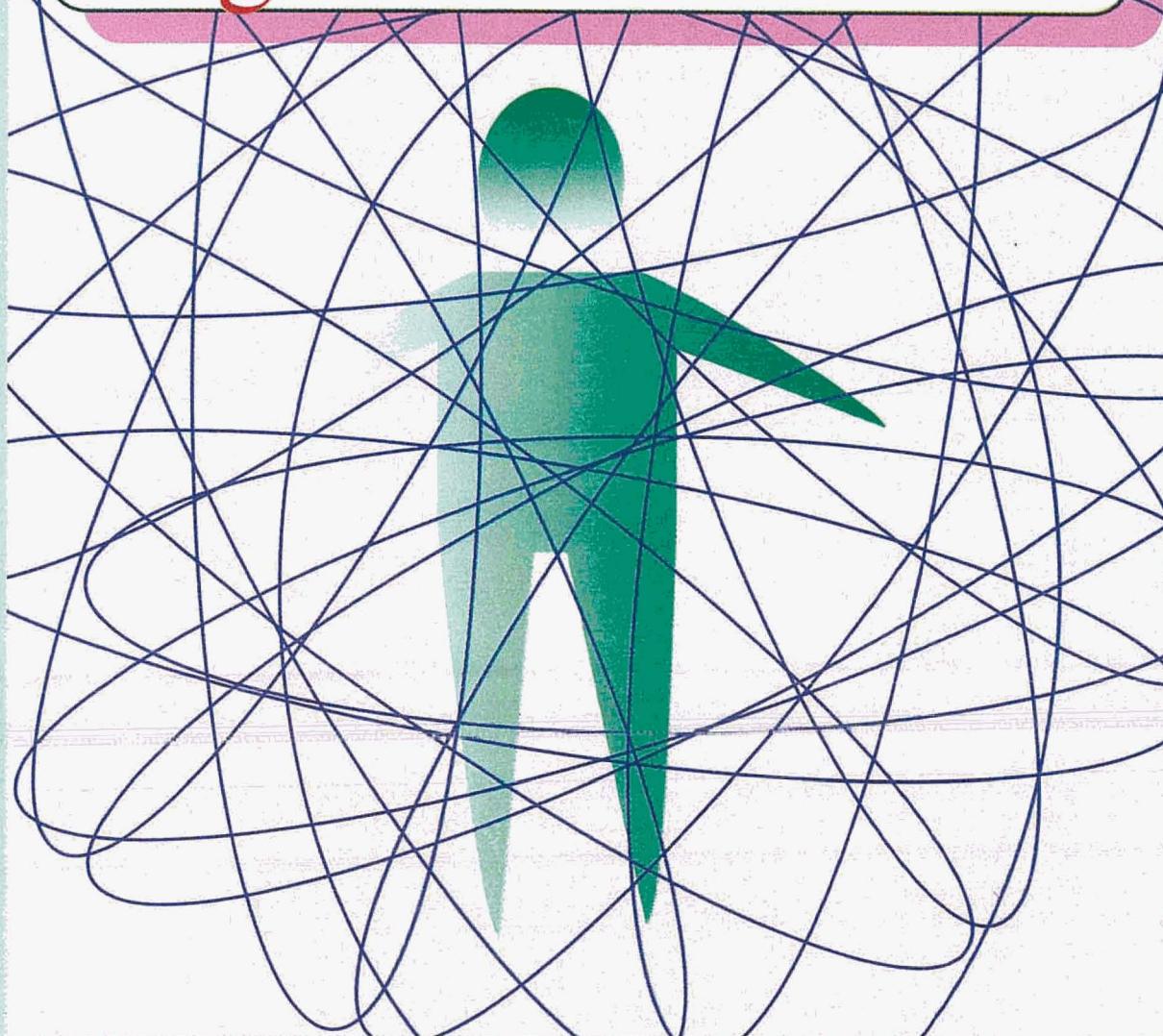


La exposición laboral a campos eléctricos y magnéticos estáticos.



DOCUMENTOS DIVULGATIVOS



MINISTERIO
DE TRABAJO
Y ASUNTOS SOCIALES



INSTITUTO NACIONAL
DE SEGURIDAD E HIGIENE
EN EL TRABAJO

LA EXPOSICIÓN LABORAL A CAMPOS ELÉCTRICOS Y MAGNÉTICOS ESTÁTICOS

Autores:

Guillermina Panadero y M^a José Rupérez
Centro Nacional de Nuevas Tecnologías. Madrid
Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo

Edita:

Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo
C/ Torrelaguna, 73 - 28027 Madrid

Composición e impresión:

Servicio de Ediciones y Publicaciones. INSHT Madrid

ISBN: 84-7425-682-8
Dep. Legal: M-50918-2004
NIPO: 211-04-004-1

ÍNDICE

	Pág.
1. INTRODUCCIÓN	5
2. FUNDAMENTOS FÍSICOS	8
2.1. Campo eléctrico.....	8
2.2. Corriente eléctrica	10
2.3. Campo magnético	11
2.4. Magnitudes y unidades	14
3. EFECTOS SOBRE LA SALUD.....	14
3.1. Mecanismos de interacción con la materia viva	17
3.2. Revisión de estudios de exposición de población.....	18
3.3. Revisión de estudios de laboratorio y epidemiológicos	21
4. FUENTES DE EXPOSICIÓN LABORAL	27
4.1. Resonancia magnética nuclear	27
4.2. Procesos electrolíticos.....	30
4.3. Aceleradores de partículas	32
4.4. Otros	33
5. CRITERIOS DE VALORACIÓN	35
5.1. El proyecto internacional CEM de la OMS	40
6. CASOS PRÁCTICOS DE EVALUACIÓN.....	42
6.1. Caso 1: Exposición laboral a campo magnético estático en un laboratorio de espectroscopía de resonancia magnética nuclear.....	42

	Pág.
6.2. Caso 2: Exposición laboral a campo magnético estático generado por un espectrómetro de resonancia ciclotrónica de iones en un centro de investigación	52
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	58
ANEXO: Valores Límite para campos estáticos	61

1. INTRODUCCIÓN

Los efectos de los campos electromagnéticos han suscitado interés y curiosidad desde la antigüedad. Las primeras observaciones conocidas sobre los fenómenos eléctricos se remontan a Tales de Mileto (624-546 a.C.), que también formuló una curiosa teoría (llamada hilozoismo) para intentar explicar la atracción de los imanes entre ellos y con pequeños pedazos de hierro, afirmando que los imanes tenían vida y además producían sobre los pedazos de hierro una animación que les impulsaba a moverse.

William Gilbert, tras varios años de experimentos con esferas imantadas, llegó a afirmar, en el año 1600, la existencia del campo magnético terrestre, cuyo origen situaba en el interior de la Tierra. También diferenció, por primera vez, lo que hoy denominamos materiales conductores de los que no lo eran.

A finales del siglo XVIII, Coulomb formuló la ley que rige cuantitativamente la electrostática. Unos años después, Gauss demostró que el campo magnético terrestre era un campo estático, de origen interno (hoy sabemos que, es así en un 94% aproximadamente) y que deriva de un potencial (1).

Finalmente, en 1860, Maxwell propuso las ecuaciones que llevan su nombre y que constituyen la síntesis de las teorías eléctrica y magnética, que hasta entonces se habían desarrollado por separado. A partir de entonces, podemos decir que a todos los niveles, el crecimiento del electromagnetismo ha sido extraordinario.

El electromagnetismo tiene muy diversas manifestaciones: los rayos X, la luz ultravioleta, las ondas de radio y los campos estáticos son todas emisiones electromagnéticas diferentes, que se pueden caracterizar por su frecuencia (ν), longitud de onda (λ) o energía (E), ya que los tres parámetros están relacionados entre sí. Esta caracterización y la intensidad del campo determinarán los efectos de la emisión en los sistemas biológicos (2).

La frecuencia es el ritmo con el que el campo electromagnético cambia de dirección y/o amplitud; generalmente se mide en hercios (Hz), siendo 1 Hz un cambio o ciclo por segundo ($\text{Hz} = \text{s}^{-1}$), aunque cuando la frecuencia es alta, normalmente se utilizan múltiplos del hercio, en particular el kilohercio (kHz), el megahercio (MHz) y el gigahercio (GHz), que equivalen a mil, un millón y mil millones de hercios, respectivamente.

La frecuencia se relaciona con la longitud de onda y con la energía mediante las ecuaciones:

$$\nu = \lambda \cdot v \quad \text{y} \quad E = h \cdot v$$

donde: v es la velocidad de propagación y h es la constante de Planck. De estas relaciones se deduce que la frecuencia es directamente proporcional a la energía e inversamente proporcional a la longitud de onda.

A muy altas frecuencias, la energía transportada es suficiente para romper los enlaces atómicos que mantienen unidas las moléculas, es decir, para producir ionización (conversión de átomos o partes de moléculas en iones con carga eléctrica positiva o negativa). A esa parte del espectro electromagnético se le denomina "radiación ionizante". Por convenio, se consideran ionizantes las radiaciones de frecuencia superior a $3 \cdot 10^{15}$ Hz (equivalente a 100 nm y a 12,4 eV) y no ionizantes las que oscilan a una frecuencia inferior a esa cifra.

Las radiaciones no ionizantes se dividen a su vez en:

- Radiaciones Ópticas, con frecuencias entre $3 \cdot 10^{12}$ Hz y $3 \cdot 10^{15}$ Hz
- Campos electromagnéticos (CEM), en el intervalo de frecuencias de 0 Hz a 300 GHz. Debido a sus características físicas también se denominan "Campos" y "Ondas". Dentro de este apartado se incluyen los campos eléctricos y magnéticos estáticos o campos de corriente continua, que son el objeto de este documento.

Los **campos estáticos** se caracterizan porque su intensidad no varía con el tiempo y se puede decir que tienen una frecuencia de 0 Hz y una longitud de onda infinita; por tanto, las emisiones eléctricas y magnéticas estáticas no producen radiación (3).

En general, las emisiones electromagnéticas producen tanto energía radiante (radiación), como no radiante (campos). La energía radiada se propaga a gran distancia de la fuente una vez emitida, y existe aun cuando la fuente se apaga; en cambio, los campos estáticos no se proyectan al espacio y cesan al apagarse la fuente.

En los últimos años, el desarrollo de nuevas tecnologías que utilizan campos eléctricos y magnéticos estáticos ha incrementado la posibilidad de la exposición humana a estos campos y ha provocado cierta preocupación sobre sus posibles efectos en la salud. Este es especialmente el caso de la industria, el transporte, la transmisión de energía eléctrica, la investigación y la medicina (2). La rápida expansión de aparatos médicos, la progresiva introducción de sistemas de transporte por levitación magnética basados en el uso de campos magnetostáticos intensos, así como el cada vez mayor número de personas con implantes ferromagnéticos, marcapasos y otros aparatos electrónicos implantados que pueden verse afectados por estos campos, incrementará la posibilidad de la exposición, tanto laboral como del resto de la población.

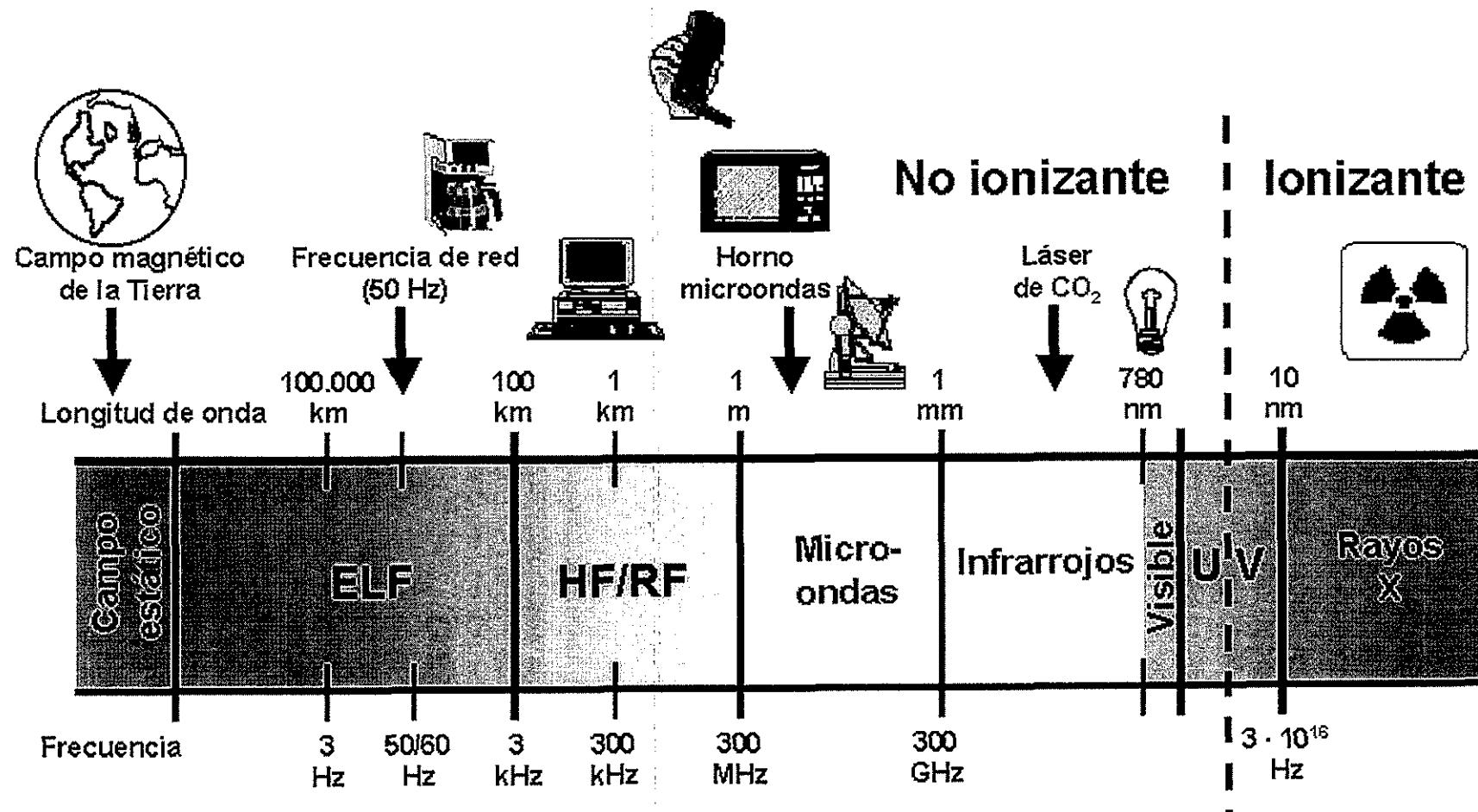


Figura 1.- Espectro electromagnético

En un principio, se estudiaron conjuntamente el campo eléctrico y el magnético, pero en la actualidad se considera que únicamente la componente magnética del campo puede ser relevante para producir posibles efectos en la salud, ya que los campos electrostáticos no penetran en el cuerpo humano. Pese al gran número de estudios realizados, aún no se dispone de suficiente información sobre los efectos de la exposición, a largo plazo, a campos magnéticos estáticos a los niveles existentes en el entorno laboral, lo que ha llevado a la Organización Mundial de la Salud (OMS) a incluir estos campos en su Proyecto Internacional CEM (2), iniciado en 1996, cuya conclusión está prevista para el año 2007, en que se espera tener datos suficientes para realizar una evaluación de riesgos más definitiva.

Mientras tanto, con objeto de asegurar que la exposición a los campos eléctricos y magnéticos estáticos no tenga efectos perjudiciales para la salud, que los equipos que los generan sean inocuos y que su utilización no cause interferencias eléctricas con otros aparatos, los organismos con competencias en prevención han establecido diversas directrices y normas internacionales, basadas en los estudios biológicos y epidemiológicos disponibles hasta la fecha, que se están utilizando como criterios de referencia.

2. FUNDAMENTOS FÍSICOS

Mientras que los campos eléctricos están asociados a la presencia de cargas eléctricas, los campos magnéticos resultan del movimiento de dichas cargas, es decir, de la corriente eléctrica. De igual forma, los campos magnéticos crean campos eléctricos, mientras haya variación del flujo. Por tanto, ambos tipos de campo (eléctrico y magnético) están íntimamente relacionados y se estudian conjuntamente en la parte de la Física denominada Electromagnetismo (4) (5).

2.1. CAMPO ELÉCTRICO

Todo cuerpo material está formado por átomos, integrados por partículas elementales: protones y neutrones en el núcleo y electrones, girando alrededor del mismo. Los electrones abandonan con facilidad los átomos y también, con cierta facilidad, son susceptibles de fijarse en otros átomos. Tanto en un caso como en el otro, se rompe el equilibrio eléctrico que existe normalmente entre protones y electrones; una falta de éstos hace que predomine la carga eléctrica positiva, y, análogamente, un exceso de electrones hace predominar la carga eléctrica negativa. Las cargas del mismo signo se repelen y las de signo contrario se atraen.

Toda carga crea a su alrededor un campo eléctrico. Si situamos en un punto de él una carga q , actuará sobre ella una fuerza F , que depende del valor de q y del lugar

en que se coloca. Representando por **E** el factor que tiene en cuenta esta última circunstancia, tendremos que:

$$\mathbf{F} = \mathbf{E} \cdot \mathbf{q}$$

El factor **E** es un vector que se llama **intensidad del campo eléctrico** en el punto considerado y representa la fuerza que ejerce el campo sobre la unidad de carga colocada en aquel punto.

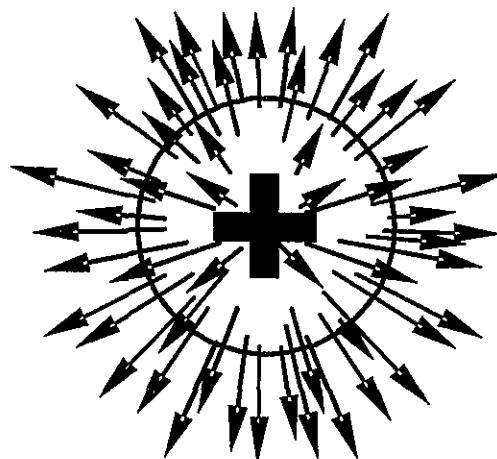


Figura 2.- Las cargas eléctricas crean campos eléctricos

La dirección y el sentido del vector **E** son los de la fuerza **F**, su unidad en el Sistema Internacional (SI) es el voltio por metro (V/m) y es la magnitud utilizada para medir la exposición a campos eléctricos.

