RADIACIONES NO IONIZANTES

49

Director del capítulo
Bengt Knave

Sumario

Campos eléctricos y magnéticos y consecuencias para la salud
Bengt Knave 49.2
El espectro electromagnético: características físicas básicas
Kjell Hansson Mild 49.4
Radiación ultravioleta
David H. Sliney 49.6
Radiación infrarroja
R. Matthes 49.10
Luz y radiación infrarroja
David H. Sliney 49.14
Láseres
David H. Sliney 49.18
Campos de radiofrecuencia y microondas
Kjell Hansson Mild 49.20
Campos eléctricos y magnéticos de VLF y ELF
Michael H. Repacholi 49.23
Campos eléctricos y magnéticos estáticos
Martino Grandolfo 49.28

CAMPOS ELECTRICOS Y MAGNETICOS Y CONSECUENCIAS PARA LA SALUD

Bengt Knave

En los últimos años se ha acrecentado el interés por los efectos biológicos y posibles consecuencias para la salud de los campos eléctricos y magnéticos débiles de baja intensidad. Se han presentado estudios sobre los campos magnéticos y el cáncer, sobre la reproducción y sobre las reacciones neurológicas y de comportamiento. Seguidamente se facilita un resumen de lo que sabemos, lo que aún requiere ser investigado y, en particular, sobre qué política es la apropiada, es decir, si ésta no debe implicar ningún tipo de restricciones de la exposición, si se debería evitar prudentemente, o si son necesarias costosas intervenciones.

Lo que sabemos

Cáncer

Estudios epidemiológicos sobre leucemia infantil y exposición residencial a líneas aéreas de tendido eléctrico parecen indicar un ligero aumento del riesgo, y se han notificado riesgos excesivos de leucemia y tumores cerebrales en profesiones "eléctricas". Recientes estudios con métodos de valoración de la exposición mejorados han reforzado en general la evidencia de una relación. No obstante, aún no están claras las características de la exposición —por ejemplo, en lo referente a la frecuencia de los campos magnéticos y la intermitencia de la exposición— y no se sabe mucho acerca de posibles factores de confusión o de modificación de los efectos. Además, la mayoría de los estudios sobre riesgo profesional apuntan a una forma especial de leucemia, la leucemia mieloide aguda, mientras que otros encuentran una mayor incidencia de otra forma, la leucemia linfática crónica. Los escasos estudios notificados sobre cáncer en animales no han sido de mucha ayuda para la valoración del riesgo y, a pesar de los numerosos estudios celulares experimentales realizados, no se ha presentado ningún mecanismo plausible y comprensible que permita explicar un efecto carcinogénico.

Reproducción, con especial referencia a las consecuencias para el embarazo

En estudios epidemiológicos se han notificado consecuencias adversas y cáncer infantil tras exposición materna y también paterna a campos magnéticos, indicándose en el caso de la exposición paterna un efecto genotóxico. Los esfuerzos realizados por otros equipos de investigación para reproducir los resultados positivos no han tenido éxito. Los estudios epidemiológicos con operadores de pantallas de visualización de datos (PVD), expuestos a los campos eléctricos y magnéticos emitidos por éstas han dado en su mayor parte resultados negativos, y los estudios teratogénicos realizados en animales utilizando campos como los de las PVD han arrojado resultados demasiado contradictorios para apoyar conclusiones fiables.

Reacciones neurológicas y de comportamiento

Estudios de provocación con voluntarios jóvenes parecen indicar alteraciones fisiológicas tales como disminución de la frecuencia cardiaca y alteraciones del electroencefalograma (EEG) tras la exposición a campos eléctricos y magnéticos relativamente débiles. El reciente fenómeno de la hipersensibilidad a la electricidad parece ser de origen multifactorial, y no está claro si los campos tienen que ver o no con él. Se ha notificado una gran variedad de síntomas y molestias, principalmente de la piel y el sistema nervioso. La mayoría de los pacientes tienen molestias cutáneas difusas en la cara, como enrojecimiento, rubefacción, rubicundez, calor, pinchazos, dolor y tirantez. También se describen síntomas asociados con el sistema nervioso, como cefalea, mareos, fatiga y debilidad, hormigueo y pinchazos en las extremidades, falta de aliento, palpitaciones, transpiración abundante, depresiones y fallos de memoria. No se han presentado síntomas característicos de enfermedad neurológica orgánica.

Exposición

La exposición a campos se produce en todos los ámbitos de la sociedad: en el hogar, en el trabajo, en las escuelas y por el funcionamiento de medios de transporte de propulsión eléctrica. Allí donde hay conductores eléctricos, motores eléctricos y equipo electrónico, se crean campos eléctricos y magnéticos. Intensidades de campo medias de 0,2 a 0,4 μT (microtesla) por jornada de trabajo parecen ser el nivel por encima del cual podría haber un aumento del riesgo, y se han calculado niveles similares para las medias anuales en relación con sujetos que viven debajo de líneas de alta tensión o en sus proximidades.

Muchas personas se hallan expuestas a niveles superiores a éstos, aunque durante períodos más breves, en sus hogares (debido a radiadores, afeitadoras, secadores de pelo y otros aparatos electrodomésticos, o a corrientes parásitas a causa de desequilibrios en el sistema de puesta a tierra eléctrica de los edificios), en el trabajo (en determinadas industrias y oficinas que implican proximidad a equipos eléctricos y electrónicos) o mientras viajan en trenes y otros medios de transporte de propulsión eléctrica. Se desconoce la importancia que reviste esta exposición intermitente. Existen asimismo otras incertidumbres en lo que respecta a la exposición (que implican interrogantes sobre la importancia de la frecuencia de los campos, sobre otros factores de modificación o de confusión, o sobre el conocimiento de la exposición total diurna y nocturna) y a su efecto (dada la consistencia de los hallazgos en cuanto a tipo de cáncer), así como a los estudios epidemiológicos, que aconsejan evaluar con gran cautela todas las valoraciones de riesgo.

Valoraciones de riesgo

Los resultados de estudios residenciales realizados en Escandinavia indican que el riesgo de leucemia se duplica a partir de 0,2 μT, es decir, los niveles de exposición que se dan normalmente a distancias de 50 o 100 metros de una línea de alta tensión. No obstante, el número de casos de leucemia infantil bajo cables de tendido aéreo es reducido, y por lo tanto el riesgo es bajo en comparación con otros riesgos ambientales que se dan en la sociedad. Se calcula que cada año se producen en Suecia dos casos de leucemia infantil debajo o cerca de líneas de alta tensión. De estos casos, uno podría atribuirse al riesgo de los campos magnéticos, si existe realmente.

Los niveles de exposición laboral a los campos magnéticos suelen ser mayores que en la exposición residencial, y los cálculos sobre riesgos de leucemia y tumores cerebrales de los trabajadores expuestos dan valores más altos que para los niños que viven cerca de líneas eléctricas aéreas. Según estimaciones basadas en el riesgo atribuible descubierto en un estudio realizado en Suecia, cada año podrían atribuirse a campos magnéticos unos 20 casos de leucemia y 20 de tumores cerebrales. Estas cifras deben compararse con el número total de casos anuales de cáncer que se dan en Suecia, y que es de 40.000, de los cuales se calcula que 800 son de origen profesional.

Lo que queda por investigar

Es evidente que se requieren más investigaciones para lograr una comprensión satisfactoria de los resultados de los estudios epidemiológicos realizados hasta ahora. Hay varios estudios epidemiológicos en curso en distintos países de todo el mundo, pero la pregunta es si ampliarán los conocimientos que ya tenemos. En

realidad, se ignora qué características de los campos son las causantes de los efectos, si es que existe alguna. Por lo tanto, decididamente necesitamos más estudios sobre posibles mecanismos que expliquen los hallazgos que hemos reunido.

En cambio, existe en la literatura un gran número de estudios *in vitro* dedicados a la búsqueda de posibles mecanismos. Se han presentado varios modelos de favorecimiento del cáncer, basados en cambios de la superficie celular y del transporte de iones de calcio en la membrana celular, en trastornos de la comunicación celular, en la modulación del crecimiento celular, en la activación de secuencias de genes específicos por transcripción modulada de ácido ribonucleico (ARN), en la depresión de la producción de melatonina pineal, en la modulación de la actividad de la ornitina descarboxilasa y en posibles trastornos de los mecanismos de control antitumoral de los sistemas hormonal e inmunológico. Cada uno de estos mecanismos posee características que podrían explicar los efectos cancerígenos de los campos magnéticos notificados; no obstante, ninguno está exento de problemas y objeciones esenciales.

Melatonina y magnetita

Hay dos mecanismos posibles que podrían ser importantes en orden al favorecimiento del cáncer y que, por lo tanto, merecen especial atención. Uno de ellos tiene que ver con la reducción de los niveles nocturnos de melatonina inducida por los campos magnéticos y el otro está relacionado con el descubrimiento de cristales de magnetita en los tejidos humanos.

Se sabe por estudios realizados con animales que la melatonina, debido a un efecto sobre los niveles de hormonas sexuales en circulación, tiene un efecto oncoestático indirecto. Algunos estudios con animales indican asimismo que los campos magnéticos suprimen la producción de melatonina pineal, hallazgo que sugiere un mecanismo teórico para el aumento notificado (por ejemplo) del cáncer de mama posiblemente provocado por la exposición a tales campos. Recientemente se ha propuesto una explicación alternativa al aumento del riesgo de cáncer. Se ha descubierto que la melatonina es un eliminador muy potente de radicales hidroxilo y que, por lo tanto, inhibe considerablemente el daño que los radicales libres podrían causar al ADN. Si se suprimen los niveles de melatonina, por efecto por ejemplo por campos magnéticos, el ADN es más vulnerable al ataque por oxidación. Esta teoría explica porqué la depresión de la melatonina por campos magnéticos podría provocar una mayor incidencia de cáncer en cualquier tejido.

Ahora bien, ¿disminuyen realmente los niveles de melatonina en la sangre cuando los individuos están expuestos a campos magnéticos débiles? Existen indicios de que puede ser así, pero es necesario seguir investigando. Desde hace algunos años se sabe que la capacidad de las aves para orientarse durante las migraciones estacionales está relacionada con la presencia en las células de cristales de magnetita que responden al campo magnético terrestre. Ahora, como se ha expuesto, se ha demostrado también que en sus células humanas hay cristales de magnetita en una concentración teóricamente lo bastante elevada para responder a campos magnéticos débiles. Así pues, el papel de estos cristales de magnetita debería tenerse en cuenta en cualquier debate sobre los posibles mecanismos que pueden proponerse como relacionados con los efectos potencialmente perjudiciales de los campos eléctricos y magnéticos.

Necesidad de conocer los mecanismos

Resumiendo, existe una clara necesidad de proseguir los estudios acerca de esos posibles mecanismos. Los epidemiólogos necesitan información acerca de las características de los campos eléctricos y magnéticos en las que deberían centrarse en sus valoraciones de la exposición. En la mayoría de estudios epidemiológicos se han utilizado intensidades de campo de valor medio (con frecuencias de 50 a 60 Hz); en otros se han estudiado mediciones de exposición acumulativas. En un estudio reciente se descubrió que los campos de frecuencia alta están relacionados con el riesgo. Por último, en algunos estudios con animales se ha encontrado que son importantes los transitorios de campo. Para los epidemiólogos, el problema no reside en los efectos; actualmente existen registros de enfermedades en numerosos países. El problema es que los epidemiólogos ignoran cuáles son las características relevantes de la exposición que deben tener en cuenta en sus estudios.

Política apropiada

Sistemas de protección

En general, son varios los sistemas de protección que han de tenerse en cuenta en las normas, directrices y políticas. El más común es el sistema centrado en la salud, que trata de detectar un efecto específico perjudicial para la salud a un determinado nivel de exposición, independientemente del tipo de exposición, sea éste físico o químico. Un segundo sistema sería el de optimización de un peligro conocido y aceptado, sin necesidad de ningún umbral por debajo del cual sea inexistente el riesgo. En este sistema encajaría la radiación ionizante. Un tercer sistema contempla los peligros o riesgos en los que no se han demostrado con certeza razonable las relaciones causales entre exposición y consecuencias, pero en relación con los cuales existe una preocupación general por los posibles riesgos. Este último es el que inspira el denominado *principio de precaución*, o más recientemente, *de evitación prudente* , que puede resumirse como evitar en el futuro, con bajo coste, la exposición innecesaria en ausencia de certeza científica. Al abordar la exposición a los campos eléctricos y magnéticos desde esta perspectiva, se han presentado estrategias sistemáticas, por ejemplo, sobre el modo de tender las futuras líneas de alta tensión, de configurar los lugares de trabajo o de diseñar los aparatos electrodomésticos para reducir al mínimo la exposición.

Evidentemente, el segundo de los sistemas mencionados, el de optimización, no es aplicable en lo que atañe a las restricciones de los campos eléctricos y magnéticos, sencillamente porque no se conocen ni están aceptados como riesgos. En cambio, los otros dos sistemas son en la actualidad objeto de consideración.

Normas y directrices para la restricción de la exposición de acuerdo con el sistema centrado en la salud

En las guías internacionales, los límites para las restricciones de exposición a los campos están varios órdenes de magnitud por encima de los valores que puede medirse en las líneas eléctricas del tendido aéreo y los que se dan en las profesiones eléctricas. En 1990, la Asociación Internacional de Protección contra la Radiación (International Radiation Protection Association, IRPA) emitió unas *Guías sobre límites de exposición a campos eléctricos y magnéticos de 50/60 Hz*, que han sido adoptadas como base de muchas normas nacionales. Dado que desde entonces se han publicado nuevos e importantes estudios, y en 1993 la Comisión Internacional de Protección contra la Radiación no Ionizante (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, ICNIRP), emitió un anexo. En 1993 se realizaron también en el Reino Unido valoraciones de riesgos en concordancia con las de la IRPA.

Estos documentos ponen de relieve que el estado actual de los conocimientos científicos no garantiza la limitación de los niveles de exposición para el público y la población laboral al nivel de µT, y que se necesitan más datos para confirmar si existen o no riesgos para la salud. Las directrices de la IRPA y la ICNIRP se basan en los efectos de las corrientes inducidas por

campos en el cuerpo, y que corresponden a las que normalmente se miden en éste (hasta 10 mA/m^2 aproximadamente). Se recomienda limitar la exposición de origen profesional a los campos magnéticos de 50/60 Hz a 0,5 mT en el caso de exposición durante toda la jornada y a 5 mT en el caso de exposiciones cortas de hasta dos horas. Asimismo, se recomienda limitar la exposición a los campos eléctricos a 10 y 30 kV/m. El límite de 24 horas para el público se fija en 5 kV/m y 0,1 mT.

Estas consideraciones sobre la reglamentación de la exposición se basan exclusivamente en informes sobre el cáncer. En los estudios de otros posibles efectos relacionados con los campos eléctricos y magnéticos (por ejemplo, trastornos de la reproducción y trastornos neurológicos y del comportamiento), los resultados no se consideran en general lo bastante claros y consistentes como para servir de base científica a la restricción de la exposición.

El principio de precaución o de evitación prudente

Aunque no existe ninguna diferencia real entre estos dos términos, en los debates sobre los campos eléctricos y magnéticos se suele utilizar el de la evitación prudente. Según se ha señalado, puede definirse ésta como la evitación futura, con bajo coste, de la exposición innecesaria mientras exista incertidumbre científica sobre los efectos para la salud. Se ha adoptado en Suecia, pero no en otros países.

En Suecia, cinco organismos gubernamentales (el Instituto de Protección contra la Radiación, la Junta Nacional de Seguridad de la Electricidad, la Junta Nacional de Salud y Bienestar, la Junta Nacional de Higiene y Seguridad en el Trabajo y la Junta Nacional de la Vivienda, Construcción y Planificación) han declarado conjuntamente que "el conocimiento total acumulado hasta ahora justifica la adopción de medidas para reducir la energía de los campos". Siempre que el coste sea razonable, la política es proteger a las personas de la exposición de larga duración a campos magnéticos de alta intensidad. Durante la instalación de nuevos equipos o de nuevas líneas de alta tensión que puedan provocar exposiciones a campos magnéticos intensos, han de elegirse soluciones que determinen exposiciones de menor intensidad, siempre que no impliquen costes elevados o grandes inconvenientes. Según el Instituto de Protección contra la Radiación, por lo general es posible adoptar medidas para reducir el campo magnético cuando los niveles de exposición exceden de los habituales en un factor superior a diez, siempre que tales reducciones puedan hacerse con un coste razonable. En las situaciones en que los niveles de exposición derivados de las instalaciones existentes no sobrepasan los niveles habituales en un factor de diez, debe evitarse realizar una costosa reforma. Ni que decir tiene que este concepto de prevención ha sido criticado por muchos expertos de diferentes países, por ejemplo, por expertos de la industria de suministro eléctrico.

Conclusiones

En el presente artículo se ha resumido lo que sabemos acerca de los posibles efectos para la salud de los campos eléctricos y magnéticos, y de lo que aún requiere ser investigado. No se ha dado ninguna respuesta a la pregunta de la política que deba adoptarse, si bien se han presentado sistemas de protección opcionales. A este respecto, parece claro que la base de datos científica disponible es insuficiente para desarrollar límites de exposición en el nivel de µT, lo que a su vez significa que no hay motivos para efectuar costosas intervenciones con estos niveles de exposición. La cuestión de si debería adoptarse o no alguna forma de estrategia precautoria (por ej., la evitación prudente) es algo que deben decidir las autoridades responsables de la salud pública y la salud en el trabajo de los distintos países. Si no se adopta tal estrategia, normalmente no se impondrá ninguna restricción de la exposición, porque los límites umbrales basados en la salud están muy por encima de la exposición pública y profesional. Así pues, si bien es cierto que en la actualidad hay diferentes opiniones en lo que se refiere a normas, guías y políticas, existe un consenso general en cuanto a la necesidad de seguir investigando para conseguir una base sólida de cara a futuras acciones.

EL ESPECTRO ELECTROMAGNETICO: CARACTERISTICAS FISICAS BASICAS

Kjell Hansson Mild

La forma más conocida de energía electromagnética es la luz del sol. La frecuencia de la luz solar (luz visible) es la línea divisoria entre la radiación ionizante (rayos x, rayos cósmicos), más potente y de frecuencias más altas, y la radiación no ionizante, más benigna y de frecuencias más bajas. Hay un espectro de radiación no ionizante. A los efectos de este capítulo, en el extremo superior, justo por debajo de la luz visible, está la radiación infrarroja. Más abajo se encuentra la amplia gama de radiofrecuencias, que incluye (en orden descendente) las microondas, la radio celular, la televisión, la radio FM y AM, las ondas cortas utilizadas en calentadores dieléctricos y de inducción y, en el extremo inferior, los campos con frecuencia de red eléctrica. El espectro electromagnético se representa en la Figura 49.1.

Del mismo modo que la luz visible o el sonido impregnan nuestro entorno, el espacio en que vivimos y trabajamos, también lo hace la energía de los campos electromagnéticos. Análogamente, igual que la mayor parte de la energía acústica a la que estamos expuestos la crea la actividad humana, lo mismo ocurre con la energía electromagnética: desde los débiles niveles emitidos por los electrodomésticos que usamos a diario (los que permiten que funcionen nuestros aparatos de radio y televisión) hasta los elevados niveles que aplican los médicos con fines beneficiosos: por ejemplo, en la diatermia (tratamientos por calor). En general, la intensidad de tal energía disminuye rápidamente con la distancia a la fuente. Los niveles naturales de estos campos en el entorno son bajos.

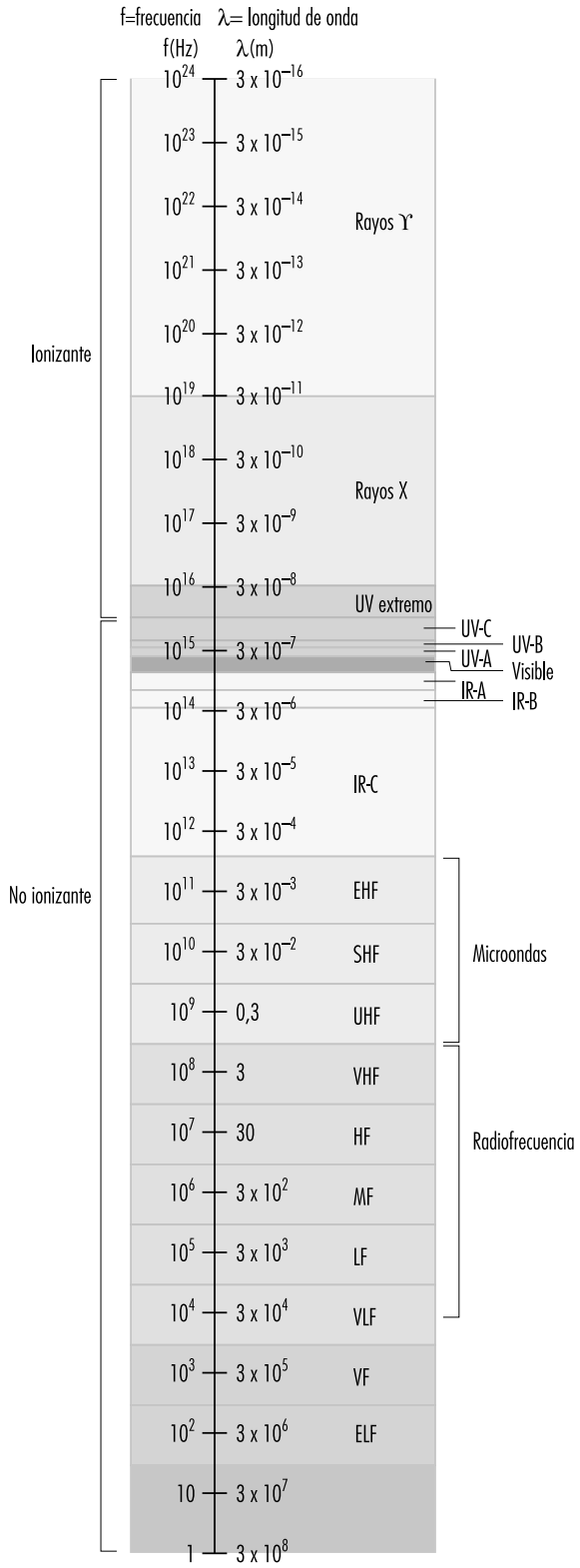
La radiación no ionizante (RNI) engloba toda la radiación y los campos del espectro electromagnético que no tienen suficiente energía para ionizar la materia. Es decir, la RNI es incapaz de impartir suficiente energía a una molécula o un átomo para alterar su estructura quitándole uno o más electrones. La división entre la RNI y la radiación ionizante suele establecerse en una longitud de onda de 100 nanómetros aproximadamente.

Al igual que cualquier forma de energía, la energía RNI tiene el potencial necesario para interactuar con los sistemas biológicos, y las consecuencias pueden ser irrelevantes, perjudiciales en diferentes grados o beneficiosas. En el caso de la radiofrecuencia (RF) y la radiación de microondas, el principal mecanismo de interacción es el calentamiento, pero en la región de baja frecuencia del espectro, los campos de alta intensidad pueden inducir corrientes en el cuerpo y por ello resultar peligrosos. No obstante, se desconocen los mecanismos de interacción de las intensidades de los campos de bajo nivel.

Cantidades y unidades

A frecuencias inferiores a 300 MHz aproximadamente, los campos se cuantifican en términos de intensidad de campo eléctrico (*E*) e intensidad de campo magnético (*H*). *E* se expresa en voltios por metro (V/m) y *H* en amperios por metro (A/m).

Figura 49.1 • Espectro electromagnético.



El espectro electromagnético se divide en dos regiones principales: la ionizante y la no ionizante, con las subdivisiones indicadas. Toda radiación puede expresarse por su longitud de onda y su frecuencia. La radiación no ionizante es la de longitud de onda superior a 100 nm aproximadamente, cuya energía es demasiado baja para ionizar la materia.

Ambos son campos vectoriales: se caracterizan por la magnitud y dirección en cada punto. En el intervalo de baja frecuencia, el campo magnético suele expresarse en términos de densidad de flujo, *B*, por medio de la unidad SI denominada tesla (T). Al hablar de los campos de nuestro entorno diario, suele preferirse como unidad el submúltiplo microtesla (μT). En algunos extos, la densidad de flujo se expresa en gauss (G), y la conversión entre estas unidades es (para campos en el aire): 1 T = 10^4 G o 0,1 μT = 1 mG y 1 A/m = 1,26 μT.

Existen diversas revisiones de los conceptos, cantidades, unidades y terminología utilizados en la protección contra la radiación no ionizante, incluyendo la radiación de radiofrecuencia (NCRP 1981; Polk y Postow 1986; OMS 1993).

El término *radiación* significa simplemente energía transmitida por ondas. Las ondas electromagnéticas son ondas de fuerzas eléctricas y magnéticas, cuyo movimiento ondulatorio se define como propagación de perturbaciones en un sistema físico. Todo cambio en el campo eléctrico va acompañado de un cambio en el campo magnético y viceversa. Estos fenómenos fueron descritos en 1865 por J.C. Maxwell en cuatro ecuaciones que ahora se conocen como ecuaciones de Maxwell.

Las ondas electromagnéticas se caracterizan por un conjunto de parámetros, que incluyen la frecuencia (*f*), la longitud de onda (λ), la intensidad del campo eléctrico, la intensidad del campo magnético, la polarización eléctrica (*P*) (dirección del campo *E*), la velocidad de propagación (*c*) y el vector de Poynting (*S*). La Figura 49.2 representa la propagación de una onda electromagnética en el espacio. La frecuencia se define como el número de cambios completos por segundo del campo eléctrico o magnético en un punto dado, y se expresa en hertzios (Hz). La longitud de onda es la distancia entre dos crestas o dos valles consecutivos de la onda (máximos o mínimos). La frecuencia, la longitud de onda y la velocidad de la onda (*v*) están en la siguiente relación:

$$v = f\ \lambda$$

La velocidad de una onda electromagnética en el espacio es igual a la velocidad de la luz, pero la velocidad en los materiales depende de las propiedades eléctricas de éstos, es decir, de su permitividad (ε) y permeabilidad (μ). La permitividad está relacionada con las interacciones del material con el campo eléctrico, en tanto que la permeabilidad expresa las interacciones con el campo magnético. Las permitividades de las sustancias biológicas difieren considerablemente de las que se dan en el espacio, pues dependen de la longitud de onda (especialmente en el intervalo de RF) y del tipo de tejido. En cambio, la permeabilidad de las sustancias biológicas es igual a la que se registra en el espacio.

En una onda plana, como la representada en la Figura 49.2, el campo eléctrico es perpendicular al campo magnético y la dirección de propagación es perpendicular a ambos campos, eléctrico y magnético.

En una onda plana, la relación entre el valor de la intensidad del campo eléctrico y el de la intensidad del campo magnético, que es constante, se denomina impedancia característica (*Z*):

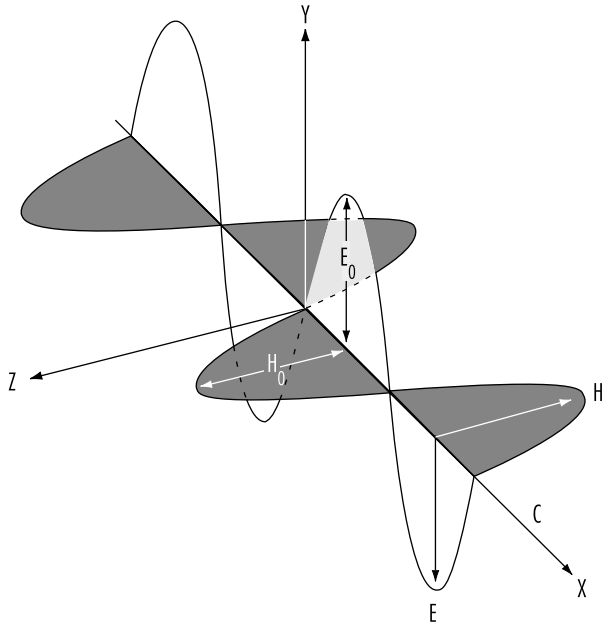
$$Z = E/H$$

En el espacio, $Z = 120\ \pi \approx 377\ \Omega$ pero en los restantes casos *Z* depende de la permitividad y permeabilidad del material a través del cual viaja la onda.

