

ASPECTOS GENERALES DE LOS EFECTOS BIOLÓGICOS DEL CAMPO ELECTROMAGNÉTICO



UNIVERSIDAD DE CANTABRIA
Grupo de Electromagnetismo

AUTORES:
Miguel Ángel Solano Vérez
Juan Sáiz Ipiña

Universidad de Cantabria

Aspectos generales de los efectos biológicos del campo electromagnético

Introducción

Un efecto biológico se produce cuando la exposición a campo electromagnético (CEM) provoca una respuesta fisiológica detectable en un sistema biológico. Un efecto biológico es nocivo para la salud cuando sobrepasa las posibilidades de compensación normales del organismo.

Cuando un sistema vivo es sensible a un CEM de una determinada frecuencia, la exposición puede generar modificaciones funcionales o incluso estructurales en el sistema. Por ejemplo, la pupila puede experimentar una contracción cuando el ojo es expuesto a un CEM intenso a frecuencias en el rango del espectro visible. Nuestro organismo está biológicamente preparado para estas respuestas como parte de sus mecanismos de adaptación al medio. Estas modificaciones, en condiciones normales, son reversibles en el tiempo, de forma que, cuando desaparece el estímulo, el organismo vuelve a su condición de equilibrio inicial. Para que se produzcan alteraciones perjudiciales, las modificaciones inducidas tienen que ser irreversibles. Es decir, una vez eliminado el estímulo, el sistema biológico no vuelve a su situación de equilibrio inicial. En este caso es cuando podemos esperar que el sistema entre en un proceso que conduzca, en el tiempo, a una situación de riesgo de enfermedad.

En los últimos veinte años, programas de investigación en todo el mundo han realizado avances significativos en la caracterización las interacciones posibles del CEM y los organismos vivos, destacando los estudios sobre los efectos biológicos del CEM y los mecanismos biofísicos implicados en tales efectos. Otra cuestión sobre la que se ha profundizado es la relevancia que

diferentes efectos biológicos del CEM detectados experimentalmente tienen en la salud; dicho con otras palabras, es muy importante poder llegar a identificar si los resultados obtenidos en laboratorio son o no indicativos de efectos potencialmente nocivos, y si es alta o baja la probabilidad de que tales efectos se den en el organismo humano bajo condiciones reales de exposición. Asimismo, se ha investigado sobre si los efectos biológicos inducidos en los seres vivos por la presencia de CEM son transitorios o permanentes y, finalmente, si dichos efectos biológicos pueden tener aplicaciones terapéuticas o, por el contrario, consecuencias negativas para la salud.

Las evidencias científicas disponibles acerca de los efectos biológicos y de los efectos del CEM sobre la salud son muy numerosas. Haremos un resumen de los efectos descritos más significativos que han servido de base para la elaboración por los diferentes comités de expertos de las restricciones a la exposición a CEM. Pero antes de ello, reparemos en algunas ideas que clarifiquen la situación.

¿Por qué tanta preocupación sobre los efectos del CEM?

Habitualmente los humanos tenemos temor a todo lo desconocido o lo que no se puede ver. Hay multitud de ejemplos de radiación electromagnética que vemos donde se produce y por donde se transporta y nos preocupa y otra que no vemos y nos preocupa¹. Además, toda esta hipersensibilidad se genera en torno a una serie de artículos científicos de carácter exclusivamente epidemiológico, que aparecen entre finales de los setenta y la actualidad, y más acusadamente en la traducción que de estos artículos han realizado para el gran público personas a veces desinformadas. Más confusas son aún algunas interpretaciones personales de carácter alarmista que se hacen públicas desde el desconocimiento del más elemental rigor científico.

¹ El ejemplo más claro de lo segundo es el empeño de algunos colectivos en enterrar las líneas de alta o media tensión. Parece que si no vemos las líneas se acaban sus efectos nocivos, en el caso de que los hubiera. Ya sabemos que el campo magnético no es apantallado por el terreno, por lo que, si éste es el causante, enterrando una línea no eliminamos su efecto.

