Año: 2001

MINISTERIO DE TRABAJO Y ASUNTOS SOCIALES ESPAÑA
INSTITUTO NACIONAL DE SEGURIDAD E HIGIENE EN EL TRABAJO

NTP 598: Exposición a campos magnéticos estáticos

Exposition á champs magnétiques statiques
Static magnetic fields exposure

Las NTP son guías de buenas prácticas. Sus indicaciones no son obligatorias salvo que estén recogidas en una disposición normativa vigente. A efectos de valorar la pertinencia de las recomendaciones contenidas en una NTP concreta es conveniente tener en cuenta su fecha de edición.

Redactor:

Pablo Luna Mendaza
Ldo. Ciencias Químicas

CENTRO NACIONAL DE CONDICIONES DE TRABAJO

Introducción

Suele darse una cierta relación entre la variación con el tiempo de la intensidad de los campos eléctricos y magnéticos y la gravedad de los efectos perjudiciales, que pueden derivarse, para la salud en las personas a ellos expuestas. La opinión mayoritaria en el mundo científico parece ser que cuando no existe variación y se trata de valores constantes del campo, los riesgos para la salud son menores. A pesar de ello, conviene conocer las características de las exposiciones y los límites propuestos por las instituciones más solventes que han estudiado este tema. Entre estas últimas figuran la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la International Protection Association (IRPA) a través de su Non-Ionizing Radiation Committee (ICNIRP). En este documento básicamente se presentan las conclusiones de estas instituciones en lo que respecta a campos magnéticos estáticos.

Campos magnéticos. Magnitudes y unidades de medida

Se dice que en un punto del espacio existe un campo eléctrico cuando una carga eléctrica situada en él se ve sometida a una fuerza proporcional a la magnitud de la carga.

En una región del espacio se dice que existe un campo magnético, cuando al penetrar en ella una carga eléctrica móvil experimenta una fuerza que depende de la velocidad de la carga y de la magnitud de la misma.

Por otra parte, toda carga eléctrica genera un campo eléctrico a su alrededor. Cuando la carga tiene movimiento crea además un campo magnético, por lo que en la inmediaciones de un conductor de corriente eléctrica coexisten campos eléctricos y magnéticos (CEM). Si la corriente que circula es continua, ambos campos son estáticos (no varía su intensidad con el tiempo). Para cuantificar la presencia de los CEM se utilizan las magnitudes E (intensidad del campo eléctrico) y H (intensidad del campo magnético) y también B (inducción magnética o densidad del flujo magnético).

Estas dos últimas se relacionan a través de la siguiente expresión:

$$B = \bullet H \quad (1)$$

Donde • es la permeabilidad magnética del medio, que en el vacío vale $\bullet_o = 4\pi 10^{-7}$ Wb/Am. En el aire y en los materiales denominados paramagnéticos (p.e. aluminio), la permeabilidad magnética es prácticamente igual a la del vacío (ligeramente superior) mientras que en las sustancias diamagnéticas (p.e. agua, cobre, etc.) es ligeramente inferior. Los elementos ferromagnéticos (hierro, cobalto, etc.) poseen un valor de • muy superior (de 100 a 1000000 de veces la del vacío).

La fuerza que experimenta una carga eléctrica móvil en un campo magnético viene dada por la expresión:

$$F = Q\ v\ B \operatorname{sen} \alpha \quad (2)$$

siendo α el ángulo que forman v y B, Q es una carga eléctrica que circula a una velocidad v, introducida en un campo magnético cuya inducción magnética es B.

La inducción magnética B es, pues, una característica vectorial del campo magnético que se define mediante la expresión (2). Se

denomina intensidad del campo eléctrico (E) a la fuerza que actúa por unidad de carga, y sus unidades son Voltios/metro (V/m). Entre dos puntos afectados por un campo eléctrico E y separados por una distancia d, existe una diferencia de potencial V=E d. Este potencial se dice que es inducido por la presencia de un campo magnético.