La transferencia de energía se describe por el vector de Poynting, que representa la magnitud y dirección de la densidad del flujo electromagnético.

$$S = E \times H$$

Figura 49.2 • Onda plana propagándose a la velocidad de la luz en dirección a X.



Una onda electromagnética tiene una componente eléctrica y otra magnética. En una onda plana, los campos E y B son perpendiculares entre sí y también perpendiculares a la dirección de propagación. Los campos E y B están en la relación E = 377 H. En la exposición de origen profesional a frecuencias inferiores a 300 MHz nos encontramos en el llamado "campo próximo" y ambas componentes han de considerarse por separado.

En una onda en propagación, la integral de *S* sobre cualquier superficie representa la potencia instantánea transmitida a través de su superficie (densidad de potencia). La magnitud del vector de Poynting se expresa en vatios por metro cuadrado (W/m^2) (en algunos textos se emplea la unidad mW/cm^2, cuya equivalencia en unidades SI es 1 mW/cm^2 = 10 W/m^2) y para las ondas planas está en relación con los valores de las intensidades de campo eléctrico y magnético:

$$S = E^2/120\,\pi = E^2/377$$

y

$$S = 120\,\pi\,H^2 = 377\,H^2$$

No todas las condiciones de exposición que se dan en la práctica pueden representarse por ondas planas. A distancias próximas a las fuentes de radiación de radiofrecuencia, las relaciones características de las ondas planas no se satisfacen. El campo electromagnético radiado por una antena puede dividirse en dos regiones: la zona de campo próximo y la zona de campo lejano. Normalmente, el límite entre estas zonas viene dado por:

$$r = 2a^2/\lambda$$

donde *a* es la dimensión máxima de la antena.

En la zona de campo próximo, la exposición ha de caracterizarse por los campos eléctrico y magnético. En la de campo lejano, es suficiente con uno de ellos, ya que ambos están relacionados entre sí por las anteriores ecuaciones, en las que intervienen *E* y *H*. En la práctica, la situación de campo próximo suele darse a frecuencias inferiores a 300 MHz.

La exposición a los campos de RF se complica aún más por las interacciones de las ondas electromagnéticas con objetos. En general, cuando las ondas electromagnéticas encuentran un objeto, una parte de la energía incidente se refleja, otra parte es absorbida y el resto se transmite. Las proporciones de energía transmitida, absorbida o reflejada por el objeto dependen de la frecuencia y polarización del campo y de las propiedades eléctricas y la forma del objeto. La superposición de las ondas incidente y reflejada produce ondas estacionarias y una distribución de campos espacialmente no uniforme. Como las ondas se reflejan totalmente en los objetos metálicos, cerca de estos objetos se forman ondas estacionarias.

Dado que la interacción de los campos de RF con los sistemas biológicos depende de numerosas características de los campos y éstos son en la práctica complejos, al describir exposiciones a campos de RF deberían tenerse en cuenta los siguientes factores:

- si la exposición se produce en la zona de campo próximo o en la de campo lejano;
- si se produce en la de campo próximo, es necesario conocer los valores de *E* y de *H* ; si se da en la de campo lejano, se necesita *E* o *H*;
- la variación espacial de la magnitud del campo o campos,
- la polarización de campo, es decir, la dirección del campo eléctrico con respecto a la dirección de propagación de la onda.

En lo que se refiere a la exposición a campos magnéticos de baja frecuencia, aún no está claro si la única consideración importante es la intensidad de campo o la densidad de flujo. Acaso sean importantes también otros factores, como el tiempo de exposición o la rapidez de las variaciones del campo.

El término *campo electromagnético* (EMF), tal como se utiliza en los medios informativos y en la prensa, se refiere generalmente a los campos eléctricos y magnéticos de baja frecuencia del espectro, pero también puede utilizarse en un sentido mucho más amplio y englobar el espectro completo de la radiación electromagnética. Téngase en cuenta que, en el intervalo de baja frecuencia, los campos *E* y *B* no están acoplados ni interrelacionados igual que a altas frecuencias, y que por lo tanto es más preciso denominarlos “campos eléctricos y magnéticos” que EMF.

RADIACION ULTRAVIOLETA

David H. Sliney

Al igual que la luz, que es visible, la radiación ultravioleta (RUV) es una forma de radiación óptica de longitudes de onda más cortas y fotones (partículas de radiación) más energéticos que los de la luz visible. La mayoría de las fuentes de luz emiten también algo de RUV. La RUV está presente en la luz del sol y también es emitida por un gran número de fuentes ultravioleta utilizadas en la industria, la ciencia y la medicina. Los trabajadores pueden encontrarse con la RUV en una gran variedad de puestos de trabajo. En algunos casos, con niveles bajos de luz ambiente pueden verse fuentes muy intensas de ultravioleta próximo (“luz negra”), pero normalmente la RUV es invisible y solo se detecta por el resplandor de materiales que producen fluorescencia al ser iluminados con RUV.

Del mismo modo que la luz se divide en colores que pueden verse en un arco iris, la RUV se subdivide en componentes comúnmente denominados *UVA, UVB* y *UVC*. Las longitudes de onda de la luz y la RUV suelen expresarse en nanómetros (nm); 1 nm es la milmillonésima parte (10^{-9}) del metro. La UVC (RUV de muy corta longitud de onda) de la luz solar es absorbida por

la atmósfera y no llega a la superficie terrestre. La UVC solo se obtiene de fuentes artificiales, tales como lámparas germicidas, que emiten la mayor parte de su energía a una sola longitud de onda (254 nm) que es muy eficaz para matar bacterias y virus sobre una superficie o en el aire.

La UVB es la RUV biológicamente más perjudicial para la piel y los ojos, y aunque la mayor parte de esta energía (que es un componente de la luz solar) es absorbida por la atmósfera, produce quemaduras solares y otros efectos biológicos. La RUV de larga longitud de onda, la UVA, se encuentra normalmente en la mayoría de las lámparas y es también la RUV más intensa que llega a la Tierra. Aunque la UVA puede penetrar profundamente en el tejido, no es tan perjudicial biológicamente como la UVB, ya que la energía individual de los fotones es menor que en la UVB o la UVC.

Fuentes de radiación ultravioleta

Luz solar

La mayor exposición de origen profesional a la RUV la experimentan quienes trabajan al aire libre, bajo la luz del sol. La energía de la radiación solar está muy atenuada por la capa de ozono de la Tierra, que limita la RUV terrestre a longitudes de onda superiores a 290-295 nm. La energía de los rayos de corta longitud de onda (UVB), más peligrosos, de la luz solar depende considerablemente de su trayectoria oblicua en la atmósfera, y varía con la estación y la hora del día (Sliney 1986 y 1987; OMS 1994).

Fuentes artificiales

Entre las fuentes artificiales más importantes de exposición humana están las siguientes:

Soldadura al arco industrial. La principal fuente de exposición potencial a la RUV es la energía radiante de los equipos de soldadura al arco. Los niveles de RUV en torno al equipo de soldadura al arco son muy altos y pueden producirse lesiones oculares y cutáneas graves en un tiempo de tres a diez minutos de exposición a distancias visuales cortas, de unos pocos metros. La protección de los ojos y la piel es obligatoria.

Lámparas de RUV industriales/en el lugar de trabajo. Muchos procesos industriales y comerciales, tales como el curado fotoquímico de tintas, pinturas y plásticos, requieren la utilización de lámparas que emiten una radiación intensa en la región del UV. Aunque la probabilidad de exposición perjudicial es baja gracias al empleo de blindajes, en algunos casos puede producirse exposición accidental.

"Lámparas de luz negra". Las lámparas de luz negra son lámparas especializadas que emiten predominantemente en la región del UV, y por lo general se utilizan para pruebas no destructivas con polvos fluorescentes, para la autentificación de billetes de banco y documentos, y para efectos especiales en publicidad y discotecas. No plantean ningún riesgo de exposición considerable para los humanos (excepto en ciertos casos para la piel fotosensibilizada).

Tratamiento médico. Las lámparas de RUV se utilizan en medicina para diversos fines de diagnóstico y terapéuticos. Normalmente, las fuentes de UVA se utilizan en aplicaciones de diagnóstico. Los niveles de exposición del paciente varían considerablemente según el tipo de tratamiento, y las lámparas UV empleadas en dermatología requieren una utilización cuidadosa por parte del personal.

Lámparas RUV germicidas. La RUV con longitudes de onda en el intervalo de 250–265 nm es la más eficaz para esterilización y desinfección dado que corresponde a un nivel máximo en el espectro de absorción del ADN. Como fuente UV se utilizan con frecuencia tubos de descarga de mercurio de baja presión, ya que más del 90% de la energía radiada se emite en la línea de 254 nm. Estas fuentes suelen denominarse "lámparas germicidas", "lámparas bactericidas" o simplemente "lámparas UVC". Se utilizan en hospitales para combatir la infección por tuberculosis, y también en el interior de cabinas microbiológicas de seguridad para inactivar los microorganismos del aire y de las superficies. Es esencial una instalación adecuada de las mismas y el uso de protección ocular.

Bronceado cosmético. En ciertas empresas hay camas solares en las que los clientes pueden broncearse por medio de lámparas especiales que emiten principalmente en la región del UVA, aunque también algo en la del UVB. El uso habitual de una cama solar puede contribuir considerablemente a la exposición cutánea anual de una persona al UV; asimismo, el personal que trabaja en salones de bronceado puede resultar expuesto a bajos niveles. El uso de medios de protección ocular tales como gafas de seguridad o gafas de sol debería ser obligatorio para el cliente, y dependiendo de la disposición del establecimiento incluso el personal puede necesitar protectores oculares.

Alumbrado general. Las lámparas fluorescentes son de uso habitual en el lugar de trabajo y también hace tiempo que se utilizan en el entorno doméstico. Estas lámparas emiten pequeñas cantidades de RUV y solo contribuyen en un pequeño porcentaje a la exposición anual de una persona a la radiación UV. Las lámparas de tungsteno halógenas cada vez se utilizan más en el hogar y en el lugar de trabajo para diversos fines de alumbrado y exhibición. Las lámparas halógenas sin apantallar pueden emitir niveles de RUV suficientes para causar graves lesiones a cortas distancias. Colocando sobre ellas filtros de vidrio se eliminaría este riesgo.

Efectos biológicos

La piel

Eritema

El eritema, o "quemadura solar", es un enrojecimiento de la piel que normalmente aparece de cuatro a ocho horas después de la exposición a la RUV y desaparece gradualmente al cabo de unos días. Las quemaduras solares intensas provocan formación de ampollas y desprendimiento de la piel. La UVB y la UVC son unas 1.000 veces más eficaces que la UVA como agentes causantes de eritema (Parrish, Jaenicke y Anderson 1982), pero el eritema producido por la UVB, de mayor longitud de onda (295 a 315 nm) es más intenso y persiste durante más tiempo (Hausser 1928). Esta mayor intensidad y duración se deben a que la penetración de esta radiación de mayor longitud de onda en la epidermis es más profunda. La piel parece presentar la máxima sensibilidad a 295 nm aproximadamente (Luckiesh, Holladay y Taylor 1930; Coblentz, Stair y Hogue 1931), siendo esta sensibilidad mucho menor (aproximadamente 0,07) a longitudes de onda de 315 nm y superiores (McKinlay y Diffey 1987).

La dosis eritémica mínima (DEM) para 295 nm notificada en estudios más recientes para piel sin broncear, ligeramente pigmentada, varía entre 6 y 30 mJ/cm^2 (Everett, Olsen y Sayer 1965; Freeman y cols. 1966; Berger, Urbach y Davies 1968). La DEM a 254 nm varía considerablemente dependiendo del tiempo transcurrido desde la exposición y de si la piel ha estado expuesta mucho tiempo a la luz solar en el exterior, pero suele ser del orden de 20 mJ/cm^2, pudiendo llegar a 0,1 J/cm^2. La pigmentación y el bronceado de la piel y, lo que es más importante, el engrosamiento del estrato córneo, pueden aumentar esta DEM en un orden de magnitud como mínimo.

Fotosensibilización
Los especialistas de la salud en el trabajo encuentran con frecuencia efectos adversos por exposición de origen profesional a la RUV en trabajadores fotosensibilizados. El tratamiento con ciertos medicamentos puede producir un efecto sensibilizante en la exposición a la UVA, lo mismo que la aplicación tópica de determinados productos, como algunos perfumes, lociones corporales, etc. Las reacciones a los agentes sensibilizantes pueden implicar, fotoalergia (reacción alérgica de la piel) y fototoxicidad (irritación de la piel) tras la exposición a la RUV de la luz solar o de fuentes industriales de RUV (también son frecuentes las reacciones de fotosensibilidad durante el empleo de aparatos de bronceado). Esta fotosensibilización cutánea puede estar producida por cremas o pomadas aplicadas a la piel, por medicamentos ingeridos por vía oral o inyectados, o por el uso de inhaladores bajo prescripción médica (véase Figura 49.3). El médico que prescribe un fármaco potencialmente fotosensibilizante debería advertir siempre al paciente que adopte medidas apropiadas para protegerse de los efectos adversos, pero con frecuencia a éste se le dice únicamente que evite la luz solar y no las fuentes de RUV (dado que no es frecuente su uso por la población en general).

Efectos retardados
La exposición crónica a la luz solar —en especial, al componente UVB— acelera el envejecimiento de la piel e incrementa el riesgo de cáncer de piel (Fitzpatrick y cols. 1974; Forbes y Davies 1982; Urbach 1969; Passchier y Bosnjakovic 1987). Varios estudios epidemiológicos han mostrado que la incidencia de cáncer de piel está estrechamente relacionada con la latitud, la altitud y las condiciones atmosféricas, lo cual se relaciona a su vez con la exposición a la RUV (Scotto, Fears y Gori 1980; OMS 1993).

Aún no se han establecido con exactitud las relaciones cuantitativas entre dosis y respuesta para la carcinogénesis de la piel humana, aunque los individuos de piel blanca, en particular los de origen celta, son mucho más propensos a contraer cáncer de piel. No obstante, hay que señalar que las exposiciones a la RUV necesarias para provocar tumores de piel en modelos animales pueden tener lugar con lentitud suficiente para que no se produzca eritema, y que la efectividad relativa (relativa al pico a 302 nm) notificada en esos estudios varía en la misma forma que las quemaduras solares (Cole, Forbes y Davies 1986; Sterenborg y Van der Leun 1987).

El ojo

Fotoqueratitis y fotoconjuntivitis
Son reacciones inflamatorias agudas como consecuencia de la exposición a radiación UVB y UVC, que aparecen pocas horas después de una exposición excesiva y normalmente remiten al cabo de uno o dos días.

Lesión retiniana por luz brillante
Aunque la lesión térmica de la retina por fuentes de luz es improbable, pueden producirse daños fotoquímicos por exposición a fuentes con una fuerte componente de luz azul, con reducción temporal o permanente de la visión. No obstante, la respuesta normal de aversión a la luz intensa evitará este riesgo a menos que se haga un esfuerzo consciente por mirar a las fuentes de luz brillante. La contribución de la RUV a la lesión de retina es generalmente muy pequeña, debido a que la absorción por el cristalino limita la exposición retiniana.

Efectos crónicos
La exposición laboral de larga duración a la RUV durante varios decenios puede contribuir a la formación de cataratas y a efectos degenerativos no relacionados con el ojo, tales como envejecimiento cutáneo y cáncer de piel relacionados con la exposición. También la exposición crónica a la radiación infrarroja puede elevar el riesgo de cataratas, aunque esto es muy improbable si se dispone de protección ocular.

Figura 49.3 • Algunas de las sustancias fotosensibilizantes.

La radiación ultravioleta actínica (UVB y UVC) es fuertemente absorbida por la córnea y la conjuntiva. La sobreexposición de estos tejidos provoca queratoconjuntivitis, conocida comúnmente como "golpe de arco" o "ceguera producida por la nieve". Pitts ha comunicado el espectro de acción y la evolución temporal de la fotoqueratitis en la córnea del hombre, el conejo y el mono (Pitts 1974). El periodo de latencia varía en razón inversa de la intensidad de la exposición, desde 1,5 a 24 horas, pero normalmente es de 6 a 12 hours; el malestar suele desaparecer en 48 horas como máximo. A continuación aparece una conjuntivitis que puede ir acompañada de eritema de la piel alrededor de los párpados. Desde luego, la exposición a la RUV rara vez produce lesiones oculares permanentes. Pitts y Tredici (1971) notificaron datos de los umbrales de fotoqueratitis en humanos para bandas de longitudes de onda de 10 nm de ancho, desde 220 a 310 nm. Se observó que la máxima sensibilidad de la córnea se produce a 270 nm, valor que difiere sensiblemente del máximo para la piel. Presumiblemente, la radiación de 270 nm es biológicamente más activa debido a la falta de un estrato corneal que atenúe la dosis aplicada al tejido epitelial de la córnea a longitudes de onda de RUV más cortas. La respuesta a la longitud de onda, o espectro de acción, no varió tanto como los espectros de acción del eritema, cuyos umbrales varían entre 4 y 14 mJ/cm^2 a 270 nm. El umbral notificado a 308 nm fue de 100 mJ/cm^2 aproximadamente.

Al contrario de lo que sucede en la exposición de la piel, la exposición repetida del ojo a niveles de RUV potencialmente peligrosos no incrementa la capacidad protectora del tejido afectado (la córnea), lo que conduce a la pigmentación y al engrosamiento del estrato corneal. Ringvold y cols. estudiaron las propiedades de absorción de RUV de la córnea (Ringvold 1980a) y del humor acuoso (Ringvold 1980b), así como los efectos de la radiación UVB sobre el epitelio córneo (Ringvold 1983), el estroma de la córnea (Ringvold y Davanger 1985) y el endotelio córneo (Ringvold, Davanger y Olsen 1982; Olsen y Ringvold 1982). Sus estudios con el microscopio electrónico mostraron que el tejido corneal posee notables propiedades de reparación y recuperación. Aunque podían apreciarse daños considerables en todas estas capas, que al parecer aparecían inicialmente en las membranas celulares, al cabo de una semana la recuperación morfológica era completa. La destrucción de queratocitos en la capa de estroma resultaba evidente y la recuperación endotelial era marcada a pesar de que en esta capa la renovación celular no es habitual. Cullen y cols. (1984) estudiaron el daño endotelial que era persistente si persistía la exposición a la RUV. Riley y cols. (1987) estudiaron también el endotelio córneo tras la exposición a la UVB y concluyeron que no era probable que agresiones graves aisladas tuvieran efectos retardados; no obstante, llegaron también a la conclusión de que la exposición crónica podría acelerar cambios del endotelio relacionados con el envejecimiento de la córnea.

Las longitudes de onda superiores a 295 nm pueden transmitirse a través de la córnea y son absorbidas casi totalmente por el cristalino. Pitts, Cullen y Hacker (1977b) demostraron que pueden producirse cataratas en conejos con longitudes de onda en la banda de 295–320 nm. Los umbrales para opacidades transitorias oscilaban entre 0,15 y 12,6 J/cm^2, dependiendo de la longitud de onda, con un umbral mínimo a 300 nm. Para que se produjesen opacidades permanentes se requerían mayores exposiciones radiantes. No se observaron efectos en el cristalino en el intervalo de longitudes de onda de 325 a 395 nm, ni siquiera con exposiciones radiantes muy superiores, de 28 a 162 J/cm^2 (Pitts, Cullen y Hacker 1977a; Zuclich y Connolly 1976). Estos estudios ilustran claramente el riesgo especial que presenta la banda espectral de 300-315 nm, como era de esperar dado que los fotones de estas longitudes de onda penetran eficazmente y tienen suficiente energía para producir daños fotoquímicos.

Taylor y cols. (1988) aportaron pruebas epidemiológicas de que la UVB de la luz solar era un factor etiológico en la catarata senil, pero no mostraron ninguna correlación entre la catarata y la exposición a la UVA. Aunque en tiempos fue una creencia popular debido a la fuerte absorción de UVA por el cristalino, la hipótesis de que la UVA puede causar cataratas no ha sido avalada por estudios experimentales de laboratorio ni por estudios epidemiológicos. De los datos experimentales de laboratorio que evidenciaron que los umbrales eran más bajos para la fotoqueratitis que para la cataratogénesis, hay que concluir que niveles inferiores a los necesarios para producir fotoqueratitis con exposición diaria, deberían considerarse peligrosos para el tejido del cristalino. Aun suponiendo que la córnea estuviese expuesta a un nivel prácticamente equivalente al del umbral para la fotoqueratitis, un cálculo estimativo indica que la dosis diaria de RUV para el cristalino a 308 nm sería inferior a 120 mJ/cm^2 con 12 horas de exposición al aire libre (Sliney 1987). En realidad, una exposición diaria media más realista sería inferior a la mitad de ese valor.

Ham y cols. (1982) determinaron que el espectro de acción para la fotorretinitis producida por RUV se encuentra en la banda de 320–400 nm. Demostraron que los umbrales en la banda espectral visible, que eran de 20 a 30 J/cm^2 a 440 nm, se reducían aproximadamente a 5 J/cm^2 para una banda de 10 nm centrada en 325 nm. El espectro de acción aumentaba monotónicamente al disminuir la longitud de onda. Deberíamos concluir, por tanto, que niveles muy por debajo de 5 J/cm^2 a 308 nm producirían lesiones de retina, aunque estas lesiones no se manifestarían en las primeras 24 a 48 horas siguientes a la exposición.

No existen datos publicados sobre umbrales de daño en la retina inferiores a 325 nm, por lo que cabe esperar que el patrón del espectro de acción para lesiones fotoquímicas en los tejidos de la córnea y el cristalino sea aplicable también a la retina, lo que supondría un umbral de daño del orden de 0,1 J/cm^2.

Aunque se ha demostrado claramente que la radiación UVB es mutágena y carcinógena para la piel, llama la atención la extrema infrecuencia de carcinogénesis en la córnea y la conjuntiva. No parece haber evidencia científica que relacione la exposición a la RUV con ningún tipo de cáncer de la córnea o la conjuntiva en humanos, aunque no sucede lo mismo con los animales. Esto sugiere que en el ojo humano actúa un sistema inmunológico muy eficaz, puesto que hay trabajadores que realizan su labor al aire libre y reciben una exposición a la RUV comparable a la que recibe el ganado. Esta conclusión está apoyada además por el hecho de que individuos con una respuesta inmunológica deficiente, como los que padecen xeroderma pigmentario, desarrollan con frecuencia neoplasias de la córnea y la conjuntiva (Stenson 1982).

Normas de seguridad

Se han establecido límites de exposición profesional LE a RUV que incluyen una curva de espectro de acción que engloba los datos umbral correspondientes a los efectos agudos determinados en estudios sobre dosis mínima de eritema y queratoconjuntivitis (Sliney 1972; IRPA 1989). Esta curva no difiere sensiblemente de los datos umbral colectivos, aun teniendo en cuenta los errores de medida y las variaciones de respuesta individual, y está muy por debajo de los umbrales cataratogénicos de la UVB.

El límite de exposición a la RUV es mínimo a 270 nm (0,003 J/cm^2 a 270 nm) y, por ejemplo, a 308 nm es de 0,12 J/cm^2 (ACGIH 1995, IRPA 1988). El riesgo biológico es el mismo tanto si la exposición consiste en unas cuantas exposiciones en forma de impulsos a lo largo del día como en una

exposición única de muy corta duración o en 8 horas de exposición a algunos microvatios por cm^2, y los límites antes indicados se aplican a la jornada de trabajo completa.

Protección en el trabajo

La exposición laboral a la RUV debe minimizarse en la medida de lo posible. En lo referente a las fuentes artificiales deberá darse prioridad en lo posible a medidas técnicas tales como filtrado, blindaje y confinamiento. Los controles administrativos, tales como la limitación de acceso, pueden reducir los requisitos de protección individual.

Los trabajadores que actúan a la intemperie, como los obreros agrícolas, peones, trabajadores de la construcción, pescadores, etc. pueden reducir al mínimo su riesgo de exposición a la radiación UV solar utilizando ropa apropiada de tejido tupido y, lo que es más importante, un sombrero con ala para reducir la exposición de la cara y el cuello. Para reducir aún más la exposición pueden aplicarse filtros solares a la piel expuesta. Deben disponer de sombra y se les debe proporcionar todas las medidas protectoras necesarias antes indicadas.

En la industria existen numerosas fuentes que pueden producir lesiones oculares agudas con una exposición breve. Hay diversos protectores oculares con distintos grados de protección apropiados para cada uso. Entre los de uso industrial se encuentran los cascos para soldadura (que además ofrecen protección frente a la radiación intensa visible e infrarroja y protegen la cara), las caretas, las gafas de seguridad y las gafas con absorción UV. En general, los protectores oculares para uso industrial deben ajustarse perfectamente a la cara de manera que no haya intersticios por los que la RUV pueda llegar directamente al ojo y deben estar bien construidos para evitar lesiones físicas.

La idoneidad y selección de los medios de protección ocular dependen de los siguientes puntos:

- la intensidad y las características de la emisión espectral de la fuente de RUV;
- los patrones de comportamiento de las personas situadas cerca de fuentes de RUV (son importantes la distancia y el tiempo de exposición);
- las propiedades de transmisión del material de las gafas protectoras,
- el diseño de la montura de las gafas, para evitar la exposición periférica del ojo a RUV directa no absorbida.

En las situaciones de exposición industrial se puede valorar el riesgo ocular midiendo y comparando los niveles de exposición con los límites recomendados (Duchene, Lakey y Repacholi 1991).

Medición

Dada la estrecha dependencia entre los efectos biológicos y la longitud de onda, la medida principal de cualquier fuente de RUV es su potencia espectral o la distribución de su irradiancia espectral. Esta debe medirse con un espectrorradiómetro, constituido por un sistema óptico de entrada adecuado, un monocromador y un detector e indicador de RUV. Este tipo de instrumento no es de uso frecuente en higiene industrial.

En muchas situaciones prácticas se utiliza un medidor de RUV de banda ancha para determinar las duraciones de exposición seguras. A efectos de seguridad se puede configurar la respuesta espectral con arreglo a la función espectral utilizada para las directrices de exposición de la ACGIH y de la IRPA. Si no se utilizan instrumentos adecuados, se producirán graves errores en la valoración del riesgo. También existen dosímetros personales de RUV (por ejemplo, película de polisulfona), pero su aplicación se ha limitado en gran parte a la investigación de la seguridad en el trabajo en lugar de a estudios de evaluación de riesgos.

Conclusiones

Constantemente se producen daños moleculares de los principales componentes celulares debidos a la exposición a la RUV pero existen mecanismos de reparación para contrarrestar la exposición de la piel y los tejidos oculares a la radiación ultravioleta. Sólo cuando estos mecanismos de reparación se ven desbordados se producen lesiones biológicas agudas (Smith 1988). Por estas razones reducir la exposición a la RUV de origen profesional sigue siendo una importante preocupación para el personal de seguridad y salud en el trabajo.

