

EFFECTOS SOBRE LA **SALUD**
HUMANA DE LOS **CAMPOS**
MAGNÉTICOS Y
ELÉCTRICOS DE MUY BAJA
FRECUENCIA (ELF)



EFFECTOS SOBRE LA SALUD HUMANA DE
LOS CAMPOS MAGNÉTICOS Y ELÉCTRICOS
DE MUY BAJA FRECUENCIA (ELF)

Autores: Grupo de investigación PRINIA de la Universidad de Córdoba, formado por:

- Ing. Mario Ruz Ruiz
- Prof. Dr. Francisco Vázquez Serrano
- Prof. Dr. Antonio J. Cubero Atienza
- Prof. Dr. Lorenzo Salas Morera
- Prof. Dr. Jorge E. Jiménez Hornero
- Prof. Dr. Antonio Arauzo Azofra
- Prof. Juan R. Cubero Atienza
- Profa. Laura García Hernández
- Profa. María Dolores Redel Macías
- Ing. Juan Garrido Jurado

Los autores agradecen la inestimable colaboración de la Dirección de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible de Endesa y, concretamente, la de D. Rafael Pacheco Panizo.

Edita: Junta de Andalucía. Consejería de Empleo.
Coordina: Dirección General de Seguridad y Salud Laboral.
Depósito Legal: SE-1.874/2010

ISBN: 978-84-692-4787-7

Diseño y maquetación: Centro Diseño Tres

El Plan General para la Prevención de los Riesgos Laborales en Andalucía 2003-2008, que tiene continuidad en la recién aprobada Estrategia Andaluza de Seguridad y Salud en el Trabajo 2009-2014, se planteaba como objetivos generales la promoción de la salud, la reducción de la siniestralidad laboral y la mejora de las condiciones de trabajo, cuestiones todas ellas que tenían y tienen un carácter prioritario para el Gobierno de la Junta de Andalucía.

Una de las 130 acciones que el Plan contemplaba se refería al esclarecimiento de los riesgos asociados a las radiaciones electromagnéticas que más tarde se concretaron en la zona del espectro correspondiente a los campos eléctricos y magnéticos de muy baja frecuencia, por razones que se exponen a continuación.

La generación, transporte y consumo de energía eléctrica han pasado a formar parte integrante de la vida cotidiana. Desde finales de los años setenta, se han planteado interrogantes sobre si la exposición a los campos eléctricos y magnéticos que crean estas instalaciones tienen o no consecuencias adversas para la salud humana. Para tratar de encontrarles respuesta, se han llevado a cabo numerosos estudios, que han resuelto algunas cuestiones y suscitado otras, contribuyendo así a enfocar mejor las investigaciones posteriores.

Si bien en la actualidad existen recomendaciones de organismos internacionales sobre límites de exposición a estas radiaciones, se basan exclusivamente en sus efectos a corto plazo, mucho mejor conocidos. Los estudios más recientes, muy numerosos en los últimos años, se han centrado en determinar si, por debajo de dichos límites, pueden producirse efectos perjudiciales para la salud humana en exposiciones crónicas.

El estudio que aquí se presenta, realizado por el grupo de investigación de la Universidad de Córdoba que dirige el profesor Cubero Atienza, constituye una exhaustiva revisión bibliográfica sobre el tema. A partir de ella, establece el estado actual del conocimiento sobre la relación entre

campos eléctricos y magnéticos de muy baja frecuencia y salud, por una parte, y desgrana una serie de interesantes propuestas de actuación, referidas tanto a la investigación básica como a la estimación de las situaciones de exposición en Andalucía, por otra.

Aunque aún persisten muchas dudas en este campo, creo que esta publicación es una valiosa contribución para los interesados y, por lo que respecta a la Consejería de Empleo, sólo el primer paso de una dedicación que va a continuar, en el nuevo marco de la Estrategia Andaluza, en beneficio de la seguridad y salud de los trabajadores de nuestra tierra.