En la tabla 1 se presentan las unidades más utilizadas para H y B.

La circulación de corriente eléctrica de intensidad I, por un conductor genera a su alrededor un campo magnético de inducción magnética B. El valor de B a una distancia d del conductor es:

$$B = \mu_o I/2\pi d \quad (3)$$

Si la intensidad de la corriente se expresa en amperios y la distancia en metros, la B calculada se expresa en tesla. La variación en el tiempo de la densidad del flujo magnético (B) puede ser sinusoidal o no. En el primer caso se incluye por ejemplo el campo magnético proveniente de la conducción de corriente eléctrica alterna y la variación de B es de 50 veces por segundo, es decir la frecuencia de su cíclica variación es f = 50 Hz en Europa (60 Hz en EEUU).

En la variación no sinusoidal se incluyen pulsos, gradientes etc. donde se genera un cierto valor de B/t en un punto del espacio determinado. Cuando la magnitud del campo magnético (o eléctrico) no varía con el tiempo, se denomina estático. El diagnóstico médico de imagen por espectroscopia de RMI (resonancia magnética de imagen) es el caso de un gran núcleo donde se genera un campo magnético que es en esencia estático pero que debido a que se efectúan barridos de campo sobre el paciente y al posible movimiento de operadores presentes en la cámara respecto al campo, supone la exposición a un campo magnético, cuya magnitud B puede ocasionalmente variar con el tiempo (dB/dt) en el interior del organismo.

TABLA 1
Unidades más utilizadas y factores de conversión entre ellas

	Densidad de flujo magnético o Inducción magnética B			Intensidad del campo magnético H	
	Tesla (T)	Gauss (G)	Gamma (γ)	Amperio/metro (A/m)	Oersted (Oe)
1 Tesla =	1	10^4	10^9	796000	10^4
1 Gauss =	10^{-4}	1	10^5	79,6	1
1 Gamma =	10^{-9}	10^{-5}	1	$0,796 \times 10^{-3}$	10^{-5}
1 Amperio/metro =	$1,257 \times 10^{-6}$	$1,257 \times 10^{-2}$	1257	1	$1,257 \times 10^{-2}$
1 Oersted =	10^{-4}	1	10^5	79,6	1

Efectos de los campos magnéticos estáticos

Los campos magnéticos estáticos pueden interaccionar con la materia viva mediante los siguientes mecanismos (ver tabla 2).

Inducción magnética

- *Interacciones electrodinámicas con electrolitos en movimiento*

  La acción de un campo magnético estático o variable en el tiempo sobre cargas eléctricas en movimiento se traduce en la aparición de fuerzas de Lorentz, cuya expresión matemática se expuso en la ecuación 2. Por esa razón, en presencia de un campo magnético, las cargas eléctricas que componen la sangre (electrolitos), al circular por los vasos sanguíneos con una cierta velocidad, pueden sufrir esas fuerzas y existirá un campo eléctrico que dará lugar a una diferencia de potencial entre las paredes del vaso.

  De esta forma y en el caso de la arteria aorta, suponiendo una velocidad máxima de la sangre de 0,63 m/s y un diámetro de la aorta de 2,5 centímetros, el potencial predecible en el interior de ese vaso es de 16 mV por cada Tesla de campo magnético estático externo. Se considera que el potencial eléctrico es pequeño para afectar al músculo cardíaco si el campo magnético es de unos pocos teslas.

  La conducción de impulsos eléctricos por el tejido nervioso puede considerarse así mismo como un flujo iónico sometido también a la acción de fuerzas de Lorentz, si la persona se encuentra expuesta a un campo magnético estático. Tanto la vía experimental como los modelos teóricos sugieren que por debajo de 2 T no se producen cambios observables en la velocidad de transmisión de los impulsos nerviosos.
- *Corrientes de Faraday*

  Los campos magnéticos variables en el tiempo inducen corrientes eléctricas en los tejidos. La densidad superficial de corriente inducida (J), que circula por una espira atravesada por un campo magnético variable en el tiempo depende del radio de la espira, de la densidad del flujo magnético B, de la frecuencia de variación de B y de las propiedades conductoras del medio material de que se trate. Aunque el mecanismo es propio de los campos magnéticos variables en el tiempo, el desplazamiento, sea alejamiento o acercamiento, de o hacia, un campo estático lleva consigo un gradiente de la inducción magnética en los tejidos. Propiamente la contracción del músculo cardíaco supone gradientes en el mismo cuando el individuo se halla en un campo magnético estático.