RADIACION INFRARROJA

R. Matthes

La radiación infrarroja es la parte del espectro de radiación no ionizante comprendida entre las microondas y la luz visible. Es parte natural del entorno humano y por lo tanto las personas están expuestas a ella en pequeñas cantidades en todas las situaciones de la vida diaria, por ejemplo en el hogar o durante las actividades recreativas realizadas al sol. No obstante, puede producirse una exposición muy intensa debido a ciertos procesos técnicos en el lugar de trabajo.

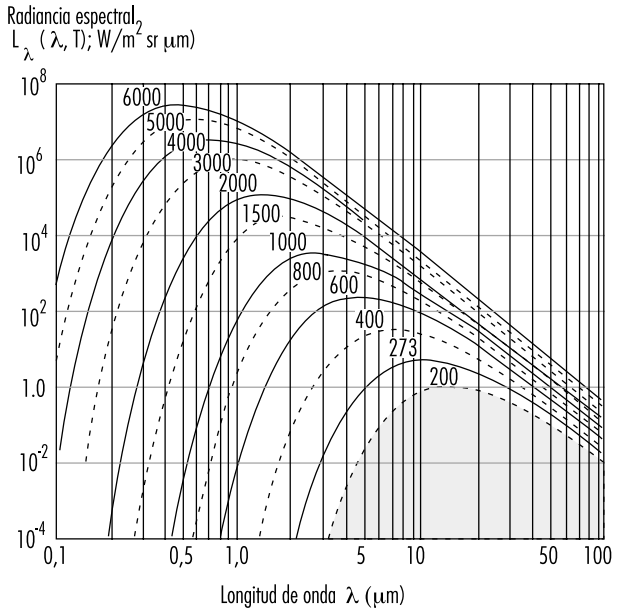
Muchos procesos industriales implican el curado térmico de distintos tipos de materiales. Normalmente, las fuentes de calor utilizadas o el propio material calentado emiten niveles tan altos de radiación infrarroja que un gran número de trabajadores corren el riesgo de resultar expuestos.

Conceptos y magnitudes

Las longitudes de onda de la radiación infrarroja (IR) están comprendidas entre 780 nm y 1 mm. Según la clasificación de la Comisión Internacional de Iluminación (CIE), esta banda se subdivide en IRA (de 780 nm a 1,4 μm), IRB (de 1,4 μm a 3 μm) e IRC (de 3 μm a 1 mm). Tal subdivisión se ajusta de manera aproximada a las características de absorción dependiente de la longitud de onda de la IR en el tejido y a los diferentes efectos biológicos resultantes.

La cantidad y la distribución temporal y espacial de la radiación infrarroja se expresan mediante diferentes magnitudes y unidades radiométricas. Debido a las propiedades ópticas y fisiológicas, especialmente del ojo, normalmente se hace una distinción entre fuentes "puntuales", es decir, pequeñas, y fuentes "extendidas". El criterio para esta distinción es el valor en radianes del ángulo (α) medido en el ojo, subtendido por la fuente. Este ángulo puede calcularse como un cociente, dividiendo la dimensión D_1 de la fuente luminosa por la distancia de visión *r*. Las fuentes extendidas son aquéllas que subtienden un ángulo de visión en el ojo mayor que α_{min}, cuyo valor es normalmente de 11 milirradianes. Para todas las fuentes extendidas hay una distancia de visión en que α es igual a α_{min}; a distancias de visión mayores se puede tratar la fuente como puntual. En lo que a protección contra la radiación óptica se refiere, las magnitudes más importantes relativas a las fuentes extensas son la *radiancia* (*L*, expresada en $Wm^{-2}sr^{-1}$) y la *radiancia integrada en el tiempo* (L_P en J $m^{-2}sr^{-1}$), que expresan el "brillo" de la fuente. A efectos de valorar el riesgo para la salud, las magnitudes más importantes relativas a las fuentes puntuales o extensas, a distancias de la fuente tales que $\alpha<\alpha_{min}$, son la *irradiancia* (*E*, expresada en Wm^{-2}), que es equivalente al concepto de tasa de dosis de exposición, y la *exposición radiante* (*H*, en Jm^{-2}), que equivale al concepto de dosis de exposición.

Figura 49.4 • Radiancia espectral L_λ de un cuerpo negro radiante a la temperatura absoluta indicada en grados Kelvin en cada curva.



En algunas bandas del espectro, los efectos biológicos debidos a la exposición dependen mucho de la longitud de onda. Por lo tanto, es preciso utilizar magnitudes espectrorradiométricas adicionales (por ejemplo, la radiancia espectral, L_λ, expresada en $Wm^{-2}\,sr^{-1}\,nm^{-1}$) para ponderar los valores físicos de la emisión de la fuente con el espectro de acción aplicable relacionado con el efecto biológico.

Fuentes y exposición profesional

La exposición a la IR se debe a diversas fuentes naturales y artificiales. La emisión espectral de estas fuentes puede limitarse a una sola longitud de onda (como en el láser) o distribuirse sobre una amplia banda de longitudes de onda.

En general, los diferentes mecanismos que intervienen en la generación de radiación óptica son los siguientes:

- excitación térmica (radiación del cuerpo negro);
- descarga gaseosa,
- amplificación de la luz por emisión estimulada de radiación (láser), siendo el mecanismo de descarga gaseosa menos importante en la banda de IR.

La emisión de las fuentes más importantes utilizadas en numerosos procesos industriales se debe a excitación térmica y puede determinarse de modo aproximado utilizando las leyes físicas de la radiación del cuerpo negro si se conoce la temperatura absoluta de la fuente. La emisión total (M, en Vm^{-2}) de un cuerpo negro radiante (Figura 49.4) se expresa mediante la ley de Stefan-Boltzmann:

$$M(T) = 5{,}67 \times 10^{-8} T^4$$

y depende de la cuarta potencia de la temperatura (T, en K) del cuerpo radiante. La distribución espectral de la radiancia se expresa mediante la ley de radiación de Planck:

$$L_\lambda = \frac{2c^2h}{\lambda^5\left(c\frac{hc}{|kT|}-1\right)}$$

c = velocidad de la luz
h = constante de Planck
k = constante de Boltzmann

y la longitud de onda de la emisión máxima (λ_{max}) se expresa según la ley de Wien, por medio de la siguiente ecuación:

$$\lambda_{max} = \frac{2{,}898 \times 10^{-3}}{T}$$

Muchos de los láseres utilizados en procesos médicos e industriales emiten niveles muy altos de IR. En general, comparada con otras fuentes de radiación, la radiación láser posee algunas características inusuales que pueden influir en el riesgo consecutivo a una exposición, tales como los impulsos de muy corta duración o una irradiancia extremadamente alta. Por lo tanto, la radiación láser se trata con detalle más adelante en este capítulo.

Tabla 49.1 • Diferentes fuentes de IR, población expuesta y niveles de exposición aproximados.

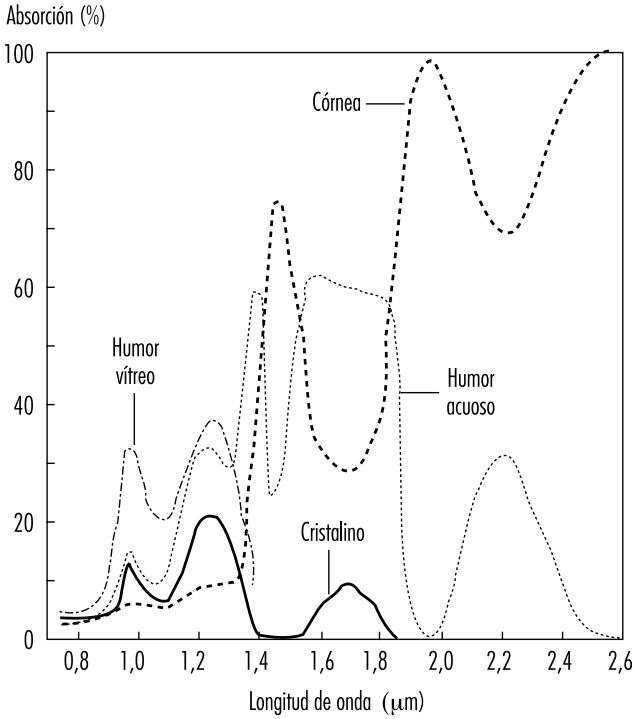
Fuente	Aplicación o población expuesta	Exposición
Luz solar	Trabajadores a la intemperie, agricultores, trabajadores de la construcción, marineros, público en general	500 Wm^{-2}
Lámparas de filamento de tungsteno	Población y trabajadores en general	10^5–10^6 $Wm^{-2}sr^{-1}$
	Alumbrado general, secado de tintas y pinturas	
Lámparas de filamento de tungsteno halogenado	(Véase lámparas de filamento de tungsteno)	50–200 Wm^{-2} (a 50 cm)
	Sistemas de copia (fijación), procesos generales (secado, cocción, retracción, reblandecimiento)	
Diodos fotoemisores (p. ej., diodo de GaAs)	Juguetes, electrónica de consumo, tecnología de transmisión de datos, etc.	10^5 $Wm^{-2}sr^{-1}$
Lámparas de arco de xenón	Proyectores, simuladores solares, luces de exploración	10^7 $Wm^{-2}sr^{-1}$
	Operadores de cámaras de imprentas, trabajadores de laboratorios ópticos, artistas de variedades	
Hierro en fusión	Horno de acero, trabajadores de acerías	10^5 $Wm^{-2}sr^{-1}$
Baterías de lámparas de infrarrojos	Calentamiento y secado industriales	10^3 a $8{\cdot}10^3$ Wm^{-2}
Lámparas de infrarrojos en hospitales	Incubadoras	100–300 Wm^{-2}

Numerosos procesos industriales requieren el empleo de fuentes que emiten altos niveles de radiación visible e infrarroja, por lo que un gran número de trabajadores, como panaderos, sopladores de vidrio, operarios de hornos de cocción, trabajadores de fundiciones, herreros, trabajadores metalúrgicos y bomberos, tienen potencial riesgo de exposición. Además de las lámparas hay que tener en cuenta otras fuentes, como llamas, sopletes de gas, sopletes de acetileno, baños de metal fundido y barras metálicas incandescentes. Estas fuentes se encuentran en fundiciones, acerías y muchas otras plantas de industria pesada. La Tabla 49.1 resume algunos ejemplos de fuentes de IR y sus aplicaciones.

Efectos biológicos

Por regla general, la radiación óptica no penetra a mucha profundidad en el tejido biológico. Por lo tanto, los principales objetivos de una exposición a IR son la piel y los ojos. En la mayoría de condiciones de exposición el principal mecanismo de interacción de la IR es térmico. Sólo los impulsos de muy corta duración que pueden producir los láseres, aunque no se tratan aquí, pueden originar también efectos termomecánicos. Con la radiación IR no son de prever efectos debidos a ionización o a la rotura de enlaces químicos, dado que la energía de las partículas, al ser inferior a 1,6 eV aproximadamente, es demasiado baja para causar tales efectos. Por la misma razón, las reacciones fotoquímicas sólo revisten importancia a longitudes de onda cortas en las regiones visible y ultravioleta del espectro. Los distintos efectos de la IR para la salud, dependientes de la longitud de onda, se deben principalmente a las propiedades ópticas de los tejidos, dependientes también de la longitud de onda que presenta el tejido: por ejemplo, la absorción espectral de los medios oculares (Figura 49.5).

Figura 49.5 • Absorción espectral de los medios oculares.



Efectos sobre el ojo

En términos generales, el ojo está bien adaptado para autoprotegerse frente a la radiación óptica del entorno natural. Además, está protegido fisiológicamente contra lesiones por fuentes de luz intensa, como el sol o las lámparas de alta intensidad, mediante una respuesta de aversión que limita la duración de la exposición a una fracción de segundo (0,25 segundos aproximadamente).

La IRA afecta principalmente a la retina, debido a la transparencia de los medios oculares. Además, cuando se mira directamente a una fuente puntual o a un haz láser, la capacidad de enfocar en la región de la IRA hace la retina mucho más susceptible de sufrir daños que ninguna otra parte del cuerpo. Se considera que, con períodos de exposición cortos, el calentamiento del iris por absorción de radiación visible o IR próxima conduce a la formación de opacidades en el cristalino.

Al aumentar la longitud de onda, a partir de 1 μm aproximadamente, aumenta también la absorción por los medios oculares. Por lo tanto, se considera que la absorción de radiación IRA por el cristalino y el iris pigmentado influye en la formación de opacidades de cristalino. Las lesiones del cristalino se atribuyen a longitudes de onda inferiores a 3 μm (IRA e IRB). El humor acuoso y el cristalino presentan una absorción especialmente elevada de la radiación infrarroja de longitud de onda superior a 1,4 μm.

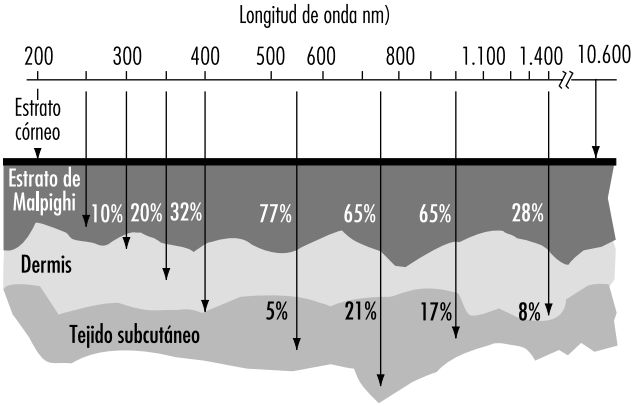
En la región IRB e IRC del espectro, los medios oculares se vuelven opacos a causa de la elevada absorción por el agua que contienen. En esta región, la absorción se produce principalmente en la córnea y el humor acuoso. Por encima de 1,9 μm, el único medio realmente absorbente es la córnea. La absorción de radiación infrarroja de larga longitud de onda por la córnea puede elevar la temperatura del interior del ojo debido a la conducción térmica. Gracias a la rápida renovación de las células superficiales de la córnea cabe esperar que cualquier daño que se limite a la capa externa de esta última sea temporal. En la banda de IRC, la exposición puede provocar en la córnea quemaduras similares a las de la piel. No obstante, las quemaduras de la córnea no son muy probables dada la reacción de aversión que desencadena la sensación dolorosa provocada por una exposición intensa.

Efectos sobre la piel

La radiación infrarroja no penetra en la piel a mucha profundidad, por lo que la exposición de la piel a una IR muy intensa puede producir efectos térmicos de distinta intensidad e incluso quemaduras graves. Los efectos sobre la piel dependen de las propiedades ópticas de ésta, tales como la profundidad de penetración en función de la longitud de onda (Figura 49.6). Particularmente, a longitudes de onda más largas, una exposición extensa puede provocar un gran aumento de temperatura local y quemaduras. Debido a las propiedades físicas de los procesos de transporte térmico en la piel, los valores umbral para estos efectos dependen del tiempo. Por ejemplo, una irradiación de 10 kWm^{-2} puede causar una sensación dolorosa al cabo de 5 segundos, mientras que una exposición de 2 kWm^{-2} no producirá la misma reacción en períodos de duración inferior a 50 segundos aproximadamente.

Si la exposición se prolonga durante períodos muy largos, incluso con valores muy inferiores al umbral de dolor, el cuerpo humano puede sufrir una elevada carga térmica, en especial si la exposición abarca la totalidad del cuerpo como por ejemplo delante de acero fundido. Esto puede provocar un desequilibrio del sistema de termorregulación, en otro caso fisiológicamente bien equilibrado. El umbral de tolerancia de tales exposiciones depende de las diferentes condiciones individuales y ambientales, tales como la capacidad individual del sistema de termorregulación, el metabolismo del cuerpo durante la

Figura 49.6 • Profundidad de penetración en la piel a diferentes longitudes de onda.



Los valores son porcentajes de radiación incidente que alcanza una determinada capa de la piel.

Fuente: OMS 1982.

exposición o la temperatura ambiente, la humedad y el movimiento del aire (velocidad del viento). En ausencia de trabajo físico puede tolerarse una exposición de 300 Wm^{-2} como máximo durante ocho horas en determinadas condiciones ambientales, pero este valor disminuye a 140 Wm^{-2} aproximadamente durante el trabajo físico pesado.

Normas de exposición

Los efectos biológicos de la exposición a la IR que dependen de la longitud de onda y de la duración de la exposición, sólo son intolerables si se sobrepasan ciertos valores umbral de intensidad o de dosis. Como protección frente a tales condiciones de exposición intolerables, organizaciones internacionales como la Organización Mundial de la Salud (OMS), la Oficina Internacional del Trabajo (OIT), el Comité Internacional de Radiación no Ionizante de la Asociación Internacional de Protección contra la Radiación (INIRC/IRPA) y su sucesora la Comisión Internacional de Protección contra la Radiación no Ionizante (ICNIRP), así como la Conferencia Americana de Higienistas Industriales del Gobierno (ACGIH), han propuesto límites de exposición a la radiación infrarroja de fuentes ópticas tanto coherentes como incoherentes. La mayoría de las propuestas nacionales e internacionales sobre guías para limitar la exposición humana a la radiación infrarroja se basan en los valores límites umbral (TLV) publicados por la ACGIH (1993/1994) o coinciden exactamente con ellos. Dichos límites están ampliamente aceptados y se aplican con frecuencia en situaciones profesionales. Se basan en el estado actual del conocimiento científico y están destinados a prevenir lesiones térmicas de la retina y de la córnea y a evitar posibles efectos retardados en el cristalino.

La revisión de 1994 de los límites de exposición de la ACGIH se expresa así:

1. Para la protección de la retina contra lesiones térmicas en caso de exposición a luz visible (por ejemplo, en el caso de fuentes luminosas potentes, la radiancia espectral L_λ en W/(m² sr nm) ponderada con respecto a la función de riesgo térmico para la retina R_λ (véase la Tabla 49.2) sobre el intervalo de longitudes de onda Δ_λ y sumada sobre la gama de longitudes de onda de 400 a 1.400 nm, no deberá exceder de:

$$\sum_{400}^{1400} L_\lambda R_\lambda \Delta_\lambda \leq \frac{5 \times 10^4}{\alpha \cdot t^{1/4}}$$

siendo t la duración de visión limitada a intervalos de 10^{-3} a 10 segundos (es decir, en condiciones de visión accidentales, no de visión fija) y α el ángulo subtendido para la fuente en radianes calculado para α = máxima extensión de la fuente/distancia a la fuente R_λ (Tabla 49.2).

2. Para proteger la retina de los riesgos de exposición de las lámparas de calor por infrarrojos o de cualquier fuente del IR próximo en ausencia de un fuerte estímulo visual, la radiancia infrarroja en el intervalo de longitudes de onda de 770 a 1.400 nm tal como es observada por el ojo (sobre la base de un diámetro de pupila de 7 mm) en condiciones de visión de duración prolongada deberá limitarse a:

$$\sum_{770}^{1400} L_\lambda \Delta_\lambda \leq \frac{6 \times 10^3}{\alpha}$$

Este límite se basa en un diámetro de pupila de 7 mm, ya que en este caso la respuesta de aversión (por ejemplo, cerrar los ojos) puede no existir debido a la ausencia de luz visible.

3. Para evitar posibles efectos retardados sobre el cristalino, tales como formación retardada de cataratas, y proteger la córnea de una sobreexposición, la radiación infrarroja a longitudes de onda superiores a 770 nm deberá limitarse a 100 W/m² para períodos superiores a 1.000 s, y a:

$$\sum_{770}^{3000} E_\lambda \Delta_\lambda \leq 1{,}8 \times 10^4 t^{-3/4}$$

para períodos más cortos.

4. Para pacientes afáquicos se indican funciones de ponderación separadas y los TLV resultantes para el intervalo de longitudes de onda del ultravioleta y la luz visible (305–700 nm).

Medición

Existen técnicas e instrumentos radiométricos que permiten analizar el riesgo para la piel y los ojos derivado de la exposición a fuentes de radiación óptica. Para caracterizar una fuente de luz convencional suele ser muy útil medir la radiancia. Para definir condiciones de exposición peligrosa a fuentes ópticas, son más importantes la irradiancia y la exposición radiante. La evaluación

Tabla 49.2 • Función de riesgo térmico para la retina.

Longitud de onda (nm)	R_λ	Longitud de onda (nm)	R_λ
400	1,0	460	8,0
405	2,0	465	7,0
410	4,0	470	6,2
415	8,0	475	5,5
420	9,0	480	4,5
425	9,5	485	4,0
430	9,8	490	2,2
435	10,0	495	1,6
440	10,0	500–700	1,0
445	9,7	700–1.050	$10^{((700-\lambda)/500)}$
450	9,4	1.050–1.400	0,2
455	9,0		

Fuente: ACGIH 1996.

de fuentes de banda ancha es más compleja que la de fuentes que emiten en una sola longitud de onda o en bandas muy estrechas, ya que han de tenerse en cuenta las características espectrales y el tamaño de la fuente. El espectro de ciertas lámparas consiste en una emisión continua en una amplia banda de longitudes de onda, simultánea a la emisión en ciertas longitudes de onda individuales (líneas). Si no se suma debidamente la fracción de energía de cada línea a la emisión continua, pueden introducirse considerables errores en la representación de esos espectros.

Para la evaluación del riesgo para la salud, los valores de exposición han de medirse sobre una abertura límite está debidamente especificada en las normas de exposición. Normalmente se considera que la abertura más pequeña posible en la práctica es de 1 mm. Las longitudes de onda superiores a 0,1 mm plantean dificultades debido a los considerables efectos de difracción que crea una abertura de 1 mm. Para esta banda de longitudes de onda se ha aceptado una abertura de 1 cm² (11 mm de diámetro), ya que los puntos calientes en esta banda son mayores que en longitudes de onda más cortas. Para la evaluación de los riesgos retinianos, el tamaño de la abertura se determinó por el tamaño de una pupila media y de acuerdo con ello se eligió una abertura de 7 mm.

Por lo general, las mediciones en la región óptica son muy complejas. Las medidas tomadas por personal no formado pueden conducir a conclusiones carentes de validez. En Sliney y Wolbarsht (1980) puede verse un compendio detallado de procedimientos de medida.

Medidas de protección

La protección normal más eficaz frente a la exposición a la radiación óptica es el confinamiento total de la fuente y de todas las vías de radiación que puedan partir de ella. En la mayoría de los casos, tales medidas permiten cumplir fácilmente los límites de exposición. De no ser así, deberá recurrirse a la protección individual. Por ejemplo, se utilizará protección ocular en forma de gafas o pantallas adecuadas, o bien ropa protectora. Si las condiciones de trabajo no permiten adoptar tales medidas, puede ser necesario ejercer un control administrativo y restringir el acceso a las fuentes muy intensas. En algunos casos, una medida para proteger al trabajador puede ser reducir la potencia de la fuente o bien el tiempo de trabajo (mediante pausas que le permitan recuperarse del estrés por calor).

Conclusión

Por lo general, la radiación infrarroja de las fuentes más comunes, tales como lámparas, o de la mayoría de las aplicaciones industriales, no supone ningún riesgo para los trabajadores. No obstante, en algunos lugares de trabajo puede entrañar un riesgo para la salud del trabajador. Además están aumentando rápidamente la aplicación y utilización de lámparas con fines especiales y en procesos a alta temperatura en la industria, la ciencia y la medicina. Si la exposición a tales aplicaciones es lo bastante elevada, no pueden excluirse ciertos efectos perjudiciales (principalmente en los ojos pero también en la piel). Se espera que aumente la importancia de las normas sobre exposición a la radiación óptica internacionalmente reconocidas. Para proteger al trabajador de una exposición excesiva deberían ser obligatorias ciertas medidas como el apantallamiento (pantallas oculares) o la ropa protectora.

Los principales efectos biológicos adversos atribuidos a la radiación infrarroja son las cataratas, conocidas como cataratas de los sopladores de vidrio o de los operarios de hornos. La exposición de larga duración incluso a niveles relativamente bajos produce estrés por calor en el cuerpo humano. En tales condiciones de exposición deben tenerse en cuenta factores adicionales, como la temperatura corporal y la pérdida de calor por evaporación, así como determinados factores ambientales.

En los países industrializados se han confeccionado algunas guías prácticas para informar e instruir a los trabajadores. Puede verse un compendio completo de las mismas en Sliney y Wolbarsht (1980).

LUZ Y RADIACION INFRARROJA

David H. Sliney

La luz y la energía radiante infrarroja (IR) son dos formas de radiación óptica que, junto a la radiación ultravioleta, constituyen el espectro óptico. Dentro de este espectro, las distintas longitudes de onda tienen potenciales considerablemente diferentes para ocasionar efectos biológicos, por lo cual el espectro óptico puede subdividirse aún más.

El término *luz* debería reservarse para las longitudes de onda de energía radiante comprendidas entre 400 y 760 nm, que provocan una respuesta visual en la retina (CIE 1987). La luz es el componente esencial de la emisión de las lámparas de iluminación, las pantallas de visualización y una gran variedad de dispositivos de alumbrado. A pesar de la importancia de la iluminación para la visión, algunas fuentes de luz pueden producir reacciones fisiológicas indeseadas, tales como discapacidad y molestias por deslumbramiento, parpadeo y otras formas de estrés ocular debido a un diseño ergonómico deficiente de las tareas del lugar de trabajo. La emisión de luz intensa es también un efecto secundario potencialmente peligroso de algunos procesos industriales, como la soldadura al arco.

La radiación infrarroja (RIR, longitudes de onda de 760 nm a 1 mm) se denomina también comúnmente *radiación térmica* (o *calor radiante*), y es emitida por todos los objetos calientes (motores calientes, metales en fusión y otras fuentes de calor en fundiciones, superficies termotratadas, lámparas eléctricas incandescentes, sistemas de calefacción radiantes, etc). Es emitida asimismo por una gran variedad de equipos eléctricos, como motores, generadores y transformadores eléctricos y diversos equipos electrónicos.

La radiación infrarroja es uno de los factores que contribuyen al estrés por calor. Niveles elevados de temperatura y humedad ambientales y un bajo grado de circulación del aire pueden combinarse con el calor radiante y producir estrés por calor con el potencial riesgo de lesiones por calor. En ambientes más frescos, las fuentes de calor radiante molestas o mal diseñadas también pueden producir malestar, siendo ésta una consideración ergonómica a tener en cuenta.

Efectos biológicos

Los riesgos profesionales que entrañan las formas de radiación visible e infrarroja para los ojos y la piel están limitados por la aversión de los ojos a la luz brillante y la sensación de dolor en la piel producida por un calentamiento radiante intenso. El ojo está bien adaptado para autoprotegerse contra lesiones por radiación óptica intensa (debidas a energía radiante ultravioleta, visible o infrarroja) procedente de la luz solar ambiental. Está protegido por una respuesta de aversión natural a la observación de fuentes de luz brillante que normalmente lo protege de lesiones por exposición a fuentes tales como el sol, las lámparas de arco y los arcos de soldadura, dado que esa aversión limita la duración de la exposición a una fracción de segundo (dos décimas aproximadamente). No obstante, las fuentes con fuerte emisión IR sin un estímulo visual intenso pueden ser peligrosas para el cristalino en

caso de exposición crónica. Uno también puede obligarse a mirar al sol, a un arco de soldadura o a un campo nevado y sufrir por ello una pérdida temporal (y a veces permanente) de visión. En una instalación industrial en la que hay luces brillantes a baja altura en el campo de visión, los mecanismos protectores del ojo son menos eficaces, por lo que es especialmente importante adoptar precauciones contra el riesgo.

