromiogramas).
- Alteraciones en la transmisión genética.
- Alteraciones en el comportamiento

Como se ha indicado, los efectos primeramente observados y más claros de detectar e interpretar son aquellos en que su interacción biológica se expresa exclusivamente en términos de conversión en energía térmica. La observación posterior de los otros efectos, aparentemente independientes del proceso de calentamiento, llevó a establecer la diferenciación entre efectos térmicos y efectos no térmicos. Sin embargo, esta división no aparece suficientemente clara en muchas ocasiones.

La actuación de los mecanismos termorreguladores del organismo, que tienden a mantener la temperatura corporal, son un factor distorsionador que introduce dudas en cuanto a la clasificación de los efectos. Los mecanismos termorreguladores de los seres vivos se pueden clasificar en mecanismos activos y pasivos. Los pasivos permiten la disipación del calor corporal por radiación, conducción, convección y el enfriamiento por evaporación. La eficacia de este proceso está íntimamente ligada a las condiciones ambientales que rodean al ser vivo. Los mecanismos activos potencian la acción de los pasivos, mediante el empleo de fluidos de circulación interna, como la sangre, que transfieren calor a las regiones externas, donde los mecanismos pasivos son más eficaces. En los animales cubiertos de pelo el mecanismo activo más eficaz se obtiene a través de la respiración, que permite transferir el aire, calentado por la vascularización pulmonar, al

exterior. Otros mecanismos de este tipo son la vasodilatación y la sudoración cutáneas en los humanos y el sudor a través del hocico y de las patas en los animales cubiertos de pelo.

Otra causa de confusión en esta clasificación de efecto térmico y no térmico puede ocurrir por la absorción no uniforme de la radiación, que, como hemos dicho, puede dar lugar a gradientes de temperatura entre órganos distantes y enmascarar su clasificación.

El problema de la clasificación se complica aún más por discrepancias semánticas entre científicos con formación física, para los que los fenómenos térmicos pueden estar asociados a la energía radiante que se convierte en calor en el organismo, y los que proceden de una formación biológica, para los que el término térmico se utiliza en función de la posibilidad de observación de la temperatura corporal.

También hay que indicar que, si bien la acción de las microondas y radiofrecuencias sobre los seres humanos pueden afectar tanto a órganos como a sistemas orgánicos y producir alteraciones funcionales o estructurales, cuando los efectos biológicos de la radiación permanezcan dentro de la escala de compensación normal del propio organismo, no serán necesariamente perjudiciales para la salud. De hecho, algunos efectos pueden mejorar la eficiencia de determinados procesos fisiológicos y por tanto usarse con fines terapéuticos. Sin embargo, otras situaciones pueden conducir a efectos que sean potencial o realmente nocivos para la salud.

LA EXPERIMENTACIÓN Y EL MÉTODO

Dadas las numerosas dificultades que presenta el estudio de la acción de las ondas electromagnéticas sobre la salud humana, se debe ser extremadamente cuidadoso tanto en el planteamiento de los experimentos, por parte de los científicos implicados, como en el análisis de las conclusiones de los trabajos ya elaborados, que pueden llevar a la aceptación de consecuencias para la salud pública. Una revisión crítica de los trabajos publicados en este campo, pone de manifiesto que muchos de los estudios realizados adolecen de defectos de planteamiento, bien por una falta de adecuación de la experiencia, bien por la utilización de elementos técnicos insuficientes, o bien por un control inadecuado de los especímenes biológicos. Se debe tender a realizar una investigación comparativa, cuantitativa y sistemática de los efectos biológicos que utilice experimentos bien controlados.

La diversidad en la preparación científica de los investigadores que han intervenido en estos estudios, -ingenieros eléctricos, físicos, biólogos, psicólogos, fisiólogos y médicos- ha dado lugar, no sólo a planteamientos sesgados hacia el punto de vista del científico implicado, sino también a manipulaciones experimentales alejadas de la preparación específica de los mismos. Así, se han dado situaciones de físicos que efectuaron experiencias de comportamiento biológico, mientras que, en otras ocasiones, médicos llevaban a cabo medidas de la radiación del campo electromagnético.

Otro problema adicional, para la correcta interpretación de los efectos de la radiación sobre la salud humana, se centra en que la mayoría de las experiencias se realizan sobre la

absorción de energía que experimentan animales de laboratorio, para posteriormente extrapolar las conclusiones obtenidas y predecir los resultados que la radiación hubiera supuesto para la exposición humana. Las diferencias físicas y fisiológicas entre las especies son suficientemente importantes como para que cualquier modelo que emplee un test animal agregue confusión al problema si no se interpretan adecuadamente todos los parámetros que intervienen, como pueden ser las diferencias obvias de geometría externa e interna, las diferencias de la propia anatomía, las diferencias en los mecanismos de disipación de calor, y la necesidad de extrapolación a frecuencias distintas de las empleadas en la comparación con los humanos, debido a los fenómenos de resonancia.

La utilización de modelos animales experimentales para analizar las condiciones físicas del entorno, que aseguren la salud y la seguridad humana, debe ser planificada cuidadosamente. La fiabilidad de los resultados podemos basarla en la correcta adecuación de las etapas siguientes:

- Selección del modelo animal idóneo para la experiencia implicada, con acotación de sus limitaciones conocidas.
- Aplicación de métodos experimentales correctos, tanto en la instrumentación como en el control de los procesos biológicos en animales.
- Elección adecuada de los parámetros de escala que permitan extrapolar los datos de los animales al hombre.

Como comentario a estas puntualizaciones, se puede afirmar que en muchas ocasiones los animales han sido seleccionados, en lugar de por su idoneidad, por otras causas distintas, como pueden ser razones económicas, de comportamiento doméstico, o simplemente de facilidad de acceso a la especie utilizada. Sin embargo, puede haber, en estas experiencias, diferencias esenciales que invaliden la extrapolación de resultados, como pueden ser diferencias del metabolismo y fisiológicas o simplemente diferencias en los efectos del tamaño, como ocurre, por ejemplo, con la frecuencia de la radiación que está íntimamente ligada al tamaño o a la posición del cuerpo animal en cuanto a los posibles efectos de resonancia. Igual sucede si se utilizan animales cubiertos de pelo, en los que los mecanismos de disipación de calor son distintos de los humanos.

Otro factor que interviene en la interpretación y extrapolación de los resultados animales al hombre, consiste en la correcta utilización de los datos estadísticos. Las investigaciones se suelen realizar utilizando dos poblaciones diferenciadas de animales, una de ellas sometida a los efectos de la radiación y otra que permanece protegida de ella durante el tiempo de la experiencia, siendo esta última la población de control de la investigación. Las diferencias observadas entre ambas poblaciones se deben interpretar correctamente, separando los factores discrepantes que puedan aparecer, ajenos a la experiencia, de aquellos que son provocados por la exposición. El análisis estadístico debe considerarse en su propia dimensión, es decir, como una ayuda poderosa que forma parte integral de la experiencia, pero que en ningún caso decide lo que es verdadero o falso.

La correcta interpretación, en la aplicación humana, de los datos aportados en la experimentación con animales, dependerá del establecimiento de una dosimetría apropiada que permita extrapolar resultados. Diversos autores se han ocupado de este aspecto y han diseñado escalas de valores para extender los resultados obtenidos con animales a

conclusiones sobre la salud pública, estableciendo valores para la tasa de absorción específica de radiación, TAE, en función de la frecuencia y para diferentes tamaños de animales de laboratorio comparados con el hombre. De todas formas, esta magnitud, que es útil para la extrapolación de resultados, se debe utilizar con precaución, dada la complejidad de los factores que intervienen en el proceso de la radiación.

Hay que reseñar igualmente, en cuanto a la posible crítica de algunos de los trabajos publicados, que, en ocasiones, las conclusiones sobre los posibles efectos de la radiación electromagnética en el organismo humano se han obtenido a partir de experiencias sobre células cultivadas "in vitro". El extender conclusiones de cambios celulares, cuando estas no forman parte de un sistema vivo integrado, es un problema extremadamente delicado. En estas circunstancias las células pueden tener una forma de relación y un ciclo celular distinto al que correspondería si formaran parte de un organismo completo. Por otro lado, la influencia de los agentes exteriores que intervienen pueden afectar a la experiencia, falseando los resultados, ya que los mecanismos de reacción pueden ser diferentes.

Otra técnica utilizada en el estudio de los efectos de la radiación electromagnética en el hombre consiste en la construcción de imágenes que simulen el comportamiento humano ante la radiación. Estas imágenes se realizan con materiales y preparados químicos que reproducen las propiedades dieléctricas y térmicas de los distintos tejidos u órganos del cuerpo humano o parte del mismo. Así, el tejido muscular se ha simulado mediante espuma de polistireno impregnada en una solución salina y en otras ocasiones con una mezcla de agua, gelatina y sal; la sangre puede simularse mediante mezcla de agua y glucosa o agua y alcohol isopropílico. Los órganos suelen ser más difíciles de simular; los pulmones, por ejemplo, se pueden simular mediante glóbulos de sílice huecos suspendidos en una mezcla semilíquida de agua, sal, azúcar y gelatina. Estos métodos permiten realizar estudios de dosimetría y conocer la tasa de absorción de las distintas partes del organismo humano, pero evidentemente tienen grandes limitaciones en cuanto al comportamiento de un ser vivo. En otras ocasiones, se simulan modelos geométricos, en los que la representación matemática de las propiedades eléctricas y térmicas de las distintas partes del cuerpo permite establecer un conjunto de ecuaciones que pueden resolverse mediante técnicas numéricas, en diferentes situaciones de radiación.