¿Qué tipos de efectos del CEM están descritos?

En el problema de los efectos sobre la salud de las radiaciones no ionizantes existen dos tipos de componentes que por razones de claridad científica deben clasificarse según dos grandes grupos:

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

¿Se pueden determinar los niveles de referencia de forma absoluta?

La Comunidad Europea, consciente tanto del derecho de las personas a una información rigurosa y honesta como el derecho a que su salud sea protegida, ha reunido a especialistas en Física, Biología y Medicina y tras analizar exhaustivamente la literatura científica, ha establecido una serie de restricciones básicas y niveles de referencia basados en la certeza de evitar los efectos nocivos comprobados y, al introducir enormes márgenes de seguridad, abarcar implícitamente los posibles efectos a largo plazo en caso de existir. Las restricciones indicadas por el Consejo están basadas en la Guía de la Comisión Internacional de Protección contra Radiaciones No Ionizantes (es fácil encontrar literatura en inglés de la "*International Comission on Non-Ionizing Radiation Protection*" (ICNIRP) y avaladas por el Comité Científico Director de la Comisión. Es destacable que la Recomendación del Consejo establece que solo se han considerado efectos comprobados y no los que como el cáncer, citado explícitamente, no han sido comprobados. Es de destacar aquí que los límites de seguridad de tanto la Recomendación Europea² (ver módulo 1) como del Real Decreto de 28 de septiembre de 2001 están basados en los efectos comprobados y no en los que como el cáncer, citado explícitamente, no han sido comprobados.

El auténtico núcleo del problema consiste en determinar cuantitativamente los niveles de seguridad respecto a los efectos comprobados. Plantearse si son o no son nocivos los campos electromagnéticos no ionizantes o ionizantes es algo que carece de sentido. La radiación electromagnética solar es necesaria para la vida pero su exceso es nocivo. El beneficio derivado de las radiografías es bien conocido pero la exposición prolongada a rayos X tiene consecuencias graves. La cuestión de la influencia de los campos sobre la salud sólo admite de modo serio y riguroso una respuesta cuantitativa que delimite los valores de intensidad de radiación de cada intervalo de frecuencias en función de los efectos nocivos

² Es conveniente repasar los niveles de referencia de la Recomendación Europea (ver módulo 1) que son idénticos a los adoptados por el gobierno español en el Real Decreto de septiembre de 2001.

comprobados asociados a cada uno de esos intervalos de frecuencia. Este es el esfuerzo realizado por los expertos que han recomendado las medidas recogidas por el Consejo de la Unión Europea.

Interacción electromagnética como base del desarrollo

La interacción electromagnética o, en otras palabras, la fuerza electromagnética es una de las cuatro fuerzas fundamentales de la física (junto la gravitatoria, la fuerte y la débil) y existe en la naturaleza desde el origen del Universo. Hay que tomar conciencia, entonces, sobre la relevancia de las interacciones electromagnéticas en el desarrollo del Universo, de la Tierra, de la Naturaleza y de la Vida. Se puede afirmar que los campos y ondas electromagnéticos se encuentran en la textura más íntima de toda materia y que intentar prescindir de ellos es prescindir de la materia, de la luz, de los alimentos y de la vida (ver lectura 3-2: la interacción electromagnética como base de la materia y la vida).

También conocemos la diferencia entre radiación no ionizante y ionizante. A modo de resumen podemos decir que todos los fotones u ondas electromagnéticas con frecuencias comprendidas entre cero hercios (los llamados fenómenos de corriente continua) y un billón de hercios no tienen energía suficiente para romper moléculas y por tanto se consideran no ionizantes. Son por tanto incapaces de generar directamente mutaciones genéticas mediante la ruptura de ADN (ver lectura 3-2: radiaciones ionizantes y no ionizantes).