El vector **E** también puede expresarse a partir de la Ley de Coulomb como:

$$\mathbf{E} = \mathbf{K} \cdot \mathbf{q} / r^2$$

donde **K** depende del medio en que nos encontramos y **r** es la distancia entre la carga que crea el campo y la que hemos situado dentro de él. De aquí se deduce que la Intensidad del campo eléctrico creado por una carga es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia a dicha carga, con lo que el campo disminuye rápidamente cuando la distancia aumenta.

El vector **E** está íntimamente ligado con una magnitud escalar denominada **potencial eléctrico (V)**. Tomando un punto arbitrario dentro del campo como origen de potenciales ($V = 0$), cualquier otro punto quedará caracterizado por el valor en él del vector **E** y del potencial **V**, referido al punto origen. Así, el valor del potencial en un punto está indeterminado, pues depende del punto origen elegido. Sin embar-

go, la diferencia de potencial entre dos puntos vale siempre lo mismo y es independiente del origen. La **diferencia de potencial** entre dos puntos, también llamada **tensión**, se define como el trabajo que hay que realizar contra las fuerzas del campo para llevar la carga eléctrica unidad de uno a otro punto, a lo largo de una serie de estados de equilibrio. Su unidad en el Sistema Internacional es el voltio (V).

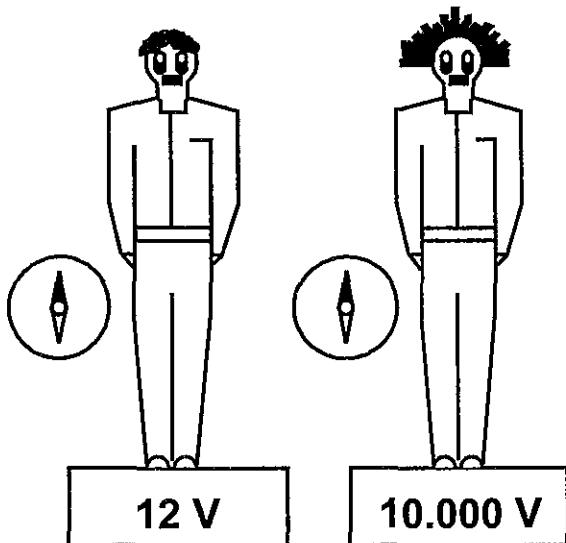


Figura 3.- El campo eléctrico depende de la diferencia de potencial

En el campo creado por una carga puntual, el potencial en un punto viene dado por la expresión:

$$V = K \cdot q / r$$

Comparando esta ecuación con la utilizada para expresar el vector **E**, deducimos que la intensidad del campo eléctrico es directamente proporcional al nivel de tensión.

2.2. CORRIENTE ELÉCTRICA

La corriente eléctrica consiste en un movimiento de cargas. En general, decimos que una corriente eléctrica se origina siempre que se unen, mediante un conductor, dos puntos entre los que existe una diferencia de potencial eléctrico o tensión. Por definición, se llama intensidad de una corriente eléctrica (**I**) a la cantidad total de cargas que atraviesa cualquier sección del conductor en la unidad de tiempo. Su unidad en el SI es el amperio (**A**) y es la magnitud utilizada para medir la exposición a corrientes de contacto.

Si la corriente se distribuye uniformemente a través de la superficie de área **S** de la sección del conductor, se puede definir una densidad media de corriente (**J**) por la relación:

$$J = I / S$$

La densidad de corriente (**J**) es un vector característico de cada punto del conductor y está dirigido en el sentido contrario al que se mueve una carga negativa situada en dicho punto. Su unidad en el SI es el amperio por metro cuadrado (A/m^2) y se utiliza para medir la **densidad de corriente inducida** por la exposición a campos estáticos o alternos de baja frecuencia.

El cociente entre la densidad de corriente (**J**) en un conductor dado y la intensidad del campo eléctrico (**E**) que le da origen es una magnitud característica de la natu-

raleza del conductor y se denomina **conductividad** (σ). Cuando el conductor es isótropo, σ es un escalar y los vectores **J** y **E** tienen la misma dirección. En el SI se mide en Siemens por metro (S/m).

2.3 CAMPO MAGNÉTICO

Los campos magnéticos son producidos por cargas en movimiento, es decir, por corrientes eléctricas, o bien por imanes permanentes. Por lo tanto, toda corriente eléctrica origina un campo magnético asociado.

Por definición, la Intensidad del campo magnético (**H**) en un punto es un vector que representa la fuerza ejercida sobre un elemento de corriente en dicho punto y cuyo módulo es:

$$\mathbf{H} = \mathbf{K} \cdot \mathbf{I}$$

donde **K** es un factor que depende del conductor. De aquí se deduce que el campo magnético es directamente proporcional a la intensidad de la corriente que recorre el conductor. La unidad del vector **H** en el SI es el amperio por metro (A/m).

El campo magnético también puede especificarse por medio de otro vector llamado inducción magnética o densidad de flujo magnético (**B**), que juega un papel análogo al del vector **E**, en el campo eléctrico. Esta magnitud, **B**, se introduce experimentalmente en la Física, determinando que el valor de la fuerza **F**, que actúa sobre una carga **q**, que se mueve con una velocidad **v** en el seno de un campo magnético, viene dado por la expresión:

$$\mathbf{F} = \mathbf{q} \cdot \mathbf{v} \times \mathbf{B}$$

Esta expresión es completamente general, lo que quiere decir que la fuerza **F**, llamada de Lorentz, aparece siempre de forma que las cargas en movimiento están sujetas a una fuerza perpendicular al plano formado por **v** y **B**.

La unidad de medida de la densidad de flujo magnético en el SI es la Tesla (T), pero debido a que los valores de inducción magnética que podemos encontrar abarcan varios órdenes de magnitud, en muchas ocasiones se utilizan submúltiplos, en particular militesla ($1\text{mT} = 10^{-3}\text{T}$) y microtesla ($1\mu\text{T} = 10^{-6}\text{T}$), aunque muchas veces todavía se sigue utilizando la antigua unidad del Sistema c.g.s. denominada Gauss ($1\text{T} = 10^4\text{ G}$). La densidad de flujo magnético es la magnitud más relevante para cuantificar la exposición a campos magnéticos estáticos.

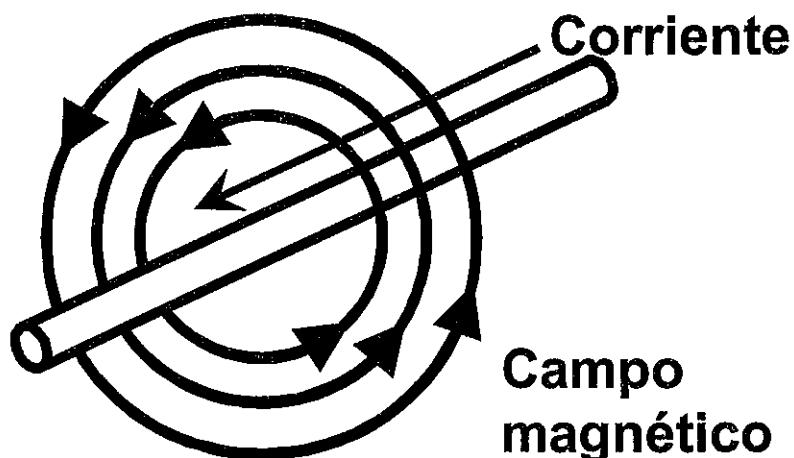


Figura 4.- Las corrientes eléctricas crean campos magnéticos

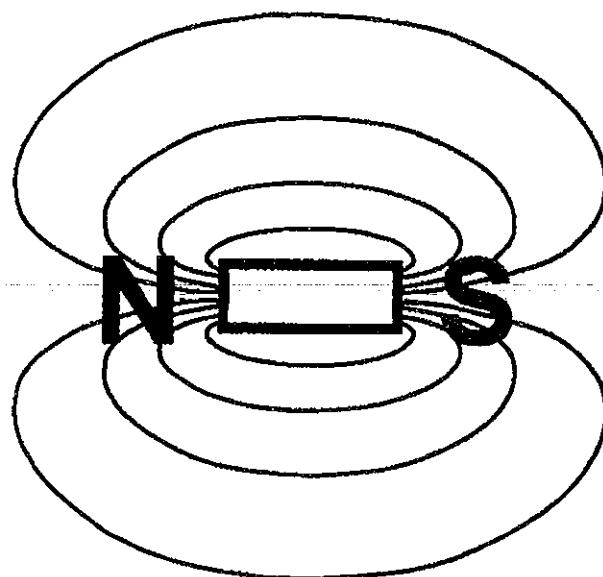


Figura 5.- Los imanes crean líneas de flujo magnético

Los vectores **B** y **H** no son independientes entre sí. Quiere esto decir que en cualquier punto del espacio donde existe una perturbación magnética, caracterizada por un valor del campo magnético **H**, la densidad de flujo magnético toma un valor tal que:

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$$

Siendo μ una constante llamada "permeabilidad magnética", que es característica del medio en que nos encontramos. En el vacío, y aproximadamente en cualquier

material no magnético (incluido el biológico), se representa como μ_0 y toma el valor de $4\pi \cdot 10^{-7}$ Henrios por metro (H/m), que es su unidad en el SI.

El valor de la inducción magnética en el campo creado por un elemento de conductor de longitud l , recorrido por una corriente de intensidad I , en un punto del espacio, viene dado por la Ley de Biot y Savart:

$$B = \mu \cdot I \cdot l \times r / 4 \pi r^3$$

Siendo r un vector con origen en el elemento de conductor y extremo en el punto donde calculamos la inducción magnética. De aquí se deduce que también el campo magnético disminuye rápidamente al aumentar la distancia.

El flujo magnético (Φ), dentro de una superficie dada, es el producto de esa superficie por la componente normal a la misma de la densidad de flujo magnético. La unidad de flujo magnético en el SI es el Weber (Wb).

Por último, hay que indicar que Faraday puso de manifiesto el fenómeno de la inducción electromagnética, que puede resumirse de esta manera: Cuando por cualquier procedimiento se hace variar el flujo magnético que atraviesa un circuito cerrado, se origina en él una corriente eléctrica, llamada "corriente inducida". El sentido de esta corriente es tal que crea un campo magnético que se opone a la variación del flujo (Ley de Lenz).

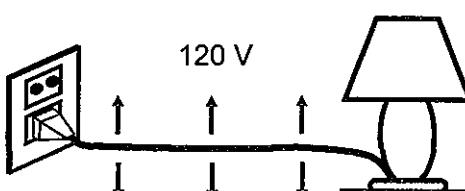
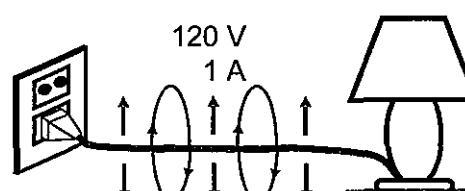
CAMPO ELÉCTRICO	CAMPO MAGNÉTICO
<ul style="list-style-type: none"> Producido por una diferencia de potencial  <p>Lámpara enchufada a la red pero desconectada. Se produce un campo eléctrico</p> <ul style="list-style-type: none"> Se mide en V/m o en KV/m Fácilmente apantallado por objetos conductores como árboles y edificios 	<ul style="list-style-type: none"> Producido por la corriente eléctrica  <p>Lámpara enchufada y conectada. Se origina además un campo magnético</p> <ul style="list-style-type: none"> Se mide en tesla (T) o en gauss (G) Difícil de apantallar
<ul style="list-style-type: none"> su intensidad disminuye al aumentar la distancia a la fuente 	

Figura 6.- Comparación entre campo eléctrico y magnético

2.4 MAGNITUDES Y UNIDADES

A continuación se resumen las principales magnitudes utilizadas para estudiar la exposición a campos eléctricos y magnéticos estáticos y sus correspondientes unidades del Sistema Internacional.

Tabla 1.- Magnitudes y unidades de campos estáticos

MAGNITUD	SÍMBOLO	UNIDAD	SÍMBOLO
Intensidad de campo eléctrico	E	Voltio por metro	V/m
Intensidad de corriente eléctrica	I	Amperios	A
Densidad de corriente eléctrica	J	Amperios por metro cuadrado	A/m ²
Conductividad	σ	Siemens por metro	S/m
Intensidad de campo magnético	H	Amperios por metro	A/m
Densidad de flujo magnético	B	Tesla	T
Permeabilidad magnética	μ	Henrios por metro	H/m
Flujo magnético	Φ	Weber	Wb

3. EFECTOS SOBRE LA SALUD

Para que los campos electromagnéticos (CEM) produzcan efectos sobre la salud, antes es necesario que exista una interacción entre el campo y las estructuras biológicas, que provoque algún cambio fisiológico perceptible o detectable. Estos cambios se denominan "efectos biológicos" y se caracterizan por la existencia de una transferencia energética, que genera una señal que puede ser percibida y amplificada por las células para producir posteriormente una respuesta del organismo.

Efectos biológicos de los campos electromagnéticos

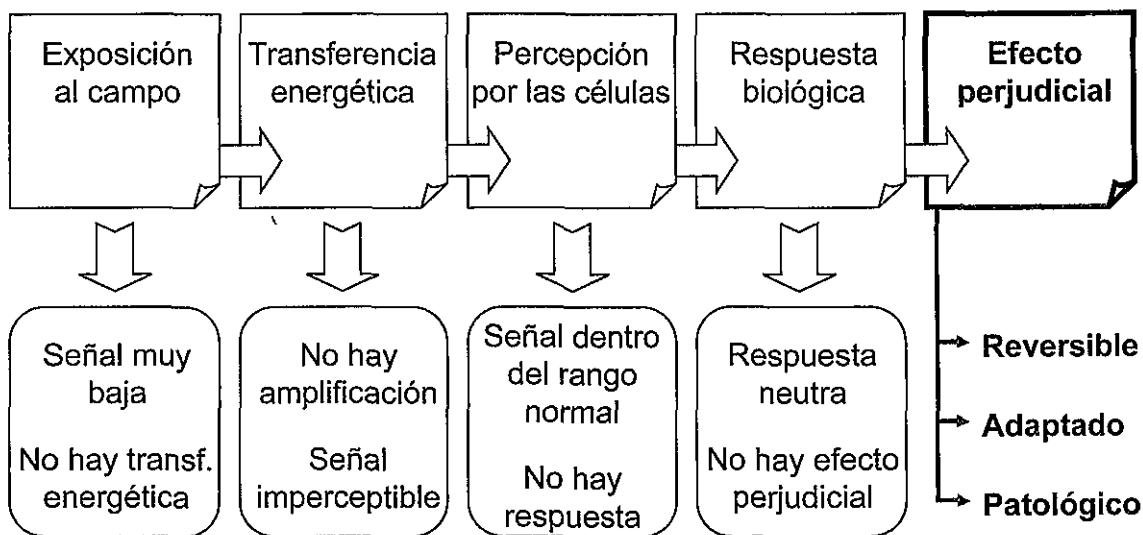


Figura 7 - Efectos biológicos de los campos electromagnéticos

Los efectos biológicos pueden a veces, pero no siempre, resultar perjudiciales para la salud. Esto sucede cuando se sobrepasa la capacidad normal de compensación del organismo, originándose algún proceso patológico, como vemos en la figura 7 (2).

La acción principal ejercida por los campos estáticos en los sistemas biológicos es la inducción de cargas y corrientes eléctricas, aunque se ha comprobado la existencia de otros efectos, que podrían resultar perjudiciales para la salud en el caso de intensidades de campo muy elevadas.

Los campos electrostáticos no penetran en el organismo humano, que es conductor de la electricidad, por lo que su interior, como el de cualquier material conductor, está protegido del campo; sin embargo, inducen una carga eléctrica en la superficie del cuerpo expuesta, que puede percibirse por el movimiento del vello cutáneo, si el campo es fuerte. Además, al tocar un objeto metálico en estas condiciones, existe el riesgo de sufrir una descarga eléctrica. Aparte de estos efectos, no se conoce otra acción directa de los campos electrostáticos sobre el organismo.

Por el contrario, los campos magnéticos estáticos tienen prácticamente la misma intensidad dentro del cuerpo que fuera de él, produciéndose una interacción con las cargas en movimiento (iones, proteínas, etc.) y con el material magnético que se encuentra en los tejidos por medio de varios mecanismos físicos, que explicaremos posteriormente, aunque, con los niveles de campo existentes habitualmente, el único efecto significativo es la inducción de campos electrostáticos y corrien-

tes eléctricas en los tejidos. Así, mientras que los campos eléctricos externos no pueden penetrar en el cuerpo, los campos magnéticos externos producen campos eléctricos generados dentro de él.