Estudios Epidemiológicos

El estudio directo de la acción de las ondas electromagnéticas sobre los seres humanos se realiza a través de trabajos de tipo epidemiológico. Movidos por el interés social sobre los posibles efectos adversos que pueden derivarse para la salud de la exposición a la radiación, los estudios se han centrado más que en los peligros directos, cuyos efectos son obvios, en aquellos otros aspectos más sutiles, como pueden ser los efectos a largo plazo, que por su misma naturaleza son más difíciles de asociar y detectar.

Las investigaciones suministran las evidencias pertinentes sobre los efectos nocivos que la radiación electromagnética puede producir sobre la salud. Aunque se sepa que la seguridad absoluta es inalcanzable, los riesgos se deben descubrir y acotar de forma que se puedan tomar decisiones y en consecuencia regularlos mediante criterios racionales.

En este sentido, la epidemiología, que se ocupa del estudio de la distribución y de los

determinantes de la salud y de la enfermedad en la población humana, desempeña un papel importante como asesora de salud y seguridad; su característica esencial consiste en su naturaleza de observación más que de experimentación. Así, en contra de lo que ocurre en otros tipos de experiencias, se analizan poblaciones de vida libre, de las que se conoce su exposición directa o indirecta a radiaciones, sin que éstas sean impuestas por el investigador.

Aunque hay considerables acuerdos entre los científicos sobre los posibles efectos biológicos y los peligros potenciales de las radiaciones electromagnéticas, también existen grandes áreas de confusión y discrepancia. El riesgo o el peligro se presenta, en primer lugar, como una cuestión filosófica. Una definición objetiva del daño sería establecerlo como un cambio irreversible en las funciones biológicas normales, tanto a nivel de órganos como de sistemas. Esta definición de daño nos llevaría, a su vez, a definir el riesgo, sobre una base estadística, como la probabilidad de recibir un daño. Aun cuando las definiciones parecen claras, hay que puntualizar algunos aspectos sobre las mismas.

En primer lugar hay que tener en cuenta que pueden existir niveles de riesgo en los que el daño puede pasar desapercibido o simplemente no confirmado. Otro punto de vista que hay que plantear es que no siempre los efectos son perjudiciales, de hecho algunos pueden tener aplicaciones beneficiosas, sobre todo, bajo condiciones controladas. Los cambios producidos por la radiación electromagnética se deben analizar con la suficiente profundidad como para conocer su significado clínico, fijar los límites de sus riesgos potenciales y establecer las relaciones de riesgo/ beneficio apropiadas. Es importante determinar si un efecto observado es irreparable, transitorio, reversible y si desaparece cuando el campo electromagnético se suprime o después de un intervalo de tiempo posterior. Cualquier efecto, aun siendo reversible, es inaceptable si transitoriamente deteriora la capacidad de comportamiento del individuo o le impide desarrollar una determinada tarea.

Además, la imposibilidad de precisar la exposición en este tipo de observaciones, genera un factor de azar en las correlaciones que ligan la exposición y el riesgo de enfermedad y por tanto pueden atribuirse a la radiación efectos extraños que actuarían como "confusores" ante la exposición de interés. Debe advertirse, no obstante, que para que un factor extraño actúe como confusor es preciso que éste sea un determinante de la enfermedad analizada. La fiabilidad de los resultados de los estudios epidemiológicos depende, en gran medida, del grado con que tales factores hayan sido controlados y eliminados con el fin de evitar la distorsión. Los métodos estadísticos usados en epidemiología están generalmente diseñados para evaluar la exposición de interés y aislar los efectos que producen esos confusores.

Otro problema añadido, que ofrece este tipo de estudios, consiste en la dificultad para establecer una dosis individualizada para la exposición, ya que su asignación es muy difícil de controlar con precisión. Esto da lugar a la necesidad de desarrollar estrategias de estimación de la exposición. En el caso de pequeñas poblaciones de profesionales sometidos a radiaciones ocupacionales, este aspecto se puede solventar mediante dosímetros personales para cada uno de los trabajadores.

A pesar de las dificultades que plantean la cuantificación de la dosis de exposición, las

posibles perturbaciones de los confusores y la frecuente inconsistencia de los resultados experimentales, los estudios epidemiológicos, aun con sus limitaciones, desempeñan un papel importante en la estimación del riesgo y en la evaluación de los posibles daños causados por la radiación electromagnética.

EFFECTOS NOCIVOS DE LA RADIACIÓN

La fisiología de animales y humanos es el resultado de millones de años de supervivencia en un medio en que sólo existían radiaciones electromagnéticas de origen natural, es decir, procedentes principalmente de causas solares o cósmicas. La reciente manipulación humana de este tipo de radiaciones supone, por tanto, una modificación de las condiciones naturales de la biosfera a la que los seres vivos no están habituados, por lo que en algunas circunstancias pueden producir efectos dañinos sobre órganos o sistemas biológicos.

Los primeros estudios sobre este aspecto de la radiación, se mantuvieron dentro de un campo estrictamente científico. En 1931 (E. Pflomm) se observaron braquicardias inducidas por radiaciones de alta frecuencia, que dieron lugar, en los años siguientes, a controversias sobre la posibilidad de que dichos efectos pudieran tener un origen térmico o no térmico.

La Segunda Guerra Mundial, como hemos dicho, supuso una intensificación de las radiaciones de microondas y propició su extensión al sector civil, aumentando y diversificando sus aplicaciones. El primer efecto nocivo de estas ondas, la formación de cataratas en perros, se hizo público por investigadores de la Clínica Mayo, en 1948. Paralelamente, investigadores soviéticos informaron de la aparición de migrañas y otros síntomas neurológicos entre trabajadores expuestos a radiaciones de microondas a dosis extremadamente bajas. En 1953 un ingeniero de una compañía americana de aviación informó al Departamento de Defensa U.S.A. sobre un tipo de enfermedad característica de los operadores de radar. La Marina de los Estados Unidos convocó una conferencia en la que participaron especialistas en microondas, en bioelectricidad y en regulación térmica; la conferencia no aportó ninguna conclusión importante por falta de datos y supuso que los efectos nocivos de las microondas eran debidos exclusivamente al calentamiento de los tejidos. En 1957 la muerte accidental por sobreexposición al radar de un militar americano produjo una prueba evidente de los riesgos que suponen una radiación excesiva de microondas.

En 1965, los Servicios Secretos Americanos revelan un extraño episodio de la Guerra Fría. La Embajada Americana en Moscú estaba siendo irradiada, desde 1953, con microondas de muy bajo nivel de potencia, moduladas en amplitud y frecuencia, en el rango de las frecuencias extremadamente bajas (ELF). La noticia saltó a la luz pública, promoviendo una fuerte especulación sobre los posibles efectos nocivos de las microondas en el personal de la Embajada. La polémica, que se extendió tanto a la comunidad científica como a la opinión pública, estaba avivada por el hecho de que los límites de exposición, para la población en general, establecidos por la Unión Soviética y los países

del Pacto de Varsovia eran de 100 a 1000 veces menores que los contemplados por las normas americanas y, si bien los afectados habían soportado niveles de radiación inferiores a la norma americana, la radiación recibida sobrepasaba la establecida por la norma rusa. El incidente dió lugar a un estudio clínico, mantenido en secreto bajo el nombre de Proyecto Pandora, en el que tras comparar el estado de salud de los funcionarios afectados, con los residentes en otras embajadas de los países del Este, se llegó a la conclusión de que no había diferencias significativas entre la salud de unos y otros.

La polémica desencadenada por la posible adecuación de los límites de protección rusos o americanos y por los posibles efectos nocivos de bajos niveles de radiación hizo que se intensificara la investigación científica sobre los efectos que la exposición a las radiaciones electromagnéticas puede ocasionar en la salud; se extendió su estudio a toda la gama de frecuencias, a la acción de los campos eléctricos y magnéticos y a las condiciones de radiación de baja y alta potencia. Los efectos detectados, descritos en la literatura, se pueden agrupar atendiendo a los trastornos que producen sobre los seres vivos.

Efectos celulares

En los niveles más bajos de la vida, las radiaciones electromagnéticas no ionizantes disponen de una cantidad de energía por fotón que es insuficiente para provocar la destrucción de las células, pero suficiente para provocar cambios en su morfología, metabolismo, reproducción o duración de vida celular, efectos que, en determinadas ocasiones, pueden indicar posibles alteraciones del genoma (código completo DNA de un animal). Las investigaciones en este campo celular, además de ayudar a conocer la posible influencia destructiva de las radiaciones electromagnéticas no ionizantes sobre los seres vivos, permiten igualmente ahondar en los procesos más profundos de la vida.