El electromagnetismo es una ciencia que está completamente desarrollada y explica cualquier fenómeno electromagnético y su interacción con la materia. Por ello, no hay que inventar nuevas propiedades de los campos electromagnéticos para justificar su acción sobre lo vivo; mas bien hay que profundizar en los mecanismos que gobiernan la marcha de las partículas cargadas, presentes en las células, para partiendo de las fuerzas bien conocidas de los campos electromagnéticos sobre dichas cargas explicar su

efecto sobre los mecanismos biológicos (ver lectura 3-2: el electromagnetismo como ciencia).

Algunos datos sobre el campo electromagnético creado por el ser humano

Para poder entender los efectos biológicos del CEM es necesario establecer de forma, al menos aproximada, el campo o la densidad de potencia asociadas al CEM de los diferentes dispositivos habituales que nos rodean en nuestra vida diaria. Podemos hacer las siguientes divisiones

- Los campos eléctricos generados por los conductores que forman las líneas de transmisión son de 50 Hz. El campo magnético que existe debajo de una línea normal nunca supera los 20 μT (20×10^{-6} Teslas). El campo magnético continuo en el que nosotros nacemos y vivimos oscila de un punto a otro de la superficie de la Tierra pero es del orden de 50 μT . El campo magnético que actúa sobre un paciente en un experimento de Resonancia Magnética Nuclear es de cuatro millones de μT , es decir, ó cuatro teslas (4T). El campo magnético natural oscila entre 30 y 70 μT , aproximadamente, dependiendo de los puntos geográficos.
- El campo eléctrico que produce una línea de alta tensión (LAT) es proporcional a su voltaje y el campo magnético proporcional a la corriente que recorre sus cables. Valores típicos de campo eléctrico para una LAT de 400 kV ($1\text{k}=10^3$) debajo de ella son de 5-10 kV y de campo magnético entre 1 y 20 μT . El campo eléctrico estático natural de la Tierra³, debido a acumulación de carga negativa en el suelo puede oscilar entre 100 y 200 V/m y llegar en las tormentas a 10 kV/m.

³ La Tierra se comporta como un gran condensador de dos placas esféricas que son el suelo y la ionosfera. Ambos están cargados con cargas negativas y positivas creando un campo eléctrico estático, análogamente a el que se crea en un condensador.

- El campo magnético asociado al suministro de energía no sólo existe en las proximidades de las LAT sino en todos los electrodomésticos, en los motores, en los transformadores de las industrias y en cualquier dispositivo similar.

Efectos biológicos del CEM

Son multitud los diferentes efectos biológicos del CEM que se han descrito en la literatura a partir de experimentos de laboratorio⁴. Algunos son comprobados y otros no. Para que un efecto descrito en publicaciones científicas sea comprobado debe cumplir algunas normas esenciales. En primer lugar los resultados deben de ser replicados por otros autores, para lo cual los estudios deben de estar perfectamente descritos y especificados en todos sus datos. Desde el punto de vista científico, no es posible asumir resultados sin contrastar, es decir deben ser científicamente relevantes. En segundo lugar, los resultados de laboratorio deben de poderse extrapolar a la salud humana.

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

⁴ Los efectos que se deduzcan de los estudios epidemiológicos se estudiarán en el módulo siguiente.

de su salud frente a la exposición a los campos electromagnéticos medioambientales de modo que se evite la inducción de corrientes con intensidades de riesgo.

Efectos de las corrientes inducidas

Las corrientes eléctricas en un medio natural dependen de la conductividad del medio y del campo eléctrico que actúa sobre él. Las corrientes eléctricas pueden producir a su paso por el cuerpo daños en el sistema cardiovascular y en el sistema nervioso central. Según la Recomendación su límite de seguridad, para largas duraciones, es de 8 miliamperios (mA) por metro cuadrado (m^2) para frecuencias inferiores a 1 Hz y de 2 mA/ m^2 para frecuencias comprendidas entre 4 y 1000 Hz.