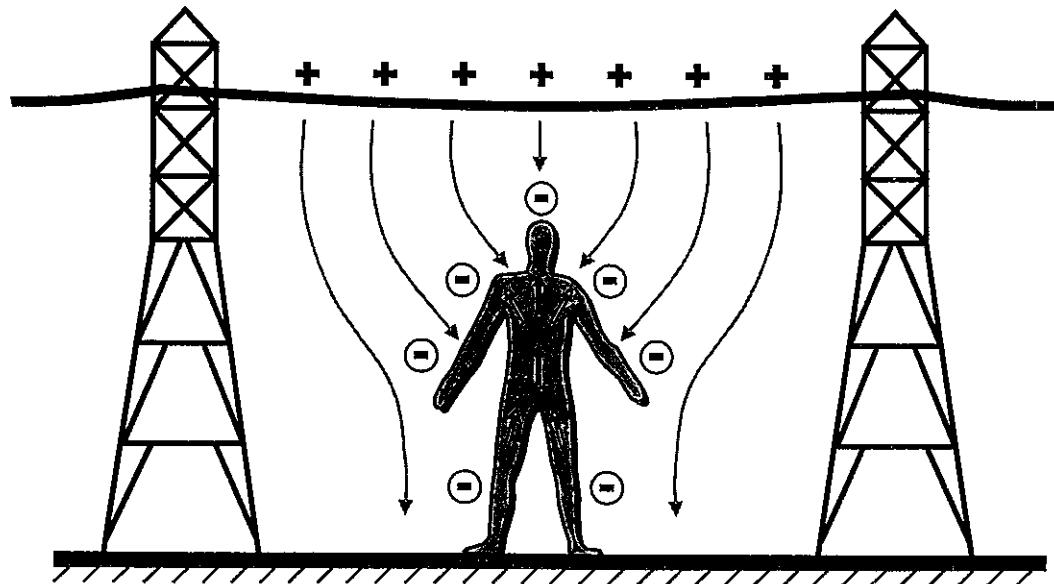


Figura 8.- Acoplamiento de campo eléctrico y cuerpo humano

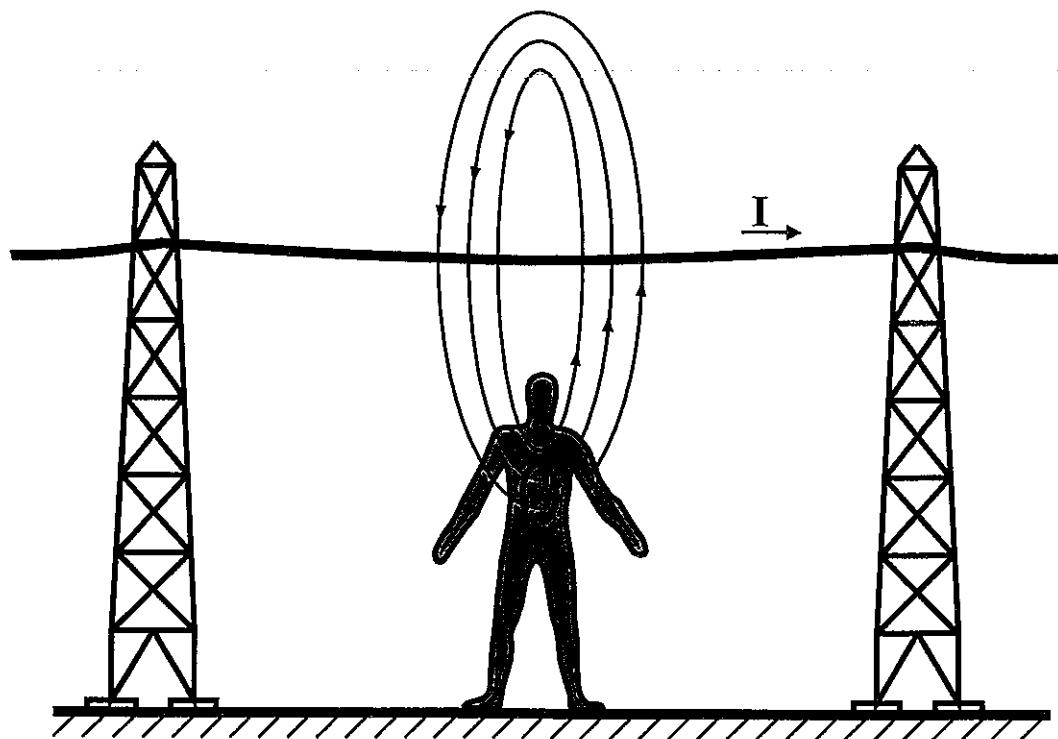


Figura 9.- Acoplamiento de campo magnético y cuerpo humano

3.1. MECANISMOS DE INTERACCIÓN

Los mecanismos físicos a través de los cuales interactúan los campos magnétostáticos con la materia viva son los siguientes: inducción magnética, efectos magnetomecánicos e interacciones electrónicas (6).

Inducción magnética.- Comprende dos tipos de interacción:

- Interacciones electrodinámicas con electrolitos en movimiento.- Los campos estáticos ejercen fuerzas de Lorentz sobre los portadores de carga iónicos en movimiento, lo que da lugar a la inducción de campos eléctricos y corrientes; se sabe que esta interacción se produce en el torrente sanguíneo.
- Corrientes de Faraday.- Los campos magnéticos variables en el tiempo inducen corrientes en los tejidos vivos, siguiendo la Ley de inducción de Faraday. Este mecanismo también puede ser activado en el caso de campos magnétostáticos, debido al movimiento de las personas en los lugares en que existen este tipo de campos.

Efectos magnetomecánicos. Los tipos de efectos mecánicos que un campo magnético estático (CME) puede ejercer son:

- Orientación magnética.- En un CME uniforme, tanto las moléculas diamagnéticas (que reaccionan ante un campo magnético externo, oponiéndose al mismo y rebajando su intensidad) como las paramagnéticas (que reaccionan imanándose en la dirección del campo inductor) experimentan un par que tiende a orientarlas en una configuración que minimice su energía libre dentro del campo. Este efecto ha sido bien estudiado en conjuntos de macromoléculas diamagnéticas con diferentes susceptibilidades magnéticas a lo largo de los principales ejes de simetría, incluidas las células pigmentadas y bastones de la membrana de la retina y los glóbulos falciformes desoxigenados. En particular, deben tenerse en cuenta los riesgos para las personas aquejadas de anemia falciforme, debido a la relativamente alta incidencia de esta patología.
- Traslación magnetomecánica.- Los CME producen una fuerza en los materiales ferromagnéticos (que ante un campo magnético externo presentan una imanación como los paramagnéticos, pero de intensidad muy superior, conservando una imanación residual una vez eliminado el campo inductor) y paramagnéticos, que da lugar a un movimiento de traslación. Debido a la limitada cantidad de material magnético que existe en la mayoría de los seres vivos, la influencia de este efecto en las funciones biológicas es despreciable; sin embargo, campos tan débiles como el terrestre pueden ejercer fuerzas significativas en las cadenas de partículas de magnetita (Fe_3O_4), que se encuentran en algunas especies.

	Eléctrico	Magnético
Mecanismo de interacción	Inducción cargas eléctricas superficiales	Inducción de campos eléctricos superficiales en fluidos en movimiento y tejidos.
Efecto adverso	Molestias de efecto superficial Choque eléctrico	Efectos sobre los sistemas: nervioso central vascular
Magnitudes dosimétricas	Intensidad de campo eléctrico externo	Densidad de flujo magnético externo
Nivel de referencia	E(V/m)	B(T)

Figura 10.- Mecanismos de interacción. Fuente: ICNIRP Health Physics 2002, Vol.82, Nº 4

Interacciones electrónicas. Ciertas reacciones químicas implican a radicales con electrones en estados intermedios, en los que la interacción de Zeeman (las líneas espectrales de los átomos situados en un campo magnético se subdividen) con CME de baja intensidad produce un efecto en el spin electrónico de esos electrones. Debido al corto tiempo de vida de estos electrones, probablemente esta interacción ejerce sólo una pequeña y puede que despreciable influencia en el rendimiento de los productos de la reacción química.

3.2 REVISIÓN DE ESTUDIOS DE EXPOSICIÓN A CAMPOS ELÉCTRICOS Y MAGNÉTICOS ESTÁTICOS

A continuación, se presentan los valores de campos estáticos medidos o calculados en varios ambientes representativos de actividades generales y una enumeración de actividades profesionales en las que puede haber exposición a este tipo de campos.

3.2.1 Exposición de la población

La exposición residencial y ambiental a campos eléctricos y magnéticos estáticos está dominada por los campos naturales de la Tierra. Existe un campo electrostático, creado por las cargas eléctricas presentes en la ionosfera, que varía entre 100

y 400 V/m en condiciones de buen tiempo, llegando a tener un valor de hasta 20000 V/m, con fuerte tormenta.

El campo magnético terrestre es en su mayor parte (sobre el 94%) de origen interno, debido teóricamente a las corrientes eléctricas que se generan en el núcleo y deriva de un potencial. Aproximadamente un 3% del mismo es debido a causas externas, lo que se evidencia por la perturbación que sigue a las denominadas tormentas magnéticas (el campo de la corriente circular) y otro tanto, más o menos, tiene un origen no potencial, debido a las corrientes eléctricas que cruzan la Tierra, ya que, hay una ancha zona de corrientes descendentes a lo largo del Ecuador y en los Polos, con una densidad de unos $0,08 \cdot 10^{-6}$ A/m². Este campo se puede considerar estático; ya que, aunque varía con el tiempo, esta variación es muy pequeña y muy lenta. (1)

Dependiendo de la latitud, el campo geomagnético varía entre 0,03 y 0,07 mT (en el ecuador y los polos geográficos, respectivamente) y puede inducir corrientes en una persona, cuando esta se mueve dentro del mismo. Por ejemplo: girar la cabeza hacia un lado lentamente induce corrientes equivalentes a las que produciría un campo de 0,2 µT. Si se mueve la cabeza hacia abajo rápidamente, se generan corrientes equivalentes a una exposición de 2 µT (7).

Debajo de las líneas de transporte de energía eléctrica continua (DC) los valores de los campos eléctrico y magnético estáticos están alrededor de 30000 V/m y 0,02 mT, respectivamente, aunque, en este momento, existen pocas de estas líneas en funcionamiento.

En equipos industriales de corriente continua, el CME puede llegar hasta 50 mT.

En la vida diaria, es común la utilización de pequeños imanes permanentes, que pueden producir CME de 1-10 mT, a 1 cm. de sus polos magnéticos. Estos imanes se encuentran desde en los frigoríficos, hasta en componentes de altavoces, motores con batería, hornos microondas etc. Muy cerca de algunos electrodomésticos, como el vídeo o la televisión el campo electrostático alcanza valores de 20000 V/m (2).

Los efectos directos en objetos ferromagnéticos y equipos electrónicos son lo único que la mayoría de la gente notaría en un CME por debajo de 1T. No hay un valor umbral para efectos en objetos ferromagnéticos; una brújula de calidad girará en presencia de un campo de 0,01 mT, pero se requiere una intensidad de al menos 1 mT para que los objetos ferromagnéticos se muevan de forma peligrosa. La electrónica puede verse afectada por campos bastante bajos; por ejem-

plo: un monitor en color de alta resolución mostrará distorsiones con campos de 0,1 mT (3).

Pero sin duda, la exposición más elevada a CME, por parte de la población en general, se da en pacientes sometidos para su diagnóstico a la prueba de Resonancia Magnética de Imagen (RMI) y similares. En la RMI, el campo oscila entre 0,15-2 T y el tiempo de exposición se limita a una media hora. También pueden producirse exposiciones durante otras aplicaciones médicas, como colocar varias prótesis en una misma zona (por ejemplo: dental, en el cuello, en la cabeza) y en el estoma colónico; aunque en estos casos el campo está muy localizado (6).

Otra fuente de potencial exposición es el transporte de viajeros, ya que los trenes eléctricos y tranvías generan tanto campos estáticos como alternos. A la altura de los asientos de los pasajeros, los campos eléctrico y magnético estáticos pueden llegar a 300 V/m y 0,2 mT, respectivamente (8). En los trenes de alta velocidad basados en la levitación magnética, el CME puede oscilar entre 10-100 mT, dependiendo del diseño (6).

En las tablas 2 y 3 se resumen los valores habituales de exposición a campos estáticos para la población en general comentados anteriormente.

Tabla 2.- Valores habituales de campo eléctrico estático en ambientes generales

CAMPOS ELECTROSTÁTICOS	VALOR (en V/m)
Campo atmosférico	100 - 400
Junto al Video o TV	20.000
Bajo líneas de transporte de corriente continua (DC)	30.000
Trenes eléctricos y tranvías	300

Tabla 3.- Campos magnéticos estáticos en ambientes generales

CAMPOS MAGNETOSTÁTICOS HABITUALES	VALOR (mT)
Campo geomagnético	0,03 - 0,07
Bajo líneas de transporte DC	0,02
Equipos industriales DC	50
Pequeños imanes (a 1 cm)	1 - 10
RMI	150 - 2000
Trenes eléctricos y tranvías	0,2
Trenes de alta velocidad (levitación magnética)	10 - 100

3.2.2. Exposición laboral

Las personas expuestas laboralmente a campos estáticos incluyen operadores de unidades de Resonancia Magnética de Imagen (RMI), personal de instalaciones de física especializada y biomédicas como reactores termonucleares, aceleradores de partículas, sistemas magnetohidrodinámicos, generadores superconductores y distribución de corriente continua.

En investigación, las cámaras de burbujas¹ y los espectrómetros superconductores, destinados a separar isótopos de los átomos y a medir sus abundancias relativas, son lugares en los que pueden existir campos estáticos intensos.

En la industria, la mayor exposición se produce en los trabajadores involucrados en procesos electrolíticos, como la producción de aluminio, las plantas que utilizan celdas electrolíticas para la obtención de cloro y además en los dedicados a la fabricación de imanes y materiales magnéticos.

También están expuestos los trabajadores ferroviarios que prestan servicios en trenes eléctricos y especialmente en trenes de alta velocidad por levitación magnética.

Finalmente, hay que indicar que otra fuente de exposición a campos magnéticos estáticos (CME) son los campos residuales que pueden quedar después de retirar campos magnéticos fuertes. Por ejemplo, al retirar una unidad de RMI de un local, el campo residual en el acero de la estructura que ha sido permanentemente magnetizado puede llegar a 2 mT, suficiente como para interferir con equipos electrónicos sensibles.

Estas fuentes de exposición laboral y los valores que alcanzan descritos en la literatura se estudian con más detalle en el apartado 4 de este documento.

3.3 REVISIÓN DE ESTUDIOS DE LABORATORIO Y EPIDEMIOLÓGICOS

Para investigar los efectos de los campos estáticos, al igual que los de cualquier agente, físico o químico, se utilizan en el laboratorio dos tipos de estudios: los llamados "in vitro", o sea, sobre células aisladas en tubos de ensayo y los estudios "in vivo", que se realizan sobre animales o personas expuestas.

¹Por medio de un campo magnético intenso se obtiene la trayectoria de partículas elementales.

Los estudios epidemiológicos estudian la posible asociación entre una enfermedad y un agente determinado. La mayoría de los estudios epidemiológicos sobre CEM son del tipo caso-control. En este tipo de estudio, se parte de un grupo que tiene una enfermedad (los casos) y se compara con otro grupo que no la tiene (los controles) y que, en principio, tiene iguales características que el primero (salvo que no padecen la enfermedad). Estudiando las exposiciones de ambos grupos, se busca la posible asociación entre la enfermedad y la exposición a uno o varios agentes.

3.3.1 Campo electrostático

Se han realizado muchos estudios sobre los efectos de los campos eléctricos estáticos, de los que destacamos los siguientes:

- Ritmos circadianos en humanos y roedores
- Estudios hematológicos
- Estudios de fertilidad
- Estudios sobre aborto y supervivencia en animales

Todos estos estudios coinciden en que no existen efectos perjudiciales para la salud asociados a la exposición a campos electrostáticos, salvo el riesgo de descarga eléctrica, ya citado (2).

Estudios sobre voluntarios han determinado que algunas personas pueden percibir campos eléctricos de entre 2000-10.000 V/m. Estas personas describen una sensación de cosquilleo, que se produce porque el campo eléctrico hace vibrar el pelo de la cabeza y del cuerpo. En cualquier caso, el hecho de percibir el campo no implica ningún efecto nocivo (7).

En resumen, las investigaciones realizadas, indican que los campos electrostáticos no producen efectos negativos en la salud de las personas a los niveles existentes en el medio ambiente y en los lugares de trabajo. Por tanto, no se considera necesario efectuar más investigaciones sobre sus posibles efectos (2).

3.3.2 Campos magnéticos estáticos (CME)

Diversos estudios han demostrado los efectos del campo geomagnético en la orientación y migraciones de diversos organismos como peces, moluscos, anfibios, aves migratorias y mamíferos acuáticos. Se ha observado que estos organismos son sensibles al campo geomagnético, de manera que existe una respuesta fisi-

lógica cuando el campo cambia de intensidad o dirección. Para explicar estos fenómenos, se han propuesto tres mecanismos de interacción:

1. Detección por el organismo del campo eléctrico inducido por el efecto Faraday, mientras se mueve a través del campo magnético (lo que ocurre en el caso de los tiburones).
2. Interacción del campo magnético con el material magnético del organismo (caso de las aves migratorias).
3. Efecto del campo magnético en las reacciones químicas con absorción de fotones (tortugas marinas).

Todos estos efectos han sido corroborados por numerosos estudios *in vitro*, aunque queda por dilucidar el efecto conjunto de más de uno de los citados mecanismos (9).

3.3.2.1 Estudios de laboratorio sobre diversas alteraciones fisiológicas en relación con la exposición a CME

Se han llevado a cabo diversos estudios sobre distintas alteraciones fisiológicas, entre los que podemos citar los siguientes:

- **Genotoxicidad**

Se ha llevado a cabo un amplio rango de estudios sobre genotoxicidad de CME en organismos completos y células. En conjunto, estos estudios ofrecen una evidencia convincente de que los CME no son genotóxicos.

Los estudios publicados sobre células han mostrado que los CME no producen ninguno de los efectos que indican genotoxicidad. Aunque existe algún estudio que sugiere que los CME podrían amplificar los efectos de otros agentes genotóxicos, ninguno de ellos ha sido replicado (3).

- **Crecimiento tumoral**

Estudios con campos de entre 0,13-1,15 T indican que no parecen tener efecto en el crecimiento de tumores inducidos químicamente o transplantados. Sin embargo, un estudio realizado con un campo de 15 mT, aplicado durante 91 días a ratas con un tumor inducido, informó de un incremento en el peso de los tumores, aunque no se observó un efecto global de promoción (conversión de células precancerosas en cancerosas al impedir, por ejemplo, la reparación del daño genético) (10).