Sevilla, Julio de 2009

Antonio Fernández García

Consejero de Empleo

ÍNDICE DOCUMENTO

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

| | |
|------------------------|----|
| 1.1 INTRODUCCIÓN | 15 |
|------------------------|----|

CAPÍTULO 2: OBJETIVOS

| | |
|------------------------|----|
| 2.1 INTRODUCCIÓN | 17 |
|------------------------|----|

CAPÍTULO 3: LOS CAMPOS DE MUY BAJA FRECUENCIA (ELF)

| | |
|---|----|
| 3.1 INTRODUCCIÓN | 19 |
| 3.1.1 El concepto de campo..... | 19 |
| 3.1.2 Magnitudes y unidades..... | 21 |
| 3.1.3 Principales características | 23 |
| 3.1.4 Perturbaciones a los campos. Apantallamiento..... | 25 |
| 3.2 FUENTES..... | 25 |
| 3.2.1 Campos eléctricos..... | 26 |
| 3.2.2 Campos magnéticos..... | 29 |
| 3.2.2.1 Líneas de transporte de energía eléctrica..... | 29 |
| 3.2.2.1.1 Niveles de campo para líneas aéreas..... | 31 |
| 3.2.2.1.2 Niveles de campo para líneas subterráneas | 32 |
| 3.2.2.1.3 Niveles de campo para líneas de distribución..... | 34 |
| 3.2.2.2 Dispositivos y aplicaciones eléctricas..... | 36 |
| 3.2.2.3 Medios de transporte..... | 38 |
| 3.3 EXPOSICIÓN HUMANA..... | 39 |
| 3.3.1 Exposición laboral | 40 |
| 3.3.2 Exposición no ocupacional | 44 |

CAPÍTULO 4: LOS CAMPOS ELF Y LA SALUD HUMANA

| | |
|---|----|
| 4.1 INTRODUCCIÓN..... | 49 |
| 4.2 TIPOS DE ESTUDIOS..... | 51 |
| 4.3 EFECTOS BIOLÓGICOS..... | 55 |
| 4.3.1 Mecanismos biofísicos..... | 57 |
| 4.4 POSIBLES EFECTOS Y PATOLOGÍAS EN LA SALUD HUMANA..... | 60 |
| 4.4.1 Efectos a corto plazo..... | 60 |
| 4.4.2 Efectos a largo plazo..... | 60 |
| 4.4.3 Resumen de efectos potenciales y enfermedades asociadas | 62 |
| 4.4.3.1 Neurocomportamiento | 62 |
| 4.4.3.2 Sistema neuroendocrino | 64 |
| 4.4.3.3 Trastornos neurodegenerativos..... | 66 |
| 4.4.3.4 Trastornos cardiovasculares..... | 67 |
| 4.4.3.5 Inmunología y hematología | 67 |
| 4.4.3.6 Reproducción y desarrollo | 68 |
| 4.4.3.7 Cáncer..... | 70 |
| 4.5 CONCLUSIONES GENERALES..... | 73 |

CAPÍTULO 5: ESTÁNDARES ICNIRP e IEEE C.95.6TM

| | |
|--|----|
| 5.1 INTRODUCCIÓN..... | 75 |
| 5.1.1 Objetivos generales de los estándares..... | 76 |
| 5.2 RESTRICCIONES BÁSICAS | 77 |
| 5.3 EXPOSICIÓN MÁXIMA PERMISIBLE (MPES) Y NIVELES DE REFERENCIA (RLS)..... | 78 |
| 5.3.1 MPES y RLs para el campo magnético..... | 79 |
| 5.3.1.1 Modelos de inducción..... | 81 |
| 5.3.2 Límites para el campo eléctrico | 83 |
| 5.4 RESUMEN DE LA COMPARACIÓN Y CONCLUSIONES | 84 |
| 5.5 NORMATIVA..... | 86 |
| 5.6 ASPECTOS AVANZADOS DE LA COMPARACIÓN..... | 90 |