  Así pues, la rápida variación con el tiempo del campo magnético es la causa de la creación de corrientes eléctricas localizadas cuyos niveles exceden de los normales y que podría explicar ciertas perturbaciones biológicas que se han observado en

presencia de campos magnéticos pulsados, tales como los utilizados en medicina para la unión de huesos fracturados.

Este podría ser también el fundamento de la aparición de fenómenos denominados magnetofosfenos originados por una estimulación videosensorial que aparece en individuos expuestos a elevados campos magnéticos variables, y expresado por éstos como la presencia de pequeños puntos luminosos (flashes).

Como la densidad de corriente inducida por la variación del campo magnético es proporcional al radio de la espira que atraviesa el campo, pueden producirse elevadas densidades, a nivel macroscópico, pero muy pequeñas a nivel celular. El movimiento de una persona en un campo de 200 mT puede dar lugar a una corriente inducida de densidad (J) entre 10 y 100 mA/m^2, suponiendo una espira imaginaria de 30 cm de radio. El ICNIRP considera que estos valores de densidad de corriente no deben producir efectos perjudiciales en el funcionamiento del sistema nervioso, en el caso de exposición a campos estáticos.

TABLA 2
Interacción de campos magnéticos con la materia viva

Mecanismo	Tipo de acción	Efecto físico	Efecto biológico
Inducción magnética	Electrodinámica	Fuerzas de Lorenz	Efectos hemodinámicos
	Eléctrica	Corrientes de Faraday	Efectos en el sistema nervioso
			Efectos en el sistema cardiovascular
			Magnetofosfenos
Fenómenos magnetomecánicos	Orientación magnética	Minimizar energía libre molecular	Giro de orientación de moléculas en células retinianas
	Traslación magnética	Fuerzas sobre materiales para y ferromagnéticos	En ciertas especies que poseen partículas de magnetita
Interacciones electrónicas	Spin electrónico	Radicales libres	Modificación de la actividad enzimática

Interacciones magnetomecánicas

- *Orientación magnética*

  En presencia de un campo magnético estático, algunas moléculas experimentan la acción de un momento de fuerza que tiende a orientarlas respecto a dicho campo, de forma que la energía libre dentro del campo sea mínima. Este efecto se ha observado por simulación en moléculas con diferente comportamiento magnético según sus ejes de simetría (anisotropía).

  Este tipo de moléculas constituyen la base de la fotopigmentación retiniana formando parte de las células. La experimentación y el cálculo determinan un tiempo de 4 segundos para el giro de 90º C cuando algunas moléculas, responsables de la sensación cromática a nivel celular en la retina, se exponen a un campo magnético estático de 1 T. Este prolongado espacio de tiempo hace improbable que el fenómeno experimental de los magnetofosfenos se deba a este mecanismo.

  Por ahora no hay conocimiento de que este fenómeno de la orientación magnética molecular ocasione efectos importantes a niveles de B menores de 1 T.
- *Traslación magnetomecánica.*

  La presencia de campo magnético estático produce una fuerza que conlleva movimiento sobre materiales para y ferromagnéticos. Debido la escasez de este material en los organismos vivos la importancia de este tipo de interacción se reduce a los casos de prótesis o dispositivos insertos de aquellas características magnéticas.