- **Crecimiento celular**

En general no parecen tener efecto en el crecimiento de células; de hecho existen al menos 12 estudios con campos entre 45-2000 mT con resultados en este sentido.

do. Sin embargo, hay cuatro estudios que demuestran efectos de los CME en el crecimiento celular:

- Inhibición del crecimiento de linfocitos humanos a 4-6,3 T
- Inhibición del crecimiento de células tumorales a 7 T
- Estimulación del crecimiento de células endoteliales bovinas a 140 mT
- Estimulación e inhibición de la síntesis del ADN en fibroblastos a 610 mT

• **Efectos en el sistema inmunológico**

En la mayoría de los estudios, los CME de entre 13-2000 mT no parecen tener efectos en el sistema inmunológico de animales, aunque un estudio informa de que la implantación de pequeños imanes en el cerebro de ratas incrementa su respuesta inmunológica (3).

• **Efectos hormonales**

Hay estudios que indican que campos del nivel del geomagnético pueden afectar a la producción de melatonina en ratas, aunque otros estudios con campos más intensos (2 T) no han observado tales efectos. No está claro que esta observación tenga ninguna significación para la salud humana. Aunque se ha sugerido que la melatonina podría tener una actividad preventiva del cáncer, no hay evidencia de que los CME afecten al nivel de melatonina en humanos, o de que la melatonina tenga actividad anticancerígena en humanos (3).

• **Otros**

Un estudio con ratones demuestra que la exposición a un CME de 4.7 T de intensidad produce peroxidación de los lípidos en el hígado y también incrementa la hepatotoxicidad producida en dicho órgano por la administración de tetracloruro de carbono (CCl_4). El autor sostiene que estos resultados son extrapolables a humanos, indicando que la peroxidación de lípidos en el hígado puede ser incrementada por la exposición a fuertes CME durante los procedimientos de Resonancia Magnética Nuclear (11).

En las recomendaciones de la IRPA (Asociación Internacional de Protección Radiológica) para proteger a los pacientes sometidos a diagnóstico médico mediante Resonancia Magnética, se limita el tiempo a una hora y el nivel de CME a 2 T para la cabeza y el tronco y a 5 T para las extremidades, estando contraindicada la prueba en personas con aparatos electrónicos o metálicos implantados (12).

La norma UNE-EN 60601-2-33: 1997. "Equipos electromédicos. Parte 2: Requisitos particulares para la seguridad de los equipos de Resonancia Magnética

para diagnóstico médico" indica, por lo que se refiere a CME , que en los equipos capaces de realizar exámenes de cuerpo entero con una intensidad de campo superior a 2 T, las instrucciones de utilización deberán establecer que es esencial que, por encima de ese límite, sólo se funcione de acuerdo con protocolos específicos y vigilando, si procede, las funciones vitales. Además, en el caso de personas con la función cardiovascular alterada o tomando medicación que altere la excitabilidad del corazón, puede ser aconsejable la vigilancia de la tasa cardiaca (nº de pulsaciones por minuto) y de la presión sanguínea, durante la exposición del cuerpo entero (13).

Por último, cabe indicar que teóricamente los efectos magnetohidrodinámicos podrían retardar la circulación sanguínea y producir un aumento de la presión arterial en un CME fuerte. Este efecto se prevé que aparezca a una intensidad de 5 T y no se ha observado en humanos a 1,5 T ni a 4,7 T en un modelo. Sí se ha observado que personas expuestas a un campo de 4 T pueden experimentar efectos sensoriales asociados al movimiento en el campo, como vértigo, náuseas, sabor metálico y fosfenos (reflejos en los ojos, tipo "ver estrellas") al mover los ojos o la cabeza (6).

3.3.2.2 Estudios en trabajadores

De los numerosos estudios realizados sobre trabajadores expuestos a CME y las posibles alteraciones de su salud, se destacan los siguientes:

- a) Algunos estudios sobre trabajadores, dedicados a la manufactura de imágenes permanentes, indicaron varios síntomas subjetivos y molestias funcionales como irritabilidad, fatiga, dolor de cabeza, pérdida de apetito, bradicardia, taquicardia, disminución de la presión arterial, alteraciones electroencefalográficas, picores, ardores y entumecimiento. La ausencia de análisis estadísticos o evaluaciones del impacto de los riesgos físicos o químicos en el ambiente laboral reduce significativamente el valor de estos resultados y dificulta su evaluación.
- b) Se estudiaron los datos de 320 trabajadores en fábricas que utilizaban células electrolíticas en un proceso de separación química, con un nivel promedio de CME de 7,6 mT y un nivel pico de 14,6 mT, detectándose ligeros cambios en el leucocitograma (aunque dentro de los valores considerados normales) del grupo expuesto en comparación con el grupo de control. Ninguno de los cambios transitorios, observados en la presión arterial y en la analítica de sangre, se consideró indicativo de algún efecto significativo adverso asociado a la exposición a CME (6).

- c) Se realizó un estudio caso-control sobre la prevalencia de enfermedades entre 792 trabajadores de laboratorios que estaban expuestos a CME generados por aceleradores de partículas, con intensidad comprendida entre 0,5 mT durante largos períodos de tiempo hasta 300 mT durante varias horas, con máximos de hasta 2 T. No hubo cambios estadísticamente significativos en la prevalencia de 19 tipos de enfermedad entre el grupo expuesto y el de control. Tampoco se encontraron diferencias entre un subgrupo de 198 trabajadores, que habían sufrido exposiciones de 300 mT o más durante un tiempo superior a una hora y el resto del grupo expuesto o el de control (14).
- d) En cuanto a la industria del aluminio, un estudio de 1983 informó que los trabajadores directamente relacionados con la producción de aluminio tenían una elevada tasa de mortalidad por leucemia, pero hay que indicar que este trabajo no estaba diseñado para analizar los efectos de los CME. Además, el proceso usado en la producción de aluminio produce alquitranes volátiles, vapores fluorados, óxidos de azufre, dióxido de carbono, etc. La presencia de hidrocarburos particulados y quizás otros contaminantes ambientales debe ser tenida en cuenta ante cualquier intento de relacionar la exposición a CME y el incremento del riesgo de contraer cáncer entre los trabajadores de la industria del aluminio (6). En un estudio más reciente (1987) con trabajadores del aluminio franceses, la mortalidad por cáncer y por las demás causas no se encontró significativamente distinta de la del resto de la población masculina francesa. (6). Posteriormente, un estudio de 1995, que investigó específicamente la exposición a CME y cáncer, observó un incremento de la tasa global de cáncer en empleados de menos de tres años de antigüedad, pero no en trabajadores que llevaran más tiempo en esa industria. No se observó un incremento significativo de leucemia, linfoma o tumores cerebrales (15).
- e) Por último, cabe citar que en un estudio de cohorte realizado en una planta de producción de cloro en Suecia, que utilizaba corriente continua (DC) de 100.000 A de intensidad para la obtención electrolítica de cloro, con CME de entre 4-29 mT, no se encontró aumento de la incidencia de cáncer entre trabajadores expuestos durante más de 1 año o durante más de 5 años (16).

En resumen, con los conocimientos actuales, no hay evidencia de efectos adversos para la salud en la exposición a CME de intensidad menor de 2 T, aunque se considera necesario efectuar más estudios sobre los efectos que la exposición crónica pueda producir a largo plazo (2).

4. FUENTES DE EXPOSICIÓN LABORAL

Los puestos de trabajo, donde puede existir una exposición laboral más elevada a campos eléctricos y magnéticos estáticos, corresponden principalmente a los siguientes grupos:

- Instalaciones de Resonancia Magnética Nuclear
- Industrias con procesos electrolíticos
- Aceleradores de partículas
- Otros, como trenes de alta velocidad, fabricación de imanes, etc.

4.1 RESONANCIA MAGNÉTICA NUCLEAR

La Resonancia Magnética Nuclear (RMN) está reconocida como método de investigación en física y química desde hace décadas, pero en los últimos años ha captado la atención general debido a sus aplicaciones médicas en Resonancia Magnética de Imagen (RMI), una técnica no invasora para producir detalladas imágenes in vivo, con un poder de resolución superior al de los rayos X, tomografía computerizada (TC) y técnicas de ultrasonidos (9).

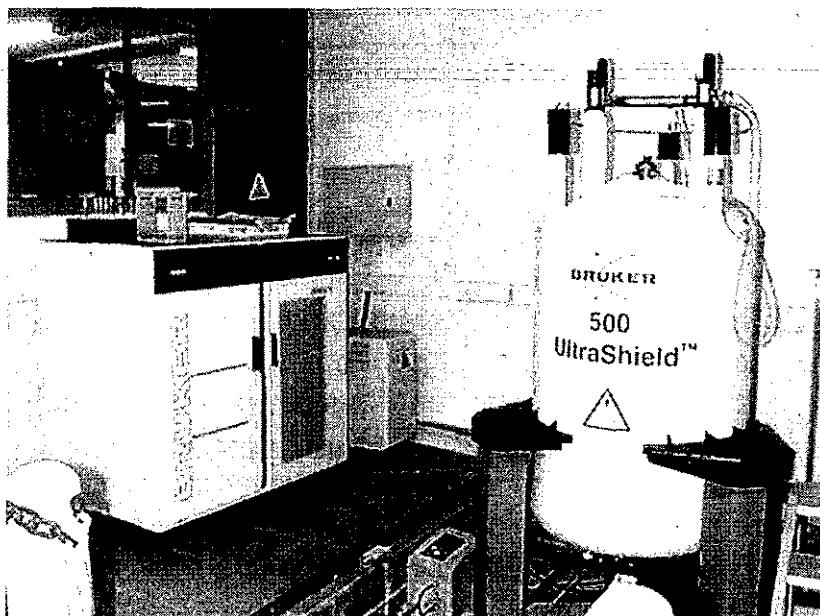


Figura 11.- Espectrómetro de RMN

forma que la amplitud de la señal a cada frecuencia es proporcional al número de protones en ese punto.

En un procedimiento de RMN el sujeto se sitúa en un CME intenso y es irradiado con ondas RF (Radiofrecuencia) desde un transmisor. El fundamento del método consiste en que, cuando un campo magnético variable con la distancia y dirección (gradiente) se superpone con un CME homogéneo, los protones del núcleo de los átomos resuenan a diferentes frecuencias en cada punto a lo largo del gradiente, de

La exposición a CME es uno de los riesgos asociados a la RMN descritos en los estudios realizados; otros son, por ejemplo, campos magnéticos variables en el tiempo y CEM de Radiofrecuencia (17).

Se han publicado diversos trabajos sobre los riesgos laborales en instalaciones de RMN, algunos de ellos específicos sobre la exposición a CME:

En 1990 se llevó a cabo una investigación centrada en el riesgo de exposición a CME en varias instalaciones de RMN, incluyendo laboratorios de investigación y clínicas con RMI(18). El campo magnético más fuerte al que el personal estaba expuesto normalmente se encontró que era de 1T para el tronco y 4,7 T para los brazos, debido a un imán de gran tamaño. La inducción magnética variaba desde 2 T en el centro del imán superconductor usado en RMI hasta 14 T en imanes de pequeño tamaño utilizados en investigación.

El campo magnético externo de un solenoide depende de la intensidad del campo central, del diámetro del solenoide y del inverso del cubo de la distancia al centro del solenoide. Este campo es la principal fuente de exposición a CME del cuerpo completo en los trabajadores de instalaciones de RMN.

Los niveles típicos de exposición de los trabajadores se estimaron basándose en las mediciones del campo efectuadas y en la observación de las prácticas de trabajo. La exposición media ponderada para 8 horas variaba entre 1,5-64 mT; la duración de la exposición a un campo intenso era el principal factor determinante del valor medio ponderado. La exposición pico en las extremidades llegó en algún caso a superar 2 T.

Como medidas para controlar la exposición laboral se proponen:

- Mantener una distancia suficiente entre las áreas de trabajo comunes y el imán.
- Limitar la duración de la exposición a un campo intenso.
- Instalar blindaje ferromagnético entre las áreas de trabajo comunes y el imán, aunque esto no protegerá al personal que deba trabajar junto al imán.

Posteriormente, en 1996, se investigó la exposición laboral a CME del personal de unidades de RMN en dos laboratorios de análisis químicos y en dos hospitales con RMI (19).

La intensidad del campo estático generado por cada imán era de 11,7 y 4,7 T en los sistemas de análisis químico y de 0,5 y 0,02 T en las unidades de IRM. El tiempo de exposición se estimó por medio de entrevistas con los trabajadores. Sólo un reducido número de personas trabajaba junto a los imanes y además durante una

Tabla 4 - Valores de CME en instalaciones de RMN

Centro de Trabajo	Distancia al centro del imán (metros)	Parte del cuerpo (tarea)	B (mT)	Tiempo de exposición habitual diario
Laboratorio Investigación	5,2	Pelvis (sentado en el panel de control)	0,10	20 minutos
	2,2	Pelvis (sentado en el panel de control)	0,80	20 minutos
	0,6(*)	Cabeza (cambiando una muestra)	17,00	1 minuto
	0,5	Pelvis (cambiando una muestra)	84,00	1 minuto
	0,5	Manos (en la parte más alta del imán)	30,00	menos de 1 minuto
Universidad	1,8	Pelvis (sentado en el panel de control)	0,10	5 horas
	0,30	Cabeza (cambiando muestra)	2,60	3 minutos
	0,30	Pelvis (cambiando muestra)	19,00	3 minutos
	—	Manos (en la parte más alta del imán)	6,50	3 minutos
	—	Manos (en la parte más baja)	170,00	4 minutos
Hospital A	11,00	Pelvis (sentado en el panel de control)	0,20	6 horas
	1,50	Cabeza (con el paciente) (**)	120,00	1 hora (***)
	1,50	Pelvis (con el paciente)	126,00	1 hora (***)
Hospital B	2,70	Pelvis (sentado en el panel de control)	0,10	2 horas
	1,00	Cabeza (con el paciente)	1,60	0,2 horas (***)
	1,00	Pelvis (con el paciente)	8,30	0,2 horas (***)

(*) Estimado - (**) - 4-10 pacientes/día (***) Se puede exceder este tiempo si el paciente es excesivamente nervioso

pequeña parte de la jornada de trabajo. Se comprobó que la inducción magnética dependía mucho de la distancia al imán y los valores encontrados durante la mayor parte de la jornada eran inferiores a 1 mT. Durante cortos períodos de tiempo, por ejemplo: cambiando muestras en el caso de los laboratorios o atendiendo pacientes que estaban nerviosos en el caso de la RMI, el campo podía llegar a 100-150 mT. No obstante, las entrevistas con los trabajadores revelaron que apartarse de los protocolos de trabajo era relativamente frecuente, especialmente en el caso de la RMI , ya que, con pacientes excesivamente nerviosos o niños, los enfermeros pasaban a veces varias horas al día junto a los pacientes y, por tanto, junto al imán.

Como la exposición puede reducirse evitando trabajar muy cerca del imán, como principal medida preventiva se propone la reorganización del lugar de trabajo o de las tareas, por ejemplo utilizando monitores de control remoto.

Los valores de campo magnético medidos en los cuatro centros se resumen en la tabla 4.

4.2 PROCESOS ELECTROLÍTICOS

Los trabajadores de la Industria directamente relacionados con procesos electrolíticos pueden estar expuestos a CME. En los procesos electrolíticos se utiliza corriente continua de gran intensidad, que en algunos casos llega a 200 kA (200.000 A), lo que produce un CME que puede ser intenso junto al circuito eléctrico. Los informes publicados describen principalmente niveles de CME en fábricas de producción de cloro electrolítico y en industrias de reducción de aluminio.

4.2.1. Plantas de producción de Cloro

Dentro de la industria química, uno de los lugares con CME más fuerte son las instalaciones cloroalcalinas. En ellas se produce cloro utilizando células electrolíticas, tanto de diafragma como de mercurio. Una disolución de cloruro sódico o potásico es sometida a electrolisis, usando corriente continua que convierte los iones cloruro (Cl^-) en cloro elemental (Cl_2). Otros productos obtenidos de este proceso son hidróxido sódico o potásico e hidrógeno.

Un estudio de 1982 informó que el nivel de CME medio ponderado para 8 horas en una planta cloroalcalina era de 7,6 mT, con un nivel máximo alcanzado de 20 mT (20).

En 1985, investigadores suecos indicaron que el nivel de CME en una instalación cloroalcalina, de ese país, oscilaba entre 4 y 29 mT (16).

En 1992 se publicó el estudio realizado en dos plantas cloroalcalinas que usaban distintas tecnologías. La primera utilizaba células de diafragma: tenía tres circuitos eléctricos con 200 células cada uno, diseñados con un voltaje de 700 V e intensidad de corriente de 80.000 A. La segunda planta usaba células de mercurio: tenía dos circuitos de 26 células cada uno, que trabajaban a 200 V con una intensidad de corriente de 180.000 A.

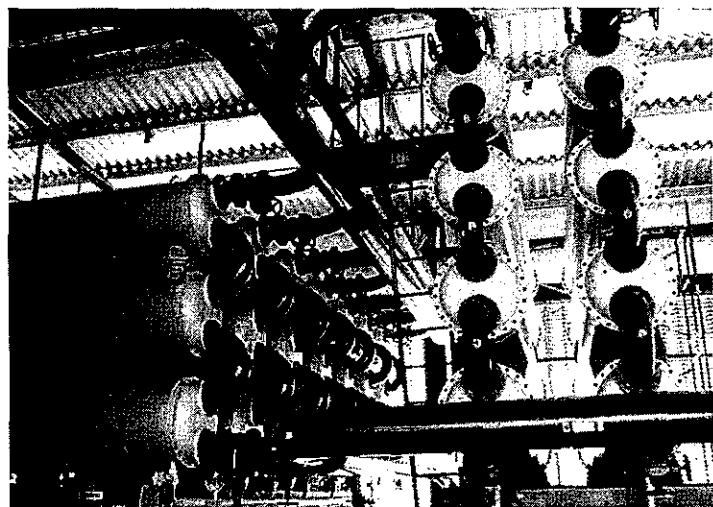


Figura 12.- Planta de producción de cloro

En la instalación que utilizaba células de diafragma, el CME oscilaba entre 0,1-17,3 mT, con un valor medio de 8,3 mT, mientras que en la de células de mercurio los niveles variaban entre 0,4-18,3 mT, con un nivel medio de 4,7 mT. En la primera se encontró que el campo variaba con la altura sobre el nivel del suelo, situándose el valor máximo a 1,5 m aproximadamente, debido a la localización de los circuitos eléctricos. Esto no ocurría en la instalación de células de mercurio. En ambos casos, las mayores intensidades de campo se obtuvieron junto a los circuitos eléctricos.

