

## **CONSIDERACIONES FÍSICAS SOBRE LA INTERACCIÓN DE LOS CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS CON LOS SISTEMAS BIOLÓGICOS**

*Miguel Sancho. Departamento de Electricidad y Electrónica  
Facultad de Ciencias Físicas. Universidad Complutense. Madrid*

En la consideración de los bioefectos de los campos electromagnéticos, hay aspectos físicos que conviene tener presentes y que pueden quitar al problema parte de la oscuridad que lo rodea.

Para la percepción pública, el desconocimiento sobre el tema es fuente de temor, en muchos casos injustificado.

Es un hecho curioso la persistencia del debate entre científicos acerca de los efectos sobre la salud de los campos electromagnéticos. La aplicación de la electricidad como técnica terapéutica tiene una larga historia que se remonta a mediados del siglo XIX. Las corrientes producidas por la pila, inventada por Volta hacia 1800, se empezaron a aplicar muy pronto para destruir tejidos tumorales; la técnica se denominó galvanocauterización, debido a Galvani que fue el primero en estudiar los efectos biológicos de la electricidad, al mismo tiempo que el papel de este fenómeno físico en la transmisión nerviosa. En la segunda mitad del siglo, D'Arsonval sistematizó y amplió el estudio de la bioelectricidad, empleando fuentes oscilantes, disponibles gracias al trabajo de Helmholtz, Kelvin y Hertz. Así, la consideración de los bioefectos de los campos electromagnéticos, no es en absoluto un tema nuevo.

La preocupación reciente sobre los posibles efectos perjudiciales de los campos electromagnéticos, sin embargo, saltó a la luz pública hacia los años 1960, en relación con la radiación de microondas (campos electromagnéticos de frecuencias comprendidas entre 300 MHz y 300 GHz, en cuyo rango están las utilizadas por la telefonía móvil, hornos de microondas, etc). Fue una consecuencia de los numerosos estudios realizados en los EEUU para establecer las condiciones de seguridad en el uso del radar, que se había demostrado que podía producir alteraciones muy serias en diversos sistemas fisiológicos (visión, sistema reproductor, sistema nervioso, sistema inmune, etc). Unos años más tarde, aparecieron varios estudios epidemiológicos, llevados a cabo en EEUU y Suecia, que relacionaban una mayor incidencia de ciertas formas de cáncer, especialmente leucemia, en niños con la residencia cerca de líneas de alta tensión (campos de baja frecuencia, 60-50 Hz). Aunque estos estudios desataron una gran controversia, recibieron validación por diversos informes, por ejemplo del National Institute of Environmental Health Sciences de los Estados Unidos que estableció en 1998, tras dos años de análisis de los datos experimentales, que este tipo de campos de baja frecuencia debía considerarse como un "posible carcinógeno humano". No obstante, este calificativo, añadió el informe, simplemente indica un riesgo potencial y no implica que exista una relación causal demostrada entre los campos electromagnéticos de baja frecuencia y ciertas formas de cáncer.

Hay aspectos físicos que conviene tener presentes y que pueden quitar al problema parte de la oscuridad que lo rodea. Para la percepción pública, el desconocimiento del tema es fuente de temor, en muchos casos injustificado.

En el área del bioelectromagnetismo suelen considerarse los campos estáticos (por ejemplo el campo magnético de los aparatos de resonancia magnética nuclear, que puede llegar a los 2 T), los de frecuencia extremadamente baja (ELF, entre 0 y 300 Hz, a los que pertenecen los producidos por las líneas del tendido eléctrico, de 50 Hz, y valores entre 3-70  $\mu$ T por ejemplo, para las proximidades de las vías del ferrocarril eléctrico) y los de radiofrecuencia (RF, de 300 Hz a 300 GHz), dentro de los cuales las microondas ocupan el intervalo de 300 MHz a 300 GHz (MW, hornos de microondas y telefonía móvil, por ejemplo). Para toda esta región del espectro, que se amplía hasta el ultravioleta, la energía de los cuantos de radiación es insuficiente para romper enlaces en las moléculas; son, por tanto, radiaciones no ionizantes, frente a las ionizantes de frecuencias extremadamente altas (rayos X y gamma fundamentalmente), cuyos efectos en la alteración del material genético son bien conocidos. Los campos de las microondas pueden tener una consecuencia importante, a la cual se han atribuido la mayor parte de los efectos biológicos descritos, y es el calentamiento de los tejidos debido a la energía disipada en el desplazamiento de iones y la orientación de moléculas en el medio, por la acción del campo oscilante. Estos efectos térmicos se utilizan con frecuencia con finalidad terapéutica (equipos de diatermia e hipertermia).