Otras experiencias, usando técnicas de migración del color fluorescente, han observado las interrupciones en la comunicación célula a célula cuando se interfiere la fosforilación que realiza la enzima quinasa. Las observaciones mostraron que cuando una célula era inyectada con un fluorescente teñido, el color se desplazaba a todas las células conectadas y más allá de ellas, a células en tercer o cuarto orden de contacto, en el tiempo de dos minutos; sin embargo, si a la célula se le daba primero el inhibidor de la enzima quinasa, no se transfería el color a las células vecinas. Las experiencias pusieron de manifiesto que se podía obtener el mismo efecto de inhibición mediante un campo de microondas modulado. Estas experiencias sugieren que las células utilizan la pequeña diferencia de potencial, de microvoltios, que actúa como barrera eléctrica en la membrana celular, para enviar señales entre sí a nivel local.

Se puede, pues, establecer que las membranas celulares son extremadamente sensibles a los gradientes de potencial y consecuentemente a los campos eléctricos y magnéticos. Mediante estos gradientes de potencial se facilita el flujo de iones, a través de la membrana, entre el interior y el exterior de la célula. A su vez se produce la energía electroquímica necesaria para la actividad celular. Este efecto está limitado a canales de frecuencias muy estrechos.

La mayor parte de las experiencias a este nivel celular se ha llevado a cabo a través del estudio del comportamiento de bacterias y microorganismos. Otras investigaciones se han realizado sobre tejidos cultivados “in vitro” donde, como hemos dicho, sus efectos son difíciles de evaluar en comparación con el tejido integrado en un organismo vivo.

Sangre y hematopoyesis

La sangre esta formada por un componente líquido, el plasma, que contiene en suspensión proteínas, lípidos, azúcares, vitaminas, pigmentos y factores de coagulación entre otros. Inmersos en este plasma se encuentran tres tipos de células sanguíneas: los eritrocitos o glóbulos rojos, que transportan oxígeno y dióxido de carbono, los trombocitos o plaquetas, responsables de la coagulación y hemostasia, y los leucocitos o glóbulos blancos. Estos últimos se subdividen a su vez en granulocitos, linfocitos y monocitos con funciones específicas cada uno de ellos en la defensa del cuerpo humano; los primeros se encargan de fagocitar bacterias, los segundos tienen funciones de identificación de antígenos y producción de anticuerpos y finalmente los últimos forman parte del sistema inmunológico mediante la fagocitosis de antígenos.

Son numerosos los trabajos que tratan de la influencia que los campos electromagnéticos ejercen sobre los componentes sanguíneos, sin que haya unanimidad de criterio ante los resultados obtenidos; a veces la misma experiencia repetida por equipos de científicos distintos ha conducido a resultados contrapuestos. La mayoría de los efectos observados se atribuyen a efectos hipertérmicos aunque algunos trabajos sugieren la existencia de posibles efectos no térmicos. La gama de frecuencias aplicadas es también amplia, con mayor incidencia en la banda de microondas. También se describen efectos a altas y bajas densidades de energía.

Estudios rusos, confirmados posteriormente por investigadores americanos, mostraron cómo ratas expuestas a microondas de 2375 megahertz y densidades de potencia de $500 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ e irradiadas 50 horas a la semana durante tres meses presentaban alteraciones en la composición sanguínea. Se observó una disminución en la actividad de la colinesterasa en el suero, un aumento en el nivel de sodio y una caída del nivel de potasio. Resultados similares se han obtenido en condiciones distintas de irradiación, (3 gigahertz, $10 \text{ mW}/\text{cm}^2$, 1 hora por día durante 42 días). Las consecuencias se atribuyeron, aunque sin evidencia absoluta, a efectos hipertérmicos, ya que bajos niveles de potencia mostraron ausencia de efectos hematológicos.

La posible influencia de los campos magnéticos en el aumento de riesgo cardiovascular es un ejemplo de las dificultades que ofrecen estas investigaciones en cuanto a establecer resultados firmes. Así, en 1973, en el laboratorio de Investigaciones Médicas Aeroespaciales de las Fuerzas Navales Americanas en Pensacola, se hizo un estudio con jóvenes oficiales recluidos por grupos en una habitación de dimensiones reducidas y sometidos, por períodos de hasta una semana, a campos magnéticos de $100 \mu\text{T}$ y 45 hertz, situación que corresponde a niveles de exposición mucho más elevados que

los existentes bajo una línea de energía eléctrica. Los resultados indicaron que se producía en los sujetos un incremento de triglicéridos en sangre, con un riesgo moderado de problemas cardiovasculares. Sin embargo, en diciembre del mismo año, las Fuerzas Navales repitieron las mismas experiencias con monos, obteniendo un resultado contrario, ya que el nivel de triglicéridos disminuyó en este caso. En 1974, la misma experiencia, realizada con ratones, condujo igualmente a resultados negativos y el mismo resultado se alcanzó con exposiciones humanas a campos débiles. Con el incremento de la intensidad de los campos a 300 μ T y 20 kV/m no se encontraron alteraciones de los niveles de triglicéridos y colesterol que pudieran atribuirse a la influencia de los campos eléctricos y magnéticos de corriente alterna. La explicación más plausible, sobre los resultados de la primera experiencia, se achacó a factores ambientales relacionados con el cambio de hábito de vida de las personas encerradas. Probablemente unos pocos oficiales navales jóvenes recluidos en una pequeña habitación, durante una semana, sin ocupación concreta, se abandonarían a una dicta incontrolada que los engordaría, e incluso intervendrían otros factores debidos al confinamiento como pueden ser reacciones psicológicas e incluso la modificación forzosa de sus actividades habituales.

La hematopoyesis o producción de células sanguíneas ha sido otro de los aspectos, sobre la acción de las ondas electromagnéticas, que ha atraído la atención de los investigadores. La médula ósea es la fuente que suministra los eritrocitos, los trombocitos y granulocitos, mientras que el bazo es la fuente que suministra los monocitos; el tejido linfático contribuye a la maduración de los linfocitos. Las técnicas de observación de los posibles efectos de la radiación electromagnética sobre la hematopoyesis se realizan a través de métodos de recuento de la células sanguíneas después de la exposición y mediante el tiempo de recuperación cuando existe una variación en el número de células.

La mayoría de las experiencias realizadas en este sentido han utilizado pequeños roedores, ratas y ratones, sometidos a microondas y radiofrecuencias con densidades de energía del orden de miliwatios por centímetro cuadrado y aplicadas en periodos diarios variables durante temporadas relativamente largas, entre 1 y 6 meses.

Los resultados han sido contradictorios; en términos generales, se puede decir que los científicos de la Europa Oriental han indicado la existencia de algunos efectos a muy bajos niveles de radiación. A niveles altos y medios las investigaciones Occidentales tienden a sugerir que la irradiación no produce efectos apreciables, mientras que las del Este Europeo aseguran que sí producen cambios hematológicos. En la valoración de todos estos informes es conveniente considerar que todas estas alteraciones transitorias descritas pueden ser exclusivamente el resultado del estrés térmico a que se somete la población de animales o humanos.

A nivel funcional, científicos de Europa Oriental han descrito efectos directos e indirectos sobre el sistema cardiovascular en exposiciones intensas o permanentes. Así se han encontrado efectos caracterizados por hipotonía, taquicardias, retardos en la conducción ventricular y auricular, disminución de la presión sanguínea y alteraciones en los electrocardiogramas, en estudios sobre profesionales que trabajan bajo campos de radiofrecuencias o microondas. Los efectos eran débiles, no afectaban a la capacidad de trabajo del operario y eran reversibles.

Sistema inmunológico

La respuesta inmune es el término utilizado para describir un proceso complejo mediante el cual un organismo aplica una reacción defensiva ante la invasión de sustancias extrañas o antígenos. Ante una agresión de este tipo, el organismo de un mamífero moviliza en primer lugar los recursos inmunitarios no específicos, de resistencia natural, que actúan a través de mecanismos vasculares y celulares. Cuando esta resistencia natural es insuficiente el organismo moviliza su inmunidad adquirida y ataca selectivamente a un antígeno determinado mediante un mecanismo que reconoce estructuras moleculares específicas.

Los trabajos publicados que abordan los efectos de la radiación electromagnética sobre el sistema inmunitario son abundantes en número y en condiciones distintas de operación. Probablemente dicha profusión se debe a que se presiente la posibilidad de que en el futuro las ondas electromagnéticas se puedan utilizar en la terapia de enfermedades infecciosas y cancerígenas, manipulando la radiación bajo condiciones que reduzcan al mínimo su peligrosidad. Las experiencias realizadas se han extendido a todo tipo de frecuencias, campos electromagnéticos y exposiciones de seres humanos, animales y tejidos cultivados “in vitro”.