Existen al menos cinco tipos distintos de riesgos para el ojo y la piel debidos a fuentes de luz intensa y radiación IR, y es preciso comprender cada uno de ellos para elegir las medidas protectoras. Además de los riesgos potenciales que presenta la radiación ultravioleta (RUV) de algunas fuentes de luz intensa, hay que tener en cuenta los siguientes: (Sliney y Wolbarsht 1980; OMS 1982):

1. Lesión térmica de la retina, que puede producirse a longitudes de onda de 400 nm a 1400 nm. Normalmente el peligro de este tipo de lesión solo lo plantean los láseres, una fuente de arco de xenón muy intensa o un hongo nuclear. La quemadura local de la retina produce un punto ciego (escotoma).
2. Lesión fotoquímica de la retina por luz azul (riesgo asociado principalmente con la luz azul de 400 nm a 550 nm de longitud de onda) (Ham 1989). Esta lesión se denomina comúnmente fotorretinitis por "luz azul" y una forma especial de ella recibe el nombre de *retinitis solar* debido a la fuente que la produce. La retinitis solar recibió en tiempos la denominación de "ceguera de los eclipses" con la correspondiente "quemadura retiniana". Sólo en los últimos años se ha descubierto que la fotorretinitis obedece a un mecanismo de lesión fotoquímico consecutivo a la exposición de la retina a longitudes de onda cortas del espectro visible, concretamente la luz violeta y azul. Hasta el decenio de 1970 se creía que obedecía a un mecanismo de lesión térmico. En contraste con la luz azul, la radiación IRA es muy poco eficaz como productora de lesiones retinianas (Ham 1989; Sliney y Wolbarsht 1980).
3. Riesgos térmicos para el cristalino en la región del infrarrojo próximo (asociados con longitudes de onda de 800 nm a 3.000 nm aproximadamente) con potencial formación de catarata por calor industrial. La exposición media de la córnea a la radiación infrarroja de la luz solar es del orden de 10 W/m^2. En comparación con esto se ha notificado que trabajadores del vidrio y el acero expuestos a irradiancias infrarrojas del orden de 0,8 a 4 kW/m^2 diariamente durante 10 a 15 años han desarrollado opacidades lenticulares (Sliney y Wolbarsht 1980). Estas bandas espectrales contienen IRA e IRB (véase la Figura 49.1). La guía de la Conferencia Americana de Higienistas Industriales del Gobierno (ACGIH) sobre exposición a la IRA de la parte anterior del ojo es una irradiancia total ponderada en función del tiempo de 100 W/m^2 para duraciones de exposición superiores a 1.000 s (16,7 min) (ACGIH 1992 y 1995).
4. Lesión térmica de la córnea y la conjuntiva (a longitudes de onda de 1.400 nm a 1 mm aproximadamente). Este tipo de lesión se limita casi exclusivamente a la exposición a radiación láser.
5. Lesión térmica de la piel. Aunque rara vez se debe a fuentes convencionales, puede producirse en todo el espectro óptico.

Importancia de la longitud de onda y del tiempo de exposición

Las lesiones térmicas (1) y (4) anteriores se limitan por lo general a duraciones de exposición muy breves y existen protecciones oculares diseñadas para prevenir estas lesiones agudas. No obstante, pueden producirse lesiones fotoquímicas como las mencionadas anteriormente en el punto (2), con dosis bajas repartidas a lo largo de la jornada de trabajo. El producto de la tasa de dosis por la duración de la exposición es siempre la dosis (de esta última es de la que depende el grado de riesgo fotoquímico). Al igual que con cualquier mecanismo de lesión fotoquímico, hay que tener en cuenta el espectro de acción que determina la eficacia relativa de las diferentes longitudes de onda en cuanto a la producción de un efecto fotobiológico. Por ejemplo, el espectro de acción correspondiente a la lesión retiniana fotoquímica tiene su máximo valor en 440 nm aproximadamente (Ham 1989). La mayoría de los efectos fotoquímicos se limitan a un intervalo de longitudes de onda muy estrecho, mientras que un efecto térmico puede producirse a cualquier longitud de onda del espectro. Por ello, la protección ocular para estos efectos específicos solo necesita bloquear una banda espectral relativamente estrecha para ser eficaz. Normalmente en la protección ocular frente a una fuente de banda ancha es preciso filtrar más de una banda espectral.

Fuentes de radiación óptica

Luz solar

La mayor exposición laboral a la radiación óptica se debe a la exposición a los rayos del sol de los trabajadores que realizan su actividad al aire libre. El espectro solar abarca desde la región de corte de la capa de ozono estratosférica, alrededor de los 290-295 nm en la banda del ultravioleta, hasta unos 5.000 nm (5 μm) en la banda del infrarrojo. La radiación solar puede alcanzar un nivel de hasta 1 kW/m^2 durante los meses de verano y puede provocar estrés por calor, dependiendo de la temperatura ambiente y de la humedad.

Fuentes artificiales

Las principales fuentes artificiales de exposición humana a la radiación óptica son las siguientes:

1. *Soldadura y corte.* Normalmente los soldadores y sus compañeros están expuestos no solo a una intensa radiación UV, sino también a intensa radiación visible e IR emitida por el arco. En casos aislados estas fuentes han producido lesiones agudas en la retina. En estos entornos es obligatoria la protección ocular.
2. *Industrias del metal y fundiciones.* La fuente más importante de exposición visible e infrarroja son las superficies de metal fundido y de metal caliente en las industrias del acero y el aluminio y en las fundiciones. La exposición de los trabajadores varía normalmente entre 0,5 y 1,2 kW/m^2.
3. *Lámparas de arco.* Muchos procesos industriales y comerciales, por ejemplo aquellos en que se utilizan lámparas de curado fotoquímico, emiten intensa luz visible de onda corta (azul) así como radiación UV e IR. Aunque la probabilidad de exposición perjudicial es baja debido al apantallado, en algunos casos puede producirse exposición accidental.
4. *Lámparas infrarrojas.* Estas lámparas emiten predominantemente en el intervalo del IRA y suelen utilizarse para tratamiento por calor, secado de pintura y otras aplicaciones afines. No suponen ningún riesgo de exposición significativo para los humanos, ya que el malestar producido por la exposición limita ésta a un nivel seguro.
5. *Tratamiento médico.* En medicina se utilizan lámparas de infrarrojos para diversos fines diagnósticos y terapéuticos. Las exposiciones del paciente varían considerablemente según el tipo de tratamiento y las lámparas de IR requieren una utilización cuidadosa por parte del personal.
6. *Alumbrado general.* Las lámparas fluorescentes emiten muy poca radiación infrarroja y generalmente no son lo suficientemente brillantes para entrañar un riesgo potencial para los

ojos. Las lámparas incandescentes de tungsteno y de tungsteno-halogeno emiten una fracción considerable de su energía radiante en la región del infrarrojo. Además, la luz azul emitida por las lámparas de tungsteno-halogeno puede entrañar un riesgo para la retina si una persona mira al filamento. Afortunadamente la respuesta de aversión del ojo a la luz brillante previene lesiones agudas incluso a cortas distancias. Este riesgo debería minimizarse o eliminarse colocando filtros "de calor" de vidrio sobre estas lámparas.

7. *Proyectores y otros dispositivos ópticos.* En los proyectores de exploración, proyectores cinematográficos y otros dispositivos colimadores de haces luminosos se utilizan fuentes de luz intensa que pueden entrañar un riesgo para la retina con el haz directo a distancias muy cortas.

Medición de las propiedades de las fuentes

La característica más importante de cualquier fuente óptica es la distribución de su potencia espectral. Esta se mide utilizando un espectrorradiómetro, constituido por un sistema óptico de entrada adecuado, un monocromador y un fotodetector.

En muchas situaciones prácticas se utiliza un radiómetro óptico de banda ancha para seleccionar una región espectral determinada. Por razones de iluminación visible y de seguridad se configura la respuesta espectral del instrumento para adaptarla a una respuesta espectral biológica; por ejemplo, los luxómetros se adaptan a la respuesta fotópica (visual) del ojo. Normalmente, si se exceptúan los medidores de riesgo de RUV, la medición y el análisis de riesgos de las fuentes de luz intensa y de las fuentes infrarrojas son demasiado complejos para los especialistas en salud y seguridad en el trabajo que realizan tareas de rutina. Se está trabajando en la normalización de las categorías de seguridad para las lámparas con el fin de que el usuario no necesite realizar mediciones para determinar los riesgos potenciales.

Límites de exposición humanos

Conociendo los parámetros ópticos del ojo humano y la radiancia de una fuente luminosa se pueden calcular las irradiancias (tasas de dosis) en la retina. También la exposición de las estructuras anteriores del ojo humano a la radiación infrarroja puede revestir interés y además debe tenerse en cuenta que la posición relativa de la fuente de luz y el grado de cierre de los párpados puede afectar considerablemente al cálculo correcto de una dosis de exposición ocular. En el caso de las exposiciones a ultravioleta y a luz visible de corta longitud de onda también es importante la distribución espectral de la fuente luminosa.

Varios grupos nacionales e internacionales han recomendado límites de exposición laboral (LE) para la radiación óptica (ACGIH 1992 y 1994; Sliney 1992). Aunque la mayoría de estos grupos han recomendado límites de exposición para la radiación UV y láser, solo uno de ellos ha recomendado LE para la radiación visible (es decir, la luz), concretamente la ACGIH, un organismo de gran prestigio en el campo de la salud en el trabajo. La ACGIH denomina a sus LE valores límite umbral, o TLV, y como éstos se publican una vez al año existe la oportunidad de efectuar una revisión anual (ACGIH 1992 y 1995). Estos valores se basan en gran parte en datos sobre lesiones oculares procedentes de estudios con animales y de datos de lesiones de retina en humanos producidas por observación del sol y por arcos de soldadura. Se basan asimismo en la hipótesis implícita de que las exposiciones medioambientales a energía radiante visible no suelen ser peligrosas para el ojo salvo en entornos muy poco usuales tales como campos nevados y desiertos o cuando se mira fijamente al sol.

Evaluación de la seguridad de las radiaciones ópticas

Debido a que una evaluación exhaustiva del riesgo requiere complejas mediciones de irradiancia y radiancia espectral de la fuente y a veces también instrumentos y cálculos muy especializados, rara vez se lleva a cabo in situ por higienistas industriales y técnicos en seguridad. En lugar de ello, la normativa sobre seguridad obliga a utilizar equipo de protección ocular en los entornos peligrosos. Mediante estudios de investigación se han evaluado una gran variedad de arcos, láseres y fuentes térmicas a fin de desarrollar recomendaciones generales para el establecimiento de normas de seguridad más fáciles de aplicar en la práctica.

Medidas de protección

La exposición laboral a la radiación visible e IR rara vez entraña riesgos y por lo general es beneficiosa. No obstante, algunas fuentes emiten una cantidad considerable de radiación visible provocando con ello la respuesta de aversión natural, por lo que hay pocas probabilidades de sobreexposición accidental de los ojos. En cambio, es muy probable que se produzca exposición accidental en el caso de fuentes artificiales que sólo emiten radiación en el infrarrojo próximo. Entre las medidas que pueden adoptarse para reducir al mínimo la exposición innecesaria del personal a la radiación IR están un diseño técnico adecuado del sistema óptico que se utilice, el uso de gafas o pantallas adecuadas, la limitación del acceso a las personas directamente relacionadas con el trabajo y la comprobación de que los trabajadores son conscientes de los riesgos potenciales que entraña la exposición a fuentes de radiación intensa visible e infrarroja. El personal de mantenimiento que sustituya lámparas de arco deberá poseer una formación adecuada para evitar cualquier exposición peligrosa. Es inadmisible que los trabajadores padezcan eritema cutáneo o fotoqueratitis. Si se produjesen estos procesos, deberán examinarse los métodos de trabajo y adoptarse medidas que garanticen la improbabilidad de sobreexposición en el futuro. Las operarias gestantes no corren riesgos específicos de radiación óptica por lo que respecta a la integridad de su embarazo.

Diseño y normas en relación con los protectores oculares

El diseño de protectores oculares para soldadura y otras operaciones que presentan fuentes de radiación óptica industrial (por ejemplo, trabajos de fundición, fabricación de vidrio y acero) se inició al comienzo del presente siglo con el desarrollo del vidrio de Crooke. Las normas sobre protectores oculares que se desarrollaron posteriormente se atenían al principio general de que puesto que la radiación infrarroja y ultravioleta no es necesaria para la visión, esas bandas espectrales deberían bloquearse del mejor modo posible con los materiales de vidrio existentes.

En el decenio de 1970 se probaron las normas empíricas sobre equipos de protección ocular y se comprobó que contenían amplios factores de seguridad frente a la radiación infrarroja y ultravioleta cuando se comparaban los factores de transmisión con los límites de exposición profesional vigentes, mientras que los factores de protección frente a la luz azul tan solo eran suficientes. En vista de ello, se ajustaron algunos requisitos de las normas.

Protección frente a la radiación ultravioleta e infrarroja

En la industria se utilizan diversas lámparas UV especializadas para detección por fluorescencia y para fotocurado o fotoendurecimiento de tintas, resinas plásticas, polímeros dentales, etc. Aunque normalmente las fuentes de UVA entrañan poco riesgo, pueden contener cantidades mínimas de radiación UVB peligrosa o presentar un problema de deslumbramiento

discapacitante (debido a la fluorescencia del cristalino). Existe una amplia disponibilidad de lentes filtrantes de la radiación UV, de vidrio o de plástico, con factores de atenuación muy elevados, que protegen contra la totalidad del espectro UV. Cuando estos filtros ofrecen protección hasta 400 nm, pueden presentar una coloración ligeramente amarillenta. Es muy importante que este tipo de protectores oculares (así como las gafas de sol industriales) ofrezcan protección para el campo de visión periférico. Los protectores laterales y los de diseño envolvente son importantes como protección frente a la incidencia temporal de rayos oblicuos en la zona nasal de la lente, que suelen originar cataratas corticales.

Casi todos los materiales de las lentes de vidrio y de plástico bloquean la radiación ultravioleta de menos de 300 nm y la radiación infrarroja de longitud de onda superior a 3.000 nm (3 μm) y para algunos láseres y fuentes ópticas ofrecen buena protección las gafas de seguridad transparentes ordinarias, con resistencia al impacto (por ejemplo las lentes de policarbonato transparentes bloquean eficazmente las longitudes de onda superiores a 3 μm). No obstante, es preciso añadir absorbentes tales como óxidos metálicos al vidrio o colorantes orgánicos a los plásticos para eliminar la radiación UV de hasta 380-400 nm aproximadamente y la infrarroja desde 780 nm hasta 3 μm. Esto puede resultar fácil o muy caro y difícil dependiendo del material, y la estabilidad del absorbente puede variar un poco. Los filtros según normas ANSI Z87.1 del American National Standards Institute deberán poseer los factores de atenuación apropiados en cada banda crítica del espectro.

Protección en diversos sectores

Extinción de incendios

Los bomberos pueden estar expuestos a radiación intensa en el infrarrojo próximo por lo que además de la vital protección de la cara y la cabeza suelen prescribirse filtros atenuadores de la radiación IR. En este caso también es importante la protección frente a los impactos.

Protección ocular en los sectores de la fundición y el vidrio

Las gafas y anteojos diseñados para protección ocular frente a la radiación infrarroja suelen tener un ligero tinte verdoso, aunque éste puede ser más oscuro si se desea proporcionar algo de confort frente a la radiación visible. No hay que confundir estos protectores oculares con las lentes azules que se utilizan en las operaciones de fabricación de acero y de fundición, y cuya finalidad consiste en comprobar visualmente la temperatura de la masa fundida. Estas gafas azules no ofrecen protección y sólo deben usarse brevemente.

Soldadura

Se pueden conferir fácilmente propiedades de filtrado del infrarrojo y el ultravioleta a los filtros de vidrio por medio de aditivos tales como óxido de hierro pero el grado de atenuación estrictamente visible determina el *grado de protección*, que es una expresión logarítmica de la atenuación. Normalmente se utiliza un grado de protección de 3 o 4 para la soldadura con gas (que exige utilizar gafas) y de 10 a 14 para la soldadura con arco eléctrico o de plasma (para las que se requiere un casco de protección). La regla práctica es que la atenuación frente a los riesgos oculares es adecuada si el soldador considera que puede observar el arco cómodamente. Los supervisores, ayudantes de los soldadores y demás personas presentes en la zona de trabajo pueden requerir filtros con un grado de protección relativamente bajo (por ejemplo 3 o 4) como protección frente a la fotoqueratitis ("golpe de arco" o "ceguera del soldador"). En los últimos años ha hecho su aparición un nuevo tipo de filtro de soldadura, el filtro autooscurecible. Cualquiera que sea el tipo de filtro, éste deberá cumplir las normas ANSI Z87.1 y Z49.1 en cuanto a los filtros de soldadura fijos especificados para tinte oscuro (Buhr y Sutter 1989; CIE 1987).

Filtros de soldadura autooscurecibles

El filtro de soldadura autooscurecible, cuyo número de tinte aumenta con la intensidad de la radiación óptica que incide en él, representa un importante avance en la capacidad de los soldadores para realizar soldaduras con un nivel uniforme de alta calidad, de un modo más eficaz y ergonómico. Antes, el soldador tenía que bajar y subir el casco o el filtro cada vez que encendía y apagaba el arco, y justo antes de encender éste tenía que trabajar a ciegas. Además, normalmente el casco se baja y se sube con un rápido movimiento del cuello y la cabeza, lo que puede provocar tensión de cuello o lesiones más graves. Debido a la incomodidad de este engorroso procedimiento, algunos soldadores suelen encender o "cebar" el arco con el casco convencional en posición elevada, lo que produce fotoqueratitis. En condiciones normales de iluminación ambiente, un soldador provisto de un casco con filtro autooscurecible puede ver suficientemente bien con la protección ocular colocada para realizar tareas tales como la alineación de las piezas a soldar, la colocación del equipo de soldadura en la posición precisa y el cebado del arco. En los cascos de diseños más comunes, unos sensores de luz detectan entonces el destello del arco prácticamente en cuanto se produce y activan una unidad de control electrónica para que conmute un filtro de cristal líquido de un grado de protección en estado claro a un grado de protección en estado oscuro preseleccionado, eliminando así la necesidad de realizar las maniobras, difíciles y peligrosas, que requieren los filtros de grado de protección fijo.

Con frecuencia se ha suscitado la cuestión de si los filtros autooscurecibles pueden entrañar problemas de seguridad ocultos. Por ejemplo ¿pueden las imágenes persistentes ("ceguera por arco") producidas en el lugar de trabajo conducir a un deterioro permanente de la visión? ¿Ofrecen realmente los nuevos tipos de filtro un grado de protección equivalente o mejor que el que pueden proporcionar los filtros fijos convencionales? Aunque se puede responder afirmativamente a esta segunda pregunta, hay que entender que no todos los filtros autooscurecibles son equivalentes. Las velocidades de reacción de los filtros, los valores de los grados de protección claros y oscuros obtenidos bajo una determinada intensidad de iluminación y el peso de cada unidad pueden variar de unos equipos a otros. La dependencia del rendimiento de la unidad respecto de la temperatura, la variación del grado de protección en función de la degradación de la batería eléctrica, el "grado de protección en estado de reposo" y otros factores técnicos varían según el diseño de cada fabricante. Estas consideraciones se están teniendo en cuenta en las nuevas normas.

Puesto que todos los sistemas proporcionan una atenuación adecuada con sus filtros, el atributo individual más importante que especifican los fabricantes de filtros autooscurecibles es la velocidad de cambio de filtro. En los filtros autooscurecibles actuales esta velocidad varía desde una décima de segundo a una velocidad superior a una diezmilésima de segundo. Buhr y Sutter (1989) han indicado un medio de especificar el tiempo máximo de conmutación pero su fórmula depende de la variación en el tiempo de la conmutación. La velocidad de conmutación es crucial, porque proporciona la mejor pauta para la importantísima (pero no especificada) medida de la cantidad de luz que entrará en el ojo al encender el arco, en comparación con la que deja pasar un filtro fijo que trabaja con el mismo grado de protección. Si entra en el ojo demasiada luz por cada conmutación durante la jornada, la dosis acumulada de energía

luminosa produce "adaptación transitoria" y molestias de "tensión ocular" y otros problemas (la adaptación transitoria es la experiencia visual causada por cambios repentinos en nuestro entorno luminoso y puede caracterizarse con malestar, sensación de haber estado expuesto a deslumbramiento y pérdida temporal de agudeza visual). Los productos actuales con velocidades de conmutación del orden de 10 milisegundos ofrecen una protección más adecuada contra la fotorretinitis, si bien el tiempo de conmutación más corto, del orden de 0,1 ms, tiene la ventaja de reducir los efectos de adaptación transitoria (Eriksen 1985; Sliney 1992).

A falta de pruebas exhaustivas de laboratorio, el soldador puede realizar unas sencillas comprobaciones. Se le puede sugerir simplemente que observe una página de texto impreso en letra menuda a través de varios filtros autooscurecibles. Así se tendrá una indicación de la calidad óptica de cada filtro. Después se le puede pedir que intente cebar un arco mientras lo observa a través de cada uno de los filtros cuya compra se está considerando. Por suerte se puede confiar en el hecho de que los niveles de luz que resultan cómodos para ver, no son peligrosos. Se deberá comprobar la eficacia de filtración del UV y el IR en la ficha técnica del fabricante para asegurarse de que se eliminan las bandas innecesarias. Unos cuantos cebados de arco repetidos deberían ser suficientes para que el soldador perciba si experimentará malestar por adaptación transitoria, aunque lo mejor sería que la prueba durase toda una jornada.

El estado de reposo o fallo del grado de protección de un filtro autooscurecible (se produce cuando falla la batería) debería ofrecer el 100 % de protección a los ojos del soldador durante uno o varios segundos como mínimo. Algunos fabricantes utilizan un estado oscuro como posición de desconexión y otros un grado de protección intermedio entre los estados oscuro y claro del filtro. En uno u otro caso, la transmitancia del filtro en estado de reposo debería ser sensiblemente inferior a la transmitancia del estado claro con el fin de excluir un riesgo para la retina. En cualquier caso, el dispositivo deberá proporcionar al usuario una indicación clara y evidente de cuándo está desconectado el filtro o cuándo se produce un fallo del sistema. De este modo se asegurará que el soldador sea alertado con antelación en caso de que el filtro no esté conectado o no funcione correctamente antes de que se inicie la soldadura. Otras características, tales como la duración de la carga de la batería o el rendimiento en condiciones extremas de temperatura, pueden ser importantes para ciertos usuarios.

Conclusiones

Aunque las especificaciones técnicas de los dispositivos que protegen los ojos de las fuentes de radiación óptica pueden parecer algo complicadas, existen normas de seguridad que especifican los grados de protección adecuados y estas normas ofrecen un factor de seguridad conservador para el usuario.

● LASERES

David H. Sliney

Un láser es un dispositivo que produce energía radiante electromagnética coherente dentro del espectro óptico comprendido entre la zona final del ultravioleta y el infrarrojo lejano (submilimétrico). El término *láser* es en realidad un acrónimo de *light amplification by stimulated emission of radiation* (amplificación de la luz por emisión estimulada de radiación). Aunque el proceso láser fue predicho teóricamente por Albert Einstein en 1916, la primera demostración de un láser conseguido con éxito no tuvo lugar hasta 1960. En los últimos años, los láseres han encontrado múltiples aplicaciones, desde el laboratorio de investigación hasta el entorno industrial, médico y de oficinas, así como en obras de construcción e incluso en el ámbito doméstico. En numerosas aplicaciones, tales como reproductores de videodiscos y sistemas de comunicación por fibra óptica, la salida de energía radiante del láser está confinada, no existe ningún riesgo para la salud del usuario y éste puede no advertir siquiera la presencia de un láser incorporado en el producto. Sin embargo, en algunas aplicaciones médicas, industriales o en investigación la energía radiante emitida por el láser es accesible y puede suponer un riesgo potencial para los ojos y la piel.

Puesto que el proceso láser (denominado a veces "laseo") puede producir un haz de radiación óptica (es decir energía radiante ultravioleta, visible o infrarroja) fuertemente colimado un láser, al contrario que en la mayoría de los riesgos que se presentan en el lugar de trabajo, puede suponer un riesgo a considerable distancia. Quizás sea esta característica más que ninguna otra la que ha suscitado las especiales preocupaciones manifestadas por trabajadores y expertos en salud y seguridad en el trabajo. No obstante, los láseres pueden utilizarse sin peligro si se adoptan medidas apropiadas para controlar el riesgo. Existen normas de ámbito mundial para la utilización segura de los láseres, la mayoría de ellas "armonizadas" entre sí (ANSI 1993; CEI 1993). En todas estas normas se utiliza un sistema de clasificación de riesgos que agrupa los productos láser en cuatro amplias categorías según la potencia o energía de salida del láser y su capacidad para producir daño. Después se aplican medidas de seguridad acordes con la clasificación de riesgo (Cleuet y Mayer 1980; Duchene, Lakey y Repacholi 1991).

Los láseres operan a longitudes de onda discretas y aunque la mayoría son monocromáticos (es decir, emiten una sola longitud de onda o un solo color) no es infrecuente que un láser emita varias longitudes de onda discretas. Por ejemplo, el láser de argón emite varias líneas diferentes en la región del ultravioleta próximo y en la región visible del espectro, a pesar de estar diseñado en general para emitir solamente una línea verde (una sola longitud de onda) de 514,5 nm y/o una línea azul de 488 nm. Al considerar los riesgos potenciales para la salud, siempre es esencial establecer la longitud o longitudes de onda de salida.

Todos los láseres tienen tres componentes fundamentales:

1. un medio activo (un sólido, líquido o gas) que define las longitudes de onda de emisión posibles;
2. una fuente de energía (por ejemplo, corriente eléctrica, lámpara de bombeo o reacción química),
3. una cavidad resonante con acoplador de salida (generalmente dos espejos).

La mayoría de los sistemas láser utilizados en la práctica fuera del laboratorio de investigación tienen también un sistema de transmisión del haz, por ejemplo una fibra óptica o un brazo articulado con espejos para dirigir el haz hacia una estación de trabajo, y lentes focalizadoras para concentrarlo sobre un material a soldar, etc. En un láser, átomos o moléculas idénticos se llevan a un estado excitado mediante la energía suministrada por la lámpara de bombeo. Cuando los átomos o moléculas se encuentran en un estado excitado, un fotón ("partícula" de energía luminosa) puede estimular a un átomo o molécula excitados para que emitan un segundo fotón de la misma energía (longitud de onda) que viaja en fase (radiación coherente) en la misma dirección que el fotón estimulante. Con ello se ha amplificado al doble la luz emitida. Este mismo proceso repetido en cascada hace que se forme un haz luminoso que se refleja hacia delante y hacia atrás entre los espejos de la cavidad resonante. Al ser uno de estos espejos parcialmente transparente, una parte

de la energía luminosa abandona la cavidad resonante y dando lugar a la emisión del haz láser. Aunque en la práctica los dos espejos paralelos suelen estar curvados para producir una situación de resonancia más estable, el principio básico es el mismo para todos los láseres.

A pesar de que en el laboratorio de física se han hecho demostraciones con varios miles de líneas láser diferentes (es decir, longitudes de onda láser discretas características de diferentes medios activos), tan solo unas veinte de ellas se han desarrollado comercialmente hasta ser de uso común en la tecnología cotidiana. Se han desarrollado y publicado guías y normas de seguridad en relación con los láseres, que abarcan básicamente todas las longitudes de onda del espectro óptico a fin de incluir tanto las líneas láser actualmente conocidas como los futuros láseres.

Clasificación de los riesgos de los láseres

Las normas actuales sobre seguridad de los láseres vigentes en todo el mundo siguen el método de agrupar los productos láser en clases de riesgo. En general, el esquema se basa en la agrupación en cuatro grandes clases de riesgo, de la 1 a la 4. Los láseres de clase 1 no pueden emitir radiación láser potencialmente peligrosa y no suponen ningún riesgo para la salud. Las clases 2 a 4 entrañan un riesgo creciente para los ojos y la piel. Este sistema de clasificación es útil porque se prescriben medidas de seguridad para cada clase de láser. Las clases superiores requieren medidas de seguridad más estrictas.