Para la telefonía móvil suele considerarse el posible riesgo, por una parte de las ondas emitidas por la antena de las estaciones base, y por otra, el de los campos emitidos por los propios teléfonos, que actúan como receptores y transmisores. Para el primer caso, las estaciones emiten con antenas omnidireccionales en un plano horizontal, es decir fundamentalmente en dirección paralela al suelo, con lo cual, la densidad de potencia detectable al nivel del suelo tiene unos valores muy bajos, típicamente de 1 mW/cm<sup>2</sup>, muy por debajo de los valores recomendados como límite por las diferentes regulaciones sobre el tema. Por otra y en cuanto a los propios teléfonos, existen también especificaciones técnicas a las que deben ajustarse, como resultado de las cuales, no deben producir efectos de incremento de temperatura apreciable en ningún caso. La magnitud significativa se considera que es el SAR (coeficiente de absorción específica), o potencia absorbida por los tejidos por unidad de masa. Un valor recomendado como límite, en este rango de frecuencias, es el de 1,6 W/kg en cualquier tejido. Las medidas realizadas, utilizando teléfonos comerciales en diferentes circunstancias, así como los cálculos sobre modelos de cabeza humana, dan como resultado que, en general, no se sobrepasa ese límite.

Conviene comparar los campos ambientales debidos a la actividad tecnológica humana con los de origen natural. Debe tenerse en cuenta, en efecto, que la vida ha evolucionado en la Tierra en presencia de campos electromagnéticos: el campo eléctrico atmosférico tiene un valor a nivel del suelo de unos 100 V/m, con oscilaciones muy fuertes en las tormentas eléctricas, mientras que el campo magnético terrestre varía con la latitud, con un valor medio de unos 50  $\mu$ T. La radiación solar contiene fundamentalmente frecuencias que van desde el infrarrojo hasta el ultravioleta, con éstas últimas muy atenuadas por el ozono atmosférico, y con una densidad de potencia total que puede llegar a ser de 1 kW/m<sup>2</sup>.

Los organismos han utilizado las características físicas de las interacciones electromagnéticas en su diseño evolutivo. Piénsese por ejemplo la incorporación de la luz en los sistemas de visión, el sofisticado sistema de transmisión nerviosa o el uso preciso de interacciones fuertes (a través de enlaces covalentes) y débiles (mediante puentes de hidrógeno) en las macromoléculas, que les confieren las propiedades de estabilidad sin

rigidez que hacen posible la vida. Por ello no es de extrañar que hayan desarrollado una adaptación a estos campos pero también que puedan ser muy sensibles a las alteraciones electromagnéticas.

En cuanto a los posibles mecanismos de acción de los campos, el panorama no es claro a pesar del esfuerzo dedicado a su esclarecimiento. Los razonamientos físicos dejan poco espacio a la posibilidad de efectos biológicos importantes. En primer lugar, hay que tener en cuenta el acoplamiento a los tejidos, que, según se trate del campo eléctrico o del campo magnético, es muy diferente. A frecuencias bajas, debido a alta conductividad de los tejidos, el campo eléctrico interno es mucho menor que el externo en una relación del orden de:

$$E_i \approx \epsilon_0 \omega \rho E_0$$

siendo  $\omega$  la frecuencia angular y  $\rho$  la resistividad específica del tejido, que es pequeña. La membrana celular, por otra parte, tiene una resistividad muy alta. Un cálculo del campo en la membrana, para una célula esférica de radio  $r$ , da

$$E_m \approx 1,5 \frac{r}{d} E_i$$

donde  $d$  el espesor de la membrana. Con datos de dimensiones y parámetros correspondientes a una célula típica en el cuerpo humano, un campo externo de 300 V/m se puede traducir en un campo extracelular del orden de 10-5 V/m y del orden de 10-2 V/m en la membrana. Este campo es inferior al nivel de ruido generado por las fluctuaciones térmicas de las densidades de carga. El núcleo de la célula y el material genético se pueden considerar por tanto muy apantallados y difícilmente se verán afectados por los campos eléctricos externos de baja frecuencia.