Como medidas para controlar la exposición a CME se proponen:

- Mantener la máxima distancia posible entre el trabajador y el circuito eléctrico.
- Establecer criterios para limitar la duración de la exposición de los trabajadores, dentro de los circuitos o entre células (21).

4.2.2.- Producción de Aluminio

Las fábricas de reducción de aluminio también tienen uno o más circuitos eléctricos que constan de un número de cubas electrolíticas que puede ser elevado. La intensidad de la corriente continua ronda los 100 kA.

En 1994 se publicaron dos estudios realizados en plantas de producción de aluminio electrolítico:

El informe del NIOSH (Instituto de Seguridad y Salud en el Trabajo de Estados Unidos) obtuvo valores medios de CME ponderados en el tiempo de 15-16 mT, con un valor pico de 70 mT (22).



Figura 13.- Planta de producción de aluminio

al calor en la industria del aluminio, encontró valores entre 4 -30 mT en los lugares de mayor exposición (24).

El otro estudio indica que las mediciones realizadas en varios puntos, alrededor de las cubas, dieron como resultado valores de CME de entre 4-20 mT. Sin embargo, el personal encargado de la vigilancia de las cubas mostraba exposiciones promedio de 2-4 mT, con variaciones muy grandes y valor pico de hasta 25 mT (23).

Posteriormente, un estudio de 1998, que investigó la exposición a CME y

4.3 ACELERADORES DE PARTÍCULAS

De forma muy simple, se puede decir que un acelerador de partículas sirve para proporcionar alta energía a partículas subatómicas. Para ello es necesario que exista una fuente de partículas elementales o iones, un tubo con un vacío parcial, en el que las partículas pueden desplazarse libremente, y un sistema para aumentar la velocidad de las partículas.

Básicamente existen dos tipos de aceleradores:

- Electrostáticos, si la causa de la aceleración es una diferencia de potencial, como el acelerador de Cockcroft-Walton y el generador de Van der Graff.
- De campos electromagnéticos variables con el tiempo, que pueden ser lineales o circulares, según sea la trayectoria de la partícula.

El acelerador lineal (Linac) utiliza tensiones alternas elevadas para impulsar las partículas a lo largo de una línea recta. Las partículas atraviesan una serie de tubos huecos metálicos, situados dentro de un cilindro donde se ha hecho el vacío. La tensión alterna se sincroniza, de forma que la partícula sea impulsada hacia adelante cada vez que pasa por un hueco entre dos tubos metálicos.

El acelerador circular consigue transmitir una alta energía a las partículas, haciéndolas girar repetidamente antes de ser lanzadas sobre blancos fijos.

Los aceleradores de partículas tienen múltiples aplicaciones:

- En investigación, para estudiar las propiedades de las partículas elementales y producir nuevos átomos e isótopos artificiales.
- En medicina, para el tratamiento del cáncer y la esterilización de material quirúrgico, fabricación de productos farmacéuticos y cosméticos.
- En la industria, para el reticulado de materiales plásticos, higienización de alimentos, etc.

Un estudio realizado en 1984 en laboratorios de Estados Unidos, que utilizaban aceleradores de partículas, encontró que la exposición a CME variaba entre 0,5 mT durante largos períodos de tiempo hasta 300 mT durante varias horas. La exposición pico llegaba a 2T (14).

En un estudio realizado en el acelerador lineal de la Universidad de Stanford (SLAC), sobre la influencia del CME en los aparatos utilizados para medir la radiación, se indica que en los lugares cercanos a los klystrons (amplificadores de potencia) que se utilizan para acelerar los electrones, puede haber un CME de 30 mT aproximadamente. En las áreas de trabajo alrededor del SLAC el campo promedio es menor de 3 mT, con un valor máximo de 10 mT (25).

4.4 OTROS

Dentro de este grupo, se pueden citar los siguientes:

- Trabajadores ferroviarios en trenes de alta velocidad por levitación magnética, donde los valores de CME pueden alcanzar valores de 10-100 mT (6).
- Trabajadores dedicados a la fabricación de imanes y materiales magnéticos, como por ejemplo prótesis (6).
- Trabajadores sanitarios, que utilizan aparatos magnéticos en procedimientos quirúrgicos, rehabilitadores, etc. (9).
- Algunos trabajos de soldadura: Normalmente la soldadura metal gas inerte/metal gas activo (MIG/MAG) utiliza únicamente corriente continua, con intensidad entre 110-380 A y CME junto al cable de 2 mT, según un amplio estudio realizado en Dinamarca.

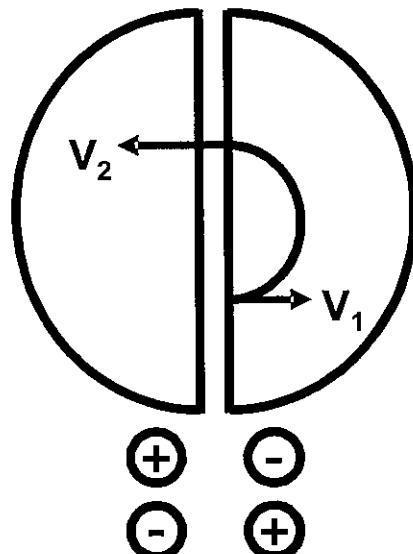


Figura 14.- Ciclotrón

La soldadura al arco sumergido (SA) es un proceso automático o semiautomático, que usa a veces corriente continua de intensidad entre 500-1500 A, obteniéndose un valor de CME junto al cable de 5 mT, según el estudio citado (26).



Figura 15.- Soldadura

5. CRITERIOS DE VALORACIÓN

Diversas organizaciones gubernamentales y profesionales han revisado la literatura epidemiológica y de laboratorio y desarrollado normas de exposición a campos eléctricos y magnéticos estáticos, tanto en ambientes laborales como residenciales.

En España no hay legislación específica con valores límite de exposición laboral a campos eléctricos y magnéticos estáticos, no obstante, a partir de marzo de 1996, fecha de entrada en vigor de la Ley 31/1995, de 8 de noviembre, de Prevención de Riesgos Laborales, los campos estáticos entran en la categoría de riesgos generales que hay que prevenir, que no disponen de legislación específica pero sí de normas o guías para valorarlos.

En el ámbito comunitario, en 2004 se ha elaborado la Directiva 2004/40/CE sobre las disposiciones mínimas de seguridad y de salud, relativas a la exposición de los trabajadores a los riesgos derivados de agentes físicos (campos electromagnéticos y ondas), sobre la que se ha adoptado una Posición Común del Consejo, basada en los criterios de la Comisión Internacional de Protección contra la Radiación No Ionizante (ICNIRP) (6), que se describe más adelante. Los campos estáticos no han sido incluidos en la Directiva.

Una de las primeras organizaciones en establecer criterios fue el **LAWRENCE LIVERMORE NATIONAL LABORATORY (LLNL)**:

En 1987, el Laboratorio Nacional Lawrence Livermore de Estados Unidos desarrolló y publicó unas recomendaciones de exposición laboral a CME (27), con una detallada revisión de los datos sobre efectos biológicos y de las bases para sus criterios:

- Mantener las corrientes eléctricas inducidas por el movimiento a través del CME a niveles por debajo de las que se dan de forma natural en el cuerpo.
- Mantener las corrientes inducidas por el flujo de corriente en los grandes vasos sanguíneos a niveles que no produzcan efectos hemodinámicos o cardiovasculares.

Los valores límite recomendados fueron:

1 mT, para las personas con marcapasos o aparatos protésicos.

A partir de 50 mT, formación a los trabajadores y vigilancia de su salud, quedando excluidas las personas con anemia falciforme.

Valor de CME medio ponderado en el tiempo limitado a 60 mT para el cuerpo completo y a 600 mT en las extremidades y valor techo de 2 T.

En el año 2000, el LLNL revisó sus criterios, adoptando las directrices de exposición desarrolladas por la ICNIRP (6).

También en 1987 la **ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD (OMS)** publicó una monografía sobre criterios de salud ambiental, "ENVIRONMENTAL HEALTH CRITERIA" (EHC) para exposición a CME, en la que se examinaban los efectos sanitarios de la exposición a campos estáticos, basándose en publicaciones científicas bien argumentadas. En sus conclusiones indicaba que, con los datos disponibles en ese momento, no se podía deducir que la exposición de corta duración a CME por debajo de 2 T supusiera un riesgo para la salud (28).

Actualmente la OMS está preparando una monografía EHC sobre campos estáticos cuya publicación está prevista para final de 2004, en la cual se van a incorporar los resultados del seminario del ICNIRP/OMS (abril de 2004) sobre los efectos de los campos magnéticos estáticos en exposiciones altas, de 1 a 8 T (2).

A continuación se desarrollan con más detalle los principales criterios utilizados actualmente para valorar la exposición a campos eléctricos y magnéticos estáticos:

- CRITERIOS DEL NATIONAL RADILOGICAL PROTECTION BOARD (NRPB)

En 1993, el Consejo Nacional de Protección Radiológica del Reino Unido realizó una extensa y detallada revisión de la literatura existente y publicó unas recomendaciones, aceptadas y aplicadas por el Gobierno de ese país (29).

Las recomendaciones se basan en la evaluación de los posibles efectos en la salud derivados de la exposición a campos eléctricos y magnéticos estáticos, de acuerdo con la información biológica y los estudios epidemiológicos disponibles.

Se aplican por igual a trabajadores y al resto de la población, pero no se aplican a la exposición de los pacientes sometidos a diagnóstico o tratamiento médico; por ejemplo, para el caso de la RMN existen recomendaciones específicas de este Organismo.

Para los campos electrostáticos, los límites se fijan para evitar los efectos molestos de la percepción de cargas eléctricas superficiales y los efectos indirectos como descargas.

Las restricciones en la exposición de corta duración a CME se basan en evitar respuestas agudas como vértigo o náuseas y efectos nocivos para la salud como arritmia cardiaca y disfunciones cerebrales. Debido a la falta de información sobre los efectos de la exposición crónica, se restringen los niveles de la exposición media ponderada en el tiempo a una décima parte de los diseñados para prevenir efectos agudos.

Los portadores de marcapasos y otros aparatos protésicos pueden verse afectados por niveles de campos eléctricos y magnéticos estáticos menores de los indicados en los límites de exposición, pero estos efectos no se consideran explícitamente; en estos casos, se recomienda consultar al fabricante o al médico que realizó el implante.

Los valores límite recomendados son:

- Para la exposición a campo electrostático, el límite es 25 kV/m, ya que se considera que la mayoría de la población no experimenta ninguna molestia en una exposición inferior.
- El valor límite de CME medio ponderado durante 24 horas es 200 mT
- El valor techo de CME se fija en 2 T, para exposición del cuerpo completo, y en 5 T, si sólo afecta a las extremidades.

-CRITERIOS DE LA INTERNATIONAL COMMISSION ON NON-IONIZING RADIATION PROTECTION (ICNIRP)

En 1994, la Comisión Internacional contra la Radiación no Ionizante publicó unos criterios de exposición a CME (6).

Estas directrices no son aplicables a la exposición deliberada de los pacientes durante el diagnóstico o tratamiento médico. Para el caso de la RMN, también este Organismo elaboró unas recomendaciones específicas (12).

Al contrario que el NRPB, esta Comisión propone límites de exposición diferentes para los trabajadores y el resto de la población, justificando esta distinción sobre la base de las siguientes razones:

- La exposición laboral se produce en adultos bajo determinadas condiciones controladas; estas personas pueden ser formadas sobre los riesgos potenciales que corren y las precauciones adecuadas que deben adoptar. Además, la exposición se limita a la duración de la jornada de trabajo y al tiempo de vida laboral.

- La población general se compone de personas de todas las edades y estados de salud posibles, incluyendo personas o grupos especialmente sensibles, que en muchos casos no son conscientes de su exposición o son reacios a aceptar ningún tipo de riesgo asociado a la exposición. Además, la población puede estar expuesta hasta 24 horas al día, a lo largo de toda su vida.

Las restricciones propuestas se basan en que, con los conocimientos actuales, la exposición de corta duración a CME menor de 2 T no supone un riesgo para la salud y también en que, del análisis de los mecanismos de interacción establecidos, se deduce que la exposición de larga duración a CME de 200 mT no debería tener consecuencias adversas: Se puede calcular el campo eléctrico (**E**) y la densidad de corriente (**J**) inducidos en la aorta y otros grandes vasos sanguíneos de personas expuestas a un CME de 200 mT. El valor máximo de **E** será $v \cdot B$, cuando la velocidad del torrente sanguíneo, **v**, sea perpendicular a la densidad de flujo magnético, **B**. En personas adultas, la velocidad media en la aorta es de 42 cm/s, con lo que el valor máximo de **E** será:

$$E = 0,42 \text{ (m/s)} \cdot 0,2 \text{ (T)} = 0,084 \text{ V/m} = 84 \text{ mV/m}$$

La densidad de corriente inducida máxima la obtendremos multiplicando este valor por la conductividad eléctrica de la sangre humana, que es aproximadamente de 0,52 S/m, con lo que **J** será como mucho 44 mA/m², valor por debajo del que se espera que produzca efectos hemodinámicos o cardiovasculares.

Los límites de exposición que propone la ICNIRP son:

Exposición laboral:

- La exposición del cuerpo completo durante la jornada de trabajo se limita a un CME medio ponderado en el tiempo de 200 mT. Esta restricción es conservadora, debido a la falta de conocimientos sobre los efectos a largo plazo.
- El valor techo es 2 T para el cuerpo completo y 5 T para las extremidades, ya que en brazos y piernas no hay órganos vitales ni grandes vasos sanguíneos.

Exposición de la población:

Por las razones apuntadas anteriormente, se añade un factor de seguridad adicional de 5, resultando un valor límite de exposición continua de 40 mT, permitiéndose el acceso ocasional a instalaciones donde el campo sea mayor, bajo condiciones controladas y siempre que no se sobrepasen los límites de exposición laboral. Este criterio ha servido de base (en lo que se refiere a CME) a una Recomendación del Consejo de la Unión Europea, relativa a la exposición de la población a CEM de 0Hz - 300 GHz, de fecha 12.07.99 en la que se establece como restricción básica para CME un valor de inducción magnética de 40 mT (30).

Como consideraciones adicionales hay que tener en cuenta que los portadores de marcapasos y desfibriladores implantables automáticos (aparatos implantables que detectan la taquicardia o la fibrilación ventricular sostenida y la suprime mediante uno o varios choques aplicados directamente al miocardio) pueden no estar protegidos por los valores límite anteriores. Para estas personas, la exposición debe limitarse a 0,5 mT y se recomienda señalizar los lugares donde la densidad de flujo magnético sea mayor.

Debido al riesgo potencial de desplazamiento de los implantes ferromagnéticos o simplemente de objetos metálicos, también se recomienda señalizar las áreas con inducción magnética superior a 3 mT y tomar precauciones para prevenir los riesgos ocasionados por el desplazamiento de objetos metálicos.

El ICNIRP ha publicado en 2003 una monografía en la que revisa la evidencia científica sobre dosimetría, efectos biológicos, observaciones epidemiológicas y consecuencias sobre la salud derivadas de la exposición a campos estáticos y de baja frecuencia (33).

-CRITERIOS DE LA AMERICAN CONFERENCE OF GOVERNMENTAL INDUSTRIAL HYGIENISTS (ACGIH)

La Conferencia Americana de Higienistas Industriales Gubernamentales realizó una revisión de la literatura sobre campos estáticos concluyendo que no se han podido identificar órganos diana específicos para los efectos nocivos de los mismos (31). La ACGIH publica cada año sus valores límite máximos de exposición que se denominan TLVs, distinguiendo entre valores medios ponderados en el tiempo (TLV-TWA) y valores pico o techo (TLV-C). Los TLVs se aplican únicamente en ambientes laborales (32).

TLV para campo electrostático

Este límite representa el valor bajo cuyas condiciones se cree que la mayoría de los trabajadores pueden estar expuestos repetidamente sin efectos nocivos en su salud. Este valor puede usarse como guía en el control de la exposición, pero, debido a la posible existencia de trabajadores especialmente sensibles, no debe contemplarse como la línea que separa la exposición segura de la peligrosa. La intensidad de campo eléctrico establecida en este TLV se refiere al nivel de campo presente en el aire, lejos de superficies conductoras, en las que existe el riesgo de descargas y corrientes de contacto. El valor fijado, 25 kV/m , es un valor techo proyectado tanto para la exposición del cuerpo completo como para la de una parte del cuerpo y está basado en mantener las corrientes superficiales y las corrientes inducidas en el interior del cuerpo a niveles inferiores a los que se cree que pue-

den producir efectos negativos en la salud. Por el momento no hay información suficiente para poder establecer un TLV sobre exposición media ponderada en el tiempo (TWA).

Para valores a partir de 5-7 kV/m, existe un amplio abanico de potenciales riesgos para la seguridad, como descargas, chispas y corrientes de contacto con conductores no conectados a tierra dentro del campo. Además, si el campo es más intenso, puede existir riesgo de incendio, si hay materiales inflamables o electro-explosivos. Se recomienda conectar a tierra los objetos que no lo estén y utilizar Equipos de Protección Individual en campos superiores a 15kV/m.

Los trabajadores que lleven marcapasos pueden no estar protegidos por este TLV contra la interferencia electromagnética producida entre el campo y la función del marcapasos. En el caso de que el fabricante del aparato no haya facilitado información específica sobre interferencias electromagnéticas, la exposición de los portadores de marcapasos y otros aparatos electrónicos debe mantenerse por debajo de 1 kV/m.