Se ha estudiado la actividad en la fagocitosis de los leucocitos neutrófilos bajo campos de microondas y se ha llegado a resultados contradictorios. Así, mientras investigadores de la Europa del Este, aplicando densidades de potencia de algunos mW/cm^2 , a pequeños mamíferos, obtenían una disminución de su actividad; otros trabajos muestran para densidades de $\mu\text{W/cm}^2$ un incremento de ésta que, sorprendentemente, era inversamente proporcional a la potencia incidente. Han aparecido numerosas publicaciones en las que se pone de manifiesto que la exposición a microondas y radiofrecuencias causa, inicialmente, una estimulación funcional de los leucocitos, pero, si la exposición se mantiene, el efecto estimulante desaparece, lo que supone la existencia de una fase transitoria de adaptación a la radiación.

Trabajos realizados sobre posibles efectos en el sistema inmunitario han descrito situaciones equivalentes a estados de inmunosupresión. La mayoría de estos trabajos señalan a la hipertermia de las microondas como la causa directa de las alteraciones observadas en el sistema inmunológico. Sin embargo, se han publicado trabajos en los que se han observado alteraciones para niveles de radiación no térmicos, así como para radiaciones de campos magnéticos y eléctricos correspondientes a las bandas de bajas frecuencias (de 1 a 200 hertz, de 2 a 6 mT, y de 0,1 a 1 mV/cm).

A la vista de los datos publicados y de cómo estos se han obtenido, mediante experiencias totalmente distintas en cuanto a tipos de radiaciones, dosimetría y sujetos experimentales, y con resultados en muchas ocasiones contradictorios, es muy difícil establecer conclusiones coherentes sobre los posibles efectos de la radiación en este aspecto de la salud humana. Sin embargo sí se pueden entresacar algunas características esenciales. Estas son:

- Los efectos observados suelen ser reversibles. El retorno a la normalidad, que sucede tras una exposición prolongada, sugiere alguna forma de adaptación a la radiación.
- El sistema inmunológico muestra una respuesta bifásica a la radiación de radiofrecuencias y microondas. Por debajo de densidades de potencia de 1 mW/cm², la exposición actúa como un estímulo, mientras que por encima de dicho valor los investigadores del Este detectaron una supresión de la actividad de este sistema.
- Se puede considerar que existen dos tipos distintos de efectos, asociados a interacciones fundamentalmente diferentes. Uno se puede considerar como la respuesta al estrés térmico, que origina un incremento en el nivel de corticosterona. La interacción primaria estimularía la acción del eje pituitario-suprarrenal y su carácter térmico sería, a veces, enmascarado por la regulación térmica del organismo. Paralelamente pueden ocurrir otro tipo de interacciones de carácter microtérmico, actuando sobre las células linfopoyéticas e inmunocompetentes. Es igualmente posible algún tipo de interacción no térmica cuyos efectos dependen de la modulación y de la frecuencia utilizada. Finalmente puede ocurrir que determinadas interacciones se deban a una predisposición genética.
- No se ha probado con certeza la existencia de efectos nocivos para la salud humana, ya que las experiencias se han ocupado de procesos aislados de los que sólo se ha inferido que las radiaciones pueden actuar como posible factor perjudicial.

Sistema nervioso

Los efectos de la radiación no ionizante sobre el sistema nervioso forman un conjunto heterogéneo de hechos que son difícilmente interpretables en términos simples de interacciones térmicas y no térmicas. La abundancia de publicaciones sobre efectos a bajo nivel de potencia y a bajas frecuencias hace previsible que en muchas ocasiones los efectos térmicos estén superpuestos a otras causas de interacción más importantes.

A grandes rasgos se pueden enumerar como efectos térmicos los observados sobre el sistema nervioso periférico y sobre algunas funciones neurovegetativas, así como las alteraciones observadas en los electroencefalogramas de algunos animales y, posiblemente, las que afectan a la barrera hematoencefálica. Como no térmicos se pueden considerar las consecuencias de la interacción de la radiación con la membrana celular a nivel cerebral que produce alteraciones en el flujo de los iones calcio y las perturbaciones observadas en la actividad de los impulsos neuronales.

La evidencia más clara sobre la existencia de efectos no térmicos se ha puesto de manifiesto con la observación de la interacción entre el sistema nervioso y campos débiles de radiación con ondas de frecuencias extremadamente bajas, ELF, o con microondas moduladas a estas frecuencias. El análisis de esta interacción ha motivado que numerosos investigadores rechacen el concepto previo de que todo funcionamiento nervioso puede ser

explicado en términos de pulsos eléctricos que se transmiten de una neurona a otra, de forma análoga a lo que ocurre en una red de comunicaciones telegráficas o en un ordenador digital. A diferencia de este planteamiento, las teorías más recientes resaltan la importancia que tienen, para la función cerebral, las ondas electromagnéticas lentas, que se observan en los electroencefalogramas. Desde este punto de vista, se establece la hipótesis de que el cerebro se comporta como una especie de oscilador no lineal sumamente complejo capaz de producir estas ondas extremadamente lentas, que utiliza para integrar su funcionamiento interno a la vez que para procesar la información sensorial. Así, las entradas sensoriales se convertirían en modelos de ondas espacio-temporales, que serían almacenadas en la estructura cerebral. Cuando ocurrieran nuevas entradas sensoriales, éstas podrían “resonar” con las ya memorizadas, dando lugar a que el cerebro reproduzca el modelo de la onda original. El campo electromagnético cerebral, según esta teoría, representa pues un papel importante en la producción de una experiencia consciente.

La teoría expuesta implica que el sistema nervioso puede ser mucho más sensible de lo previsto a la radiación electromagnética medioambiental. Si el sistema nervioso fuera excitable solamente a través de los impulsos neuronales sería necesario para perturbarlo producir campos internos del mismo orden de magnitud de dichos impulsos, es decir del orden de 15 kV/cm. Sin embargo, las ondas cerebrales lentas tienen amplitudes mucho más pequeñas, del orden de 10 mV/cm, por lo que serían mucho más sensibles a los campos externos impuestos. Además, si el cerebro actúa normalmente como productor y receptor de sus propios campos electromagnéticos debe ser capaz, igualmente, de amplificar los campos ambientales próximos a sus frecuencias de resonancia.

Investigaciones planificadas bajo estos supuestos han reforzado la hipótesis de que los campos resonantes extremadamente débiles de la tierra, a estas frecuencias (7,8 - 14,1 - 23,3 - 26,4 y 32,5 hertz y 10 μ V/cm) pueden actuar como contadores de tiempo naturales acoplados a las frecuencias humanas electroencefalográficas. Así, se ha puesto de manifiesto que la aplicación de campos externos perturbadores o la supresión de los campos ambientales, dentro de este rango de frecuencias, alteraba los ritmos circadianos en grupos de personas sometidas a experimentación. Efectos análogos, sobre la función cerebral, se han encontrado en experiencias que utilizan microondas moduladas a frecuencias extremadamente bajas.

Las perturbaciones observadas en este rango de frecuencias han sido objeto también de una interpretación distinta, sustentada por otro grupo de investigadores. Según esta teoría, la red de membranas neuronales, se podría considerar como una única compleja membrana que se comportaría como una capa dipolar sensible a los gradientes de potencial. La ausencia o presencia de iones calcio modificaría localmente estos gradientes de potencial produciendo resonancias no lineales en la escala de las frecuencias extremadamente bajas que se observan en los electroencefalogramas. Esta membrana también actuaría como rectificadora de los componentes de alta frecuencia de las microondas moduladas que, de esta forma, se convertirían también en ondas ELF. El modelo fue experimentado mediante el análisis del flujo de iones calcio en tejido cerebral de pollos y gatos, comprobando la existencia de canales discretos en la membrana para determinadas amplitudes del campo aplicado, fenómeno que es típico de las oscilaciones no lineales en que aparecen estos saltos preferentes en la magnitud de la amplitud de oscilación.

Una fuerte controversia se originó alrededor de 1975 cuando un equipo de investigadores norteamericanos obtuvo efectos perturbadores de las microondas en la permeabilidad de la delicada barrera que separa los capilares sanguíneos del parenquima cerebral, la llamada barrera hematoencefálica. El debate público se centró sobre los aspectos de la seguridad en la utilización de las microondas, ya que dichos efectos se habían obtenido a niveles de potencia muy inferiores a los correspondientes a las normas de protección americanas. Investigaciones posteriores, utilizando los mismos niveles de potencia, no pudieron confirmar la experiencia, por lo que se descartó la posibilidad de estos efectos. Hoy en día se considera la posibilidad de interacción de las microondas sobre la barrera hematoencefálica como un efecto térmico que, por supuesto, ocurre a niveles de potencia mucho más elevados.

La protección proporcionada por la barrera hematoencefálica previene que un buen número de sustancias alcancen el sistema nervioso central; por otra parte, parece que ciertos virus tienen una afinidad especial por el cerebro y pueden atravesar dicha barrera sin ningún impedimento. La identificación de un mecanismo que controle la permeabilidad de la barrera resulta así de gran importancia terapéutica y ha motivado que numerosas investigaciones, mediante la aplicación de microondas, experimenten en este campo. Los resultados obtenidos son contradictorios y están muy ligados a las condiciones particulares de experimentación.