CAPÍTULO 6: MÉTODOS DE MEDIDA

| | |
|--|-----|
| 6.1 INTRODUCCIÓN. VALORACIÓN DE LA EXPOSICIÓN..... | 101 |
| 6.1.1 Consideraciones generales..... | 101 |
| 6.2 VALORACIÓN DE LA EXPOSICIÓN RESIDENCIAL A CAMPOS MAGNÉTICOS: MÉTODOS QUE NO INVOLUCRAN MEDIDAS | 103 |
| 6.2.1 Distancia..... | 103 |
| 6.2.2 Código de cables (wire coding) | 103 |
| 6.2.3 Cálculo de historial de campos | 105 |

| | |
|--|-----|
| 6.3 VALORACIÓN DE LA EXPOSICIÓN RESIDENCIAL A CAMPOS MAGNÉTICOS: MÉTODOS A PARTIR DE MEDIDAS..... | 106 |
| 6.3.1 Medidas puntuales (spot measurements) | 107 |
| 6.3.2 Medidas a largo plazo (long-term)..... | 107 |
| 6.3.3 Monitorización personal de la exposición..... | 110 |
| 6.4 EJEMPLOS DE VALORACIÓN..... | 114 |
| 6.4.1 Valoración de la exposición a campos magnéticos generados por dispositivos eléctricos | 114 |
| 6.4.2 Valoración de la exposición en las escuelas | 115 |
| 6.4.3 Valoración de la exposición no ocupacional a los campos magnéticos..... | 116 |
| 6.4.4 Valoración de la exposición ocupacional a los campos magnéticos | 117 |
| 6.4.5 Aplicación de la norma UNE 215001:2004..... | 120 |
| 6.4.5.1 Procedimiento de medida del campo magnético de las líneas eléctricas aéreas de alta tensión..... | 120 |
| 6.4.5.2 Procedimiento de medida del campo magnético de las líneas eléctricas subterráneas de alta tensión | 122 |
| 6.4.5.3 Informes de las medidas del campo..... | 123 |
| 6.5 VALORACIÓN DE LA EXPOSICIÓN A LOS CAMPOS ELÉCTRICOS..... | 124 |
| 6.6 EVALUACIÓN DE LA EXPOSICIÓN: CONCLUSIONES..... | 125 |

CAPÍTULO 7: INSTRUMENTOS DE MEDIDA

| | |
|--|-----|
| 7.1 INTRODUCCIÓN | 127 |
| 7.2 CONCEPTOS GENERALES DE MEDIDA..... | 128 |
| 7.2.1 Medida de los campos magnéticos..... | 131 |
| 7.2.2 Medida de los campos eléctricos..... | 132 |
| 7.3 RECOMENDACIONES DE LA NORMA IEEE STD 1460-1996TM | 134 |
| 7.4 EJEMPLOS DE VALORACIÓN Y MEDIDAS DE EXPOSICIÓN..... | 141 |
| 7.5 CONCLUSIONES..... | 146 |

CAPÍTULO 8: MEDIDAS DE PREVENCIÓN Y PROTECCIÓN

| | |
|--|-----|
| 8.1 INTRODUCCIÓN..... | 149 |
| 8.2 MEDIDAS DE PREVENCIÓN Y PROTECCIÓN..... | 150 |
| 8.2.1 Instalación eléctrica (cableado) | 150 |
| 8.2.1.1 Opciones de reducción de la intensidad de campo | 151 |
| 8.2.1.2 Código de buenas prácticas para la reducción de campos | 152 |
| 8.2.1.3 Conclusiones | 152 |
| 8.2.2 Equipos eléctricos en el hogar. Buenas prácticas | 154 |
| 8.2.2.1 Conclusiones | 155 |

| | |
|---|-----|
| 8.2.3 Reducción de la exposición de líneas de transporte de energía eléctrica | 156 |
| 8.2.3.1 Opciones recomendadas..... | 157 |
| 8.2.3.2 Reducción de la exposición de forma significativa | 158 |
| 8.2.3.3 Conclusiones | 159 |
| 8.2.4 Medidas de protección industriales y en puestos de trabajo..... | 159 |
| 8.2.5 Interferencias causadas por los campos ELF en dispositivos médicos | 161 |