La clase 1 se considera un grupo sin riesgo, "seguro para la vista". La mayoría de los láseres totalmente confinados (por ejemplo, los registradores láser de discos compactos) son de clase 1. Un láser de clase 1 no requiere ninguna medida de seguridad.

La clase 2 corresponde a los láseres visibles que emiten una potencia muy baja, la cual no sería peligrosa ni siquiera aunque el haz penetrase en el ojo humano con toda su potencia y se enfocase sobre la retina. La respuesta de aversión natural del ojo a la contemplación de fuentes de luz muy brillante lo protege contra lesiones de retina si la energía que entra en él es insuficiente para dañar la retina dentro del tiempo de respuesta de aversión. Dicha respuesta consiste en el reflejo de parpadeo (de 0,16 a 0,18 segundos aproximadamente), la rotación del ojo y el movimiento de la cabeza cuando se produce la exposición a esa luz tan brillante. Las normas de seguridad actuales definen de modo conservador una duración de la respuesta de aversión de 0,25 segundos. Por lo tanto, los láseres de clase 2 tienen una potencia de salida igual o inferior a 1 miliwatio (mW), que corresponde al límite de exposición admisible para 0,25 segundos. Son ejemplos de esta clase 2 los punteros láser y algunos láseres de alineación.

Algunas normas de seguridad contemplan también una subcategoría de la clase 2 denominada "clase 2A". La contemplación de los láseres de clase 2A no es peligrosa durante un tiempo máximo de 1.000 s (16,7 minutos). La mayoría de los lectores láser utilizados en puntos de venta (cajas de supermercados) y de los lectores de inventario son de la clase 2A.

Los láseres de la clase 3 presentan un riesgo para la vista, dado que la respuesta de aversión no es lo bastante rápida para limitar la exposición de la retina a un nivel momentáneamente seguro y también pueden producirse daños en otras estructuras del ojo (por ejemplo, la córnea y el cristalino). Normalmente la exposición accidental no entraña riesgos para la piel: son ejemplos de láseres de clase 3 numerosos láseres de investigación y telémetros láser militares.

La clase 3 tiene una subcategoría especial, denominada "clase 3A" (el resto de los láseres de clase 3 se denominan "clase 3B"). Los láseres de la clase 3A tienen una potencia de salida comprendida entre una y cinco veces los límites de emisión accesible (AEL) para la clase 1 o la clase 2, pero con una irradiancia de salida no superior al límite de exposición profesional correspondiente a la clase inferior. Son ejemplos de esta clase numerosos instrumentos láser de alineación y topografía.

Los láseres de clase 4 pueden entrañar riesgo de incendio, riesgo considerable para la piel o riesgo de reflexión difusa. Casi todos los láseres quirúrgicos y los de procesado de materiales utilizados para soldadura y corte son de clase 4 si no están confinados. Todos los láseres con una potencia de salida media superior a 0,5 W son de clase 4. Si un láser de alta potencia de clase 3 o clase 4 está totalmente confinado de manera que la energía radiante peligrosa no sea accesible, el sistema láser total podría ser de clase 1. El láser más peligroso, situado dentro de una carcasa se denomina *láser interno o encapsulado*.

Límites de exposición profesional

La Comisión Internacional de Protección contra la Radiación No Ionizante (ICNIRP 1995) ha publicado guías sobre límites de exposición humana a la radiación láser los cuales se actualizan periódicamente. En la Tabla 49.3 se indican los límites de exposición (LE) representativos de varios láseres usuales. Casi todos los haces láser sobrepasan los límites de exposición admisibles. Por lo tanto, en la práctica no suelen utilizarse los límites de exposición para determinar medidas de seguridad. En lugar de ello se aplica con este fin el esquema de clasificación láser que se basa en la aplicación de los LE en condiciones realistas.

Normas de seguridad sobre láseres

Muchas naciones han publicado normas de seguridad sobre láseres y la mayoría de ellas están armonizadas con la norma internacional de la Comisión Electrotécnica Internacional (CEI). La norma CEI 825-1 (1993) rige para los fabricantes; no obstante, también ofrece algunas orientaciones limitadas sobre seguridad para los usuarios. Todos los productos láser comerciales

Tabla 49.3 • Límites de exposición para láseres usuales.

Tipo de láser	Principales longitudes de onda	Límite de exposición
Fluoruro de argón	193 nm	3,0 mJ/cm^2 durante más de 8 h
Cloruro de xenón	308 nm	40 mJ/cm^2 durante más de 8 h
Argón ionizado	488.514,5 nm	3,2 mW/cm^2 durante más de 0,1 s
Vapor de cobre	510. 578 nm	2,5 mW/cm^2 durante más de 0,25 s
Helio, neón	632,8 nm	1,8 mW/cm^2 durante más de 10 s
Vapor de oro	628 nm	1,0 mW/cm^2 durante más de 10 s
Criptón ionizado	568.647 nm	1,0 mW/cm^2 durante más de 10 s
Neodimio-YAG	1.064 nm 1.334 nm	5,0 μJ/cm^2 durante 1 ns a 50 μs No MPE para t <1 ns, 5 mW/cm^2 durante 10 s
Dióxido de carbono	10–6 μm	100 mW/cm^2 durante 10 s
Monóxido de carbono	≈5 μm	Hasta 8 h, superficie limitada 10 mW/cm^2 durante >10 s para la mayor parte del cuerpo

Todas las normas/directrices contienen valores EMP a otras longitudes de onda y duraciones de exposición.

Nota: Para convertir EMP en mW/cm^2 a mJ/cm^2, multiplicar por el tiempo de exposición t en segundos. Por ejemplo, el MPE para He-Ne o argón a 0,1 s es de 0,32 mJ/ cm^2.

Fuente: Norma ANSI Z-136.1 (1993); valores TLV de la ACGIH (1995) y Duchene, Lakey y Repacholi (1991).

deben exhibir la clasificación de riesgos indicada. En todos los productos de las clases 2 a 4 debe aparecer una etiqueta de advertencia apropiada según la clase correspondiente.

Medidas de seguridad

El sistema de clasificación de riesgos de los láseres facilita considerablemente la determinación de las medidas de seguridad adecuadas. Las normas de seguridad sobre láseres y las reglas prácticas requieren por sistema la adopción de medidas de control tanto más restrictivas cuanto más alta es la clasificación.

En la práctica siempre es preferible confinar totalmente el láser y la trayectoria del haz de manera que no sea accesible ninguna radiación láser potencialmente peligrosa. En otras palabras, si sólo se utilizan productos láser de clase 1 en el lugar de trabajo, la seguridad de uso está garantizada. Sin embargo, en muchas situaciones esto sencillamente no es viable, por lo que se requiere la oportuna formación de los trabajadores en la utilización segura del producto y en las medidas de control del riesgo.

Aparte de la regla evidente de no apuntar con un láser a los ojos de una persona, no se exige ninguna medida de control para un producto láser de clase 2. Para los láseres de clases superiores se requieren obviamente medidas de seguridad.

Si no es factible el confinamiento total de un láser de clase 3 o 4, el uso de carcasas que cubran el haz (por ejemplo tubos), pantallas deflectoras y cubiertas ópticas puede eliminar casi totalmente el riesgo de exposición ocular peligrosa en la mayoría de los casos.

Cuando no sea posible encerrar láseres de las clases 3 y 4, deberá establecerse una zona con entrada controlada para el láser y generalmente dentro de la zona de riesgo nominal (ZRN) del haz láser es obligatorio el uso de protectores oculares contra el láser. Aunque en la mayoría de laboratorios de investigación en los que se utilizan haces láser colimados la ZRN abarca la totalidad de la zona controlada del laboratorio, en aplicaciones de haz focalizado la ZRN puede ser sorprendentemente limitada y no abarcar toda la sala.

Como garantía contra el uso inadecuado y posibles acciones peligrosas por parte de usuarios del láser no autorizados debe utilizarse la llave de control que traen todos los productos láser fabricados comercialmente.

Dicha llave deberá guardarse en lugar seguro cuando no se utilice el láser si éste es accesible a las personas.

Durante la alineación y la puesta a punto inicial del láser es preciso adoptar precauciones especiales, ya que la probabilidad de sufrir lesiones oculares graves es muy elevada en tales circunstancias. Los operarios que trabajen con láseres deberán estar instruidos en los métodos de seguridad antes de realizar la puesta a punto y alineación del láser.

Después de establecerse los límites de exposición profesional se desarrollaron medios de protección ocular contra el láser y se definieron especificaciones para determinar las densidades ópticas (OD, una medida logarítmica del factor de atenuación) que serían necesarias para láseres específicos en función de la longitud de onda y de la duración de la exposición. Aunque existen en Europa normas específicas de protección ocular contra el láser, en Estados Unidos el American National Standards Institute facilita otras guías bajo las designaciones ANSI Z136.1 y ANSI Z136.3.

Formación

En la investigación de los accidentes con láseres tanto en situaciones de laboratorio como industriales surge un elemento común: la falta de una formación adecuada. La formación sobre seguridad de los láseres debe ser adecuada y suficiente para las operaciones con láser en las que intervendrá cada trabajador. Ha de ser específica para el tipo de láser y la tarea que el trabajador tenga encomendada.

Vigilancia médica

Los requisitos sobre vigilancia médica de los trabajadores que utilizan láseres varían de unos países a otros, en función de la normativa local sobre medicina en el trabajo. Hubo un tiempo, cuando el uso de los láseres estaba restringido a los laboratorios de investigación y era poco lo que se sabía sobre sus efectos biológicos, en que era completamente normal que todos los trabajadores que utilizaban láseres se sometieran periódicamente a un reconocimiento oftalmológico general completo, con fotografía del fondo de ojo (retina). No obstante, al principio del decenio de 1970 se cuestionó la validez de esta práctica, ya que los hallazgos clínicos eran casi siempre negativos y se advirtió claramente que tales exploraciones solo servían para descubrir lesiones agudas detectables subjetivamente. Esto indujo al grupo de trabajo sobre láseres de la OMS, reunido en Don Leaghreigh, Irlanda, en 1975, a pronunciarse en contra de tales programas de vigilancia y a promover la comprobación de la función visual. A partir de entonces, la mayoría de los grupos nacionales de la salud en el trabajo ha rebajado continuamente las exigencias de reconocimiento médico. Hoy día los reconocimientos oftalmológicos completos sólo se exigen con carácter universal en caso de lesión ocular por láser o de sospecha de sobreexposición y generalmente se requiere una exploración de la función visual antes de desempeñar un puesto de trabajo. En algunos países se requieren exploraciones adicionales.

Mediciones de los láseres

A diferencia de lo que ocurre con algunos riesgos en el lugar de trabajo, en general no es necesario realizar mediciones para la vigilancia de niveles peligrosos de radiación láser en los lugares de trabajo. Dadas las dimensiones de los láseres confinados y de la mayoría de los haces láser, la probabilidad de alterar las trayectorias de los haces y la dificultad y el coste de los radiómetros láser, las normas actuales sobre seguridad preconizan medidas de control basadas en la clase de riesgo y no en la medición en el lugar de trabajo (vigilancia). El fabricante debe realizar mediciones para asegurarse del cumplimiento de las normas de seguridad sobre láseres y de la adecuada clasificación del riesgo. De hecho una de las primeras justificaciones para la clasificación del riesgo de los láseres fue la gran dificultad que entraña realizar medidas apropiadas para la evaluación del riesgo.

Conclusiones

Aunque el láser es algo relativamente nuevo en el lugar de trabajo, está difundiéndose rápidamente y lo mismo sucede con los programas relacionados con su seguridad. Las claves para el uso seguro de los láseres son, en primer término, confinar si es posible la energía radiante del láser y, si no lo es, adoptar medidas de control adecuadas e instruir a todo el personal que trabaje con láseres.

CAMPOS DE RADIOFRECUENCIA Y MICROONDAS

Kjell Hansson Mild

La radiación de radiofrecuencia (RF), energía electromagnética y microondas se utiliza en diversas aplicaciones en la industria, comercio, medicina e investigación, así como en el hogar. En la gama de frecuencia de 3 a 3 x 10^8 kHz (es decir, 300 GHz)

encontramos aplicaciones muy conocidas tales como las emisiones de radio y televisión, comunicaciones (telefonía de larga distancia, telefonía móvil, radiocomunicación), radar, calentadores dieléctricos, calentadores de inducción, fuentes de alimentación conmutadas y monitores de ordenador.

La radiación RF de alta potencia es una fuente de energía térmica que comporta todas las implicaciones conocidas del calentamiento para los sistemas biológicos, incluyendo quemaduras, cambios temporales y permanentes en la reproducción, cataratas y muertes. En la amplia gama de las radiofrecuencias, la percepción cutánea del calor y el dolor térmico no son indicadores de detección fiables, ya que los receptores térmicos están situados en la piel y no perciben fácilmente el calentamiento profundo del cuerpo originado por estos campos. Es necesario establecer límites de exposición como protección contra estos efectos adversos para la salud de la exposición a los campos de radiofrecuencia.

Exposición profesional

Calentamiento por inducción

Aplicando un campo magnético alterno intenso se puede calentar un material conductor por medio de las *corrientes parásitas* inducidas. Este calentamiento se utiliza para realizar procesos de forja, recocido y soldadura fuerte y blanda. Las frecuencias de trabajo varían entre 50/60 y varios millones de Hz. Puesto que las bobinas que producen los campos magnéticos suelen ser de pequeñas dimensiones, el riesgo de alto nivel de exposición de todo el cuerpo es pequeño, no obstante, el nivel de exposición de las manos puede ser elevado.

Calentamiento dieléctrico

En la industria se utiliza energía de radiofrecuencia de 3 a 50 MHz (principalmente a frecuencias de 13,56, 27,12 y 40,68 MHz) para diversos procesos de calentamiento. Entre las aplicaciones se incluyen el sellado y estampación de plásticos, secado de colas y pegamentos, tratamiento de tejidos y fibras textiles, carpintería y la fabricación de productos tan diversos como lonas, piscinas, forros de camas de agua, calzado, carteras de cheques de viaje, etc.

Las medidas notificadas en la literatura (Hansson Mild 1980; IEEE COMAR 1990a, 1990b, 1991) indican que en muchos casos los *campos de fuga* eléctricos y magnéticos son muy intensos cerca de estos dispositivos de RF. A menudo los operarios son mujeres en edad fértil (es decir, de 18 a 40 años). En algunas situaciones de trabajo, los campos de fuga suelen ser extensivos, lo que provoca la exposición de todo el cuerpo de los operarios. En muchos dispositivos los niveles de exposición a campos eléctricos y magnéticos sobrepasan todas las guías de seguridad existentes en materia de RF.

Dado que estos dispositivos pueden originar una absorción muy elevada de energía de RF, interesa controlar los campos de fuga que emanan de los mismos. Por ello, la vigilancia periódica de la RF es esencial para determinar si existe un problema de exposición.

Sistemas de comunicación

Los trabajadores de los campos de la comunicación y el radar sólo están expuestos en la mayoría de las situaciones a campos de baja intensidad. No obstante, la exposición de los trabajadores que tienen que trepar a torres de FM/TV puede ser intensa, por lo que se requieren precauciones de seguridad. La exposición también puede ser considerable cerca de armarios de transmisión que tienen los enclavamientos anulados y las puertas abiertas

Exposición médica

Una de las aplicaciones más tempranas de la energía de RF fue la diatermia de onda corta. Para ésta suelen utilizarse electrodos sin blindaje, con el consiguiente riesgo de formación de campos de dispersión intensos.

Recientemente han empezado a utilizarse campos de RF en unión de campos magnéticos estáticos en la *resonancia magnética* (RM). Puesto que la energía de RF utilizada es de baja intensidad y el campo casi siempre está totalmente confinado en la cámara de alojamiento del paciente, los niveles de exposición para los operarios son despreciables.

Efectos biológicos

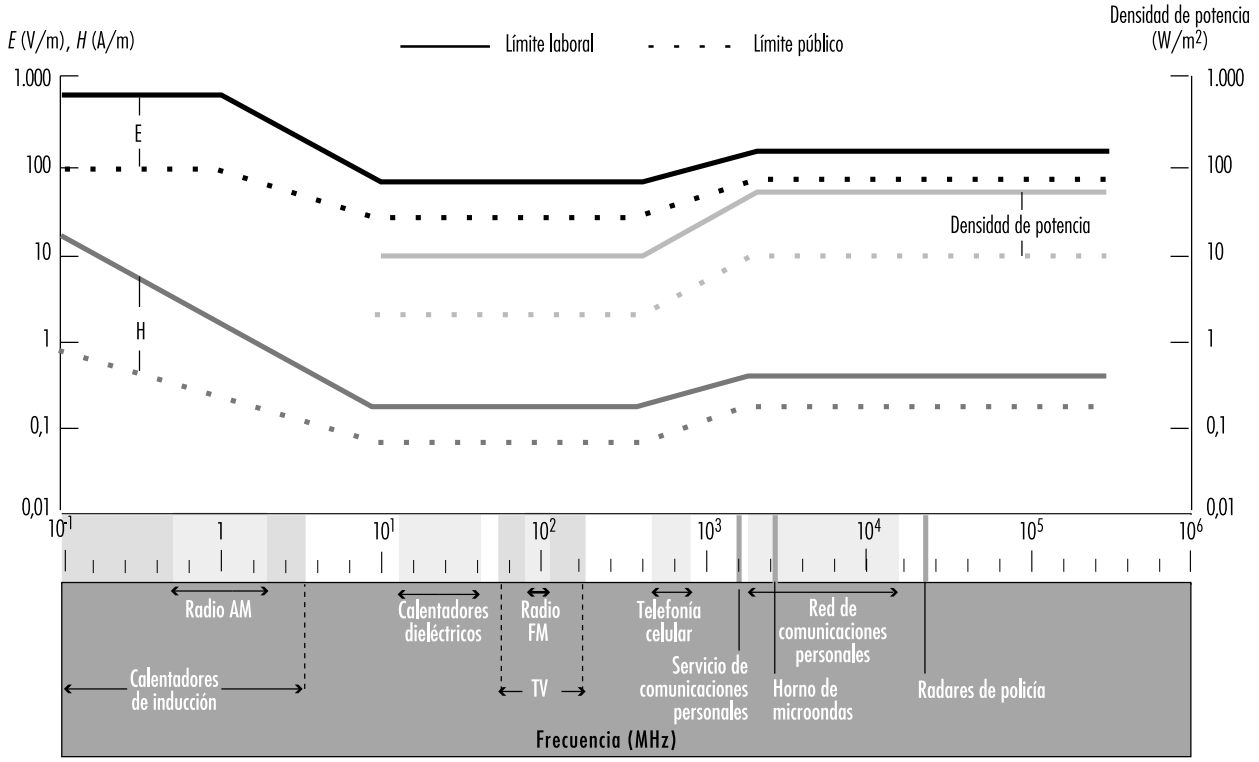
Como magnitud dosimétrica se utiliza ampliamente la tasa de absorción específica (SAR, medida en watios por kilogramo), de la cual pueden derivarse los límites de exposición. La SAR de un organismo biológico depende de parámetros de exposición tales como la frecuencia de la radiación, la intensidad, la polarización, la configuración de la fuente radiante y del cuerpo, las superficies de reflexión y tamaño y la forma y propiedades eléctricas del cuerpo. Además, la distribución espacial de la SAR en el interior del cuerpo presenta una marcada falta de uniformidad. Esta distribución no uniforme de la energía provoca un calentamiento no uniforme de las partes profundas del cuerpo y puede producir gradientes de temperatura internos. A frecuencia superiores a 10 GHz, la energía se deposita cerca de la superficie corporal. El máximo valor de SAR se da a aproximadamente 70 MHz en el sujeto estándar y a unos 30 MHz cuando la persona se encuentra de pie y en contacto con tierra de RF. En condiciones extremas de humedad y temperatura, valores de SAR de 1 a 4 W/kg a 70 MHz en todo el cuerpo suelen originar un aumento de temperatura interno de 2 ºC aproximadamente en seres humanos sanos, en una hora.

El calentamiento por RF es un mecanismo de interacción que ha sido estudiado en profundidad. Se han observado efectos térmicos a menos de 1 W/kg, pero en general no se han determinado umbrales de temperatura para estos efectos. Al evaluar efectos biológicos debe tenerse en cuenta el perfil tiempo-temperatura.

También se producen efectos biológicos cuando el calentamiento por RF no es un mecanismo adecuado ni posible. Estos efectos suelen estar relacionados con campos de RF modulada y longitudes de onda milimétricas. Se han propuesto diversas hipótesis, pero aún no han aportado información útil para establecer límites de exposición en humanos. Es necesario entender los mecanismos de interacción fundamentales ya que no es factible explorar cada uno de los campos de RF para determinar sus interacciones biofísicas y biológicas características.

Los estudios en humanos y en animales indican que los campos de RF pueden causar efectos biológicos nocivos debido al calentamiento excesivo de los tejidos internos. Los sensores térmicos corporales están situados en la piel y no detectan fácilmente el calentamiento de zonas profundas del cuerpo. Por lo tanto, los trabajadores pueden absorber cantidades significativas de energía de RF sin percatarse inmediatamente de la presencia de campos de fuga. Existen notificaciones de que personal expuesto a campos de RF producidos por equipos de radar, calentadores y selladores de RF y torres de emisoras de radio y televisión ha experimentado una sensación de calentamiento algún tiempo después de haber estado expuesto.

Figura 49.7 • Límites de exposición según la IRPA (1988) para la intensidad de campo eléctrico *E*, la intensidad de campo magnético *H* y la densidad de potencia.



Apenas existen pruebas de que la radiación de RF pueda desencadenar cáncer en humanos. No obstante, en un estudio se sugiere que puede actuar como promotor del cáncer en animales (Szmigielski y cols. 1988). Los estudios epidemiológicos de personal expuesto a campos de RF son escasos y por lo general de ámbito limitado (Silverman 1990; NCRP 1986; OMS 1981). En la antigua Unión Soviética y en países del Este de Europa se han realizado varios estudios de trabajadores expuestos en el lugar de trabajo (Roberts y Michaelson 1985), sin bien estos estudios no son concluyentes en cuanto a los efectos para la salud.

Evaluaciones y estudios epidemiológicos en operarios de equipos de sellado por RF en Europa (Kolmodin-Hedman y cols. 1988; Bini y cols. 1986) han dado como resultado la posible presentación de los siguientes problemas específicos:

- quemaduras por RF o por contacto con superficies calientes;
- entumecimiento (es decir, parestesia) de manos y dedos; perturbación o alteración de la sensibilidad táctil;
- irritación ocular (posiblemente a causa de vapores emanados de material que contenía vinilo),
- calentamiento y malestar significativos en las piernas (debido quizá al flujo de corriente a tierra a través de las piernas).

Teléfonos móviles

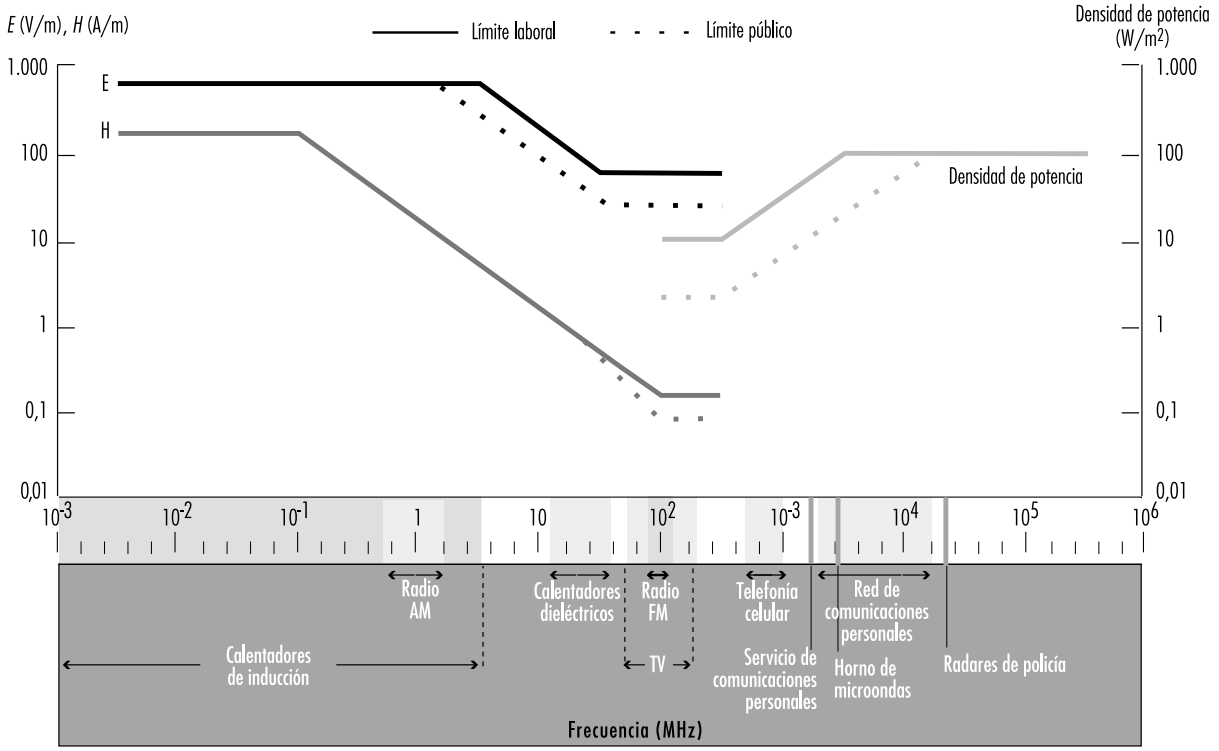
El uso de radioteléfonos personales está aumentando rápidamente, con el aumento consiguiente del número de estaciones base, a menudo situadas en zonas públicas. No obstante, la exposición del público a estas estaciones es baja. Normalmente los sistemas funcionan a frecuencias cercanas a los 900 MHz o 1,8 GHz y utilizan tecnología analógica o digital. Los terminales son radiotransmisores pequeños de baja potencia que se sostienen muy cerca de la cabeza cuando se utilizan. Parte de la energía radiada por la antena es absorbida por la cabeza. Cálculos numéricos y mediciones realizados en cabezas simuladas indican que los valores de SAR pueden ser del orden de algunos W/kg (véase también la declaración de la ICNIRP de 1996). Actualmente ha aumentado la preocupación pública por el riesgo que puedan suponer los campos electromagnéticos para la salud y se han dedicado varios programas de investigación a estudiar esta posibilidad (McKinley y cols., informe no publicado). Están en curso varios estudios epidemiológicos en relación con el uso de teléfonos móviles y el cáncer cerebral. Hasta ahora solo se han publicado los resultados de un estudio con animales (Repacholi y cols. 1997), concretamente ratones transgénicos expuestos una hora diaria durante 18 meses a una señal similar a la que se utiliza en la comunicación móvil digital. Al finalizar los experimentos, 43 de 101 animales expuestos presentaban linfomas, frente a 22 de 100 en el grupo de control de exposición simulada. El incremento era estadísticamente significativo ($p > 0{,}001$). No es fácil interpretar estos resultados como relevantes para la salud humana, por lo que será necesario seguir investigando.

Normas y directrices

Varias organizaciones y servicios públicos han publicado normas y directrices de protección frente a la exposición excesiva a campos de RF. Grandolfo y Hansson Mild (1989) facilitaron un análisis de las normas de seguridad de ámbito mundial; en este artículo solo se comentan las directrices publicadas por la IRPA (1988) y la norma IEEE C 95.1 de 1991.