Efectos sobre el comportamiento

Se han realizado numerosos estudios sobre los efectos que la aplicación de microondas produce en la ejecución de tareas realizadas por animales adiestrados (ratas y macacos). Los estudios indican una disminución en la actividad de los animales que llega, incluso, a la supresión de su tarea. Se manifiesta que el umbral de supresión está determinado por una relación entre la densidad de potencia aplicada, del orden de mW/cm^2 , y el intervalo de tiempo de aplicación.

Otros estudios sobre el comportamiento han tenido una orientación fármacodinámica, observándose que microondas pulsadas, de 2.450 megahertz, afectaban al sistema nervioso central y al comportamiento, mediante alteraciones en la sensibilidad de los animales a las drogas neurotrópicas. Estos resultados no pudieron ser confirmados en otras investigaciones igualmente orientadas.

Investigaciones del Este Europeo y China observaron que exposiciones humanas a microondas de bajos niveles de potencia producían, con carácter reversible, el llamado "síndrome de las microondas" (dolor de cabeza, sudoración, inestabilidad emocional, irritabilidad, cansancio, somnolencia, problemas sexuales, pérdida de memoria, dificultades de concentración y decisión, insomnio y tendencias depresivas hipocondriacas). Estas conclusiones han sido replicadas por científicos Occidentales, aludiendo a la dificultad de valoración de estos síntomas, dado su carácter subjetivo, y de evaluación de otros factores ambientales al margen de las microondas, así como a la falta de datos concretos de dosimetría y, en muchas ocasiones, de grupos de control. No

obstante, pese a su crítica, estos científicos concluyen que no se debe descartar la posibilidad de efectos no térmicos de este tipo.

Se han descrito también efectos sobre el comportamiento a frecuencias inferiores a las de microondas. En concreto se han publicado trabajos de tipo epidemiológico sobre la influencia de campos eléctricos y magnéticos en el rango de frecuencias utilizadas en las redes de distribución de energía eléctrica (50 y 60 hertz). Se ha informado que campos magnéticos superiores a $0,1 \mu\text{T}$ en viviendas donde la disposición de los conductores no equilibra la corriente eléctrica neta producían depresiones y una mayor tendencia al suicidio. También se describió mayor incidencia de depresiones y dolores de cabeza entre personas que vivían próximas a líneas de distribución eléctrica de alta tensión. Estas investigaciones han sido replicadas con otras análogas en las que no se detectaron tales efectos, aunque siempre hacen la salvedad de que se debe considerar la posibilidad de dichos efectos.

Sistema endocrino

Se ha publicado una gran variedad de datos experimentales sobre alteraciones en el sistema endocrino. Algunos estudios describen incrementos en la actividad del tiroides en conejos expuestos a radiación de microondas (3.000 megahertz, 5 mW/cm^2 y 3 horas diarias durante 4 meses) mientras que, en contraste con estos, otros estudios informan de que experiencias con ratas (2.450 megahertz, 20 y 25 mW/cm^2 , durante 16 horas y 15 mW/cm^2 durante 60 horas) han demostrado un nivel bajo de secreción de hormonas por el tiroides y una disminución en la capacidad para la fijación del yodo, todo lo cual indica una disminución de la actividad del tiroides.

El efecto de las microondas sobre las gónadas ha sido estudiado en profundidad. Los informes revelan que las exposiciones a altos niveles de potencia pueden afectar a ovarios y testículos por lo que estas respuestas pueden proceder de un efecto térmico, ya que es bien conocida la sensibilidad de los testículos al calor.

Efecto sobre el crecimiento

Aunque en este campo no se ha experimentado con seres humanos, sí hay una gran actividad experimental con embriones y desarrollo postnatal de pequeños mamíferos y pollos. Los retrasos en el crecimiento o anomalías reseñadas se pueden atribuir a la elevación excesiva de la temperatura a causa de la radiación aplicada bajo combinaciones particulares de frecuencia, densidad de potencia y duración de la exposición. Algunos de estos informes sugieren que los efectos prenatales observados son deletéreos o teratogénicos. Toda tentativa de extrapolar estos resultados a los humanos lleva a densidades de energía excesivamente elevadas, en parte debido a las diferencias en las frecuencias de resonancia.

Percepción auditiva

Se ha observado que personas y otros mamíferos expuestos a una radiación de microondas moduladas en impulsos de audiofrecuencia pueden percibir una sensación acústica. Este hecho fue descubierto en 1961, y puede observarse con picos de potencia tan débiles como $0,1 \text{ mW/cm}^2$. La causa se atribuye a efectos electromecánicos y termoelásticos de las microondas en el caracol del oído interno. La abundancia de dispositivos de radar que operan en modo pulsado ha motivado la necesidad de investigaciones en este campo.

Lesiones oculares

El riesgo profesional de contraer cataratas inducidas por las microondas se observó por primera vez en 1964 entre el personal de mantenimiento de equipos de radar de las Fuerzas Aéreas de los EEUU, en el que se detectó un tipo particular de cataratas que se origina en la zona subcapsular del cristalino y que se denominó “cataratas inducidas por microondas”, idéntico al observado como enfermedad profesional en los sopladores de vidrio.

Desde entonces se ha realizado un gran número de experiencias con animales. Las investigaciones con conejos, entre 200 y 10.000 megahertz, han probado que existe un umbral potencia-tiempo, para la generación de cataratas, de alrededor de 100 mW/cm^2 durante una hora o más. En experiencias con monos no ha sido posible establecer ningún umbral.

Todas las experiencias realizadas conducen a que este tipo de cataratas tienen un origen térmico, debido al alto contenido en agua del cristalino y su pobre vascularización. No se han observado diferencias entre radiaciones continuas o moduladas, aplicadas bajo las mismas densidades de potencia, ni se ha demostrado que puedan existir efectos acumulativos de la radiación, al menos para intervalos de aplicación suficientemente distantes en el tiempo.

RIESGOS OBSERVADOS SOBRE POBLACIONES HUMANAS

Los posibles daños que las ondas electromagnéticas pueden causar en los humanos se han analizado mediante estudios epidemiológicos sobre poblaciones que, por causas profesionales o de residencia, han convivido durante períodos prolongados de tiempo en presencia de campos electromagnéticos sensiblemente superiores a los campos naturales. Consecuentemente, este tipo de estudios se ha centrado en las bandas de frecuencia de mayor uso humano.

Los primeros estudios se realizaron en la banda de las microondas, ya que, desde su utilización inicial, se manifestaron sus riesgos térmicos. Los efectos no térmicos, más sutiles y por tanto más difíciles de concretar y atribuir, fueron apareciendo posteriormente

con el uso creciente de las microondas. El suceso, ya indicado, de la irradiación de la Embajada Norteamericana en Moscú reactivó este aspecto de las microondas. Estudios realizados por los propios norteamericanos, sobre el personal de dicha Embajada, utilizando como grupos de control personal de embajada en otros países del Este, dieron como resultado un porcentaje mayor, en el grupo moscovita, de enfermedades intestinales por protozoos, neoplasias benignas, problemas oculares, psoriasis y otros problemas de piel, depresión, irritabilidad, pérdida de apetito y dificultades de concentración. En los niños aparecían, en número bastante más alto, paperas, anemia, enfermedades del corazón e infecciones respiratorias y en las mujeres complicaciones en el embarazo y parto.

La dificultad de evaluar los daños imputables a las microondas, así como los intereses puestos en juego, llevaron al Departamento de Estado Norteamericano a negar los efectos nocivos de la radiación a que fue sometida la embajada, a la vez que apaciguó las protestas del personal afectado con recalificaciones de sus puestos de trabajo que suponían incrementos salariales del 20%. No obstante, la duda de que la radiación de microondas pudiera provocar un incremento de las enfermedades observadas, propició que aumentaran las investigaciones en este campo. Así, se estudió la incidencia, de la hospitalización o muerte por neoplasias malignas, entre el personal de la Armada Americana expuesto al radar durante la guerra de Corea, con resultados contrapuestos, que iban asociados a la forma de elección de los grupos de riesgo y de control.

En la Europa del Este, concretamente en Polonia, entre 1971 y 1980, se realizó un estudio entre militares expuestos a microondas y radiofrecuencias, durante cinco o más años. Las conclusiones presentaron un incremento del riesgo de contraer enfermedades neoplásicas, que fue casi tres veces mayor para el personal expuesto.

Se han realizado igualmente estudios sobre profesionales civiles. Así, en Suiza, se observaron incrementos del riesgo de contraer cánceres faríngeos entre trabajadores de la industria electrónica de radio y televisión. Igualmente, aparecen descritos en la literatura resultados de incremento en el padecimiento de leucemia mieloide aguda entre una muestra de radioaficionados. Otro trabajo, realizado en Estados Unidos, sobre posibles riesgos profesionales, analiza los niveles de exposición experimentados por cirujanos; simulando una intervención se descubrió que una unidad electroquirúrgica, utilizada para cortar y sellar tejidos, en un tiempo normal de intervención, exponía al operador a niveles de radiofrecuencias extremadamente altos, sobre todo alrededor de los ojos y de la frente.