CAPÍTULO 9: LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN RECOMENDADAS

| | |
|--|-----|
| 9.1 INTRODUCCIÓN..... | 163 |
| 9.2 LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN RECOMENDADAS POR LA OMS..... | 163 |
| 9.2.1 Fuentes, mediciones y exposiciones..... | 163 |
| 9.2.2 Dosimetría..... | 164 |
| 9.2.3 Mecanismos biofísicos..... | 164 |
| 9.2.4 Neurocomportamiento | 165 |
| 9.2.5 Sistema neuroendocrino | 166 |
| 9.2.6 Trastornos neurodegenerativos..... | 166 |
| 9.2.7 Trastornos cardiovasculares..... | 166 |
| 9.2.8 Inmunología y hematología | 166 |
| 9.2.9 Reproducción y desarrollo | 167 |
| 9.2.10 Cáncer..... | 167 |
| 9.2.11 Medidas de protección..... | 168 |
| 9.3 RESUMEN DE RECOMENDACIONES..... | 171 |

CAPÍTULO 10: CONCLUSIONES GENERALES

| | |
|------------------------|-----|
| 10.1 CONCLUSIONES..... | 173 |
|------------------------|-----|

BIBLIOGRAFÍA

| | |
|-------------------------------|-----|
| BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA..... | 179 |
| REFERENCIAS ELECTRÓNICAS..... | 188 |

APÉNDICES 193

| | |
|---|-----|
| APÉNDICE I: GLOSARIO..... | 195 |
| APÉNDICE II: PRINCIPALES ORGANISMOS DE SUPERVISIÓN | 199 |
| APÉNDICE III: TABLAS DE REGISTROS. NORMA UNE-215001:2004..... | 209 |
| APÉNDICE IV: ACRÓNIMOS..... | 215 |

| | |
|--|-----|
| Figura 3.1 Comparación de los campos magnético y eléctrico (modificada de [3])..... | 21 |
| Figura 3.2 Ilustración de la disminución de la intensidad de campo magnético..... | 21 |
| Figura 3.3 Cuadro de conversión de unidades de campo magnético [a] | 22 |
| Figura 3.4 Longitud de onda y frecuencia (modificada de [3])..... | 23 |
| Figura 3.5 Valores máximos de campo eléctrico (modificada de [a]) | 27 |
| Figura 3.6 Valores máximos de campo magnético (modificada de [a])..... | 27 |
| Figura 3.7 Valores de campo magnético en función de la altura de la línea..... | 30 |
| Figura 3.8 Campo magnético en línea enterrada y equivalente aérea | 33 |
| Figura 3.9 Forma del campo eléctrico y magnético de una línea de transporte | 34 |
| Figura 3.10 Medidas de campo magnético en diferentes trenes (modificada de [3]) | 39 |
| Figura 3.11 Exposición de trabajadores a campos magnéticos (modificada de [3])..... | 42 |
| Figura 3.12 Exposición personal de campo magnético (modificada de [3])..... | 45 |
| Figura 5.1 Densidades de flujo magnético máximas permitidas en ICNIRP e ICES (MPEs y RLs) (modificada de [8])..... | 81 |
| Figura 5.2 Niveles medios de estimulación adversa y MPEs (modificada de [8]) | 82 |
| Figura 5.3 Modelos de inducción magnética utilizados por ICES e ICNIRP [8] | 82 |
| Figura 5.4 MPEs y RLs de campos eléctricos propuestos por ICES e ICNIRP | 84 |
| Figura 5.5 Restricciones básicas de ICES e ICNIRP, densidad de corriente | 93 |
| Figura 5.6 Factores aplicados a los niveles medios límite, ICNIRP e ICES..... | 96 |
| Figura 7.1 Filtros paso-banda (modificada de [t])..... | 129 |
| Figura 7.2 Sonda de medición [t]..... | 130 |
| Figura 7.3 Pantalla digital de un medidor de campo magnético [t]..... | 130 |
| Figura 7.4 Estación de medición y medidor de mano..... | 131 |
| Figura 7.5 Sonda de medidor de campo eléctrico de 3 ejes [u] | 133 |
| Figura 7.6 Medida de campo magnético en un periodo de 24 h [90] | 137 |
| Figura 7.7 Campo magnético con armónicos [90]..... | 139 |
| Figura 7.8 Dos ejemplos de medidores..... | 141 |
| Figura 7.9 Medida realizada a lo largo de una línea de transporte..... | 144 |
| Figura 7.10 Equipo midiendo | 145 |
| Figura 7.11 Gráfica de intensidad de campo magnético respecto al tiempo | 145 |
| Figura 8.1 Inserciones de plástico para aislar tuberías (modificada de [37]) | 151 |
| Figura 8.2 Ejemplo de alimentación en alta tensión [38] | 160 |