Interacciones electrónicas

Algunas reacciones orgánicas que suponen transferencia electrónica mediante radicales con un electrón libre pueden ser sensibles a la presencia de un campo magnético al interferir éste en el momento de spin del electrón. Es el caso de reacciones con enzimas. Algunos autores han podido mostrar por experimentación, cambios en la actividad enzimática en presencia de campos magnéticos. El ICNIRP señala que probablemente, aunque este tipo de efecto necesita un valor relativamente pequeño de B para producirse, el tiempo de duración biológico de estos radicales es tan corto (picosegundos) que la interferencia es realmente pequeña.

Criterios de valoración

Los conocimientos científicos actuales no parecen indicar que se puedan producir efectos irreversibles perjudiciales para el ser humano, por exposiciones ocasionales a campos magnéticos estáticos cuya densidad de flujo magnético B no supere 2 T.

Desde el análisis de los mecanismos de interacción posibles parece que las exposiciones continuadas a campos magnéticos estáticos cuya densidad de flujo magnético B no supere 200 mT no deben producir consecuencias adversas para la salud. Estas son las conclusiones a las que llega el ICNIRP y en ellas basa los valores límite de referencia que propone para exposiciones laborales. Considera así mismo que la exposición continuada a campos magnéticos de B $\leq$ 40 mT es suficiente protección para el público en general (coeficiente 5 de seguridad).

En nuestro país el Real Decreto 1066/2001, de 28 de septiembre, por el que se aprueba el Reglamento que establece condiciones de protección del dominio público radioeléctrico, restricciones a las emisiones radioléctricas y medidas de protección sanitaria frente a emisiones radioléctricas y la Recomendación del Consejo de 12 de julio de 1999 (1999/519/CE) relativa a la exposición del público en general a campos electromagnéticos (0 Hz a 300 GHz) recogen exactamente los valores que propone el ICNIRP para exposiciones del

público en general, a campos y ondas electromagnéticas hasta 300 Gigahercios, lo que incluye a los campos magnéticos estáticos (frecuencia cero), si bien el Real Decreto 1066/2001 extiende su ámbito de aplicación a las emisiones de energía que estén relacionadas con la radiocomunicación.

La American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH) cuyos criterios de valoración de exposiciones laborales gozan de gran prestigio entre los higienistas, propone así mismo y publica anualmente unos valores límite de exposición laboral, que como puede comprobarse en la tabla 3, en lo que corresponde a la exposición continuada, es claramente inferior (60 mT).

TABLA 3
Campo magnético estático. Valores límite de referencia para la exposición

Criterio de valoración			Densidad de flujo magnético B	
			Exposición continuada	Valor techo
IRPA-ICNIRP (1998)	Exposición laboral	Cuerpo completo	200 mT	2 T
		Localizado en miembros (p.e. piernas)	-	5 T
	Exposición del público		40 mT	2 T (*)
	Portadores de marcapasos		-	0,5 mT
ACGIH (2002)	Exposición laboral	Cuerpo completo	60 mT	2 T
		Localizado en miembros. (p.e. piernas)	600 mT	5 T
	Portadores de marcapasos y prótesis metálicas		-	0,5 mT
Recomendación del Consejo (1999/519/CE)	Exposición del público		40 mT	2 T (*)
Real Decreto 1066/2001	Exposición del público		40 mT	2 T(*)

(*) Bajo condiciones controladas.

Exposiciones campos magnéticos estáticos

El campo magnético cuyo origen es el núcleo terrestre, da pie a un campo magnético natural cuyos valores de B oscilan según la zona entre 30 y 70 microteslas. La cercanía de conductores eléctricos de corriente continua y alta intensidad generan campos magnéticos estáticos a su alrededor. Ciertos procesos industriales entre los que se encuentran los que llevan a cabo operaciones de electrólisis, utilizan corriente eléctrica continua de varios miles de amperios de intensidad y baja tensión (100 V). Teóricamente la densidad de flujo magnético que podríamos hallar a una distancia d de los conductores de corriente, cuando la intensidad es I se calcula según la ecuación 3.

Si suponemos una intensidad de 200000 Amperios, el valor esperable de la densidad del flujo magnético es B = 40 mT a una distancia de 1 metro.