El cuerpo humano es conductor eléctrico para campos estáticos y de baja frecuencia cómo son los campos de 50 Hz producidos por las LAT. Cuando se introduce un conductor en un campo eléctrico las líneas del campo se distorsionan de tal modo que el campo en la superficie del conductor es perpendicular a ella y su valor se reduce en varios órdenes de magnitud en el interior del conductor. El cuerpo humano hace que un campo externo a él se reduzca en torno a 5 a 7 órdenes de magnitud (ello significa una disminución de entre 10^{-5} y 10^{-7}). El campo magnético no es atenuado por el cuerpo humano, por lo tanto su valor externo e interno es el mismo, produciéndose, además, por inducción electromagnética (efecto Faraday, ver módulo 1) un campo eléctrico en el interior del cuerpo humano que produce una densidad de corriente inducida que es proporcional al campo eléctrico interno por la conductividad del medio⁵ es decir, $J_{ind}=\sigma E$ (hemos eliminado el carácter vectorial). La siguiente tabla proporciona unos valores aproximados de densidad de corriente para unos campos dados

⁵ Notemos la gran dificultad que entraña el conocer la densidad de corriente pues el cuerpo humano no es en absoluto un medio homogéneo con una conductividad σ igual en cualquier punto.

$E_{\text{externo}}(\text{V/m})$	$B_{\text{externo}}(\mu\text{T})$	$J_{\text{ind}}(\mu\text{A/m}^2)$
10	0,1	1
10.000	100	1.000

Se sabe que las corrientes endógenas debidas a la actividad eléctrica del cuerpo humano (el corazón, las células nerviosas) están entre 1 y 10 mA. Para que un campo eléctrico y magnético crean una corriente de 1 mA se necesita un campo eléctrico externo de aproximadamente 10 kV/m o un campo magnético de 100 μT . Estos valores de campo, que son bastante altos y que no se está sometido a ellos de forma normal, producirían corrientes del orden a las endógenas del cuerpo humano.

En este punto deberíamos hacer una anotación. Los estudios de efectos de campos ELF se han restringido básicamente al campo magnético pues el campo eléctrico es atenuado de forma brutal por el cuerpo humano. Sin embargo, hemos visto que campos eléctricos de 10 kV/m producen corrientes del orden de las endógenas. Estos campos son los posibles justo bajo una LAT y por ello, entendemos que también deben ser estudiados sus efectos.

Efectos de las corrientes de contacto

En el rango de frecuencias de interés la corriente máxima en la Recomendación es de 0.5 mA (cuadro 3 de la Recomendación). La corriente de corta duración umbral que detecta un organismo medio como sensación de calambre es de 25 a 40 mA. A 50 mA hay daños graves en el tejido en contacto con el conductor que origina la corriente. Para alcanzar la seguridad de que la intensidad de corriente de larga duración se mantenga inferior a este valor de 0.5 mA la intensidad de campo magnético en el rango comprendido entre 0.025 kHz y 0.8 kHz debe mantenerse inferior a $5/f$ microteslas (como explica el cuadro 2 de la Recomendación), siendo f la frecuencia del campo en kilohertzios. **Al ser 50 Hz =0.05 kHz, $5/f$ resulta ser $5/0.05$ igual a 100 μT .**

Efectos térmicos

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

Como resumen de los efectos comprobados podemos decir que hoy en día

- **Está comprobado que**
 - corrientes eléctricas, en el rango de frecuencias comprendido entre 5 Hz y 1 kHz, con densidades superiores a 10 mA/m², pueden afectar las funciones normales del cuerpo humano
 - El aumento de temperatura por encima de 1 grado puede producir efectos biológicos adversos. El efecto de daño térmico solo puede ser generado por frecuencias del orden de gigahercios (en el rango de las microondas) y la restricción se define respecto a la potencia absorbida por unidad de masa que debe permanecer por debajo de 0.4 W/kg².

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

ANEXO

El presente anexo está indicado para completar algunos de los aspectos de la lectura de los contenidos anteriores.

a) La interacción electromagnética como base de la materia y la vida.

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

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

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

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

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

b) Radiaciones ionizante y no ionizantes.