También se ha manifestado una incidencia mayor de cáncer entre personas residentes en las proximidades de líneas de enlace de microondas. Investigadores chinos experimentaron con un grupo de soldados y estudiantes, alojados en la proximidades de antenas de radio e instalaciones de radar, por un período de tiempo superior al año. Sus conclusiones describieron la aparición, en el grupo expuesto, de retrasos en el tiempo de reacción visual, pérdida de memoria y disminución de la función inmunológica, en comparación con el grupo de control. Actualmente, la comercialización masiva de los teléfonos celulares ha creado una fuerte polémica sobre los riesgos que puede implicar su utilización.

Otra franja en la que abundan los estudios sobre riesgos es la correspondiente a las frecuencias extremadamente bajas, ELF, que incluye a los 50 y 60 hertz de las líneas de

distribución de energía eléctrica, en su doble vertiente de transporte en alta tensión y de red de distribución en baja. Los estudios se ocupan de los posibles efectos, evidentemente no térmicos, causados por los campos eléctricos y magnéticos asociados.

Las investigaciones han adquirido gran transcendencia, en estos últimos años, al haberse descrito efectos cancerígenos, en esta banda de frecuencias, atribuidos a exposiciones habituales motivadas por causas laborales o por la ubicación del lugar de residencia (hogares cercanos a líneas de alta tensión, a estaciones transformadoras, o a campos magnéticos no compensados en el tendido eléctrico de las viviendas o en los dispositivos electrodomésticos).

El estudio de los posibles efectos biológicos, en este rango de frecuencias, se inició entre trabajadores del sector eléctrico, en los años 60, al introducirse por primera vez las líneas de distribución de 345 kV o superiores. En 1966 investigadores rusos informaron que operarios de subestaciones eléctricas de 400 y 500 kV experimentaron síntomas de tipo subjetivo que podían ser relacionados con su ocupación; así aparecían quejas de cefaleas, náuseas, cansancio, pérdida de libido, entre otras. Estos informes, que fueron criticados en su día por la debilidad de la metodología empleada, fueron el punto de partida para una preocupación general sobre el tema.

A partir de esta fecha se han acumulado un gran número de trabajos relacionados con la salud. Las publicaciones se centran fundamentalmente en los posibles efectos de los campos eléctricos y magnéticos intensos de las líneas de alta tensión o de las líneas de distribución en baja tensión y de electrodomésticos con campos magnéticos no compensados.

Los principales efectos descritos aluden a incremento en el riesgo de cáncer infantil (leucemia y tumores cerebrales) e incremento en la proporción de suicidios, depresiones y cefaleas. Incluso se ha atribuido la muerte súbita en recién nacidos a la proximidad de su dormitorio a líneas de ferrocarril eléctrico o a campos magnéticos intensos.

Los cableados y los dispositivos domésticos con campos magnéticos intensos no compensados son fuertemente criticados en la literatura y, entre ellos, la manta eléctrica se considera especialmente peligrosa. La ubicación de hogares próximos a líneas de alta tensión es otro tema bastante debatido.

CAMPOS NATURALES Y ARTIFICIALES

Los campos electromagnéticos naturales, en los que se ha desarrollado la vida, son estáticos o cuasiestáticos y su valor aproximado está entre 100 y 150 V/m para el campo geoelectrico y entre 40 y 50 μT para el geomagnético, bajo condiciones normales de tiempo atmosférico. Estos campos, que permanecen constantes o con períodos de variación muy lenta (varios minutos o segundos de duración) pueden alcanzar valores mil veces mayores bajo los efectos de una tormenta geomagnética o con el paso de una nube cargada.

Campos naturales con períodos de fluctuación más cortos, o frecuencia más elevada, no existen en la naturaleza o son extremadamente débiles, por lo que la mayor parte de los campos de este tipo que se encuentran en nuestro entorno se deben a la actividad industrial humana.

Así, los campos eléctricos y magnéticos naturales de nuestro entorno a frecuencias de 50 ó 60 hertz (que se corresponden con las de distribución de energía eléctrica) son débiles, entre 50 y 200 $\mu\text{V/m}$ y alrededor de milésimas de microtesla; estos valores pueden incrementarse durante la actividad tormentosa. Por ello, las exposiciones ambientales, en los países industrializados, a estas frecuencias, se pueden atribuir a los sistemas de distribución de energía de las empresas de electricidad, al cableado del interior de las viviendas y a los dispositivos electrodomésticos. Los valores típicos de estos campos artificiales en el interior de los hogares se encuentran entre 1 y 100 V/m para los campos eléctricos y entre 0,01 y 10 μT para los magnéticos. Los valores concretos dependen del tipo de aparato y de la distancia. Los campos mayores se encuentran junto a ciertos electrodomésticos. Los campos magnéticos ambientales en algunas industrias del sector eléctrico, en los lugares próximos a motores eléctricos y a transformadores de potencia, pueden alcanzar valores de varios cientos de microtesla. Los campos eléctricos más elevados se obtienen bajo las líneas de alta tensión, donde pueden alcanzar valores de 0,4 ó 4,8 kV/m en líneas de 132 ó 380 kV . Los campos magnéticos, bajo estas líneas, alcanzan valores medios de 10 μT .

A bajas frecuencias, los valores de los campos eléctricos externos se atenúan fuertemente en el interior del cuerpo humano debido a su alta conductividad eléctrica. Así, un campo externo de corriente alterna de unos 10 kV/m puede alcanzar valores internos de entre 1 y 40 mV/m , dependiendo del lugar considerado en el interior del cuerpo y de las condiciones de contacto con tierra. Los campos magnéticos, sin embargo, no son atenuados por el cuerpo humano, ya que la permeabilidad de los tejidos de los mamíferos es prácticamente igual a la del vacío, por lo que los campos magnéticos penetran en los organismos sin ninguna distorsión.

En la zona del espectro electromagnético correspondiente a las frecuencias de radiodifusión y microondas, las radiaciones naturales son inapreciables, adquiriendo su valor más alto en las proximidades del extremo superior de frecuencias, cerca del infrarrojo, donde a 300 gigahertz la radiación natural alcanza unas décimas de $\mu\text{W/cm}^2$. Casi todas las radiaciones que recibe el hombre, en esta zona del espectro, son artificiales. La mayoría de las fuentes a las que esta expuesta la población en general son las que provienen de las emisoras de radio y televisión, que aportan unos valores máximos de radiación extremadamente bajos, densidades de potencia del orden de milésimas de $\mu\text{W/cm}^2$. La exposición puede ser bastante más alta para profesionales o personas que permanecen próximas a estas fuentes y a estaciones o enlaces de radar. En los alrededores de emisoras o instalaciones de radar los niveles de una radiación continua pueden alcanzar valores de 1 $\mu\text{W/cm}^2$, y los operadores de dispositivos de navegación de este tipo pueden estar expuestos a niveles superiores a 1 mW/cm^2 .

Otra posibilidad de exposición a campos elevados puede ocurrir junto a dispositivos mal diseñados o con poca protección frente a la radiación, como puede ser un horno de microondas con fugas, cuyo límite legal en USA está fijado en 5 mW/cm^2 , o la utilización

continuada de un teléfono celular o una emisora de radio de banda ciudadana potente, ya que una potencia de 7 watt puede producir radiación en todo el cuerpo de hasta 70 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$.

NORMAS DE PROTECCIÓN

Con el desarrollo tecnológico de nuestra sociedad la valoración de la seguridad, como parte de la producción, crece en importancia. Esto sucede no sólo por la renovación e incorporación, cada vez más frecuente, de los dispositivos industriales, lo que supone la adquisición de nuevos riesgos, sino también porque el punto de vista de la sociedad sobre lo que debe entenderse por un “riesgo aceptable” es un concepto igualmente cambiante.

Este concepto es particularmente vulnerable cuando el riesgo no puede ser percibido o comprendido por la víctima, o si la parte responsable del riesgo es poderosa frente a la sociedad. Situaciones de este tipo se suelen presentar cuando el posible daño no es inmediato sino que se produce a través de un tiempo de exposición más o menos largo y por lo tanto difícilmente atribuible a una causa concreta; además la sociedad no está dispuesta a valorar igualmente todos los riesgos que la rodean ya que cualquier ciudadano asume más fácilmente un riesgo sobre el que cree tener algún tipo de control, que aquel otro que le es impuesto externamente. Así, se asumen más fácilmente los riesgos voluntarios de fumar, conducir un coche o practicar cualquier deporte arriesgado, donde generalmente existen más peligros potenciales, que aquellos otros que le son impuestos, como pueden ser la polución de los campos electromagnéticos de bajo nivel o la radiación de una planta de energía nuclear.