La IRPA (1988) facilita la explicación razonada y completa de los límites de exposición a RF. En síntesis, las directrices IRPA han adoptado un valor límite básico de SAR de 4 W/kg, por

Figura 49.8 • Límites de exposición según el IEEE (1991) para la intensidad de campo eléctrico *E*, la intensidad de campo magnético *H* y la densidad de potencia.



encima del cual se considera que existe una probabilidad creciente de que se produzcan consecuencias adversas para la salud debido a la absorción de energía de RF. No se han observado efectos perjudiciales para la salud tras exposiciones intensas por debajo de este nivel. Incorporando un factor de seguridad de diez para cubrir las posibles consecuencias de la exposición de larga duración, se utiliza 0,4 W/kg como límite básico del que derivar los límites de exposición profesional. Para obtener los límites para el público en general se incorpora un factor de seguridad adicional de cinco.

Los límites de exposición derivados para la intensidad de campo eléctrico (*E*), la intensidad de campo magnético (*H*) y la densidad de potencia, expresados en V/m, A/m y W/m^2, se indican en la Figura 49.7. Los cuadrados de los campos *E* y *H* están promediados sobre seis minutos; se recomienda que la exposición instantánea no exceda de los valores promediados en tiempo en un factor superior a 100. Asimismo, la corriente del cuerpo a tierra no deberá exceder de 200 mA.

La norma C95.1 establecida en 1991 por la IEEE especifica unos valores límite de exposición laboral (en ambiente controlado) de 0,4 W/kg para la SAR media sobre la totalidad del cuerpo de una persona y de 8 W/kg para la SAR máxima administrada a cada gramo de tejido durante 6 minutos o más. Los valores de exposición correspondientes para el público en general (en ambiente no controlado) son de 0,08 W/kg para la SAR sobre todo el cuerpo y de 1,6 W/kg para la SAR máxima. La corriente del cuerpo a tierra no deberá exceder de 100 mA en un ambiente controlado ni de 45 mA en un ambiente no controlado (para más detalles véase IEEE 1991). Los límites derivados se indican en la Figura 49.8.

Puede verse más información sobre campos de radiofrecuencia y microondas, por ejemplo, en Elder y cols. 1989, Greene 1992 y Polk y Postow 1986.

CAMPOS ELECTRICOS Y MAGNETICOS DE VLF Y ELF

Michael H. Repacholi

Los campos eléctricos y magnéticos de frecuencia extremadamente baja (ELF) y de muy baja frecuencia (VLF) abarcan el intervalo de frecuencia por encima de los campos estáticos (> 0 Hz) hasta los 30 kHz. A los efectos de este artículo, la ELF se considera comprendida en el intervalo de frecuencia de 0 a 300 Hz y la VLF en el intervalo de 300 Hz a 30 kHz. En el intervalo de frecuencia > 0 a 30 kHz, las longitudes de onda varían entre ∞ (infinito) y 10 km, por lo que los campos eléctricos y magnéticos actúan de forma esencialmente independiente entre sí y deben tratarse por separado. La intensidad de campo eléctrico (*E*) se mide en voltios por metro (V/m), la intensidad de campo magnético (*H*) en amperios por metro (A/m) y la densidad de flujo magnético (*B*) en tesla (T).

Se ha suscitado un considerable debate sobre los posibles efectos adversos para la salud entre los trabajadores que utilizan equipos que funcionan en este intervalo de frecuencias. La frecuencia más común es con mucho la de 50/60 Hz, utilizada para la generación, distribución y uso de energía eléctrica. Los medios de información, la distribución de información inexacta y el debate científico en curso han alimentado la preocupación por la posibilidad de que la exposición a campos magnéticos de 50/60 Hz pueda estar relacionada con un aumento de la incidencia de cáncer (Repacholi 1990; NRC 1996).

El objeto de este artículo es facilitar una visión general de las siguientes cuestiones:

- fuentes, ocupaciones y aplicaciones;
- dosimetría y medición;

- mecanismo de interacción y efectos biológicos;
- estudios en humanos y efectos para la salud;
- medidas de protección,
- normas sobre exposición laboral.

Se facilitan descripciones resumidas para informar a los trabajadores sobre los tipos e intensidades de los campos generados por las principales fuentes de ELF y VLF, efectos biológicos, posibles consecuencias para la salud y límites de exposición vigentes. También se ofrece un compendio de precauciones de seguridad y medidas de protección. Aunque muchos trabajadores utilizan pantallas de visualización de datos (PVD), en este artículo solo se facilitan breves indicaciones al respecto, ya que las mismas se tratan con mayor detalle en otro capítulo de la *Enciclopedia*.

Gran parte del material aquí contenido figura expuesto con mayor detalle en varias publicaciones recientes (OMS 1984, 1987, 1989, 1993; IRPA 1990; OIT 1993; NRPB 1992, 1993; IEEE 1991; Greene 1992; NRC 1996).

Fuentes de exposición profesional

Los niveles de exposición profesional varían considerablemente y dependen en gran medida del tipo de aplicación. La Tabla 49.4 ofrece un resumen de aplicaciones comunes de las frecuencias comprendidas en el intervalo de 0 a 30 kHz.

Generación y distribución de energía eléctrica

Las fuentes artificiales más importantes de campos eléctricos y magnéticos a 50/60 Hz son las que intervienen en la generación y distribución de energía eléctrica así como cualquier equipo que utilice corriente eléctrica. Casi todos estos equipos funcionan a frecuencias de alimentación de 50 Hz en la mayoría de los países y a 60 Hz en Norteamérica. Algunos sistemas de trenes eléctricos funcionan a 16,67 Hz.

Las líneas de transmisión de alta tensión (AT) y las subestaciones producen los campos eléctricos más intensos a que pueden estar expuestos los trabajadores de forma habitual. Los factores más importantes a tener en cuenta en relación con la máxima intensidad de campo eléctrico a nivel del suelo son principalmente la altura de los conductores, la configuración geométrica, la distancia lateral a la línea de transmisión y el voltaje de ésta. A distancias laterales del doble de la altura de la línea, la intensidad del campo eléctrico disminuye con la distancia aproximadamente de forma lineal (Zaffanella y Deno 1978). En el interior de los edificios próximos a líneas de transmisión de AT, las intensidades de los campos eléctricos suelen ser inferiores al campo no perturbado en un factor de aproximadamente 100.000, dependiendo de la configuración del edificio y de los materiales de su estructura.

Por lo general, las intensidades de los campos magnéticos producidos por las líneas aéreas de transmisión de energía eléctrica son relativamente bajos en comparación con las aplicaciones industriales en las que intervienen corrientes de alta intensidad. Los empleados de compañías de suministro eléctrico que trabajan en subestaciones o en el mantenimiento de líneas de transmisión activas constituyen un grupo especial expuesto a campos intensos (de 5 mT incluso más en algunos casos). En ausencia de materiales ferromagnéticos, las líneas del campo magnético forman círculos concéntricos alrededor del conductor. Aparte de la geometría del conductor de energía eléctrica, lo único que determina la densidad del flujo magnético es la magnitud de la corriente. La dirección del campo magnético debajo de las líneas de transmisión de AT es principalmente transversal al eje longitudinal de la línea. La máxima densidad de flujo a nivel del suelo puede estar debajo del centro de la línea o de los conductores exteriores, dependiendo de la relación de fase entre conductores. La máxima densidad de flujo magnético a nivel del suelo en un sistema normal de líneas de transmisión aérea de 500 kV de doble circuito es de aproximadamente 35 μT por kiloamperio de corriente transmitida (Bernhardt y Matthes 1992). La densidad de flujo magnético alcanza normalmente valores de hasta 0,05 mT en los lugares de trabajo situados cerca de líneas aéreas, en subestaciones y en centrales eléctricas que trabajan a frecuencias de 16 2/3, 50 ó 60 Hz (Krause 1986).

Tabla 49.4 • Aplicaciones de los equipos que trabajan dentro de la gama de 0 a 30 kHz.

Frecuencia	Longitud de onda (Km)	Aplicaciones típicas
16,67; 50; 60 Hz	18.000–5.000	Generación, transmisiones y uso de potencia, procesos electrolíticos, calentamiento por inducción, hornos de arco y de colada, soldadura, transporte, etc., cualquier uso industrial, comercial, médico o en investigación de la energía eléctrica
0,3–3 kHz	1.000–100	Modulación de emisiones radiadas, aplicaciones médicas, hornos eléctricos, calentamiento por inducción, temple, soldadura, fusión, afino de metales
3–30 kHz	100–10	Comunicaciones de muy largo alcance, radionavegación, modulación de emisiones radiadas, aplicaciones médicas, calentamiento por inducción, temple, soldadura, fusión, afino, PVD

Procesos industriales

La exposición laboral a campos magnéticos se produce principalmente por trabajar cerca de equipos industriales que utilizan corrientes elevadas. Entre tales dispositivos se incluyen los que se emplean en soldadura, afino con electroescoria, calentamiento (hornos, calentadores de inducción) y agitación.

Estudios sobre calentadores de inducción utilizados en la industria, llevados a cabo en Canadá (Stuchly y Lecuyer 1985), Polonia (Aniolczyk 1981), Australia (Repacholi, datos no publicados) y Suecia (Lövsund, Oberg y Nilsson 1982), indican que las densidades de flujo magnético en los puestos de trabajo de los operarios varían entre 0,7 μT y 6 mT dependiendo de la frecuencia utilizada y de la distancia a la máquina. En su estudio de los campos magnéticos producidos por equipos eléctricos industriales de producción de acero y de soldadura, Lövsund, Oberg y Nilsson (1982) descubrieron que las máquinas de soldadura por puntos (50 Hz, 15 a 106 kA) y los hornos de colada (50 Hz, 13 a 15 kA) producían campos de hasta 10 mT a distancia de hasta 1 m. En Australia se comprobó que una planta de calentamiento por inducción que funcionaba a frecuencias comprendidas entre 50 Hz y 10 kHz producía campos de máxima intensidad de hasta 2,5 mT (hornos de inducción de 50 Hz) en posiciones que podían ocupar los operarios. Además, los campos máximos alrededor de los calentadores de inducción que funcionaban a otras frecuencias eran de 130 μT a 1,8 kHz, 25 μT a 2,8 kHz y superiores a 130 μT a 9,8 kHz.

Como las bobinas que generan los campos magnéticos suelen ser de pequeñas dimensiones, rara vez se produce exposición de todo el cuerpo; la exposición suele ser local y afecta principalmente a las manos. La densidad de flujo magnético a que están expuestas las manos del operario puede alcanzar valores de

hasta 25 mT (Lövsund y Mild 1978; Stuchly y Lecuyer 1985). En la mayoría de los casos, la densidad de flujo es inferior a 1 mT. La intensidad del campo eléctrico en las proximidades del calentador de inducción suele ser baja.

Los trabajadores de la industria electroquímica pueden estar expuestos a altas intensidades de campo eléctrico y magnético producidas por hornos eléctricos y otros dispositivos que utilizan altas corrientes. Por ejemplo, cerca de hornos de inducción y de pilas electrolíticas industriales se miden a veces densidades de flujo magnético de hasta 50 mT.

Pantallas de visualización de datos

El uso de pantallas de visualización de datos (PVD), o terminales de visualización como también se las denomina, aumenta a ritmo creciente. Los operadores de PVD se muestran preocupados por los posibles efectos de las emisiones de radiaciones de bajo nivel. En los casos más desfavorables se han llegado a medir campos magnéticos (a frecuencias de 15 a 125 kHz) de hasta 0,69 A/m (0,9 μT) cerca de la superficie de la pantalla (Bureau of Radiological Health 1981). Este resultado ha sido confirmado por numerosos estudios (Roy y cols. 1984; Repacholi 1985; IRPA 1988). Análisis exhaustivos de las mediciones y estudios de las pantallas realizados por organismos nacionales y expertos particulares han dado como resultado que las PVD no producen ninguna emisión de radiaciones que puedan tener consecuencias para la salud (Repacholi 1985; IRPA 1988; OIT 1993a). No es necesario efectuar medidas de radiación periódicas, ya que incluso en el caso más desfavorable o en situaciones de avería los niveles de emisión están muy por debajo de los límites de cualquier norma internacional o nacional (IRPA 1988).

En el documento (OIT 1993a) se ofrece un completo análisis de las emisiones, así como un compendio de la literatura científica, normas y guías pertinentes.

Aplicaciones médicas

Pacientes con fracturas óseas que no cicatrizan o no sueldan bien han sido tratados con campos magnéticos de impulsos (Bassett, Milchell y Gaston 1982; Mitbreit y Manyachin 1984). Asimismo se están realizando estudios sobre el uso de los campos magnéticos de impulsos para mejorar la cicatrización de heridas y la regeneración tisular.

Para la estimulación del crecimiento óseo se utilizan diversos dispositivos que generan impulsos de campos magnéticos. Un ejemplo característico es el del dispositivo que genera una densidad de flujo magnético media de 0,3 mT aproximadamente, una intensidad pico del orden de 2,5 mT y que induce en el hueso intensidades de campo eléctrico pico en el intervalo de 0,075 a 0,175 V/m (Bassett, Pawluk y Pilla 1974). Cerca de la superficie del miembro expuesto, el dispositivo produce una densidad de flujo magnético pico del orden de 1,0 mT que origina densidades de corriente iónica pico de aproximadamente 10 a 100 mA/m^2 (1 a 10 μA/cm^2) en el tejido.

Medición

Antes de iniciar las mediciones de campos de ELF o VLF, es importante obtener la máxima información posible sobre las características de la fuente y la situación de exposición. Esta información es necesaria para el cálculo estimativo de las intensidades de campo esperadas y para la selección de la instrumentación de medida más adecuada (Tell 1983).

La información acerca de la fuente debe incluir los siguientes datos:

- frecuencias presentes, incluyendo armónicos;
- potencia transmitida;
- polarización (orientación del campo *E*);
- características de modulación (valores pico y medio);
- ciclo de trabajo, anchura de impulso y frecuencia de repetición de impulsos,
- características de la antena, como tipo, ganancia, anchura de haz y velocidad de barrido.

La información sobre la situación de exposición deberá incluir lo siguiente:

- distancia a la fuente,
- existencia de objetos dispersantes de cualquier tipo. La dispersión en superficies planas puede incrementar el campo *E* en un factor de 2. Las superficies curvas, como las de los reflectores de cónicos, pueden producir incrementos aún mayores.

Los resultados de los estudios realizados en centros de trabajo se resumen en la Tabla 49.5.

Tabla 49.5 • Fuentes de exposición laboral a campos magnéticos.

Fuente	Densidades de flujo magnético (mT)	Distancia (m)
PVD	Hasta 2,8 x 10^{-4}	0,3
Líneas de alta tensión	Hasta 0,4	Debajo de la línea
Centrales eléctricas	Hasta 0,27	1
Arcos de soldadura (0–50 Hz)	0,1–5,8	0–0,8
Calentadores de inducción (50–10 kHz)	0,9–65	0,1–1
Horno de colada de 50 Hz	0,2–8	0,5–1
Horno de arco de 50 Hz	Hasta 1	2
Agitador de inducción de 10 Hz	0,2–0,3	2
Soldadura con electroescoria a 50 Hz	0,5–1,7	0,2–0,9
Equipo terapéutico	1–16	1

Fuente: Allen 1991; Bernhardt 1988; Krause 1986; Lövsund, Oberg y Nilsson 1982; Repacholi, datos no publicados; Stuchly 1986, Stuchly y Lecuyer 1985, 1989.

Instrumentación

Un instrumento de medida de campos eléctricos o magnéticos consta de tres partes básicas: la sonda, los cables y el monitor. Para garantizar unas mediciones adecuadas se requiere o es conveniente que la instrumentación reúna las siguientes características:

- La sonda debe responder solo al campo *E* o solo al campo *H* pero no a ambos simultáneamente.
- La sonda no debe producir perturbación significativa del campo.
- Los cables que unen la sonda al monitor no deben perturbar el campo en la sonda de modo significativo ni acoplar energía del campo.
- La respuesta en frecuencia de la sonda debe cubrir el intervalo de frecuencias que se necesita medir.
- Si se utiliza en campo próximo reactivo, conviene que las dimensiones del sensor de la sonda sean inferiores a la cuarta parte de una longitud de onda a la frecuencia más alta presente.
- El instrumento deberá indicar el valor medio cuadrático o valor eficaz (rms) del parámetro del campo medido.
- Se deberá conocer el tiempo de respuesta del instrumento. Es conveniente que tenga un tiempo de respuesta de

aproximadamente 1 segundo como máximo, para que puedan detectarse con facilidad campos intermitentes.
- La sonda deberá responder a todos los componentes de polarización del campo. Esto puede conseguirse por respuesta isotrópica inherente o mediante la rotación física de la sonda en tres direcciones ortogonales.
- Otras características deseables son una buena protección frente a sobrecargas, el funcionamiento con batería, la portabilidad y la construcción robusta.
- Los instrumentos ofrecen una indicación de uno o más de los siguientes parámetros: campo *E* medio (V/m) o valor medio cuadrático del campo *E* (V^2/m^2); campo *H* medio (A/m) o valor medio cuadrático del campo *H* (A^2/m^2).

Estudios de exposición

A menudo se realizan este tipo de estudios para determinar si los campos existentes en el lugar de trabajo están por debajo de los límites prescritos por las normas nacionales. Por lo tanto, la persona que efectúe las mediciones deberá conocer perfectamente dichas normas.

Se comprobarán todas las posiciones ocupadas y accesibles. El operador del equipo que se comprueba y el investigador que realiza el estudio deberán situarse lo más lejos posible de la zona de la verificación. Todos los objetos normalmente presentes que puedan reflejar o absorber energía deberán estar en su posición habitual. El investigador tomará precauciones contra las quemaduras por radiofrecuencia (RF) y shock, en particular cerca de sistemas de alta potencia y baja frecuencia.

Mecanismos de interacción y efectos biológicos

Mecanismos de interacción

Los únicos mecanismos por los que se ha comprobado que los campos de ELF y VLF interactúan con los sistemas biológicos son los siguientes:

- Campos eléctricos que inducen una carga superficial en un cuerpo expuesto, la cual induce en el interior del cuerpo corrientes (medidas en mA/m^2) cuya magnitud está en relación con la densidad de carga superficial. Dicha densidad de carga superficial puede variar considerablemente, dependiendo de las condiciones de exposición y del tamaño, forma y posición del cuerpo expuesto en el campo, lo que determina una distribución variable y no uniforme de corrientes en el interior del cuerpo.
- Los campos magnéticos también actúan sobre los humanos induciendo campos y corrientes eléctricos en el interior del cuerpo.
- Las cargas eléctricas inducidas en un objeto conductor (p. ej., un automóvil) expuesto a campos eléctricos de ELF o VLF pueden hacer que la corriente pase a través de una persona que esté en contacto con él.
- El acoplamiento del campo magnético a un conductor (por ejemplo una alambrada) hace que circulen corrientes eléctricas (de la misma frecuencia que el campo que produce la exposición) por el cuerpo de una persona en contacto con él.
- Cuando las personas se acercan lo suficiente a objetos metálicos expuestos a un campo eléctrico intenso, pueden producirse descargas transitorias (chispas).
- Los campos eléctricos o magnéticos pueden interferir en dispositivos médicos implantados (por ejemplo marcapasos cardíacos unipolares) y causar mal funcionamiento del dispositivo.

Las dos primeras interacciones indicadas son ejemplos de acoplamiento directo entre personas y campos de ELF o VLF. Las cuatro últimas son ejemplos de mecanismos de acoplamiento indirecto, ya que solo pueden producirse cuando el organismo expuesto se encuentra cerca de otros cuerpos. Estos pueden ser otros humanos o bien animales y objetos tales como automóviles, alambradas o dispositivos implantados.

Aunque se han postulado otros mecanismos de interacción entre tejidos biológicos y campos de ELF o VLF, o hay algún indicio de su existencia (OMS 1993; NRPB 1993; NRC 1996), no se ha demostrado que ninguno de ellos tenga consecuencias adversas para la salud.

Efectos para la salud

Las pruebas existentes indican que la mayoría de los efectos comprobados de la exposición a campos eléctricos y magnéticos en la gama de frecuencias de 0 a 30 kHz se deben a respuestas agudas a la carga superficial y a la densidad de corriente inducida. Las personas pueden percibir los efectos de la carga superficial oscilante inducida en sus cuerpos por los campos eléctricos de ELF (pero no por los campos magnéticos); estos efectos se vuelven molestos si son lo bastante intensos. La Tabla 49.6 ofrece un resumen de los efectos de las corrientes que atraviesan el cuerpo humano (umbrales de percepción, y de no soltar o tetanización).

Células nerviosas y musculares humanas han sido estimuladas por las corrientes inducidas por exposición a campos magnéticos de varios mT y de 1 a 1,5 kHz; se cree que los umbrales de densidad de corriente son superiores a 1 A/m^2. Se pueden inducir en el ojo humano sensaciones visuales de destellos por exposición a campos magnéticos incluso de sólo 5 a 10 mT (a 20 Hz) aproximadamente o mediante corrientes eléctricas aplicadas directamente a la cabeza. La consideración de estas respuestas y de los resultados de los estudios neurofisiológicos señala que densidades de corriente superiores a 10 mA/m^2 pueden afectar a delicadas funciones del sistema nervioso central, tales como el razonamiento o la memoria (NRPB 1993). Los valores umbral suelen mantenerse constantes hasta 1 kHz aproximadamente pero a partir de ahí aumentan cuando lo hace la frecuencia.

Los resultados notificados de varios estudios *in vitro* (OMS 1993; NRPB 1993) indican cambios metabólicos, tales como alteraciones de la actividad enzimática y el metabolismo proteico, y disminución de la citotoxicidad linfocítica en diversas cepas de células expuestas a campos eléctricos y corrientes de

Tabla 49.6 • Efectos del paso de corrientes por el cuerpo humano.

Efecto	Sujeto	Corriente umbral en mA				
		50 y 60 Hz	300 Hz	1000 Hz	10 kHz	30 kHz
Percepción	Varones	1,1	1,3	2,2	15	50
	Mujeres	0,7	0,9	1,5	10	35
	Niños	0,55	0,65	1,1	9	30
Umbral de no soltar	Varones	9	11,7	16,2	55	126
	Mujeres	6	7,8	10,8	37	84
	Niños	4,5	5,9	8,1	27	63
Tetanización torácica; fuerte sacudida	Varones	23	30	41	94	320
	Mujeres	15	20	27	63	214
	Niños	12	15	20,5	47	160

Fuente: Bernhardt 1988a.

Tabla 49.7 • Intervalos aproximados de densidad de corriente correspondientes a diversos efectos biológicos.

Efecto	Densidad de corriente (mA/m^2)
Estimulación directa de nervios y músculos	1.000–10.000
Modulación de la actividad del sistema nervioso central Cambios del metabolismo celular *in vitro*	100–1.000
Cambios de la función retiniana	
Cambios probables en el sistema nervioso central	10–100
Cambios del metabolismo celular *in vitro*	
Densidad de corriente endógena	1–10

Fuente: Sienkiewicz y cols. 1991.

ELF y VLF aplicados directamente al cultivo celular. La mayoría de los efectos se notificaron a densidades de corriente comprendidas entre aproximadamente 10 y 1.000 mA/m^2, aunque estas respuestas no están tan claramente definidas (Sienkiewicz, Saunder y Kowalczuk 1991). En todo caso, merece la pena señalar que las densidades de corriente endógena generada por la actividad eléctrica de los nervios y músculos alcanzan normalmente valores tan elevados como 1 mA/m^2 y pueden llegar hasta 10 mA/m^2 en el corazón. Estas densidades de corriente no afectan de modo adverso a los nervios, músculos y otros tejidos. Tales efectos biológicos se evitarán restringiendo la densidad de corriente inducida a menos de 10 mA/m^2 a frecuencias de hasta 1 kHz aproximadamente.

Entre las posibles áreas de interacción biológica que presentan numerosas implicaciones para la salud y acerca de las cuales tenemos un conocimiento limitado están las siguientes: posibles cambios en los niveles nocturnos de melatonina en la glándula pineal y alteraciones de los ritmos circadianos inducidos en animales por exposición a campos eléctricos o magnéticos de ELF, y posibles efectos de los campos magnéticos de ELF sobre los procesos de desarrollo y carcinogénesis. Existe además alguna evidencia de respuestas biológicas a campos eléctricos y magnéticos muy débiles, entre ellas la alteración de la movilidad de los iones de calcio en el tejido cerebral, los cambios en los patrones de activación neuronal y la alteración del comportamiento de los operandos. Se han notificado "ventanas" de amplitud y frecuencia que ponen en duda la hipótesis convencional de que la magnitud de una respuesta aumenta con la dosis. Estos efectos no están bien comprobados y no sirven de base para establecer restricciones a la exposición humana, aun cuando están previstas nuevas investigaciones (Sienkievicz, Saunder y Kowalczuk 1991; OMS 1993; NRC 1996).

La Tabla 49.7 recoge los intervalos aproximados de densidades de corriente inducida correspondientes a diversos efectos biológicos en humanos.

Normas sobre exposición laboral

Casi todas las normas con límites comprendidos en la gama de >0-30 kHz se basan en la necesidad de mantener los campos y corrientes eléctricos inducidos dentro de niveles seguros. Normalmente las densidades de corriente inducidas están restringidas a menos de 10 mA/m^2. La Tabla 49.8 ofrece un resumen de algunos límites de exposición profesional vigentes.

Medidas de protección

Las exposiciones de origen laboral que se producen cerca de líneas de transmisión de alta tensión dependen de la posición del trabajador en el suelo o junto al conductor durante el trabajo con la línea activa a elevado potencial. Cuando se trabaja con la línea activa, puede utilizarse ropa protectora para reducir la intensidad de campo eléctrico y la densidad de corriente en el cuerpo a valores similares a los que se producirían si se trabajase en el suelo. La ropa protectora no aminora la influencia del campo magnético.

Tabla 49.8 • Límites de exposición laboral a campos eléctricos y magnéticos en el intervalo de frecuencias > 0 a 30 kHz (*f* se indica en Hz).

País/ Referencia	Gama de frecuencia	Campo eléctrico (V/m)	Campo magnético (A/m)
Internacional (IRPA 1990)	50/60 Hz	10.000	398
EE.UU. (IEEE 1991)	3–30 kHz	614	163
EE.UU. (ACGIH 1993)	1–100 Hz	25.000	60/*f*
	100–4.000 Hz	2,5 x 10^6/*f*	60/*f*
	4–30 kHz	625	60/*f*
Alemania (1996)	50/60 Hz	10.000	1.600
Reino Unido (NRPB 1993)	1–24 Hz	25.000	64.000/*f*
	24–600 Hz	6 x 10^5/*f*	64.000/*f*
	600–1.000 Hz	1.000	64.000/*f*
	1–30 kHz	1.000	64

Las responsabilidades en cuanto a la protección de los trabajadores y del público en general contra los efectos potencialmente adversos de la exposición a campos eléctricos y magnéticos de ELF o VLF deben estar claramente delimitadas. Se recomienda que las autoridades competentes tomen en consideración los siguientes pasos:

- desarrollo y adopción de límites de exposición e implantación de un programa de cumplimiento;
- desarrollo de normas técnicas para reducir la susceptibilidad a la interferencia electromagnética, por ejemplo de los marcapasos;
- desarrollo de normas que definan zonas de acceso limitado alrededor de las fuentes productoras de campos eléctricos y magnéticos intensos como protección frente a la interferencia electromagnética (por ejemplo para marcapasos y otros dispositivos implantados). Debería estudiarse la utilización de señales de advertencia adecuadas;
- establecimiento del requisito de designar específicamente una persona responsable de la seguridad de los trabajadores y el público en cada lugar de trabajo con altos potenciales de exposición;
- desarrollo de procedimientos de medida y métodos de estudio normalizados;
- establecimiento de requisitos para la instrucción de los trabajadores en relación con los efectos de la exposición a campos eléctricos y magnéticos de ELF o VLF y las medidas y reglas destinadas a protegerlos,
- elaboración de guías o códigos de prácticas para la seguridad de los trabajadores expuestos a campos eléctricos y magnéticos de ELF o VLF. La OIT (1993) ofrece excelentes orientaciones para la confección de este tipo de códigos.