El Sol, como fuente de energía, es responsable directo de la vida sobre la Tierra en todas sus formas. La transmisión de la energía desde el Sol, donde se produce continuamente por fusión nuclear, hasta la Tierra se realiza mediante fotones o radiación. La atmósfera amortigua la radiación ultravioleta que correspondiendo a la banda más energética del entorno del espectro visible produciría quemaduras si actuara con mayor intensidad. Este es un primer ejemplo del equilibrio requerido para el desarrollo de la vida. Si

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

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

permite hablar de **dosis de tolerancia y dosis de seguridad** incluso para las radiaciones altamente energéticas o ionizantes.

Se puede concluir que todos los fotones u ondas electromagnéticas con frecuencias comprendidas entre cero hercios y un billón de hercios no tienen energía suficiente para romper moléculas y por tanto se consideran no ionizantes. Son por tanto incapaces de generar directamente mutaciones genéticas mediante la ruptura de ADN

c) El electromagnetismo como ciencia.

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

El último aserto del párrafo anterior es especialmente importante para centrar con claridad el problema que representa la interacción de los campos electromagnéticos con la materia viva. Cualquiera que sea el efecto

producido por un campo de una cierta intensidad y frecuencia debe poderse explicar como una consecuencia de las fuerzas electromagnéticas que son perfectamente conocidas. La dificultad para explicar sus efectos sobre la salud proviene de la falta de conocimiento suficientemente detallado sobre todos los mecanismos físico-químicos que constituyen la vida. Por supuesto que esta falta de conocimiento está originada por la enorme complejidad en detalle de los fenómenos biológicos. Pero son estos los que deben investigarse. En otras palabras, es un error considerar que los campos electromagnéticos pueden producir efectos sobre la vida diferentes a los que producen sobre partículas cargadas. **No hay que inventar nuevas propiedades de los campos electromagnéticos para justificar su acción sobre lo vivo, mas bien hay que profundizar en los mecanismos que gobiernan la marcha de las partículas cargadas, presentes en la célula, para partiendo de las fuerzas bien conocidas de los campos electromagnéticos sobre dichas cargas explicar su efecto sobre los mecanismos biológicos.**

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

d) El electromagnetismo como herramienta de desarrollo y bienestar: la revolución de Faraday. La posibilidad de crear campos electromagnéticos artificialmente.

El disco duro del ordenador, el vídeo, la cinta magnetofónica, la banda de las tarjetas de crédito, códigos de seguridad, los núcleos de los motores, transformadores y generadores, la televisión, los equipos de telecomunicaciones, todos estos elementos tan familiares en el año 2000 están basados en efectos de los campos eléctricos y magnéticos. Estos sistemas a diferencia de toda la química de la Naturaleza que es también

esencialmente resultado de las leyes del Electromagnetismo no existen espontáneamente, han sido frutos del trabajo de investigación del hombre. Se puede afirmar que desde comienzos del siglo XX los campos magnéticos creados artificialmente por la humanidad se superponen a los campos electromagnéticos que naturalmente existen desde hace millones de años sobre la superficie de la Tierra.

La aplicación más revolucionaria de los campos electromagnéticos fue sin duda la llevada a cabo este siglo gracias al descubrimiento de Faraday hacia la mitad del siglo XIX. Este genial físico experimental inglés descubrió en su laboratorio que los campos eléctricos, de los que hasta entonces se sabía que eran creados por cargas eléctricas, también se creaban, sin necesidad de contar con carga eléctrica, con campos magnéticos variables en el tiempo. La posibilidad de crear campos magnéticos variables mediante artilugios mecánicos que hagan girar, por ejemplo, imanes, es inmediata. De este modo se podrían construir "*fábricas*" de campo eléctrico y mediante conductores transportar la electricidad a distancias alejadas de ellas. Este transporte era en realidad un transporte de energía que, por su principio de conservación, consistía en la energía que gastaba el artilugio mecánico para hacer girar el campo magnético. La energía se podía almacenar como energía química, o mecánica, convertir en campo eléctrico, transmitir a distancia - análogamente a como la energía nuclear del Sol se transmite a la Tierra mediante fotones- y entonces volver a reconvertir en energía utilizable en los lugares de consumo, viviendas, oficinas y fábricas. La posibilidad de utilizar la energía en cualquier parte sin necesidad de aproximación a la fuente constituye el resultado científico que más ha contribuido a alcanzar el nivel de bienestar, cultura, seguridad sanitaria y capacidad industrial de los pueblos mas desarrollados.