Los problemas que presenta el aumento en la seguridad de la salud ciudadana son muy complejos y las sumas de dinero asociadas a cualquier modificación o mejora pueden ser enormes. Por ello, en las decisiones de este tipo, no sólo influyen las implicaciones sociales o de salud pública, sino que también intervienen valoraciones políticas y económicas.

El esquema típico para un riesgo y las subsiguientes normas de protección suele desarrollarse como sigue. Primero se descubre la utilidad de un nuevo fenómeno o dispositivo; su utilización permite descubrir que es peligroso bajo ciertas condiciones, por lo que se establecen normas de protección pública contra este efecto. Con el paso del tiempo se realizan mejores investigaciones y con instrumentos más precisos, comenzando a comprender los mecanismos que provocan el peligro para los seres vivos, y descubriendo nuevos riesgos y más sutiles. Como consecuencia se establecen nuevas normas con unos niveles de protección más fuertes.

Así se continuaría, alternando nuevos riesgos y nuevas normas, pero evidentemente en este proceso se ha pasado por alto una cuestión importante, como es la de establecer hasta qué nivel se deben ajustar las normas de seguridad en cada momento. La solución no es sencilla, pues al no poderse establecer el riesgo nulo, generalmente se adopta la decisión de establecerlo justo por debajo de los riesgos demostrados, pero esta decisión suele estar, a su vez, condicionada por la posibilidad de obtener el máximo rendimiento y utilidad de la tecnología implicada. Esta doble condición es la causa principal de la polémica social, puesto que el fijar los “riesgos demostrados” suele ser un compromiso importante entre

productividad y gastos de protección. El esquema descrito encaja perfectamente en la evolución de las normas de protección adoptadas para la radiación electromagnética.

La valoración del riesgo producido por las ondas electromagnéticas se establece en función de la intensidad del campo electromagnético irradiado. Las magnitudes de medida que se utilizan son distintas según se trate de radiaciones de baja frecuencia o sujetos próximos al foco emisor, situaciones en las que los campos eléctrico y magnético están desacoplados y se miden con independencia (Voltios/metro y Tesla respectivamente) o se trate de frecuencias elevadas o distancias alejadas del foco emisor, en que los campos son coherentes y la medida se realiza mediante la energía irradiada por unidad de superficie (Wattios/centímetro cuadrado).

En este último caso, para cuantificar la acción de la radiación sobre los sistemas biológicos, se utiliza, como magnitud de medida alternativa, la Tasa de Absorción Específica, TAE (SAR en la nomenclatura inglesa, Specific Absorption Rate). Esta relación se establece como el promedio de energía que absorbe el organismo por unidad de masa y se mide en Wattios/kilogramo.

La proximidad o lejanía entre el objeto y el foco emisor, que influye en la forma de medir el campo, depende no sólo de la distancia, sino que intervienen, además, la frecuencia de radiación y las características técnicas de la antena emisora. Así, en frecuencias de microondas, la situación de campo lejano puede existir a distancias de escasos metros de la antena, mientras que, en radiofrecuencias, siempre estaremos en situación de campo cercano, en sus alrededores.

El aumento sensible de la radiación electromagnética artificial que se produjo, como hemos dicho, durante la Segunda Guerra Mundial fue, evidentemente, una situación límite que no favorecía el establecimiento de normas de protección rigurosas, por lo que estas se limitaron, entonces, a tomar las precauciones mínimas de utilización que permitían evitar los riesgos directos e inmediatos del radar.

Al finalizar la guerra el uso de las microondas se extendió al sector civil, primero en dispositivos médicos de diatermia y posteriormente en el control del tráfico y en las telecomunicaciones, cada vez con potencias de emisión más elevadas.

En los años 50 el físico Herman Schwan, de la Universidad de Pensilvania, financiado por el Departamento de Defensa americano, diseñó el horno de microondas para ser usado en los submarinos. Como medida de protección estableció las primeras normas científicamente diseñadas, en 1953. Para fijarlas, simuló la capacidad de absorción térmica del cuerpo humano mediante un modelo formado por agua, sal y bolas metálicas. Estima que los niveles peligrosos corresponden a un calentamiento significativo de los tejidos, hecho que ocurre para radiaciones superiores a los 100 mW/cm^2 (valor equivalente al calentamiento que se produciría en una exposición al sol intenso); incorpora un factor 10 de seguridad y establece el límite para la exposición humana en 10 mW/cm^2 .

Por esta fecha un ingeniero americano, perteneciente a una industria aeronáutica del Departamento de Defensa, puso de manifiesto la existencia de una enfermedad característica en los trabajadores de estaciones de radar. La Armada Americana resolvió establecer, como medida de protección, la norma diseñada por el profesor Schwan.

Para reemplazar esta primera norma por otra más elaborada las Fuerzas Armadas

iniciaron un programa de investigación en 1956. La responsabilidad de establecer dicha norma pasó posteriormente a un comité de la “Asociación de Normas Americanas”, denominado mas tarde “Instituto de Normas Nacionales Americanas”, ANSI (American National Standards Institute). El Comité, encabezado por el Profesor Schwan, trabajó con lentitud y tras proceder a una revisión de la bibliografía científica y en ausencia de pruebas convincentes de daños, acabó en 1966 por reafirmar el nivel de riesgo en 10 m W/cm^2 .

Esta pauta establecida por ANSI (conocida formalmente como Norma ANSI C 95,1) cubre las frecuencias comprendidas entre 10 megahertz y 100 gigahertz y ha permanecido prácticamente inalterada durante muchos años siendo adoptada como norma de protección por la mayor parte de los países occidentales.

Paralelamente a los informes norteamericanos, los rusos habían encontrado que trabajadores expuestos a la radiación de microondas habían padecido migrañas y otros síntomas neurológicos; este tipo de enfermedades también aparecía entre operarios de líneas de energía eléctrica de frecuencias de 50 ó 60 hertz. Como consecuencia de todo ello, la Unión Soviética estableció una norma para los trabajadores expuestos que variaba con la duración y frecuencia de la radiación pero que, en todo caso, en la banda de 30 a 300 megahertz era mil veces más baja que la norma USA, es decir $10 \mu\text{W/cm}^2$. Igualmente establecieron normas de protección para trabajadores de líneas aéreas de tendido eléctrico por encima de los 5 kV/m.

La normativa soviética era conocida por los norteamericanos, pero generalmente se consideró exagerada, aduciendo falta de rigor en las experiencias en que se basaron las normas de protección. El incidente de 1965, ya reseñado, de la Embajada Americana en Moscú, en el que el personal estuvo expuesto a radiaciones inferiores a las normas americanas pero superiores a las rusas, resaltó la diferencia, lo que motivó la fuerte polémica entre la opinión pública americana. En esta controversia, que se extiende a los años 70, se llega incluso a acusar a la Administración americana de proteccionismo a las empresas eléctricas implicadas a pesar de los posibles riesgos.

La consecuencia de todo ello, aparte de luchas legales sobre ubicación de torres de emisión de TV y FM, instalaciones de radar y líneas de tendido eléctrico, fue el comienzo de investigaciones encaminadas a revisar la normativa ANSI, entonces vigente.

Al final de la década de los 60 se publicaron las primeras observaciones sobre efectos no térmicos de la radiación electromagnética. En la Universidad de California encontraron efectos biológicos de las microondas a muy bajas intensidades y en el Instituto Max Planck de Alemania se puso en evidencia que campos sumamente débiles y de extremada baja frecuencia, en la región de 1 a 30 hertz, pueden producir efectos sobre el sistema nervioso.

Una nueva revisión de la normativa ANSI ajustó su propuesta a los datos suministrados por estudios más precisos, que utilizaban métodos más perfeccionados de medida, basados en la evaluación de la dosis de radiación absorbida por el organismo en vez de en la medida de la radiación incidente. Se tuvo en cuenta el principio de que cualquier cuerpo absorbe la mayor cantidad de energía a su frecuencia de resonancia, para el cuerpo humano comprendida entre 70 y 100 megahertz. La nueva norma estableció en 1982 que el promedio de radiación absorbida por todo el cuerpo debía estar por debajo de $0,4 \text{ W/kg}$ en todas las frecuencias, ya que estos valores se suponían diez veces inferiores

que los correspondientes a los efectos más bajos encontrados como peligrosos.

La aplicación de estos criterios llevó a un ajuste de la normativa que se realizó por tramos, con una mayor precisión para frecuencias superiores a 10 megahertz; en los casos de mayor riesgo, por posibles efectos de resonancia, la nueva norma alcanza valores de protección de 1 mW/cm^2 , es decir establece un límite para la exposición humana 10 veces inferior al de la norma de 1966 pero cerca de 100 veces superior al de la normativa rusa.

Independientemente de ANSI, la “Asociación Internacional de Radioprotección”, IRPA, constituyó, en 1974, un grupo de trabajo para el estudio de la protección contra los efectos de las radiaciones no ionizantes. Este grupo, constituido más tarde como “Comite Internacional de Radiaciones No Ionizantes”, IRPA/INIRC, aprobó en 1983 unas normas de protección que, en términos generales, coinciden con la normativa ANSI en frecuencias superiores a 30 megahertz, mientras que para las frecuencias inferiores las normas IRPA están más ajustadas.