ÍNDICE TABLAS

| | |
|--|-----|
| Tabla 3.1 Campo magnético medio a varias distancias de una línea eléctrica nacional en Reino Unido, 400 kV, medida realizada a nivel del suelo..... | 32 |
| Tabla 3.2 Niveles típicos de campos magnéticos de líneas de transporte de energía en USA (modificada de [2])..... | 32 |
| Tabla 3.3 Medidas de campo magnético de líneas subterráneas en Reino Unido | 33 |
| Tabla 3.4 Campo magnético generado por distintas aplicaciones eléctricas | 37 |
| Tabla 3.5 Campos magnéticos generados por sistemas de trenes eléctricos en Reino Unido (modificada de [2])..... | 38 |
| Tabla 3.6 Medidas ocupacionales de campo magnético (modificada de [3])..... | 41 |
| Tabla 3.7 Sector eléctrico español [45] | 43 |
| Tabla 3.8 Intensidad de campo magnético en diferentes profesiones en Suecia [45] | 44 |
| Tabla 3.9 Estimación de exposición poblacional a campos magnéticos | 46 |
| Tabla 3.10 Campo magnético medio según el tipo de actividad realizada..... | 46 |
| Tabla 3.11 Niveles de campo magnético en ambientes comunes (modificada de [3]) | 47 |
| Tabla 4.1 Algunos estudios realizados sobre la melatonina [45] | 57 |
| Tabla 4.2 Otros mecanismos investigados [45]..... | 59 |
| Tabla 4.3 Resultados de algunos estudios sobre la reproducción y los campos ELF | 69 |
| Tabla 4.4 Resumen de estudios sobre incidencia de leucemias y/o linfomas en ratas y ratones expuestos a campos ELF [45]..... | 72 |
| Tabla 5.1 Restricciones básicas de ICES (modificada de [8])..... | 78 |
| Tabla 5.2 Restricciones básicas de ICNIRP (modificada de [8])..... | 78 |
| Tabla 5.3 Niveles MPE de campo magnético: cabeza y torso [4]..... | 80 |
| Tabla 5.4 Niveles MPE de campo magnético: exposición de brazos o piernas [4]..... | 80 |
| Tabla 5.5 Niveles RL para el público general (ICNIRP) [5] | 80 |
| Tabla 5.6 Niveles RL, exposición ocupacional (ICNIRP) [5] | 80 |
| Tabla 5.7 Comparación de las restricciones básicas de ICES e ICNIRP..... | 85 |
| Tabla 5.8 MPEs y RLs de ICES e ICNIRP. Exposición de todo el cuerpo..... | 85 |
| Tabla 5.9 Diferencias entre MPEs/RLs entre ICES e ICNIRP (modificada de [8])..... | 85 |
| Tabla 5.10 Diferencias entre los estándares ICNIRP e ICES; rheobase mínimo tomado como referencia (modificada de [8])..... | 92 |
| Tabla 6.1 Media aritmética de intensidad de campo magnético obtenida en estudios de encuestas | 109 |