CAMPOS ELECTRICOS Y MAGNETICOS ESTATICOS

Martino Grandolfo

Nuestros entornos, tanto el natural como el artificial, generan fuerzas eléctricas y magnéticas de diversas magnitudes, en exteriores, oficinas, viviendas particulares y lugares de trabajo industriales. Esto suscita dos importantes cuestiones: a) ¿suponen estas exposiciones efectos adversos para la salud humana?, y b) ¿qué límites pueden establecerse en un intento de definir límites "seguros" de tales exposiciones?

Este artículo se refiere específicamente a los campos estáticos eléctricos y magnéticos. Se describen estudios realizados con trabajadores de diversos sectores y con animales, los cuales no han revelado de modo concluyente ningún efecto biológico adverso a los niveles de exposición a campos eléctricos y magnéticos que se dan habitualmente. No obstante, se comentan los esfuerzos de varias organizaciones internacionales por establecer directrices guías para proteger a los trabajadores y a otras personas de cualquier posible nivel de exposición peligroso.

Definiciones

Cuando se aplica una tensión o una corriente eléctrica a un objeto tal como un conductor eléctrico, el conductor se carga y empiezan a actuar fuerzas en otras cargas cercanas. Pueden diferenciarse dos tipos de fuerzas: las producidas por cargas eléctricas estacionarias, denominadas *fuerza electrostática*, y las que solo aparecen cuando las cargas están en movimiento (como en el caso de la corriente eléctrica que circula por un conductor), conocidas como *fuerza magnética*. Para describir la existencia y distribución espacial de estas fuerzas, físicos y matemáticos han creado el concepto de campo. Así, hablamos de un campo de fuerza o, simplemente, de campos eléctricos y magnéticos.

El término *estático* describe una situación en que todas las cargas están inmóviles en el espacio o se desplazan con un movimiento uniforme. Como consecuencia de ello, tanto las cargas como las densidades de corriente son constantes en el tiempo. En el caso de las cargas inmóviles, tenemos un campo eléctrico cuya intensidad en cualquier punto del espacio depende del valor y la geometría de todas las cargas. En el caso de un circuito de corriente continua, tenemos un campo eléctrico y un campo magnético constantes en el tiempo (campos estáticos) dado que la densidad de carga en cualquier punto del circuito no varía.

La electricidad y el magnetismo son fenómenos claramente diferenciados cuando las cargas y la corriente son estáticas; en esta situación estática desaparece cualquier interconexión entre los campos eléctrico y magnético, de modo que éstos pueden tratarse por separado (a diferencia de lo que ocurre cuando los campos son variables en el tiempo). Los campos electrostáticos y magnéticos están claramente caracterizados por intensidades uniformes, independientes del tiempo y corresponden al límite de frecuencia cero de la banda de frecuencias extremadamente bajas (ELF).

Campos eléctricos estáticos

Exposición natural y profesional

Los campos eléctricos estáticos son producidos por cuerpos cargados eléctricamente cuando se induce una carga eléctrica en la superficie de un objeto dentro de un campo eléctrico estático. A consecuencia de ello, el campo eléctrico de la superficie de un objeto, sobre todo si el radio de curvatura es pequeño, como en el caso de un punto, puede ser mayor que el campo eléctrico no perturbado (es decir, el campo sin la presencia del objeto). El campo en el interior del objeto puede ser muy pequeño o nulo. Los campos eléctricos actúan como una fuerza sobre los objetos cargados eléctricamente; por ejemplo, ejercen una fuerza en el vello corporal que puede ser percibida por el individuo.

Generalmente, la carga superficial terrestre es negativa mientras que en las capas superiores de la atmósfera existe una carga positiva. El campo electrostático resultante cerca de la superficie terrestre tiene una intensidad de 130 V/m aproximadamente. Esta densidad disminuye con la altitud y presenta un valor de aproximadamente 100 V/m a una altitud de 100 m, 45 V/m a 1 km y menos de 1 V/m a 20 km. Los valores reales varían ampliamente dependiendo del perfil local de temperatura y humedad y de la presencia de contaminantes ionizados. Debajo de las nubes de tormenta, por ejemplo, e incluso al aproximarse éstas, se producen grandes variaciones de campo a nivel del suelo, dado que, por lo general, la parte inferior de una nube está cargada negativamente, mientras que la parte superior contiene una carga positiva. Además, existe una carga en el espacio entre la nube y el suelo. Según se aproxima la nube, el campo a nivel del suelo puede aumentar primero de valor y después invertirse, volviéndose positiva la carga del suelo. Durante este proceso pueden observarse campos de 100 V/m a 3 kV/m incluso en ausencia de relámpagos locales; las inversiones de campo pueden producirse con gran rapidez, en menos de 1 minuto, y mientras dura la tormenta pueden persistir altas intensidades de campo. Tanto las nubes ordinarias como las de tormenta contienen cargas eléctricas, y por lo tanto, afectan profundamente al campo eléctrico a nivel del suelo. Asimismo, en presencia de niebla, lluvia e iones grandes y pequeños de aparición natural, son previsibles grandes desviaciones, de hasta el 200 %, respecto del campo existente con buen tiempo. Igualmente pueden producirse cambios en el campo eléctrico durante el ciclo diario con un tiempo espléndido: es probable que las causas de estas variaciones diurnas sean cambios sensiblemente regulares en la ionización, temperatura o humedad locales, con las consiguientes variaciones de la conductividad eléctrica atmosférica cerca del suelo, así como la transferencia de cargas mecánicas producida por movimientos locales del aire.

Los niveles típicos de los campos electrostáticos artificiales en oficinas y viviendas particulares están comprendidos entre 1 y 20 kV/m; normalmente estos campos se generan alrededor de equipos de alta tensión, como televisores y pantallas de visualización de datos (PVD), o por rozamiento. Las líneas de transmisión de corriente continua (CC) generan campos estáticos eléctricos y magnéticos y son un medio económico de distribución de energía cuando hay que salvar largas distancias.

Los campos electrostáticos son muy utilizados en industrias como las de productos químicos, textiles, aviación, papel y caucho, así como en el transporte.

Efectos biológicos

Los estudios experimentales aportan pocas pruebas biológicas de un posible efecto adverso de los campos electrostáticos para la salud humana. Tampoco los escasos estudios realizados con animales parecen haber aportado datos que confirmen efectos perjudiciales genéticos, de crecimiento de tumores o sobre los sistemas endocrino o cardiovascular (la Tabla 49.9 ofrece un resumen de estos estudios con animales).

No se han realizado estudios *in vitro* para evaluar el efecto de la exposición de células a campos eléctricos estáticos.

Los cálculos teóricos señalan que un campo eléctrico estático induce una carga en la superficie de las personas expuestas, la cual puede percibirse si se descarga en un objeto conectado a tierra. Si la tensión es suficientemente alta, el aire se ioniza y es capaz de producir una corriente eléctrica entre por ejemplo un

Tabla 49.9 • Estudios en animales expuestos a campos electrostáticos.

Objetivos biológicos	Efectos notificados	Condiciones de exposición
Hematología e inmunología	Cambios en las fracciones de albúmina y globulina de las proteínas séricas en ratas	Exposición continua a campos de entre 2,8 y 19,7 kV/m desde los 22 a los 52 días de edad
	Respuestas inconsistentes	
	Ausencia de diferencias significativas en los recuentos de hematíes, proteínas de la sangre o química sanguínea en ratones	Exposición a 340 kV/m 22 h al día durante un total de 5.000 h
Sistema nervioso	Inducción de cambios significativos observada en los EEG de ratas, pero sin ninguna indicación clara de respuesta consistente	Exposición a campos eléctricos de hasta 10 kV/m de intensidad
	Ausencia de cambios significativos en las concentraciones y tasas de utilización de diversos neurotransmisores en el cerebro de ratas macho	Exposición a un campo de 3 kV/m durante hasta 66 h
Comportamiento	Recientes estudios bien realizados sugieren ausencia de efectos en el comportamiento de roedores	Exposición a campos de hasta 12 kV/m de intensidad
	Comportamiento de evitación en ratas macho, sin influencia de iones aéreos	Exposición a campos eléctricos de dispositivos de alta tensión comprendidos entre 55 y 80 kV/m
Reproducción y desarrollo	Ausencia de diferencias significativas en el número total de crías y en el porcentaje de crías supervivientes en ratones	Exposición a 340 kV/m 22 h al día antes, durante y después de la gestación

objeto cargado y una persona conectada a tierra. La *descarga disruptiva* depende de varios factores, tales como la forma del objeto cargado y las condiciones atmosféricas. Los valores típicos de las intensidades de campo eléctrico correspondientes varían entre 500 y 1.200 kV/m.

Informes procedentes de algunos países indican que varios operadores de PVD han experimentado trastornos de la piel, pero no está clara la relación exacta entre estos trastornos y su trabajo. Se han señalado los campos eléctricos estáticos en los lugares de trabajo con PVD como posible causa de estos trastornos de la piel y acaso la carga electrostática del operador sea un factor relevante. No obstante, de acuerdo con las pruebas aportadas hasta ahora por la investigación, cualquier relación entre los campos eléctricos estáticos y los trastornos de la piel deberá seguir considerándose como hipotética.

Normas sobre mediciones, prevención y exposición

Las medidas de intensidad de los campos eléctricos estáticos pueden reducirse a medidas de voltajes o de cargas eléctricas. Existen en el comercio varios voltímetros electrostáticos que permiten medir con precisión fuentes electrostáticas u otras fuentes de alta impedancia sin necesidad de contacto físico. Algunos utilizan un troceador electrostático con baja deriva y realimentación negativa para conseguir precisión y baja sensibilidad en la separación entre sonda y superficie. En algunos casos, el electrodo electrostático "observa" la superficie que se mide a través de un pequeño orificio existente en la base de la sonda. La señal de corriente alterna troceada inducida en este electrodo es proporcional al voltaje diferencial entre la superficie que se mide y la sonda. También se utilizan como accesorios de los voltímetros electrostáticos adaptadores de gradiente que permiten usarlos como medidores de intensidad de campo electrostático; es posible la lectura directa en voltios por metro de la separación entre la superficie medida y la placa puesta a tierra del adaptador.

No existen datos fidedignos que puedan servir como guías para establecer límites básicos de exposición humana a campos eléctricos estáticos. En principio, podría determinarse un límite de exposición a partir de la descarga disruptiva mínima en el aire, pero la intensidad de campo que experimenta una persona situada dentro de un campo eléctrico estático varía según la orientación y la forma del cuerpo y esto debe tenerse en cuenta al intentar establecer un límite adecuado.

La Conferencia Americana de Higienistas Industriales del Gobierno (ACGIH 1995) ha recomendado valores límite umbral (TLV). Estos TLV se refieren a la máxima intensidad de campo eléctrico estático sin protección en el lugar de trabajo, y representa las condiciones a las que casi todos los trabajadores pueden estar expuestos repetidamente sin sufrir efectos adversos para la salud. Según la ACGIH, los niveles de exposición profesional no deberían exceder de una intensidad de campo electrostático de 25 kV/m. Este valor debe utilizarse únicamente con carácter orientativo en el control de la exposición y debido a la susceptibilidad individual no debe considerarse como una línea divisoria clara entre los niveles seguros y peligrosos (este límite corresponde a la intensidad de campo presente en el aire, lejos de las superficies de conductores, donde las descargas con chispas y las corrientes de contacto pueden suponer riesgos significativos, y es aplicable tanto a exposiciones parciales del cuerpo como a exposiciones de cuerpo completo). Se deberán eliminar los objetos no conectados a tierra, o ponerlos a tierra, utilizando guantes aislantes para manipular los objetos no conectados a tierra. La prudencia aconseja utilizar dispositivos protectores (por ejemplo, trajes, guantes y aislamiento) en todos los campos que excedan de 15 kV/m.

Según la ACGIH, la información actualmente disponible sobre respuestas humanas y posibles efectos de los campos eléctricos estáticos para la salud es insuficiente para establecer un TLV fiable para exposiciones promedio ponderadas en el tiempo. Cuando no se disponga de información específica del fabricante sobre interferencia electromagnética, se recomienda mantener los niveles de exposición de los portadores de marcapasos y otros dispositivos electrónicos médicos en un valor no superior a 1 kV/m.

En Alemania, según una norma DIN, los niveles de exposición profesional no deben sobrepasar una intensidad de campo eléctrico estático de 40 kV/m. Para exposiciones de corta duración (hasta 2 horas diarias) se permite un límite más alto, de 60 kV/m.

En 1993, la National Radiological Protection Board (NRPB 1993) editó una recomendación sobre las restricciones

adecuadas de la exposición de personas a campos electromagnéticos y radiación. Se incluyen aquí los campos estáticos tanto eléctricos como magnéticos. En el documento de la NRPB se proporcionan niveles de investigación con objeto de permitir la comparación de los valores de las magnitudes de campo medidas a fin de determinar si se cumplen o no las restricciones básicas. Si el campo al que está expuesto una persona excede del nivel de investigación correspondiente, deberá comprobarse el cumplimiento de las restricciones básicas. Entre los factores que podrían tenerse en cuenta en tal evaluación se incluyen por ejemplo la eficacia del acoplamiento de la persona al campo, la distribución espacial del campo en el volumen ocupado por la persona y la duración de la exposición.

Según la NRPB, no es posible recomendar restricciones básicas para evitar efectos directos de la exposición humana a campos eléctricos estáticos; se ofrecen orientaciones para evitar efectos molestos de la percepción directa de la carga eléctrica superficial y efectos indirectos tales como el shock eléctrico. Para la mayoría de las personas, la percepción molesta de carga eléctrica superficial actuando directamente sobre el cuerpo no se produce durante la exposición a intensidades de campo eléctrico estático inferiores a 25 kV/m aproximadamente, es decir, la misma intensidad de campo recomendada por la ACGIH. Para evitar que las descargas con chispa (efectos indirectos) causen molestias, la NRPB recomienda restringir las corrientes de contacto continuas a menos de 2 mA. El shock eléctrico provocado por fuentes de baja impedancia puede evitarse siguiendo los procedimientos de seguridad eléctrica establecidos para tales equipos.

Campos magnéticos estáticos

Exposición natural y profesional

El cuerpo es relativamente transparente a los campos magnéticos estáticos; tales campos interactúan directamente con los materiales magnéticamente anisótropos (cuyas propiedades presentan valores distintos cuando se miden a lo largo de ejes en direcciones diferentes) y con las cargas en movimiento.

El campo magnético natural es la suma de un campo interno debido a la acción de la tierra como un imán permanente y un campo externo generado en el medioambiente por factores tales como la actividad solar o los de tipo atmosférico. El campo magnético interno de la tierra tiene su origen en la corriente eléctrica que circula por la capa superior del núcleo terrestre. Existen diferencias locales significativas en la intensidad de este campo, cuya magnitud media varía desde aproximadamente 28 A/m en el ecuador (lo que corresponde a una densidad de flujo magnético de alrededor de 35 mT en un material no magnético tal como el aire) hasta aproximadamente 56 A/m sobre los polos geomagnéticos (valor correspondiente a unos 70 mT en el aire).

Los campos artificiales superan en intensidad a los de origen natural en muchos órdenes de magnitud. Entre las fuentes

Tabla 49.10 • Principales tecnologías en las que se utilizan grandes campos magnéticos estáticos y niveles de exposición correspondientes.

Procedimientos	Niveles de exposición
Tecnologías energéticas	
Reactores de fusión termonuclear	Campos dispersos de hasta 50 mT en zonas accesibles al personal.
	Menos de 0,1 mT fuera del recinto del reactor
Sistemas magnetohidrodinámicos	Aproximadamente 10 mT a unos 50 m;
	100 mT únicamente a distancias superiores a 250 m
Sistemas de almacenamiento de energía con imanes superconductores	Campos dispersos de hasta 50 mT en lugares accesibles a los operarios
Generadores y líneas de transmisión superconductores	Campos dispersos con una intensidad inferior a 100 mT según proyecto
Instalaciones de investigación	
Cámaras de burbujas	Durante los cambios de cassettes de película, el campo es de aproximadamente 0,4 - 0,5 T al nivel de los pies y de alrededor de 50 mT a la altura de la cabeza
Espectrómetros superconductores	Aproximadamente 1 T en lugares accesibles a los operarios
Aceleradores de partículas	El personal rara vez queda expuesto debido a su exclusión de la zona de alta radiación. Sólo se producen excepciones durante el mantenimiento
Unidades de separación de isótopos	Breves exposiciones a campos de hasta 50 mT
	Normalmente los niveles de los campos son inferiores a 1 mT
Industria	
Producción de aluminio	Niveles de hasta 100 mT en lugares accesibles a los operarios
Procesos electrolíticos	Niveles de campo medios y máximos de alrededor de 10 y 50 mT respectivamente
Fabricación de imanes	De 2 a 5 mT en las manos de los trabajadores; en el intervalo de 300 a 500 mT al nivel del tórax y la cabeza
Medicina	
Resonancia magnética nuclear de imagen y espectroscopia de RMN	Un imán de 1 T sin blindaje produce aproximadamente 0,5 mT a 10 m y un imán de 2 T asimismo sin blindaje produce el mismo nivel de exposición a 13 m aproximadamente

artificiales de campos magnéticos estáticos se encuentran todos los dispositivos que contienen hilos conductores de corriente continua, entre ellos numerosos aparatos y equipos industriales.

En las líneas de transmisión de energía de corriente continua, los campos magnéticos estáticos se producen por cargas en movimiento (una corriente eléctrica) en una línea bifásica. En las líneas de tendido aéreo, la densidad de flujo magnético a nivel del suelo es de aproximadamente 20 mT para una línea de ± 500 kV. En una línea de transmisión subterránea, enterrada a 1,4 m y que transporta una corriente máxima de alrededor de 1 kA, la densidad de flujo magnético máxima es inferior a 10 mT a nivel del suelo.

La Tabla 49.10 ofrece una relación de las principales tecnologías en las que se utilizan campos magnéticos estáticos de alta intensidad, y de los niveles de exposición correspondientes.

Efectos biológicos

Las pruebas aportadas por experimentos de laboratorio con animales indican ausencia de efectos significativos en los numerosos factores de desarrollo, de comportamiento y fisiológicos evaluados a densidades de flujo magnético estático de hasta 2 T. Tampoco los estudios en ratones han mostrado ningún daño del feto por exposición a campos magnéticos de hasta 1 T.

Teóricamente, los efectos magnéticos podrían reducir la velocidad de la sangre que circula en un campo magnético intenso y producir un aumento de la presión arterial. Podría esperarse una reducción de flujo de unos cuantos puntos porcentuales como máximo a 5 T, pero no se observó ninguno en sujetos humanos sometidos a 1,5 T cuando se investigaron.

Los resultados de algunos estudios con trabajadores que intervienen en la fabricación de imanes permanentes indican diversos síntomas subjetivos y alteraciones funcionales: irritabilidad, fatiga, dolor de cabeza, pérdida del apetito, bradicardia (frecuencia cardíaca lenta), taquicardia (frecuencia cardíaca rápida), disminución de la presión arterial, alteración del EEG, picores, quemazón y entumecimiento. No obstante, la ausencia de cualquier análisis estadístico o evaluación del impacto de riesgos físicos o químicos en el entorno de trabajo reduce de modo significativo la validez de estos informes y dificulta su valoración. Aunque los estudios no son concluyentes sugieren que si en realidad se producen efectos a largo plazo, éstos son muy ligeros; no se han notificado efectos acumulativos intensos. Se ha informado de que individuos expuestos a una densidad de flujo magnético de 4 T han experimentado efectos sensoriales asociados con el movimiento dentro del campo tales como vértigo, náuseas, sabor metálico y sensaciones magnéticas al mover los ojos o la cabeza. No obstante, dos estudios epidemiológicos de datos sobre la salud general de trabajadores crónicamente expuestos a campos magnéticos estáticos no revelaron ningún efecto significativo para la salud. Se obtuvieron datos sobre la salud de 320 trabajadores en plantas que utilizan grandes pilas electrolíticas para procesos de separación química, en las que el nivel de campo estático medio en el entorno de trabajo era de 7,6 mT y el campo máximo de 14,6 mT. En el grupo expuesto se detectaron ligeros cambios en el recuento leucocitario, aunque dentro del intervalo normal, en comparación con el grupo de control de 186 trabajadores. Ninguno de los cambios transitorios observados en la presión arterial y otras medidas sanguíneas se consideró indicativo de un efecto adverso significativo asociado con exposición a campos magnéticos. En otro estudio se evaluó la prevalencia de enfermedad en 792 trabajadores expuestos profesionalmente a campos magnéticos estáticos. El grupo de control estaba formado por 792 trabajadores no expuestos, de edad, raza y situación socioeconómica equivalentes. El intervalo de intensidades de exposición a campos magnéticos varió entre 0,5 mT para exposiciones de larga duración y 2 T para períodos de varias horas. No se observó ninguna variación estadísticamente significativa en la incidencia de 19 clases de enfermedad en el grupo expuesto en comparación con el de control. Tampoco se observó ninguna diferencia en cuanto a prevalencia de enfermedad entre un subgrupo de 198 trabajadores que habían experimentado exposiciones de 0,3 T o superiores durante períodos de una hora o más en comparación con el resto de la población expuesta o del grupo de control correspondiente.

Un estudio con trabajadores de la industria del aluminio reveló una elevada tasa de mortalidad por leucemia. Aunque este estudio epidemiológico indicaba un mayor riesgo de cáncer para las personas que intervienen directamente en la producción de aluminio, en la que los trabajadores están expuestos a grandes campos magnéticos estáticos, actualmente no existe ninguna prueba clara que indique con exactitud cuáles son los factores carcinogénicos causantes en el entorno de trabajo. En el proceso utilizado para la reducción del aluminio se crean alquitrán de hulla, componentes volátiles de la brea, emanaciones de fluoruros, óxidos de azufre y dióxido de carbono, y algunas de estas sustancias son candidatos más probables como causantes de cáncer que la exposición a campos magnéticos.

En un estudio con trabajadores franceses del aluminio se descubrió que la mortalidad por cáncer y otras causas no difería significativamente de la observada en la población masculina general de Francia (Mur y cols. 1987).

Otro hallazgo negativo en cuanto a la posible relación de las exposiciones a campos magnéticos con la aparición de cáncer procede de un estudio realizado en un grupo de trabajadores de una planta de cloroálcalis en la que las corrientes continuas de 100 kA utilizadas para la producción electrolítica de cloro producían, en los lugares ocupados por los trabajadores, densidades de flujo magnético estático comprendidas entre 4 y 29 mT. No se apreciaron diferencias significativas entre la incidencia de cáncer observada y esperada en estos trabajadores, en un período de 25 años.

Mediciones, prevención y normas sobre exposición

Durante los últimos treinta años, la medición de campos magnéticos ha experimentado un considerable desarrollo. El progreso de las técnicas ha permitido desarrollar nuevos métodos de medida y mejorar los antiguos.

Los dos tipos más conocidos de sondas de campos magnéticos son una bobina blindada y una sonda de efecto Hall. La mayoría de los medidores de campos magnéticos disponibles en el comercio utilizan uno u otro de ellos. Recientemente se han propuesto como sensores de campos magnéticos otros dispositivos de semiconductores, concretamente transistores bipolares y transistores de efecto de campo (FET), que ofrecen algunas ventajas sobre las sondas de efecto Hall, tales como una mayor sensibilidad, una mayor resolución espacial y una respuesta en frecuencia más amplia.

El principio de la técnica de medida denominada resonancia magnética nuclear (RMN) consiste en determinar la frecuencia resonante de la muestra analizada, dentro del campo magnético a medir. Se trata de una medida absoluta que puede realizarse con gran precisión. El campo de medida de este método abarca desde aproximadamente 10 mT hasta 10 T, sin límites definidos. En mediciones de campo utilizando el método de resonancia magnética de protón se obtiene fácilmente una precisión de 10^{-4} con aparatos sencillos y puede alcanzarse una precisión de 10^{-6} adoptando amplias precauciones y utilizando mejores equipos. El defecto inherente al método de la RMN es su limitación a un

campo de bajo gradiente y la falta de información acerca de la dirección del campo.

Recientemente se han desarrollado también varios dosímetros personales adecuados para vigilar exposiciones a campos magnéticos estáticos.

Las medidas de protección para el uso industrial y científico de campos magnéticos pueden clasificarse en las siguientes categorías: medidas de diseño técnico, uso de la distancia de separación y controles administrativos. Otra categoría general de medidas de control del riesgo, que incluye el equipo de protección individual (por ejemplo, prendas y máscaras especiales), no existe para los campos magnéticos. No obstante, un área especial de preocupación son las medidas protectoras contra riesgos potenciales por interferencia magnética con equipos electrónicos de emergencia o médicos y para implantes quirúrgicos y dentales. Las fuerzas mecánicas aplicadas a los implantes ferromagnéticos y objetos sin amarrar en instalaciones con campos de alta intensidad requieren tomar precauciones frente a los riesgos para la salud y la seguridad.

Las técnicas destinadas a minimizar la exposición indebida a campos magnéticos de alta intensidad en grandes instalaciones industriales y de investigación suelen pertenecer a uno de estos cuatro tipos:

1. distancia y tiempo
2. blindaje magnético
3. interferencia (EMI) y compatibilidad electromagnéticas
4. medidas administrativas.

El uso de señales de advertencia y zonas de acceso especial para limitar la exposición del personal cerca de instalaciones de grandes imanes ha sido de máxima utilidad para controlar la exposición. Este tipo de controles administrativos suelen ser preferibles al blindaje magnético, que puede resultar extremadamente caro. Los objetos ferromagnéticos y paramagnéticos (cualquier sustancia magnetizante) sueltos pueden convertirse en proyectiles peligrosos cuando están sujetos a gradientes de campo magnético intensos. Este riesgo solo puede evitarse retirando los objetos metálicos sueltos de la zona y los que lleve el personal. Deberá prohibirse la presencia de objetos tales como tijeras, limas de uñas, destornilladores y bisturíes en las proximidades.

Las primeras directrices sobre campos magnéticos estáticos se desarrollaron como recomendación no oficial en la antigua Unión Soviética. Esta norma estaba basada en investigaciones clínicas y sugería que la intensidad del campo magnético estático en el lugar de trabajo no debería sobrepasar los 8 kA/m (10 mT).

La Conferencia Americana de Higienistas Industriales del Gobierno publicó valores TLV de densidades de flujo magnético estático a los que la mayoría de los trabajadores podían estar expuestos repetidamente, día tras día, sin efectos nocivos para la salud. Al igual que en los campos eléctricos, estos valores deben utilizarse como orientación para el control de la exposición a campos magnéticos estáticos, pero no deben considerarse como una clara línea divisoria entre los niveles seguros y peligrosos. Según la ACGIH, las exposiciones laborales de rutina no debieran exceder de 60 mT, promediadas sobre la totalidad del cuerpo o de 600 mT en las extremidades, sobre una base diaria, ponderada en el tiempo. Como valor techo se recomienda una densidad de flujo de 2 T. Pueden existir riesgos para la salud debido a las fuerzas mecánicas ejercidas por el campo magnético sobre las herramientas e implantes médicos ferromagnéticos.