En los países de Europa Occidental no existe una normativa común, cada país tiene normas particulares distintas que derivan en general de la normativa IRPA y ANSI, establecidas a partir del año 1979.

En las bajas frecuencias, 50 y 60 hertz, existe aún más dispersión en cuanto a la utilización de normas. En Estados Unidos no existe ninguna regulación de riesgos generalmente aceptada, sino que cada Estado ha adoptado sistemas de protección distintos.

Las primeras normas de protección frente a los campos eléctricos, de las líneas de transporte aéreo de energía eléctrica de alta tensión, se introdujeron en Norteamérica a partir de 1987, motivadas por la preocupación pública creciente ante los resultados de los primeros estudios epidemiológicos. Siete Estados establecieron como protección unos corredores o caminos de paso a lo largo de las líneas; los bordes de éstos distaban entre 30 y 100 metros, dependiendo del Estado y de la tensión de la línea. Los valores típicos en el interior del corredor varían entre 7 y 10 kV/m, y entre 1 y 3 kV/m en los bordes del mismo. El estado de Florida fue el primero que, en Enero de 1989, estableció un valor máximo permitido para el campo magnético a lo largo del corredor de paso; fijó los valores de $20 \mu\text{T}$ para líneas de 500 kV, y $15 \mu\text{T}$ para las líneas de 250 kV o menores. En Nueva York el límite se fijó en $20 \mu\text{T}$.

En el resto del mundo tampoco existen normativas comunes. La mayoría de los países se limitan a establecer la distancia mínima entre los cables de alta tensión y tierra, según fórmulas empíricas (en España la distancia, en metros, viene dada por $d = 3,3 + U/100$, donde U es la tensión nominal de la línea en kV). En algunos países (Bélgica, Checoslovaquia, Italia, Japón, Rusia) se fija el valor máximo del campo eléctrico bajo la línea y, a veces, el límite mayor del mismo admitido para las zonas habitadas.

El valor del campo magnético bajo las líneas de alta tensión sólo está regulado en los estados de Florida y Nueva York, ya reseñados, y últimamente en Italia que, en abril del 1992, ha promulgado un Decreto que limita los valores máximos entre 0,1 y 1 mT para las líneas y las subestaciones.

Fuera del ámbito de las líneas eléctricas de transporte aéreo no existe prácticamente ninguna norma de protección para estas frecuencias. Sólo existen recomendaciones de exposición, para trabajadores y público en general, derivadas de las elaboradas por el

IRPA para las bajas frecuencias, y que no suelen ser de obligado cumplimiento.

La Comunidad Económica Europea tiene actualmente en trámite un documento de protección laboral que, basado en las recomendaciones IRPA, incluye una directiva sobre la protección de los trabajadores frente a los riesgos derivados de la exposición a Campos y Ondas, (publicada en el Diario Oficial de la Comunidades Europeas del 18/3/93).

En resumen, se puede indicar que, en líneas generales, los niveles de potencia a los que está sometida la mayor parte de la población son pequeños, y no suponen riesgos para la salud; pero, si consideramos situaciones particulares, pueden existir riesgos concretos.

Así, podemos decir que en la banda de frecuencias de las microondas la radiación que recibe la población en general es muy pequeña, por lo que no parece que exista riesgo alguno para la salud. Sólo profesionales, pequeñas partes de la población que estén ubicadas en las inmediaciones de dispositivos de radiación elevada o el uso de aparatos de fabricación inadecuada o mal protegidos, son situaciones que pueden suponer un riesgo real.

Para las frecuencias correspondientes a las líneas de distribución de energía eléctrica, 50 y 60 hertz, el número de investigaciones realizadas es elevado y con esfuerzos considerables, sin que se pueda asegurar que los campos electromagnéticos asociados a estas frecuencias produzcan efectos adversos sobre la salud. La dificultad de apreciación de los factores circunstanciales que acompañan a las investigaciones y de su posible influencia, conducen a una falta de consenso sobre los resultados. No obstante, parece claro que una exposición breve a estos campos, aun cuando sean medianamente altos, no es aparentemente perjudicial; en exposiciones crónicas o de larga duración, los posibles perjuicios para la salud son difícilmente detectables. Sin embargo, lo que está claro es que, ante estos resultados dudosos, se deben tomar medidas de protección. Evitar los campos eléctricos superiores a unos cientos de V/m y los magnéticos por encima de 0,5 μ T puede considerarse una medida prudente.

Finalmente, como crítica a los trabajos publicados, se puede establecer la existencia de dos grupos: los que tratan de demostrar los efectos nocivos de la radiación electromagnética y los que critican el método y las conclusiones de los anteriores. Por tanto, en definitiva, no se puede probar con certeza la relación causa-efecto, aunque sí se puede asegurar que, al menos, la evidencia es cuestionable, ya que tampoco se puede negar que dicha relación exista. Hay que precisar también que, en algunas ocasiones, las publicaciones son interesadas, bien por haber sido financiadas con la intencionalidad de demostrar que no existen riesgos y proteger así intereses económicos o bien por ser promovidas para provocar la alarma social y maniobrar contra otros intereses económicos o industriales competitivos.

BIBLIOGRAFÍA

- AMYS (Asociación de Medicina y Seguridad en el Trabajo de UNESA para la Industria Eléctrica). "Normativa relacionada con la Exposición a Campos Electromagnéticos". XXX Asamblea. Jornadas Técnicas. Diciembre 1993.
- AMYS. "La problemática Actual de los Campos electromagnéticos en las Actividades de Producción, Transporte y Distribución de Electricidad". XXX Asamblea. Jornadas Técnicas. Diciembre 1993.
- BARNER F.S. "Some Sources of Hazards, Safety and Electrical Engineering". IEEE Transactions on Education. vol. 34, no. 3, pp. 209 -210. Agosto 1991.
- BEST S. "Non-Ionizing Radiation: The Epidemiological Evidence". Electronics World + Wireless World. pp. 98 -106. Febrero 1990.
- BEST S. "Non-Ionizing Radiation: The Microwave Health Hazard". Electronics World + Wireless World. pp. 208 -211. Marzo 1990.
- BLANCO C, REBOLLAR J.M, ZAPATA J. "Efectos Biológicos de las Microondas". Bioingeniería y Clínica. 4º Trimestre. pp. 17 -26. 1986/8.
- COGHILL R. "Non-Ionizing Radiation: The Biophysical Evidence". Electronics World + Wireless World. pp. 112 -118. Febrero 1990.
- CORCORAN R.P. "Extremely Low Frequency Exposure Limits Relative to Military Electrical/Electronic System Environments". IEEE International. EMC Symposium. pp. 62 -67. Agosto 1992.
- FOSTER R.K, GUY A.W. "El Problema de las Microondas". Investigación y Ciencia. no. 122. pp. 6 -14. Noviembre 1986.
- HOEFT L.O. "A Model for Possible Effects of Electromagnetic Fields on the occurrence of Cancer". IEEE International. EMC Symposium. pp.266 -267. Agosto 1992.
- INSTITUTO NACIONAL DE SEGURIDAD E HIGIENE EN EL TRABAJO. "Radiaciones No Ionizantes. Prevención de Riesgos". Mayo 1988.
- LERNER E.J. "RF Radiation: Biological Effects". IEEE Spectrum. pp. 51 -59. Diciembre 1980.
- MICHAELSON S.M. "Microwave Biological Effects: An Overview". Proceedings of the IEEE. vol. 68. no. 1. pp. 40 -49. Enero 1980.
- MORGAN M.G. et Alt. "Power-Line Field and Human Health". IEEE Spectrum. pp. 62 -68. Febrero 1985.
- PHILIPS A. "Non-Ionizing Radiation". Electronics World + Wireless World. pp. 96 -97. Febrero 1990.
- PHILIPS A. "Non-Ionizing Radiation: The Politics". Electronics World + Wireless World. pp. 120 -124. Febrero 1990.
- POLK C. "Biological Effects of Low-Level Low-Frequency Electric and Magnetic Fields". IEEE Transactions on Education. vol. 34, no. 3, pp. 243 -249. Agosto 1991.
- SACHA J.L. "Aspectos Físicos de los Campos Eléctricos y Magnéticos de Frecuencia Industrial". AMYS XXX Asamblea. Jornadas Técnicas. Diciembre 1993.
- SAVITZ D.A. "The Use of Epidemiology for Establishing Hazards and Risk". IEEE Transaction on Education. vol. 34, no. 3, pp. 211 -215. Agosto 1991.
- SCHWAN H.P, FOSTER K.R. "RF-Field Interactions with Biological Systems: Electrical Properties and Biophysical Mechanisms". Proceedings of the IEEE. vol. 68, no. 1. pp. 104 -113. Enero 1980.
- THUERY J. "Microwaves: Industrial, Scientific and Medical Applications". Edit. Artech House, Inc. 1992.