TLV para campo magnetostático

Estos TLVs se refieren a valores de CME a los que se cree que la mayoría de trabajadores puede exponerse diariamente sin sufrir efectos adversos. Deben usarse como guía en el control de la exposición y no como frontera entre exposición segura y peligrosa.

La exposición laboral media ponderada en el tiempo para un periodo de 8 horas (TLV-TWA) no debe exceder el valor de 60 mT para el cuerpo completo, o 600 mT para las extremidades. Los valores techo (TLV-C) recomendados son: 2 T para el cuerpo completo y 5 T para las extremidades.

Pueden existir riesgos para la seguridad, debido a la fuerza mecánica ejercida por el CME sobre aparatos ferromagnéticos e implantes médicos. Los portadores de marcapasos y otros aparatos electrónicos implantados no deben exponerse a niveles de CME superiores a 0,5 mT.

En el Anexo figura una recopilación de los valores límite recomendados por los Organismos mencionados en este apartado.

5.1. EL PROYECTO INTERNACIONAL CEM DE LA OMS

Finalmente, hay que mencionar la próxima publicación de criterios de valoración de la exposición a campos estáticos por parte de la OMS, dentro del Proyecto Internacional CEM (2).

El proyecto internacional sobre campos electromagnéticos evalúa los efectos sanitarios y ambientales de la exposición a CEM estáticos y variables con el tiempo hasta 300 GHz de frecuencia, con miras a desarrollar unas directrices internacionales sobre límites de exposición. El Proyecto se inició en la OMS en 1996, ha sido planificado como una progresión de actividades y resultados orientada a mejorar la evaluación de riesgos derivada de la exposición a CEM y, para ello, se está realizando una revisión crítica, extensa y concienzuda de la política de salud pública y laboral.

En este proyecto colaboran 8 organismos internacionales, más de 50 países y 7 centros colaboradores de la OMS, entre ellos la ICNIRP, la Comisión Europea y el NRPB, y se espera que pueda desarrollar un marco para la armonización de las distintas normas sobre campos, así como que fomente el establecimiento de límites de exposición y de medidas de control que protejan la salud de todas las personas. En este periodo de tiempo, la OMS ha realizado una base de datos mundial sobre criterios de exposición a CEM. La principal conclusión, por el momento, es que al parecer las exposiciones a campos estáticos inferiores a los límites recomendados por la ICNIRP no producen ninguna consecuencia conocida sobre la salud. Las investigaciones continúan orientándose hacia los posibles efectos agudos y crónicos de la exposición a campos estáticos elevados (1-8 T) de trabajadores y pacientes.

La monografía de la serie Criterios de Salud Ambiental (EHC) sobre campos estáticos que incorporará toda la información procedente de las últimas reuniones de los grupos de trabajo y seminarios conjuntos ICNIRP/OMS está prevista para fin de 2004.

6. CASOS PRÁCTICOS DE EVALUACIÓN

Como resultado de la experiencia adquirida por el Centro Nacional de Nuevas Tecnologías en la evaluación del potencial riesgo por exposición a Campo Magnético Estático, fundamentalmente en laboratorios de investigación, se han seleccionado algunos casos que pueden utilizarse como orientación para abordar la evaluación inicial de puestos de trabajo.

6.1. CASO 1: EXPOSICIÓN LABORAL A CAMPO MAGNÉTICO ESTÁTICO EN UN LABORATORIO DE ESPECTROSCOPIA DE RESONANCIA MAGNÉTICA NUCLEAR

ANTECEDENTES

Este estudio tuvo como origen la solicitud del Servicio de Prevención de una Universidad, en cuyo Servicio de Análisis se utilizaban dos espectrómetros de RMN que producían disfunciones en los equipos informáticos de los despachos contiguos así como en una sala de reunión del piso inferior, creando la consiguiente alarma entre el personal potencialmente afectado.

La espectroscopía de Resonancia Magnética Nuclear (RMN) es una técnica de análisis químico que se basa en la utilización de un electroimán que crea en su eje central (núcleo de la bobina) un campo magnético estático en cuyo interior se introduce la muestra a estudiar. La densidad de flujo magnético depende de las características de la espira así como de la corriente eléctrica que recorre el electroimán.

El objeto de dicho campo es alinear los spines de los núcleos atómicos de la muestra, para posteriormente aplicar un campo de radiofrecuencia que pueda entrar en resonancia con la diferencia entre los niveles energéticos creados por el campo estático. Periódicamente se procede al relleno del imán con líquido criogénico con objeto de mantener la bobina superconductora por debajo de la temperatura crítica.

Se emplean electroimanes de diferentes densidades de flujo magnético, entre 0,15 y 20 Tesla (1500 a $2 \cdot 10^5$ Gauss) y la radiofrecuencia es variable de un equipo a otro, de 200 a 600 MHz.

6.1.1. Estudio previo

DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN

Sala en la planta primera con dos espectrómetros de RMN. Hay dos locales colindantes al mismo nivel, tras la pared más próxima a los dos imanes, y un local de

reunión en la planta baja, bajo el laboratorio de RMN (ver esquemas de las figuras 16 y 17).

DESCRIPCIÓN DE LAS FUENTES EMISORAS

Espectrómetros RMN marca BRUKER, con diámetro de bobina de 52 mm:

B-500: Modelo DRX-500, con emisión máxima de 11,7 T y Radiofrecuencia de 500 MHz.

B-300: Modelo AMX-300, con emisión máxima de 7 T y Radiofrecuencia de 300 MHz.

Los imanes están instalados sobre tarimas a 15 cm sobre el nivel del suelo. Cada equipo dispone de consola y monitor de control, así como de una unidad de alimentación y una fuente de RF separada del imán para evitar interferencias.

Debido a que el campo estático es de magnitud mucho mayor que el de radiofrecuencia y que por tanto es el que puede presentar una potencial peligrosidad en el lugar de trabajo, se procede a medir la densidad de flujo magnético creado por el electroimán en distintos puntos del área de trabajo.

CARACTERÍSTICAS DE LOS PUESTOS DE TRABAJO.- IDENTIFICACIÓN DE PUESTOS DE TRABAJO CON POTENCIAL RIESGO

Hay dos puestos de trabajo de características similares, cuyas tareas realizan dos técnicos de RMN, cada uno encargado de un espectrómetro que controlan, ajustan y mantienen. Los imanes son permanentes por lo que el campo estático es constante.

Se realizan tres tipos de tareas:

a) *Operaciones habituales cerca del imán*

El procedimiento habitual de trabajo consiste en introducir la muestra en la parte superior del imán y sintonizar la sonda en la parte inferior del mismo. Este proceso supone unos 3 minutos de proximidad al imán con exposición de manos, cabeza y tronco del técnico.

La frecuencia de la operación de sintonía de la sonda no es igual para los dos puestos de trabajo: En el **B-300** la sintonía se realiza *una vez al día* y dura un máximo de tres minutos; el puesto de control está situado a 3,40 metros del eje axial del imán. En el caso del **B-500** esta operación debe realizarse *cada vez que se intro-*

duce una muestra. La frecuencia de estos ajustes depende del número de muestras analizadas; el puesto de control dista 4,30 metros del eje axial (vertical) del imán.

b) Trabajo en el puesto de control

El resto de la jornada laboral (unas 5 horas). Desde el puesto de control se ajusta la resolución de la muestra, empleando un tiempo variable (desde 10 minutos a varias horas).

c) Operaciones especiales cerca del imán

Se realizan además operaciones especiales tales como el cambio de sonda (dos o tres veces al mes - 10 minutos de proximidad al imán) y el mantenimiento del imán por recarga de gases criogénicos N₂ y He, según datos facilitados por el Servicio de Prevención.

6.1.2. Metodología empleada

- Realización de estudio previo (características técnicas de equipos, esquema de la instalación e identificación de puestos de trabajo con potencial riesgo).
- Entrevista con los técnicos de RMN e inspección visual de los procedimientos de trabajo.
- Mediciones de campo magnético estático en:
 - Las proximidades de los equipos
 - Los puestos de control
 - La zona de preparación de muestra, y
 - Los locales colindantes (al mismo nivel y en la planta baja)
- Comparación de los valores obtenidos con los criterios recomendados por la ICNIRP en sus "Guidelines" de 1994 para campos magnéticos estáticos.

6.1.3. Equipo de medida

Medidor de campo magnético WALKER SCIENTIFIC INC., modelo MG-4D, portátil, con sonda de efecto Hall (un solo eje). Precisión: ± 0,1 %.

En cada punto de medida, la sonda se ha orientado de forma que se obtuviera la máxima lectura posible de campo magnético, buscando siempre la exposición más desfavorable para el operador.

MEDIDAS DE CAMPO RADIAL

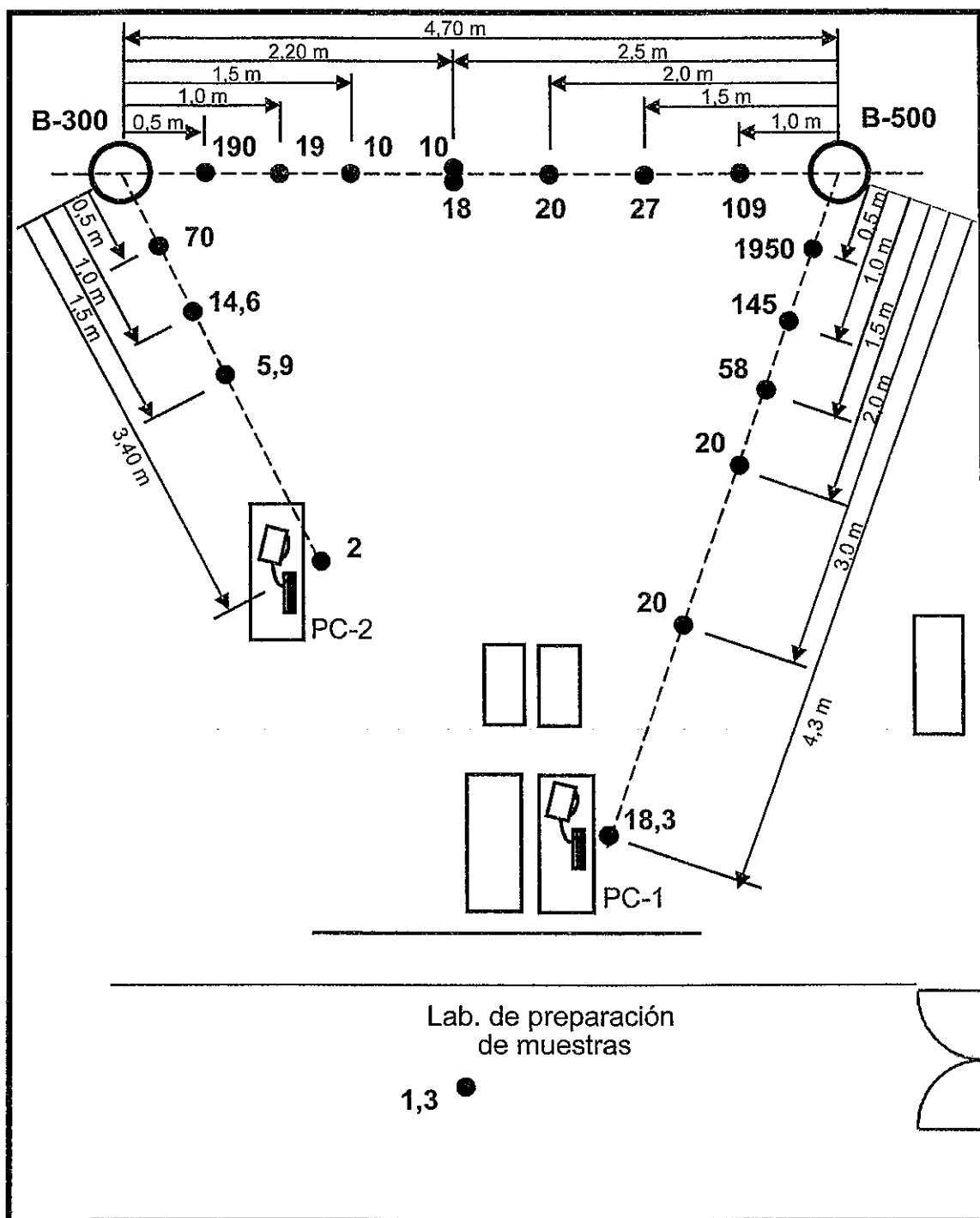


Figura 16.- Medidas de campo radial

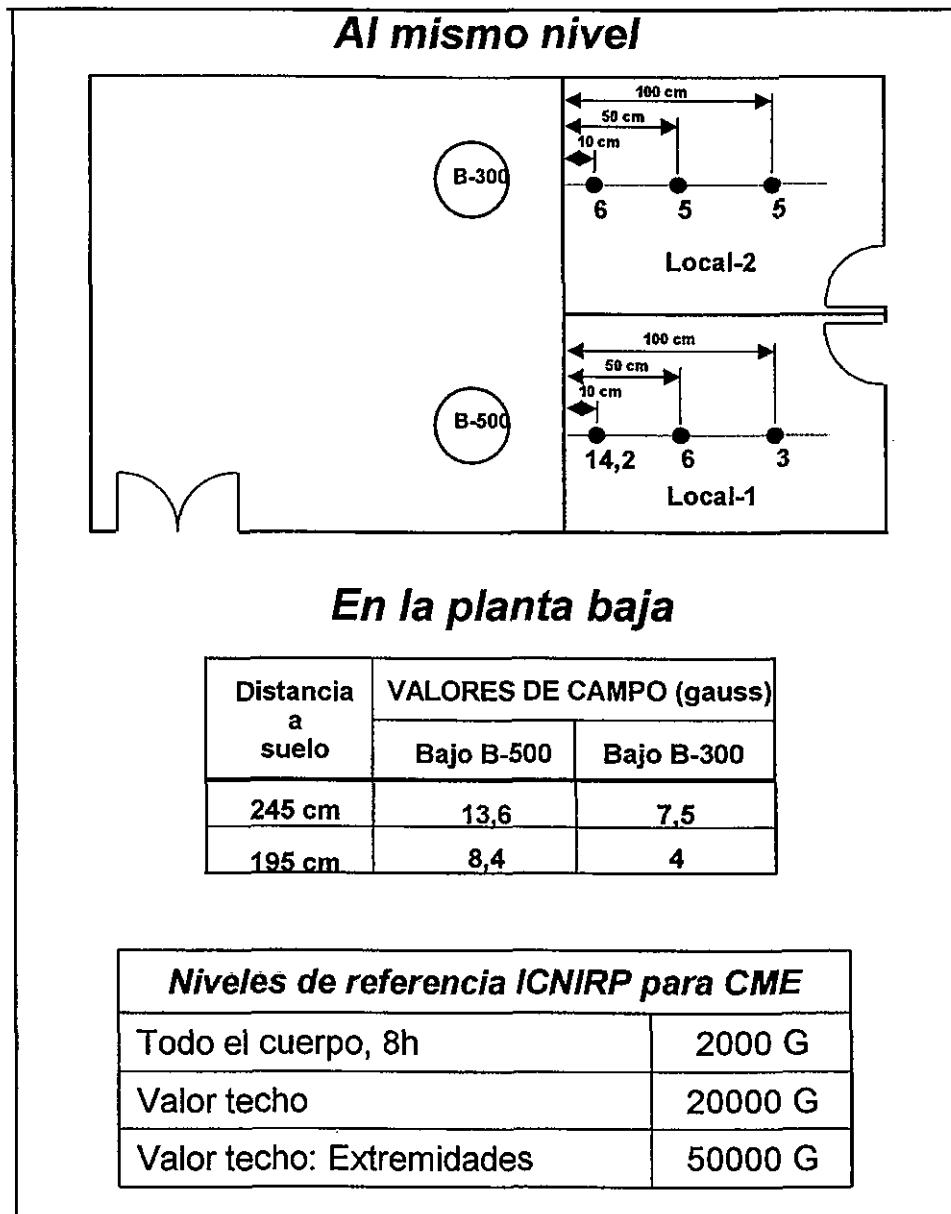


Figura 17.- Medida en locales colindantes (al mismo nivel y en la planta baja)

6.1.4. Resultados15

Debido a que el campo exterior del electroimán es muy variable, se han tomado las lecturas máximas obtenidas en cada posición de medida. Los resultados de las medidas de campo magnético estático se exponen sobre las figuras 16, 17 y 18 y están expresadas en gauss ($1T = 10^4 G$). Se consideró conveniente hacerlo así en lugar de expresarlos en Teslas (SI), por tratarse de valores pequeños, y facilitar su comparación en diagramas. Para separar valores muy bajos se utilizaron gráficos semilogarítmicos

MEDIDAS DE CAMPO RADIAL

Se realizaron medidas a diferentes distancias de cada imán, en las direcciones marcadas en la figura 16, por considerar que reproducen mejor el acercamiento al imán durante la potencial exposición laboral. El origen de las cotas radiales es el eje de cada imán.

La altura de medida en todos los puntos fue la de máximo campo, coincidiendo con el centro magnético de cada imán (entre 1,30 - 1,40 m).

En los puestos de control PC-1 y PC-2, se midió a 1m del suelo para reproducir la exposición del tórax de una persona sentada. En la zona de preparación de muestra se tomaron medidas ambientales; para la evaluación se utilizó el valor máximo.

En los locales 1 y 2 se midió a partir de la pared contigua al Servicio de RMN, y en el local inferior, a varias alturas bajo cada imán (figura 17).

MEDIDAS DE CAMPO AXIAL

Se ha partido del supuesto más desfavorable, midiendo en el punto de inserción de las muestras (parte superior) y bajo el imán, para reproducir las operaciones de sustitución y sintonización de la sonda manipulando cerca de cada imán con exposición de las manos y la cabeza del operador (figura 18).