| | |
|---|-----|
| Tabla 6.2 Media geométrica de la intensidad de campo magnético obtenida en estudios de encuestas de investigación y caso-control (modificada de [2]) | 110 |
| Tabla 6.3 Resumen de análisis de exposiciones residenciales (modificada de [2]) | 111 |
| Tabla 6.4 Datos de exposición personalizada y campos en diferentes entornos..... | 113 |
| Tabla 6.5 Parámetros del campo magnético por profesiones (modificada de [2]) | 118 |
| Tabla 6.6 Clasificación por ocupaciones a campos magnéticos ELF en mujeres..... | 119 |
| Tabla 7.1 Características técnicas tipo de un medidor de campos ELF | 142 |
| Tabla 7.2 Ejemplo de datos de medición..... | 146 |
| Tabla 8.1 Distancias mínimas respecto líneas de transporte aéreas | 158 |
| Tabla 9.1 Recomendaciones para futuras investigaciones formuladas por la OMS | 169 |
| Tabla II.1 Categorías de clasificación de la IARC..... | 206 |
| Tabla III.1 Registro del campo eléctrico y magnético en líneas de alta tensión..... | 210 |
| Tabla III.2 Líneas de alta tensión aéreas..... | 211 |
| Tabla III.3 Líneas de alta tensión subterráneas | 212 |
| Tabla III.4 Descripción gráfica y observaciones..... | 213 |

Capítulo 1

Introducción

1.1 Introducción

El consumo de energía eléctrica ha pasado a formar parte integrante de la vida cotidiana. Siempre que hay un flujo de electricidad, se crean campos eléctricos y magnéticos junto a los conductores que la transportan, así como alrededor de los dispositivos que la consumen. Desde finales de los años setenta, se han plantado interrogantes sobre si la exposición a los campos magnéticos y eléctricos de muy baja frecuencia (*Extremely Low Frequency, ELF*) tiene consecuencias adversas para la salud. Desde entonces, se han llevado a cabo numerosos estudios, que han contribuido a resolver cuestiones importantes y a focalizar mejor las investigaciones futuras.

Si bien existen recomendaciones realizadas por organismos internacionales sobre niveles límite de exposición, tales como las guías de la Comisión Internacional de Protección contra Radiaciones No Ionizantes (*International Commission on Non-Ionizing Radiation, ICNIRP*), adoptada por la Directiva 2004/40/CE, o de IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*), éstas se basan en los efectos a corto plazo, por lo que los estudios más recientes se centran en determinar si por debajo de los niveles establecidos de exposición pueden existir efectos perjudiciales para la salud humana, siendo éste el principal aspecto de incertidumbre en la temática tratada.

Al no existir una evidencia demostrada en cuanto a los efectos a largo plazo, además de las recomendaciones comentadas, importantes organismos han realizado recopilaciones bibliográficas y desarrollado proyectos de investigación, en aras de resolver las lagunas que existen actualmente acerca de la exposición a los campos ELF y la salud humana. De las revisiones más recientes, han formado parte los siguientes organismos [a]:

- Organización Mundial de la Salud (*World Health Organization, OMS*).