En 1994, la Comisión Internacional de Protección contra la Radiación no Ionizante (ICNIRP 1994) concluyó y publicó guías sobre los límites de exposición a campos magnéticos estáticos. En estas guías se hace una distinción entre el límite de exposición para los trabajadores y para el público en general. Los límites recomendados por la ICNIRP para exposiciones profesionales y de público en general a campos magnéticos estáticos se resumen en la Tabla 49.11. Cuando las densidades de flujo magnético exceden de 3 mT deben tomarse precauciones para prevenir riesgos por objetos metálicos volantes. Los relojes analógicos, tarjetas de crédito, cintas magnéticas y discos de ordenador pueden resultar afectados negativamente por la exposición a 1 mT, pero esto no se considera preocupante en relación con la seguridad de las personas.

Tabla 49.11 • Límites de exposición a campos magnéticos estáticos recomendados por la Comisión Internacional de Protección contra la Radiación no Ionizante (ICNIRP).

Características de la exposición	Densidad de flujo magnético
Laboral	
Toda la jornada (media ponderada en el tiempo)	200 mT
Valor techo	2 T
Extremidades	5 T
Público en general	
Exposición continua	40 mT

Se podrá utilizar el acceso esporádico del público a instalaciones especiales en las que las densidades de flujo magnético excedan de 40 mT en condiciones debidamente controladas, siempre que no se rebase el límite de exposición profesional correspondiente.

Los límites de exposición de la ICNIRP se han establecido para un campo homogéneo. Para campos no homogéneos (variaciones dentro del campo) la densidad de flujo magnético media deberá medirse sobre una superficie de 100 cm^2.

Según un reciente documento de la NRPB, la restricción de la exposición aguda a menos de 2 T evitará respuestas agudas tales como mareos o náuseas y efectos nocivos para la salud como consecuencia de arritmia cardíaca (frecuencia cardíaca irregular) o alteración de la función mental. A pesar de la relativa falta de pruebas como resultado de los estudios de poblaciones expuestas en relación con posibles efectos a largo plazo de los campos de alta intensidad, la NRPB considera aconsejable restringir la exposición a largo plazo ponderada en el tiempo sobre 24 horas a menos de 200 mT (una décima parte de la prevista para prevenir respuestas agudas). Estos niveles son muy similares a los recomendados por la ICNIRP; los TLV de la ACGIH son ligeramente inferiores.

Las personas con marcapasos cardíacos y otros dispositivos de activación eléctrica implantados, o con implantes ferromagnéticos, pueden no estar debidamente protegidos por los límites aquí indicados. La mayoría de los marcapasos cardíacos es improbable que resulten afectados por la exposición a campos de intensidad inferior a 0,5 mT. Las personas portadoras de algunos implantes ferromagnéticos o de dispositivos de activación eléctrica (distintos de los marcapasos cardíacos) pueden ser afectadas por campos de nivel superior a algunos mT.

Existen otros conjuntos de guías que recomiendan límites de exposición laboral: tres de ellos están implantados en laboratorios de física de alta energía (Centro del Acelerador Lineal de Stanford y Laboratorio Nacional Lawrence Livermore en

California, Laboratorio del Acelerador del CERN en Ginebra), y una guía provisional del Departamento de Energía (DOE) de Estados Unidos.

En Alemania, según una norma DIN, las exposiciones profesionales no deben exceder de una intensidad de campo magnético estático de 60 kA/m (75 mT aproximadamente). Cuando sólo están expuestas las extremidades, este límite se fija en 600 kA/m, para exposiciones del cuerpo completo de corta duración están permitidos límites de intensidad de campo de hasta 150 kA/m (hasta 5 minutos por hora).

Referencias

Allen, SG. 1991. Radiofrequency field measurements and hazard assessment. *J Radiol Protect* 11:49-62.

American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH). 1992. *Documentation for the Threshold Limit Values.* Cincinnati, Ohio: ACGIH.

—. 1993. *Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents and Biological Exposure Indices.* Cincinnati, Ohio: ACGIH.

—. 1994a. *Annual Report of ACGIH Physical Agents Threshold Limit Values Committee.* Cincinnati, Ohio: ACGIH.

—. 1994b. *TLV's, Threshold Limit Values and Biological Exposure Indices for 1994-1995.* Cincinnati, Ohio: ACGIH.

—. 1995. *1995-1996 Threshhold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents and Biological Exposure Indices.* Cincinnati, Ohio: ACGIH.

—. 1996. *TLVs © and BEIs © . Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents; Biological Exposure Indices* . Cincinnati, Ohio: ACGIH.

American National Standards Institute (ANSI). 1993. *Safe Use of Lasers. Standard No. Z-136.1.* Nueva York: ANSI.

Aniolczyk, R. 1981. Measurements of hygienic evaluation of electromagnetic fields in the environment of diathermy, welders, and induction heaters. *Medycina Pracy* 32:119-128.

Asociación Internacional para la Protección contra las Radiaciones (IRPA). 1985. Guidelines for limits of human exposure to laser radiation. *Health Phys* 48(2):341-359.

—. 1988a. Change: Recommendations for minor updates to the IRPA 1985 guidelines on limits of exposure to laser radiation. *Health Phys* 54(5):573-573.

—. 1988b. Guidelines on limits of exposure to radiofrequency electromagnetic fields in the frequency range from 100 kHz to 300 GHz. *Health Phys* 54:115-123.

—. 1989. Proposed change to the IRPA 1985 guidelines limits of exposure to ultraviolet radiation. *Health Phys* 56(6):971-972.

Asociación Internacional para la Protección contra las Radiaciones (IRPA) y Comité Internacional de Radiaciones No Ionizantes. 1990. Interim guidelines on limits of exposure to 50/60 Hz electric and magnetic fields. *Health Phys* 58(1):113-122.

Bassett, CAL, RJ Pawluk, AA Pilla. 1974. Augmentation of bone repair by inductively coupled electromagnetic fields. *Science* 184:575-577.

Bassett, CAL, SN Mitchell, SR Gaston. 1982. Pulsing electromagnetic field treatment in ununited fractures and failed artrodeses. *J Am Med Assoc* 247:623-628.

Berger, D, F Urbach, RE Davies. 1968. The action spectrum of erythema induced by ultraviolet radiation. En *Preliminary Report XIII. Congressus Internationalis Dermatologiae, Munchen*, dirigido por W Jadassohn y CG Schirren. Nueva York: Springer-Verlag.

Bernhardt, JH, R Matthes. 1992. ELF and RF electromagnetic sources. En *Non-Ionizing Radiation Protection*, dirigido por MW Greene. Vancouver: UBC Press.

Bernhardt, JH. 1988a. The establishment of frequency dependent limits for electric and magnetic fields and evaluation of indirect effects. *Rad Envir Biophys* 27:1.

Bini, M, A Checcucci, A Ignesti, L Millanta, R Olmi, N Rubino, R Vanni. 1986. Exposure of workers to intense RF electric fields that leak from plastic sealers. *J Microwave Power* 21:33-40.

Buhr, E, E Sutter y Consejo Holandés de Salud. 1989. Dynamic filters for protective devices. En *Dosimetry of Laser Radiation in Medicine and Biology*, dirigido por GJ Mueller y DH Sliney. Bellingham, Wash: SPIE.

Bureau of Radiological Health. 1981. *An Evaluation of Radiation Emission from Video Display Terminals.* Rockville, Maryland: Bureau of Radiological Health.

Cleuet, A, A Mayer. 1980. Risques liés à l'utilisation industrielle des lasers. En *Institut National de Recherche et de Sécurité, Cahiers de Notes Documentaires, No. 99* París: Institut National de Recherche et de Sécurité.

Coblentz, WR, R Stair, JM Hogue. 1931. The spectral erythemic relation of the skin to ultraviolet radiation. En *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* Washington, DC: National Academy of Sciences.

Cole, CA, DF Forbes, PD Davies. 1986. An action spectrum for UV photocarcinogenesis. *Photochem Photobiol* 43(3):275-284.

Comisión Electrotécnica Internacional (CEI). 1993. *IEC Standard No. 825-1.* Ginebra: CEI.

Comisión Internacional de Iluminación (CIE). 1987. *International Lighting Vocabulary.* Viena: CIE.

Comisión Internacional de Protección contra las Radiaciones No Ionizantes (ICNIRP). 1994. Guidelines on Limits of Exposure to Static Magnetic Fields. *Health Phys* 66:100-106.

—. 1995. *Guidelines for Human Exposure Limits for Laser Radiation.*

Cullen, AP, BR Chou, MG Hall, SE Jany. 1984. Ultraviolet-B damages corneal endothelium. *Am J Optom Phys Opt* 61(7):473-478.

Declaración de la ICNIRP. 1996. Health issues related to the use of hand-held radiotelephones and base transmitters. *Health Physics*, 70:587-593.

Duchene, A, J Lakey, M Repacholi. 1991. *IRPA Guidelines On Protection Against Non-Ionizing Radiation.* Nueva York: Pergamon.

Elder, JA, PA Czerki, K Stuchly, K Hansson Mild, AR Sheppard. 1989. Radiofrequency radiation. En *Nonionizing Radiation Protection*, dirigido por MJ Suess y DA Benwell-Morison. Ginebra: OMS.

Eriksen, P. 1985. Time resolved optical spectra from MIG welding arc ignition. *Am Ind Hyg Assoc J* 46:101-104.

Everett, MA, RL Olsen, RM Sayer. 1965. Ultraviolet erythema. *Arch Dermatol* 92:713-719.

Fitzpatrick, TB, MA Pathak, LC Harber, M Seiji, A Kukita. 1974. *Sunlight and Man, Normal and Abnormal Photobiologic Responses.* Tokio: Univ. of Tokyo Press.

Forbes, PD, PD Davies. 1982. Factors that influence photocarcinogenesis. Capítulo 7 de *Photoimmunology*, dirigido por JAM Parrish, L Kripke y WL Morison. Nueva York: Plenum.

Freeman, RS, DW Owens, JM Knox, HT Hudson. 1966. Relative energy requirements for an erythemal response of skin to monochromatic wavelengths of ultraviolet present in the solar spectrum. *J Invest Dermatol* 47:586-592.

Grandolfo, M, K Hansson Mild. 1989. Worldwide public and occupational radiofrequency and microwave protection. En *Electromagnetic Biointeraction. Mechanisms, Safety Standards, Protection Guides*, dirigido por G Franceschetti, OP Gandhi y M Grandolfo. Nueva York: Plenum.

Greene, MW. 1992. Non Ionizing Radiation. II Seminario internacional sobre radiaciones no ionizantes, 10-14 de mayo, Vancouver.

Ham, WT, HA Mueller, JJ Ruffolo, D Guerry III, RK Guerry. 1982. Action spectrum for retinal injury from near ultraviolet radiation in the aphakic monkey. *Am J Ophthalmol* 93(3):299-306.

Ham, WTJ. 1989. The photopathology and nature of the blue-light and near-UV retinal lesion produced by lasers and other optic sources. En *Laser Applications in Medicine and Biology*, dirigido por ML Wolbarsht. Nueva York: Plenum.

Hansson Mild, K. 1980. Occupational exposure to radio-frequency electromagnetic fields. *Proc IEEE* 68:12-17.

Hausser, KW. 1928. Influence of wavelength in radiation biology. *Strahlentherapie* 28:25-44.

Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE). 1990a. *IEEE COMAR Position of RF and Microwaves.* Nueva York: IEEE.

—. 1990b. *IEEE COMAR Position Statement On Health Aspects of Exposure to Electric and Magnetic Fields from RF Sealers and Dielectric Heaters.* Nueva York: IEEE.

—. 1991. *IEEE Standard for Safety Levels With Respect to Human Exposure to Radiofrequency Electromagnetic Fields 3 KHz to 300 GHz.* Nueva York: IEEE.

Kolmodin-Hedman, B, K Hansson Mild, E Jönsson, MC Anderson, A Eriksson. 1988. Health problems among operations of plastic welding machines and exposure to radiofrequency electromagnetic fields. *Int Arch Occup Environ Health* 60:243-247.

Krause, N. 1986. Exposure of people to static and time variable magnetic fields in technology, medicine, research and public life: Dosimetric aspects. En *Biological Effects of Static and ELF-Magnetic Fields*, dirigido por JH Bernhardt. Munchen: MMV Medizin Verlag.

Lövsund, P, KH Mild. 1978. *Low Frequency Electromagnetic Field Near Some Induction Heaters.* Estocolmo: Consejo de Salud y Seguridad en el Trabajo de Estocolmo.

Lövsund, P, PA Oberg, SEG Nilsson. 1982. ELF magnetic fields in electrosteel and welding industries. *Radio Sci* 17(5S):355-385.

Luckiesh, ML, L Holladay, AH Taylor. 1930. Reaction of untanned human skin to ultraviolet radiation. *J Optic Soc Am* 20:423-432.

McKinlay, A, JB Andersen, JH Bernhardt, M Grandolfo, K-A Hossmann, FE van Leeuwen, K Hansson Mild, AJ Swerdlow, L Verschaeve, B Veyret. Proposal for a research programme by a European Commission Expert Group. Possible health effects related to the use of radiotelephones. Informe no publicado.

McKinlay, AF, B Diffey. 1987. A reference action spectrum for ultraviolet induced erythema in human skin. En *Human Exposure to Ultraviolet Radiation: Risks and Regulations*, dirigido por WF Passchier y BFM Bosnjakovic. Nueva York: Excerpta Medica Division, Elsevier Science Publishers.

Mitbriet, IM, VD Manyachin. 1984. Influence of magnetic fields on the repair of bone. Moscú, Nauka, 292-296.

National Council on Radiation Protection and Measurements (NCRP). 1981. *Radiofrequency Electromagnetic Fields. Properties, Quantities and Units, Biophysical Interaction, and Measurements.* Bethesda, Maryland: NCRP.

—. 1986. *Biological Effects and Exposure Criteria for Radiofrequency Electromagnetic Fields.* Report No. 86. Bethesda, Maryland: NCRP.

National Radiological Protection Board (NRPB). 1992. *Electromagnetic Fields and the Risk of Cancer.* Vol. 3(1). Chilton, Reino Unido: NRPB.

—. 1993. *Restrictions On Human Exposure to Static and Time-Varying Electromagnetic Fields and Radiations.* Didcot, Reino Unido: NRPB.

National Research Council (NRC). 1996. *Possible health effects of exposure to residential electric and magnetic fields* . Washington: NAS Press. 314.

Oficina Internacional del Trabajo (OIT). 1993a. *Protection from Power Frequency Electric and Magnetic Fields.* Occupational Safety and Health Series, No. 69. Ginebra: OIT.

Olsen, EG, A Ringvold. 1982. Human corneal endothelium and ultraviolet radiation. *Acta Ophthalmol* 60:54-56.

Organización Mundial de la Salud (OMS), Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y Asociación Internacional para la Protección contra las Radiaciones (IRPA). 1984. *Extremely Low Frequency (ELF).* Environmental Health Criteria, No. 35. Ginebra: OMS.

Organización Mundial de la Salud (OMS). 1981. *Radiofrequency and microwaves.* Environmental Health Criteria, No.16. Ginebra: OMS.

—. 1982. *Lasers and Optical Radiation.* Environmental Health Criteria, No. 23. Ginebra: OMS.

—. 1989. *Non-Ionization Radiation Protection.* Copenhague: Oficina Regional de la OMS para Europa.

—. 1994. *Ultraviolet Radiation.* Environmental Health Criteria, No. 160. Ginebra: OMS.

—. 1987. *Magnetic Fields.* Environmental Health Criteria, No.69. Ginebra: OMS.

—. 1993. *Electromagnetic Fields 300 Hz to 300 GHz.* Environmental Health Criteria, No. 137. Ginebra: OMS.

Parrish, JA, KF Jaenicke, RR Anderson. 1982. Erythema and melanogenesis: Action spectra of normal human skin. *Photochem Photobiol* 36(2):187-191.

Passchier, WF, BFM Bosnjakovic. 1987. *Human Exposure to Ultraviolet Radiation: Risks and Regulations.* Nueva York: Excerpta Medica Division, Elsevier Science Publishers.

Pitts, DG, AP Cullen, PD Hacker. 1977a. Ocular effects of ultraviolet radiation from 295 to 365nm. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 16(10):932-939.

—. 1977b. *Ultraviolet Effects from 295 to 400nm in the Rabbit Eye.* Cincinnati, Ohio: National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH).

Pitts, DG, TJ Tredici. 1971. The effects of ultraviolet on the eye. *Am Ind Hyg Assoc J* 32(4):235-246.

Pitts, DG. 1974. The human ultraviolet action spectrum. *Am J Optom Phys Opt* 51(12):946-960.

Polk, C, E Postow. 1986. *CRC Handbook of Biological Effects of Electromagnetic Fields.* Boca Raton: CRC Press.

Repacholi, M, A Basten, V Gebski, D Noonan, J Finnic, AW Harris. (1997). Lymphomas in E-Pim1 transgenic mice exposed to pulsed 900 MHz electromagnetic fields. *Radiation research*, 147:631-640.

Repacholi, MH. 1985. Video display terminals -should operators be concerned? *Austalas Phys Eng Sci Med* 8(2):51-61.

—. 1990. Cancer from exposure to 50760 Hz electric and magnetic fields: A major scientific debate. *Austalas Phys Eng Sci Med* 13(1):4-17.

Riley, MV, S Susan, MI Peters, CA Schwartz. 1987. The effects of UVB irradiation on the corneal endothelium. *Curr Eye Res* 6(8):1021-1033.

Ringvold, A, M Davanger, EG Olsen. 1982. Changes of the corneal endothelium after ultraviolet radiation. *Acta Ophthalmol* 60:41-53.

Ringvold, A, M Davanger. 1985. Changes in the rabbit corneal stroma caused by UV radiation. *Acta Ophthalmol* 63:601-606.

Ringvold, A. 1980b. Aqueous humour and ultraviolet radiation. *Acta Ophthalmol* 58:69-82.

—. 1980a. Cornea and ultraviolet radiation. *Acta Ophthalmol* 58:63-68.

—. 1983. Damage of the corneal epithelium caused by ultraviolet radiation. *Acta Ophthalmol* 61:898-907.

Roberts, NJ, SM Michaelson. 1985. Epidemiological studies of human exposure to radiofrequency radiation: A critical review. *Int Arch Occup Environ Health* 56:169-178.

Roy, CR, KH Joyner, HP Gies, MJ Bangay. 1984. Measurement of electromagnetic radiation emitted from visual display terminals (VDTs). *Rad Prot Austral* 2(1):26-30.

Scotto, J, TR Fears, GB Gori. 1980. *Measurements of Ultraviolet Radiations in the United States and Comparisons With Skin Cancer Data.* Washington, DC: US Government Printing Office.

Sienkiewicz, ZJ, RD Saunder, CI Kowalczuk. 1991. *Biological Effects of Exposure to Non-Ionizing Electromagnetic Fields and Radiation. 11 Extremely Low Frequency Electric and Magnetic Fields.* Didcot, Reino Unido: National Radiation Protection Board.

Silverman, C. 1990. Epidemiological studies of cancer and electromagnetic fields. En el Capítulo 17 de *Biological Effects and Medical Applications of Electromagnetic Energy*, dirigido por OP Gandhi. Engelwood Cliffs, Nueva Jersey: Prentice Hall.

Sliney, DH, ML Wolbarsht. 1980. *Safety With Lasers and Other Optical Sources.* Nueva York: Plenum.

Sliney, DH. 1972. The merits of an envelope action spectrum for ultraviolet radiation exposure criteria. *Am Ind Hyg Assoc J* 33:644-653.

—. 1986. Physical factors in cataractogenesis: Ambient ultraviolet radiation and temperature. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 27(5):781-790.

—. 1987. Estimating the solar ultraviolet radiation exposure to an intraocular lens implant. *J Cataract Refract Surg* 13(5):296-301.

—. 1992. A safety manager's guide to the new welding filters. *Welding J* 71(9):45-47.

Stenson, S. 1982. Ocular findings in xeroderma pigmentosum: Report of two cases. *Ann Ophthalmol* 14(6):580-585.

Sterenborg, HJCM, JC van der Leun. 1987. Action spectra for tumourigenesis by ultraviolet radiation. En *Human Exposure to Ultraviolet Radiation: Risks and Regulations*, dirigido por WF Passchier y BFM Bosnjakovic. Nueva York: Excerpta Medica Division, Elsevier Science Publishers.

Stuchly, MA, DW Lecuyer. 1985. Induction heating and operator exposure to electromagnetiic fields. *Health Phys* 49:693-700.

—. 1989. Exposure to electromagnetic fields in arc welding. *Health Phys* 56:297-302.

Stuchly, MA. 1986. Human exposure to static and time-varying magnetic fields. *Health Phys* 51(2):215-225.

Szmigielski, S, M Bielec, S Lipski, G Sokolska. 1988. Immunologic and cancer related aspects of exposure to low-level microwave and radiofrequency fields. En *Modern Bioelectricity*, dirigido por AA Mario. Nueva York: Marcel Dekker.

Taylor, HR, SK West, FS Rosenthal, B Munoz, HS Newland, H Abbey, EA Emmett. 1988. Effect of ultraviolet radiation on cataract formation. *New Engl J Med* 319:1429-1433.

Tell, RA. 1983. Instrumentation for measurement of electromagnetic fields: Equipment, calibrations, and selected applications. En *Biological Effects and Dosimetry of Nonionizing Radiation, Radiofrequency and Microwave Energies*, dirigido por M Grandolfo, SM Michaelson y A Rindi. Nueva York: Plenum.

Urbach, F. 1969. *The Biologic Effects of Ultraviolet Radiation.* Nueva York: Pergamon.

Zaffanella, LE, DW DeNo. 1978. *Electrostatic and Electromagnetic Effects of Ultra-High-Voltage Transmission Lines.* Palo Alto, California: Electric Power Research Institute.

Zuclich, JA, JS Connolly. 1976. Ocular damage induced by near-ultraviolet laser radiation. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 15(9):760-764.

Otras lecturas recomendadas

American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH). 1990. *A Guide for Control of Laser Hazards.* Cincinnati, Ohio: ACGIH.

—. 1991. *Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents and Biological Exposure Indices, 1990-1991.* Cincinnati, Ohio: ACGIH.

Asociación Internacional para la Protección contra las Radiaciones (IRPA) y Comisión Internacional de Protección contra las Radiaciones no Ionizantes (ICNIRP). 1993a. Alleged radiation risks from visual display units. *Health Phys* 54:231-232.

Avdeev, PS, YD Berezin, YP Gudakovskii, VR Muratov, AG Murzin, VA Fromzel. 1978. Experimental determination of maximum permissible exposure to laser radiation of 1.54 p wavelength. *Soviet J Quant Electr* 8:137-141.

Bargeron, CB, OJ Deters, RA Farrell, RL McCally. 1989. Epithelial damage in rabbit corneas exposed to CO_2 laser radiation. *Health Phys* 56:85-95.

Bernhardt, JH. 1988b. Extremely low frequency (ELF) electric fields. En *Non-Ionizing Radiation: Physical Characteristics, Biological Effects and Health Hazard Assessment*, dirigido por MH Repacholi. Melbourne: Seminario Internacional sobre las Radiaciones No Ionizantes.

British Standards Organisation (BSO). 1984. *Radiation Safety of Laser Products and Systems.* Londres: BSO.

Deutsche Electrotechische Kommission. 1996. *Electromagnetic Field Limit.* Berlín: Deutsche Elektrotechische Kommission.

Deutsche Institut für Normung (DIN). 1984. *Radiation Safety of Laser Products.* Berlín: DIN.

Duchene, AR, MA Repacholi, J Lakey. 1991. *Guidelines for Limits of Human Exposure to Non-Ionizing*

Fankhauser, F. 1977. Physical and biological effects of laser radiation. *Klinische Monatsblatter fur Augenhielkunde* 170(2):219.

Gabel, VP, R Birngruber. 1981. A comparative study of threshold lesions in the retinae of human volunteers and rabbits. *Health Phys* 40(2):238-240.

Geeraets, WJ, ER Berry. 1968. Ocular spectral characteristics as related to hazards from lasers and other light sources. *Am J Ophthalmol* 66:15-20.

Gezonheidsraad (Consejo de Salud de los Países Bajos). 1979. *Recommendations Concerning Acceptable Levels of Electromagnetic Radiation in the Wavelength Range from 100 nm and Other Optical Radiation Sources.* Nueva York: Plenum.

Grandolfo, M, SM Michaelson, A Rindi. 1985. *Biological Effects and Dosimetry of Static and ELF Electromagnetic Fields.* Nueva York: Plenum Press.

Grossweiner, LI. 1984. Photochemistry of proteins: A review. *Curr Eye Res* 3(1):137-144.

Harding, JJ, KJ Dilley. 1976. Structural proteins of the mammalian lens: A review with emphasis on changes in development, aging and cataract. *Exp Eye Res* 22(1):1-73.

Kowalczuk, CI, ZJ Sienkiewicz, RD Saunder. 1991. *Biological Effect of Exposure to Non-Ionizing Electromagnetic Fields and Radiation. I-Static Electric and Magnetic Fields.* Chilton, Reino Unido: NRPB.

Ministerio de Sanidad de la URSS. 1982. *Normas sanitarias para el diseño y el uso del láser (en ruso).* Moscú: Ministerio de Sanidad de la URSS.

National Radiological Protection Board (NRPB). 1993. *Documents of the National Radiological Protection Board. Board Statement On Restrictions On Human Exposure to Static and Time Varying Electromagnetic Fields and Radiation.* Vol. 4, number 5. Chilton, Reino Unido: NRPB.

Oficina Internacional del Trabajo (OIT). 1993b. *Visual Display Units -Radiation Protection Guidance.* Occupational Safety and Health Series, No. 70. Ginebra: OIT.

Parrish, JA, RR Anderson, F Urbach, D Pitts. 1978. *UVA, Biological Effects of Ultraviolet Radiation With Emphasis On Human Responses to Longwave Radiation.* Nueva York: Plenum.

Pitts, DG, AP Cullen. 1981. Determination of infrared radiation levels for acute ocular cataractogenesis. *Arch Klin Ophthalmol* 217:285-297.

Sliney, DH, S Trokel. 1992. *Medical Lasers and Their Safe Use.* Nueva York: Springer-Verlag.

Sliney, DH. 1987. Unintentional exposure to ultraviolet radiation: Risk reduction and exposure limits. En *Human Exposure to Ultraviolet Radiation: Risks and Regulations*, dirigido por WF Passchier y BFM Bosnjakovic. Nueva York: Excerpta Medica Division, Elsevier Science Publishers.

Smith, KC. 1988. *The Science of Photobiology.* Nueva York: Plenum.

Stuck, BE, DJ Lund, ES Beatrice. 1981. Ocular effects of holmium (2.06 um) and erbium (1054 gm) laser radiation. *Health Phys* 40:835-846.

Suess, MJ, DA Benwell-Morison. 1989. *Non-ionizing protection.* OMS Regional Publications European Series, No. 25. Copenhague: Oficina Regional de la OMS para Europa.

Tung, WH, LTJ Chylack, UP Andley. 1988. Lens hexokinase deactivation by near-UV irradiation. *Curr Eye Res* 7(3):257-263.

Urbach, F, RW Gange. 1986. *The Biological Effects of UVA Radiation.* Westport, Connecticut: Praeger.

Willis, I, A Kligman, J Epstein. 1972. Effects of long ultraviolet rays on human skin: Photoprotective or photoaugmentative. *J Invest Dermatol* 59:416-420.

Yanuzzi, LA, YL Fisher, A Krueger, J Slater. 1987. Solar retinopathy, a photobiological and geophysical analysis. *Trans Am Ophthalmol Soc* 85:120-158.

Zuclich, JA. 1989. Ultraviolet-induced photochemical damage in ocular tissues. *Health Phys* 56(5):671-682.