MEDIDAS DE CAMPO AXIAL

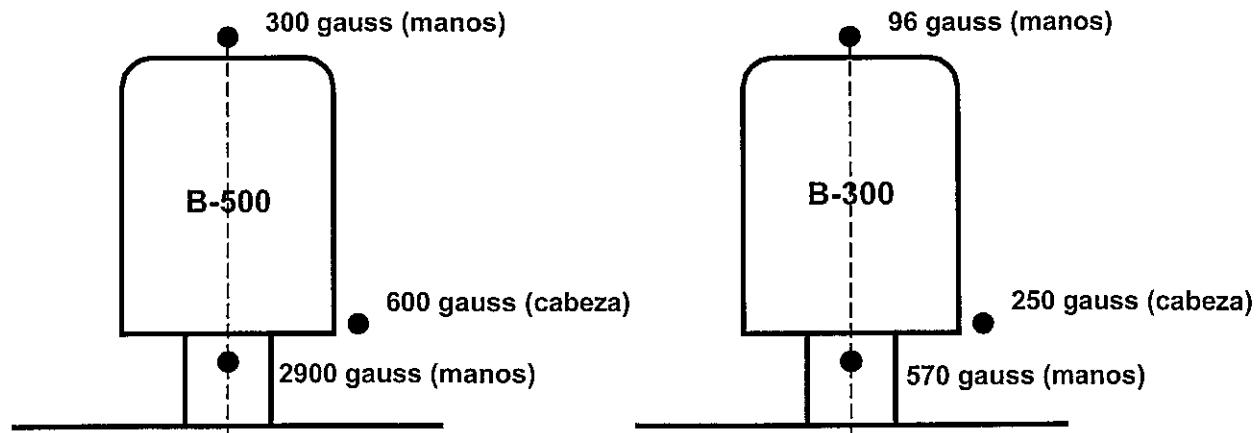


Figura 18.- Medidas de campo axial

6.1.5. Evaluación del riesgo

Se aplican los criterios de exposición laboral de la ICNIRP para CME de 1994. Se trata de un caso de exposición discontinua, muy baja en la consola de control y algo más elevada durante los procesos de sintonización de la sonda y sustitución de la muestra.

Comparando los niveles de referencia para exposición laboral con los valores de campo magnético obtenidos puede verse que no se superan en ningún caso:

En el supuesto más desfavorable, que son las operaciones de sustitución y sintonización de la sonda manipulando debajo del imán B-500, se obtiene un valor máximo de 2900 gauss (0,29 T) aplicable a las manos, que corresponde a un 6% del nivel recomendado para extremidades; el valor 600 gauss (0,06 T), aplicable a la cabeza, es el 3% del valor techo para cuerpo completo y el 30% si se compara con el valor promediado para 8 h/día.

Para B-300 la exposición máxima de las manos (570 gauss) está alrededor de un 1,1% del nivel para extremidades, y para la cabeza (250 gauss) es el 1,3% aproximadamente.

Los valores obtenidos en los puestos de control y en las zonas de paso son tan bajos que tampoco superan los niveles recomendados para público general.

En el caso de la utilización de la sala de la planta baja y de los locales 1 y 2 por personas ajenas al servicio de RMN, no se superan los niveles de referencia aplicables para público en general.

6.1.6. Comparación con la exposición a CME en equipos similares

Los valores obtenidos se comparan con algunas mediciones realizadas en el área de trabajo de otros espectrómetros de RMN.

Los valores medidos para exposiciones a corta distancia del imán en operaciones habituales son más elevados en el trabajo con el equipo de 11,7 T. Como se disponía de otros valores medidos en instalaciones similares (diferente fabricante, con emisión máxima entre 4,7 y 11,3 T y similares diámetros de bobina), se han comparado los valores de campo magnético estático por cada tipo de operación, como puede verse en el gráfico de la figura 19. La operación que presenta un nivel de exposición más elevado es la de sintonizar la sonda en el eje magnético del imán (manos), seguida de la exposición de la cabeza en la misma operación, y los

valores son más altos para el equipo B-500 (11,7 T) seguido del B-300 (7 T) y del V-500 (11,3 T). Esto puede deberse a sus diferentes especificaciones técnicas.

Exposición a CMS por tipo de operación

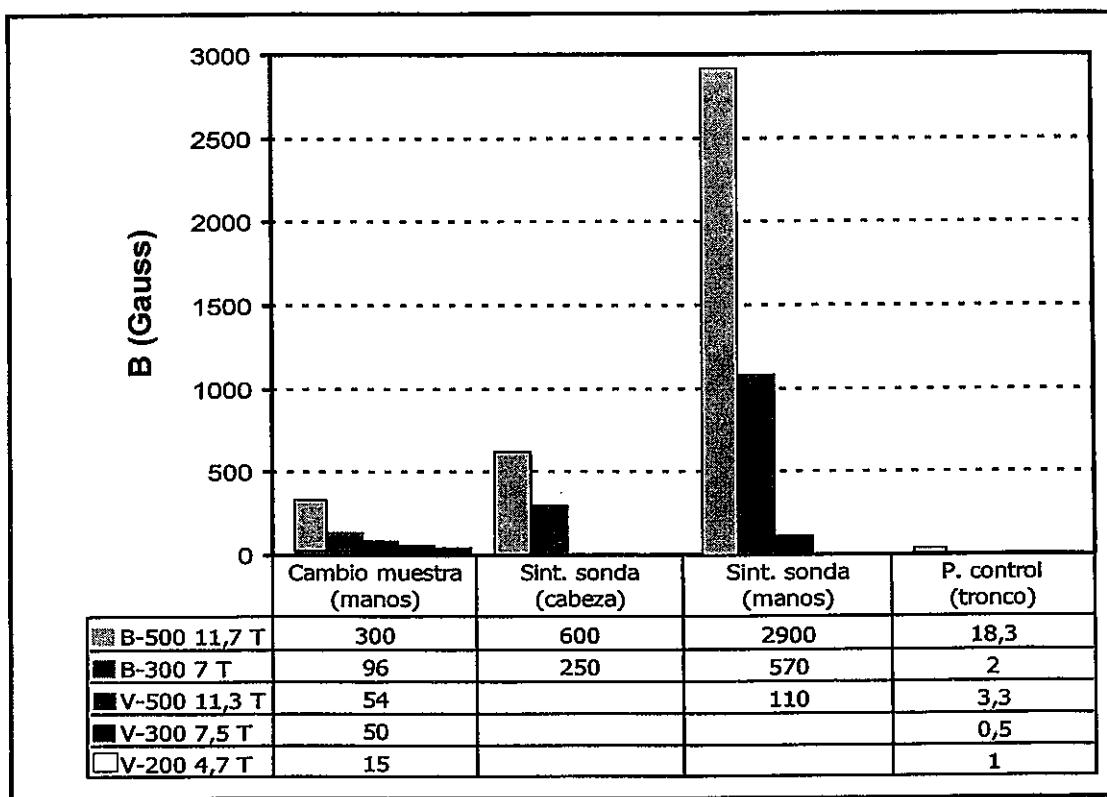


Figura 19.- Exposición a CME por tipo de operación

Cuando se compara la disminución de los valores radiales de B al alejarse de los imanes en dirección hacia cada consola de control y en dirección hacia el otro imán, el campo magnético estático decrece muy rápidamente, hasta unos 2 metros, y después se estabiliza. Los valores en los puestos de control son bajos ya que están más alejados, siendo más alto en PC-1 como corresponde a la mayor potencia del imán (figura 20). En la figura 21 se comparan por tipo de instalación (sobre tarima, en suelo o en foso).

6.1.7. Recomendaciones

- Exposición discontinua a CMS, muy baja en consola de control y algo mayor en los procesos manuales de cambio de muestra y sintonización de sonda. Durante esta operación la cabeza del operador se acerca mucho al imán. En el caso de B-500 es conveniente realizarla en el mínimo tiempo posible a la vez que se informa al operador sobre su nivel de potencial exposición y del riesgo en caso de superar los niveles recomendados.

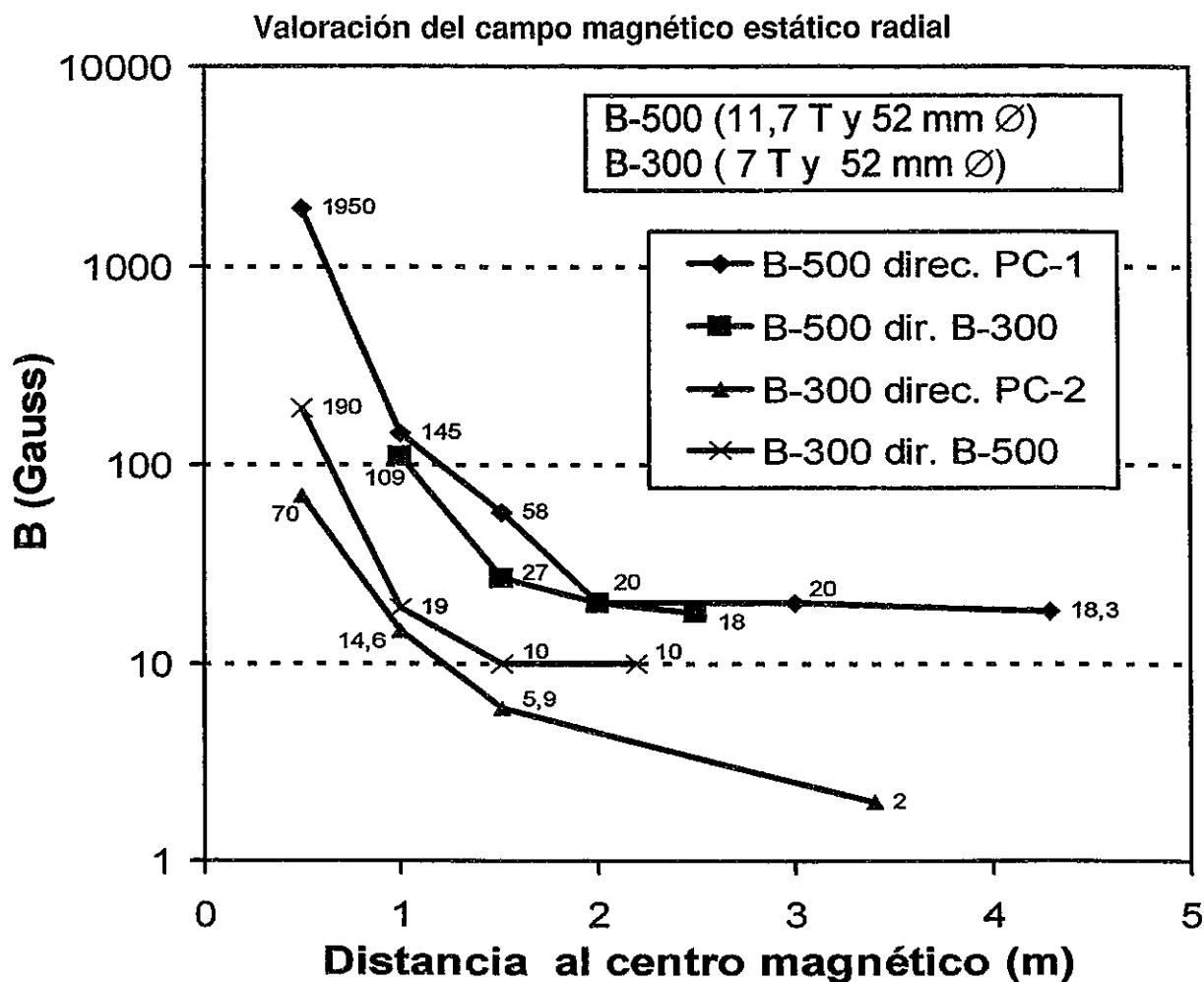


Figura 20.- Comparación del campo radial con la distancia

- La variación radial del CMS depende de las especificaciones técnicas de cada imán (densidad de flujo magnético, diámetro de la bobina, blindaje ferromagnético...) y decrece rápidamente al aumentar la distancia a la fuente. Se recomienda consultar la información proporcionada por el fabricante.
- Conviene instalar los equipos de RMN en planta baja y separados de locales destinados a otro uso, ya que, aunque no se superen los niveles de referencia para público, los criterios de la ICNIRP no garantizan la protección frente a disfunciones de marcapasos, implantes magnéticos, discos de ordenador, cintas magnéticas, relojes analógicos, tarjetas de crédito.
- Se deberán seguir las instrucciones de seguridad del fabricante, en especial sobre: fuerzas ejercidas sobre materiales magnéticos situados en el campo, señalización y manipulación de gases criogénicos (Helio y Nitrógeno).

- El peligro más serio es la manipulación de gases licuados. Sería conveniente disponer de un equipo de respiración autónoma en la puerta exterior del laboratorio, y que una persona con la formación adecuada estuviera preparada para intervenir en caso de escape o vertido. Se deberán utilizar: guantes protectores, botas cerradas y gafas o pantallas faciales.

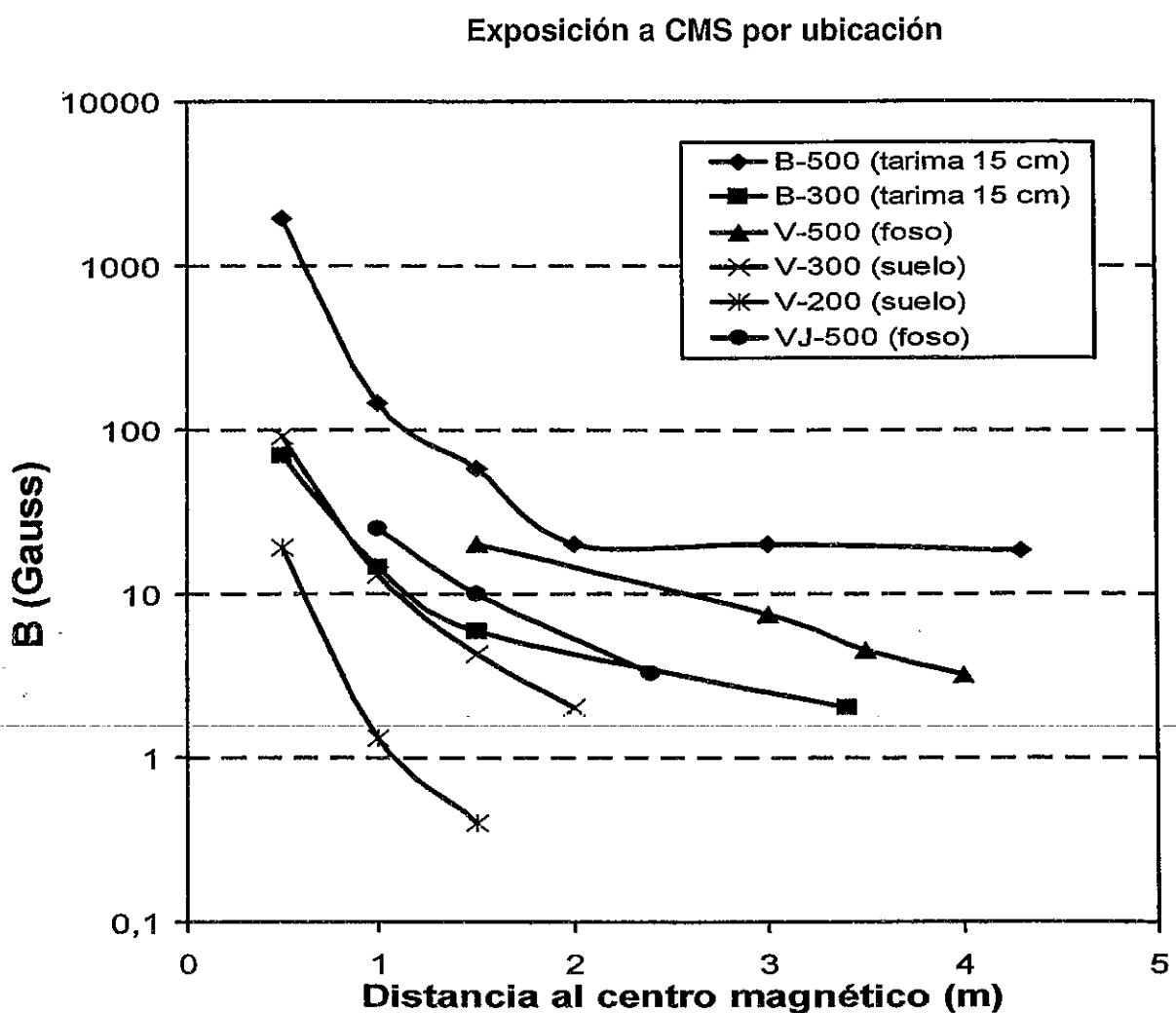


Figura 21.- Comparación del CMS por tipo de instalación

6.2. CASO 2: EXPOSICIÓN LABORAL A CAMPO MAGNÉTICO ESTÁTICO GENERADO POR UN ESPECTRÓMETRO DE RESONANCIA CICLOTRÓNICA DE IONES EN UN CENTRO DE INVESTIGACIÓN

ANTECEDENTES

Este estudio se realizó como consecuencia de la reclamación efectuada por el personal que utiliza despachos situados encima de un laboratorio en el que se encuentra un espectrómetro de resonancia ciclotrónica de iones, en un centro de investigación: los ocupantes de esos despachos veían alterado el funcionamiento de sus ordenadores personales. No se había realizado la evaluación inicial de los puestos de trabajo.

El espectrómetro de Resonancia Ciclotrónica de Iones (ICR-FT) es un espectrómetro de masas basado en el efecto de un campo magnético muy intenso ($B > 4\text{T}$) sobre la trayectoria de partículas cargadas (iones). La utilidad del fenómeno ICR en la espectrometría de masas radica en que todos los iones con una misma relación masa-carga (m/q) tienen la misma frecuencia ciclotrónica (ω_c) independientemente de su velocidad inicial.

Las trayectorias que describen los iones inducen en las placas de detección señales periódicas que, convenientemente tratadas, son procesadas en el modo "Transformada de Fourier" (FT) y finalmente se registran los picos de intensidad iónica en función de la relación m/q (espectro ICR).