Para el campo magnético, en cambio, la situación es diferente, ya que al ser la permeabilidad del cuerpo prácticamente igual a la del aire, penetra sin modificación los tejidos. El campo magnético ejerce una fuerza sobre cargas móviles, dada por la ley de Lorentz,

$$F = qv \times B$$

que, al ser perpendicular a la velocidad, afecta a la trayectoria de las cargas pero sin aportarles energía. El cálculo de esta fuerza sobre las corrientes en las neuronas o sobre los iones presentes en el flujo sanguíneo da como resultado unos valores insignificantes para los todos los valores del campo ambiental, excepto quizás para los utilizados en algunas técnicas médicas que pueden llegar a los 2 T. Se han buscado explicación a los posibles efectos biológicos de los campos oscilantes a partir de fenómenos de resonancia, por ejemplo, la resonancia ciclotrónica, debido al efecto combinado de un campo magnético estático en que las cargas describen órbitas y un campo eléctrico oscilante que les comunica energía de manera coherente. El efecto de resonancia es equivalente a la reducción del ancho de banda a través del cual se aplica el ruido térmico y puede disminuir su valor efectivo en relación a la señal. Sin embargo, los

efectos de amortiguamiento en el movimiento de iones y moléculas van a impedir previsiblemente que las cargas completen una parte significativa de un ciclo y por tanto hacen descartar este mecanismo. El candidato más plausible como mecanismo de acción es probablemente el efecto Faraday, por el que un campo magnético cambiante produce un campo eléctrico y en consecuencia, una corriente en un medio de una cierta conductividad,

$$\int_C E \, dl = \frac{d}{dt} \int_S B \, ds$$

donde S es un área atravesada por B y C un contorno que limita esa área. Estos campos y corrientes quizás si puedan afectar a receptores de membrana y alterar el flujo de iones a través de la misma, aunque esta posibilidad no es universalmente aceptada.

Para los campos de microondas muchos efectos son de origen térmico y este el nivel de seguridad más fácil de establecer y exigible siempre. Sin embargo están bien documentados algunos efectos no térmicos, encontrados en experimentación con animales, aunque no necesariamente perjudiciales para la salud humana. La investigación epidemiológica parece ser menos concluyente en este caso que para los campos ELF. En cambio, los efectos físicos de la radiación de teléfonos móviles son más claros, y así se admite por ejemplo en cuanto a su posible interferencia con dispositivos eléctricos como los marcapasos, que los de campos de baja frecuencia. En la actualidad hay numerosos programas de investigación en desarrollo, algunos de ellos basados en una cooperación internacional muy amplia, dedicados a establecer estudios epidemiológicos rigurosos y a reproducir y contrastar resultados experimentales anteriores.

Volviendo a la consideración del principio, la persistencia del debate, a pesar del tiempo y del esfuerzo dedicados, refleja, en primer lugar, la evidencia de que realmente existen bioefectos de los campos electromagnéticos y además bioefectos no puramente térmicos, lo cual no quiere decir que impliquen necesariamente un riesgo para la salud. En segundo lugar, que esos efectos no son intensos y sus consecuencias fisiológicas, caso de existir, no son fácilmente detectables y por tanto no suponen, en el estado actual, un peligro sanitario importante. Sin embargo, como cualquier tecnología y quizás más que otras, dada su expansión creciente, requiere cierta cautela y un uso racional de sus posibilidades. También, la controversia revela las dificultades de una investigación interdisciplinar y sobre un tema enormemente complejo, como es un organismo vivo múltiplemente interconectado y con mecanismos de regulación y reparación muy sofisticados. La falta de modelos teóricos aceptados que puedan servir de guía a la investigación experimental es un problema esencial en la situación actual. Para los físicos es un desafío y un objetivo del mayor interés el imaginar posibles modelos que puedan explicar algunos de los hechos observados.