Los instrumentos de Resonancia Magnética, tanto de diagnostico médico por imagen (RMI) como los espectroscopios de uso en laboratorios fisico-químicos generan campos magnéticos a su alrededor (0,1-2T) anisotrópicamente según los tres ejes del espacio. Los fabricantes suelen indicar en los manuales de uso mediante mapas de campo magnético (curvas concéntricas, de igual valor de B) cuales son las distancias y los valores de B esperados. La limitación de acceso aún por señalización visible en el pavimento, es probablemente la medida preventiva de mayor eficacia y menor coste. Se trata entonces de trabajar y transitar normalmente más allá de la distancia que suponga una densidad de flujo magnético aceptable para la exposición continuada, y acceder a las proximidades del espectroscopio (y por lo tanto del núcleo) el menor número de veces posible y empleando cada vez el tiempo indispensable. Ante la ausencia de datos sobre niveles de B existentes, sean teóricos o provenientes de medición, se tendrá en cuanta que el valor de B varía de forma inversamente proporcional al cubo de la distancia.

En el caso de resonancia de diagnóstico médico (RMI) el instrumento se halla normalmente en una sala aislada en Jaula de Faraday, con un buen blindaje, y los operadores trabajan habitualmente en el exterior. Cuando no es así, debería reducirse el tiempo de exposición en el interior de la sala al mínimo imprescindible. De forma general, se puede estimar en 4 ó 5 metros la distancia al núcleo que conviene preservar.

Otras exposiciones a campo magnético estático se pueden dar en la fabricación de materiales magnéticos, ferrocarriles, separación de isótopos, aceleradores de partículas, reactores termonucleares y aplicaciones médicas diversas, Modernos sistemas de transporte basados en la levitación magnética pueden suponer niveles de B relativamente elevados (6-60 mT).

Existe un riesgo, de magnitud variable y no conocida, para las personas portadoras de marcapasos cardíacos y también otros dispositivos de funcionamiento electrónico y electromecánico y de prótesis insertas. Los posibles efectos de interferencia en el funcionamiento de aquéllos varían según los modelos, y no se suele disponer de datos concretos del comportamiento del instrumento en cuestión frente a un campo magnético. En muchas ocasiones, cuando los portadores son visitantes ocasionales de la empresa, estos pueden no estar informados de la posible exposición. Dada la obligatoriedad de informar de los riesgos que la empresa tiene respecto a las personas que trabajan en ella habitual u ocasionalmente, es necesario señalizar la existencia del campo magnético y su posible interferencia con marcapasos. Es recomendable además impedir el acceso a estas personas cuando el valor de B es superior a 0,5 mT.

Bibliografía

1. REAL DECRETO 1066/2001, de 28 de septiembre, por el que se aprueba el Reglamento que establece condiciones de protección del dominio público radioeléctrico, restricciones a las emisiones radioléctricas y medidas de protección sanitaria frente a emisiones radioléctricas.
2. RECOMENDACIÓN DEL CONSEJO de 12 de julio de 1999 (1999/519/CE) relativa a la exposición del público en general a campos electromagnéticos (0 Hz a 300 GHz)
3. AMERICAN CONFERENCE OF GOVERNMENTAL INDUSTRIAL HYGIENISTS (ACGIH). Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents. ACGIH Cincinnati. 2002
4. INTERNATIONAL COMMISSION ON NO-IONIZING RADIATION PROTECTION. Guidelines on limits of exposure to static magnetic fields ICNIRP Guidelines. 1994.
5. WORLD HEALTH ORGANIZATION-INTERNATIONAL RADIATION PROTECTION ASSOCIATION. Magnetic fields. Environmental Health Criteria n°- 69. Geneva 1987
6. POLK, CH and ELLIOT P. Handbook of biological effects of electromagnetic fields. CRC Press, inc., 2000 Corporate Blvd. NW. Boca Ratón, Florida, 3341. (1986)

© INSHT