6.2.1. Estudio previo

DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN

Sé trata de un Laboratorio en planta baja, en el que está instalado un espectrómetro de Resonancia Ciclotrónica de Iones (ICR-FT).

En la planta superior, exactamente sobre este laboratorio, se encuentra un despacho que corresponde a otra institución, cuyos ocupantes han planteado la reclamación que motiva el estudio (ver esquema de la figura 22).

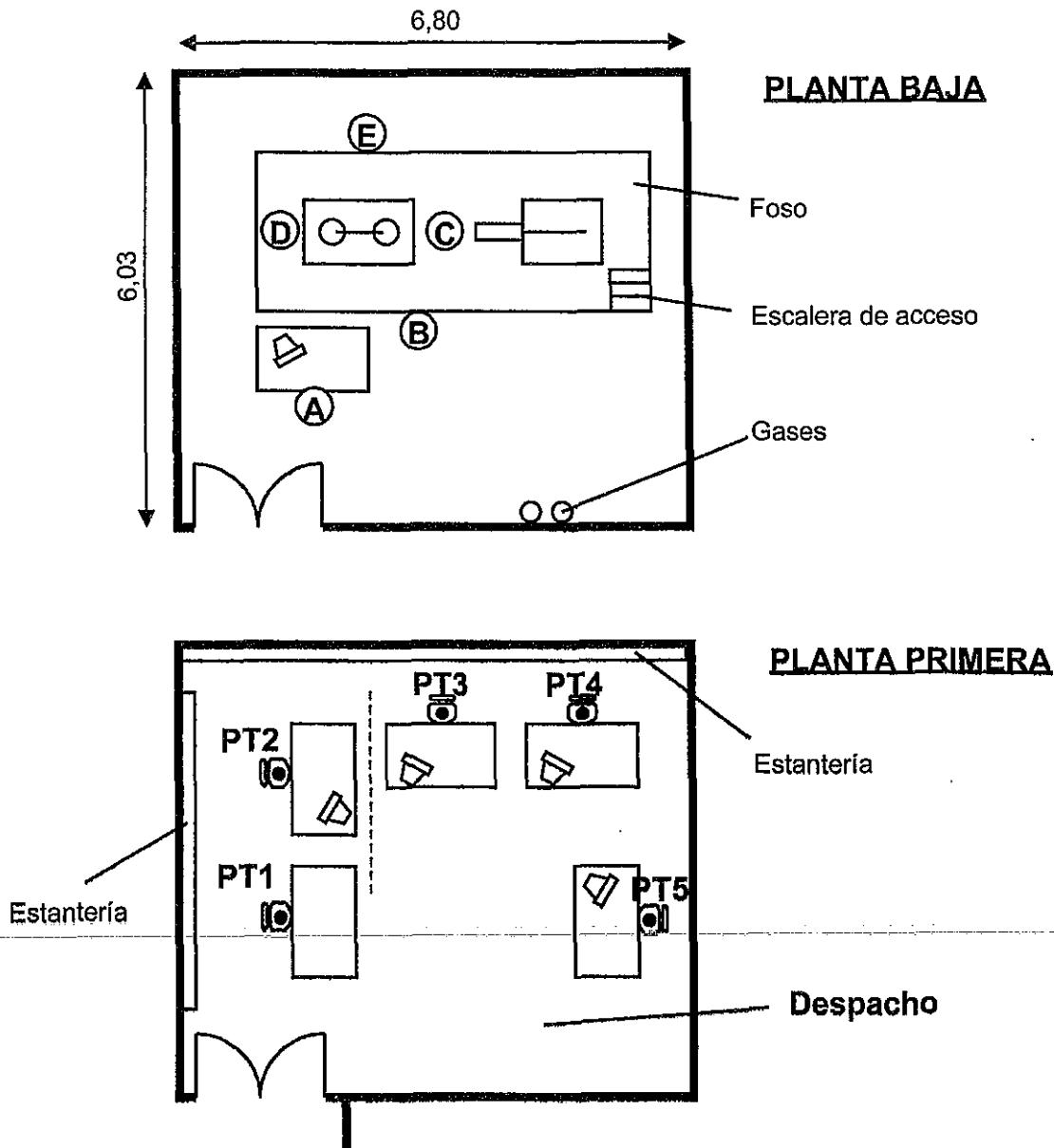


Figura 22.- Esquema de la instalación

DESCRIPCIÓN DE LA FUENTE EMISORA

El ICR-FT es un espectrómetro Bruker CMS 47 modificado, tiene un campo magnético central de $B_0 = 4.7$ Tesla, generado por una bobina superconductora de NbTi. La cámara de trabajo se mantiene bajo alto vacío (entre 10^{-9} y 10^{-6} torr) y dentro de ella se encuentra la celda de confinamiento iónico.

El equipo está instalado en un foso, quedando el eje del solenoide a la altura del suelo de la sala (ver figura 23). El puesto de control, con el sistema de adquisición y procesamiento de datos, está situado a unos 2 m.



Figura 23.- Espectrómetro FT-ICR

La bobina está permanentemente conectada, por lo que el campo magnético es constante, y se refrigerará mediante Helio y Nitrógeno líquidos.

DESCRIPCIÓN DE LOS PUESTOS DE TRABAJO - IDENTIFICACIÓN DE PUESTOS DE TRABAJO CON POTENCIAL RIESGO

Hay un puesto de trabajo asociado a la técnica de ICR-FT, ocupado por una becaria pre-doctoral, que permanece en este laboratorio solamente para realizar ensayos. Se hacen dos ensayos al día, con una duración máxima total de tres horas en el peor de los casos. El resto de su jornada laboral lo dedica a otras tareas en un despacho alejado del laboratorio.

Cada ensayo comprende dos tipos de tareas:

- Dentro del foso, para realizar la puesta a punto del equipo y preparación y cambio de muestras, así como cambio de las condiciones durante el ensayo. (La duración estimada es de 30 minutos por ensayo).
- El resto del tiempo, unas dos horas discontinuas, permanece en el puesto de control, vigilando el desarrollo de los ensayos.

En el despacho de la planta superior desarrolla su trabajo personal investigador de otro Centro, 4 ó 5 personas en total que permanecen en los despachos durante toda su jornada laboral.

6.2.2. Metodología empleada

- Realización de estudio previo, para el que se tuvo que recurrir a la página web del fabricante.
- Medidas de densidad de flujo magnético para reproducir la potencial exposición a campo magnético estático, en las siguientes situaciones:
 - 1.- Medidas en la planta baja, en los puntos en que se espera mayor exposición o bien el tiempo de permanencia es mayor, para valorar la potencial exposición del tórax de la operadora:
 - Dentro del foso, donde se realizan las operaciones de preparación y cambio de muestras así como la modificación de las condiciones de trabajo.
 - En el borde del foso, correspondiente a operaciones de mantenimiento y servicio.
 - En el puesto de control, debido al mayor tiempo de permanencia.
 - 2.- Medidas en la planta primera:
 - En cada puesto de trabajo, para valorar la potencial exposición del tórax de una persona sentada. En los puestos situados sobre el imán se han realizado también medidas a nivel del suelo, para valorar la exposición de las extremidades inferiores.

Como los valores más altos encontrados correspondían efectivamente a los puestos de trabajo situados sobre el imán - marcados con 2 y 3 en el esquema de la figura 22 -, se realizaron una serie de medidas adicionales en el espacio comprendido entre ambos a nivel del suelo, para obtener un valor promediado de la exposición en la zona transitable.

- En cada punto de medida se han tomado las lecturas máximas de campo magnético, buscando siempre la exposición más desfavorable para el usuario.
- Comparación de los resultados obtenidos con los límites de exposición del ICNIRP.

6.2.3 Equipo de medida

Medidor de campo magnético de METROLAB Instruments SA, modelo ETM-1 versión W&G, con sonda triaxial que utiliza elementos Hall. Incertidumbre $\pm 2\%$.

El ETM-1 calcula y visualiza el módulo del vector densidad de flujo magnético según la fórmula:

$$B = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2}$$

6.2.4. Resultados de las mediciones

Los resultados de las medidas de campo magnético estático se exponen a continuación en las siguientes tablas como densidad de flujo magnético, B (mT). Debido a que el campo exterior del electroimán es muy variable, se han tomado las lecturas máximas obtenidas en cada posición de medida.

1 - Medidas en la planta baja - ver esquema de la instalación Figura 22

Punto de medida	Altura sobre el suelo	B(mT)	% nivel referencia para exposición continua	Nivel de referencia ICNIRP
A	1 metro	0,56 ± 0,01	0,3	Para todo el cuerpo, 8 h: 200 mT Valor techo: 2T Extremidades: 5T
B	1 metro	3,03 ± 0,06	1,5	
C	Dentro del foso, en el eje del imán	70 ± 1,4	35	
D		35 ± 0,7	17,5	
E	1 metro	14 ± 0,3	7	

2 a.- Medidas en la planta primera (despacho) - Ver puestos de trabajo en el esquema de la figura 22

Punto de medida	B(mT)		%nivel referencia para exposición continua	Nivel de referencia ICNIRP
	A 0,2 m del suelo	Altura tronco 1,2 m		
PT 1	-	0,11 ± 0,01	0,06	Para todo el cuerpo, 8 h: 200 mT Valor techo: 2T Extremidades: 5T
PT 2	0,40	0,28 ± 0,01	0,14	
PT 3	0,48	0,28 ± 0,01	0,14	
PT 4	-	0,15 ± 0,01	0,08	
PT 5	-	0,13 ± 0,01	0,07	

2 b.- Medidas a nivel del suelo en la zona de tránsito en la vertical del imán

Se realizaron cuatro medidas a 20 cm del suelo, obteniéndose un valor medio de

$$B = (0,49 \pm 0,02) \text{ mT.}$$

Este valor corresponde aproximadamente a un 0,01% del nivel de referencia para exposición de las extremidades (5T).

6.2.5. Evaluación del riesgo

Comparando los niveles de referencia para exposición laboral con los valores de campo magnético obtenidos en las mediciones de los apartados 1, 2.a y 2.b, puede verse que no se superan en ningún caso y que, en el supuesto más desfavorable (en el laboratorio, dentro del foso, punto C), representaría un 35% del nivel recomendado para 8 horas de trabajo con exposición de todo el cuerpo. Si se aplica el valor techo para exposiciones cortas, la exposición laboral sería inferior al 4% del nivel recomendado. Hay que tener en cuenta que la permanencia de la operadora en el punto C sería de dos períodos de 30 minutos al día en el peor de los casos.

Los valores obtenidos en el puesto de control y zonas fuera del foso no superan los límites de exposición para público durante 8 horas.

En cuanto a los valores medidos en el despacho de la primera planta, nunca se llegó al 1% del nivel de referencia para cuerpo completo. En el caso de comparar los valores medidos al nivel del suelo con el nivel de referencia para extremidades, no se superaría el 0,01%.

6.2.6. Recomendaciones

- Deberá tenerse en cuenta que, aunque no se superen los niveles de referencia para público en general, los criterios del ICNIRP no garantizan la protección frente a disfunciones de marcapasos ni de implantes magnéticos.
- Se recuerda que el funcionamiento de determinados equipos electrónicos puede verse afectado en campos bastante bajos, por ejemplo: un monitor en color muestra distorsiones con campos de 0,1 mT.
- En cuanto a la seguridad de funcionamiento con el espectrómetro de ICR, se deberán seguir las instrucciones del fabricante, en especial en lo referente a fuerzas ejercidas sobre materiales magnéticos situados en el campo, señalización y manipulación de gases criogénicos.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Miguel, L. Geomagnetismo. 3^a ed. Madrid: Instituto Geográfico Nacional, 1980.
2. Organización Mundial de la Salud. "Proyecto Internacional CEM".
Dirección de Internet: www.who.int/peh-emf.
3. Moulder, J.E. "Static electric and magnetic fields and cancer". Medical College of Wisconsin. Dirección de Internet: www.mcw.edu/gcrc/cop.html
4. Tipler, P. Física para la Ciencia y la Tecnología, 4^a ed., Vol. 2, Cap.22-32. Editorial Reverte S.A., 1999.
5. Young, H. y Freedman, R. Física Universitaria 9^aed. Vol. 2, Cap.22-33. Editorial Addison, Wesley, Longman, 1999.
6. International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, "Guidelines on limits of exposure to static magnetic fields". Health Physics 66 (1), 100-106, 1994.
7. Llanos, C. "Campos eléctricos y magnéticos de 50 Hz. Análisis del estado actual de conocimientos". Red Eléctrica de España, 1998.

8. Chadwick, P.J. et al. "Magnetic Fields on British trains". Annual Occupational Hyg. 5: 331-335, 1998.
9. Polk, C. y Postow, E. Handbook of biological effects of electromagnetic fields. 2nd ed., Chapter 3:149-183. Ed. Boca Ratón, 1996.
10. Mevissen, M. et al. "Effects of magnetic fields on mammary tumor development induced". Bioelectromagnetics 14: 131-143, 1993.
11. Watanabe, Y. et al. "Enhancement of lipid peroxidation in the liver of mice exposed to magnetic fields" Industrial Health 35: 285-290, 1997.
12. IRPA/INIRC Guidelines: "Protection of the patient undergoing a magnetic resonance examination" Health Physics 61 (6): 923-928, 1991.
13. Norma UNE-EN 60601-2-33: 1997. "Equipos electromédicos. Parte 2: Requisitos particulares de seguridad de los equipos de Resonancia Magnética para diagnóstico médico".

14. Budinger, T. et al. "Biological effects of static magnetic fields" In: "Proceedings of the 3rd annual meeting of the Society of Magnetic Resonance in Medicine". Berkeley. Society of Magnetic Resonance in Medicine 1984: 113-114.
15. Ronneberg, A. y Yersen,A. "Mortality and cancer morbidity from an aluminium smelter with prebaked carbon anodes" Occupational Environ. Medical 52: 250-254, 1995.
16. Barregard, L. et al. "Cancer among workers exposed to strong static magnetic fields" Lancet 2: 892, 1995.
17. Kanal, E. et al. "Safety considerations in magnetic resonance imaging" Radiology 176: 593-606, 1990.
18. Phillips, M.L. "Industrial hygiene investigation of static magnetic fields in nuclear magnetic resonance facilities" Appl. Occup. Environ. Hyg. 5 (6): 353-358, 1990.
19. Jonsson, P. y Barregard, L. "Estimated exposure to static magnetic fields for the staffs of NMR-UNITS". Occup. Med. 46 (1): 17-19, 1996.
20. Marsh, J.L. et al. "Health effects of occupational exposure to steady magnetic fields", Am. Industrial Hyg. Association J. 43: 387-394, 1982.

21. Pastides, H. et al. "A characterization of occupational static magnetic field exposures at a diaphragm-cell and a mercury-cell chlor-alkali facility", Appl. Occup. Environ. Hyg. 7 (1): 42-48, 1992.
22. NIOSH Health Hazard Evaluation Report: " Alumax of South Carolina, centers for disease control and prevention". NIOSH, 1994.
23. Von Kaenel, R. et al. "The determination of the exposure to EMF in aluminium electrolysis", In: "Light Metals 1994". U. Mannweiler, ed. The Minerals, Metals and Materials Society, pp. 253-260, 1994.
24. Mur, J. et al. "Demographic evaluation of the fertility of aluminium industry workers: Influence of exposure to heat and static magnetic fields", Human Repro. 13: 2016-2019, 1998.
25. Liu, J. et al. "The effect of the static magnetic field on the response of radiation survey instruments", Health Physics 64 (1),59-63, 1993.

26. Skotte, J. "Exposure of welders and other metal workers to ELF magnetic fields", Bioelectromagnetics, 18: 470-477, 1997.
27. Miller, G. "Exposure guidelines for magnetic fields ". Amer. Indust Hyg. Assoc. J. 48: 957-968, 1987.
28. OMS "Environmental Health Criteria (EHC) 69. Magnetic Fields". OMS. Ginebra, 1987.
29. NRPB Statement by the NRPB " Restrictions on human exposure to static and time varying electromagnetic fields and radiation". Documents of the NRPB Vol.4, nº 5, 1993.
30. Consejo de la Unión Europea. "Recomendación del Consejo de 12.07.99 relativa a la exposición del público en general a campos electromagnéticos (0 Hz a 300 GHz). Anexo II, "Restricciones Básicas", DOCE de 30.07.99 L 199/64.
31. ACGIH. Documentation of the TLVs for physical agents. 7th Ed. ACGIH, 2001.
32. ACGIH. 2003 TLVs and BEIs. ACGIH, 2003.
33. ICNIRP,. "Exposure to static and low frequency electromagnetic fields, biological effects and health consequences (0-100 kHz) - Review of the scientific evidence and health consequences". ICNIRP, 2003, (www.icnirp.de/pubEMF.htm)

ANEXO
RESUMEN DE VALORES LÍMITE PARA CAMPOS ESTÁTICOS

ORGANISMO	TIPO DE EXPOSICIÓN	VALORES LÍMITE
LLNL (Lawrence Livermore National Laboratory)	Portadores de marcapasos (CME)	1mT
	Nivel de acción (CME)	50 mT
	TWA cuerpo completo (CME)	60 mT
	TWA extremidades (CME)	600 mT
	Valor Techo (CME)	2 T
OMS	Exposición de corta duración (CME)	2 T
NRPB (National Radiological Protection Board)	Valor techo para campo electrostático	25 KV/m
	TWA 24 horas (CME)	200 mT
	V. Techo c. c. (CME)	2 T
	V. Techo extremidades (CME)	5 T
ICNIRP	TWA 8 horas /CME)	200 mT
	V. Techo c. c. (CME)	2 T
	V. Techo extremidades (CME)	5 T
	Portadores de marcapasos (CME)	0,5 mT
ACGIH	Valor Techo de campo electrostático	25 KV/m
	TWA 8 horas c.c. (CME)	60 mT
	TWA 8 horas extremidades (CME)	600 mT
	Valor Techo c. c. (CME)	2 T
	V. Techo extremidades (CME)	5 T
	Portadores de marcapasos (CME)	0,5 mT



MINISTERIO
DE TRABAJO
Y ASUNTOS SOCIALES