Un dato a considerar con vista a elaborar un detallado análisis de los riesgos que permite estimar el estado actual del conocimiento de los fenómenos biológicos es el que se refiere a las intensidades de campo magnético asociado a la transmisión de la energía en forma eléctrica. **Los**

campos eléctricos generados por los conductores que forman las líneas de transmisión son de 50 Hz. El campo magnético que existe debajo de una línea normal nunca supera los 20 microtesla. El campo magnético continuo en el que nosotros nacemos y vivimos oscila de un punto a otro de la superficie de la Tierra pero es del orden de 50 microteslas. El campo magnético que actúa sobre un paciente en un experimento de Resonancia Magnética Nuclear es de cuatro millones de microtesla ó cuatro teslas.

e) *Los campos electromagnéticos asociados a las líneas de alta tensión (LAT) comparados con los campos naturales*

Actualmente existen en España treinta mil kilómetros de LAT repartidos entre 14000 Km de 400 kV (kV o kilovoltio corresponde a mil voltios, el voltio mide el voltaje o tensión) y 16000 Km de 220 kV. A escala mundial la LAT de tensión mas elevada es de 765 kV. Las de corriente trifásica constan al menos de tres cables colocados a una determinada altura del suelo (líneas aéreas) o bajo el mismo (líneas subterráneas). Los cables conductores se agrupan según diversas configuraciones en delta, en horizontal, etc. Las diferentes configuraciones provocan diferentes campos electromagnéticos. El **campo eléctrico que produce una LAT depende del voltaje** y de la carga que a su vez para un voltaje dado depende de la capacitancia de la línea que está condicionada por su configuración geométrica. El campo eléctrico fluctúa poco en cada línea, en torno a un 10% siguiendo las fluctuaciones de tensión. Los valores típicos del campo electromagnético bajo una LAT de 400 kV a nivel del suelo son de 5-10 kV/m para el campo eléctrico. **El campo magnético depende de la intensidad y no directamente del voltaje** por lo que fluctúa con el consumo y varía generalmente al nivel del suelo bajo la línea entre 1 y 20 microteslas. Ambos campos, eléctrico y magnético, disminuyen a medida que aumenta la distancia a la línea.

El campo eléctrico estático presente en la superficie de la Tierra, debido a una acumulación de carga negativa en el suelo de una milésima de culombio por kilómetro cuadrado, es del orden de 150 V/m y alcanza durante las tormentas el valor de 10 kV/m. Las partículas cargadas de la atmósfera disminuyen progresivamente la carga negativa superficial que recupera su

valor durante las tormentas que actúan como baterías de mantenimiento del campo. El campo magnético estático terrestre se cree debido a corrientes eléctricas de convención generadas en el núcleo metálico del Planeta y es máximo en los polos, aproximadamente próximos a los geográficos, con valor 70 microteslas y mínimo en el ecuador, 30 microteslas. En algunos lugares próximos a suelos ferromagnéticos llega a alcanzar valores de 300 microteslas y en España su intensidad media es 45 microteslas. A estos campos naturales estáticos debemos sumar todos los campos de amplio espectro de frecuencias correspondientes a los pulsos de campos electromagnéticos asociados a las descargas eléctricas que continuamente se producen en la troposfera.

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

Los campos magnéticos asociados al suministro de energía se manifiestan no solo en las proximidades de las LAT sino en todos los electrodomésticos de las viviendas, ordenadores y en los motores, generadores y transformadores de las industrias que utilizan la energía de la red en su proceso productivo. Cerca de los electrodomésticos la intensidad de campo magnético de 50 Hz puede alcanzar valores de miles de microteslas que decrecen rápidamente con la distancia.

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