- Comité Científico de la Comisión Europea de los Riesgos Sanitarios y Recientemente Identificados (*European Commission Scientific Committee on Emerging and Newly identified Health Risks*).
- Consejo Nacional de Protección Radiológica (*National Radiological Protection Board UK*).
- Departamento de Servicios de Salud de California, USA (*California Department of Health Services, USA*).
- Comisión Internacional de Protección contra Radiaciones No Ionizantes (*International Commission on Non-Ionizing Radiation*).
- Agencia Internacional de Investigación sobre el Cáncer (*International Agency of Research on Cancer*).
- Instituto Nacional de Ciencias de Salud Ambiental (USA) (*National Institute for Environmental Health Sciences (USA)*).

Por tanto, el presente documento, promovido por la Dirección General de Seguridad y Salud Laboral de la Consejería de Empleo de la Junta de Andalucía, dentro de la Acción 77 del Plan General de Prevención de Riesgos Laborales 2003-2008, pretende establecer el marco teórico actual de conocimiento sobre los campos ELF; explicar los conceptos fundamentales de los mismos y las fuentes que los generan; establecer los principales efectos biológicos que se producen en los seres humanos a causa de su exposición, y las posibles enfermedades que son motivo de estudio. Asimismo, se establece una comparación entre las dos guías comentadas anteriormente sobre niveles de exposición, y que tienen un reconocimiento importante a nivel internacional. También son objeto de análisis los principales tipos de estudios (epidemiológicos, de laboratorio, etc...); los niveles de exposición poblacionales, tanto para el público en general como para el ocupacional; los métodos de medida e instrumentación empleados; las posibles medidas de protección y prevención; y la normativa relacionada con los campos magnéticos ELF. Se citan además las líneas de investigación recomendadas por la Organización Mundial de la Salud para completar las lagunas existentes de la base científica desarrollada.

Finalmente, cabe decir que se ha pretendido citar los principales documentos de recopilaciones bibliográficas, cuya consulta pueda proporcionar información más detallada cuando ésta se requiera.

Capítulo 2

Objetivos

2.1 Introducción

El objetivo global de este documento consiste en establecer el nivel de conocimiento actual sobre los posibles efectos perjudiciales de los campos de muy baja frecuencia (*Extremely Low Frequency*, ELF) en la salud humana, en sus diferentes aspectos abarcando el rango 3-3000 Hz (considerándose en ocasiones también el caso estático, 0 Hz). Los principales puntos de estudio son:

- Definir los conceptos básicos de los campos ELF, actividades que lo generan, cuadro de profesiones más afectadas, y niveles de exposición para diferentes entornos, tanto ocupacionales como no ocupacionales.
- Efectos de la exposición a los campos ELF sobre la salud humana.
- Comparación y resumen de los principales estándares (IEEE Std C95.6™ "*IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Electromagnetic Fields, 0-3 kHz*" [4] e ICNIRP, "*Guidelines for limiting Exposure to Time-Varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz)*" [5]. Niveles admisibles de exposición.
- Medición de los campos ELF y los principales tipos de estudios.
- Posibles sistemas de protección o apantallamiento para los campos ELF, y recomendaciones sobre prevención y protección en el ámbito laboral, derivadas de los estudios que se llevan a cabo a nivel mundial.
- Líneas de investigación recomendadas.

Capítulo 3

Los campos ELF

3.1 Introducción

En este capítulo se describe la naturaleza de los campos magnéticos y eléctricos de muy baja frecuencia (*Extremely Low Frequency, ELF*), destacando las características más relevantes de los mismos para la temática tratada en este documento. Se proporciona información referente a las principales fuentes que los generan, y se realiza una valoración sobre los niveles de exposición que sufren los seres humanos en los diferentes entornos, tanto en el laboral, diferenciando entre posibles tipos de trabajo, como en las actividades diarias comunes, incluyendo el propio hogar. En muchos casos se muestran los valores medios de campo, en otros además se muestra la evolución de la exposición a lo largo de un período de tiempo, en forma de gráfica. En posteriores capítulos se analizan de forma más detallada otros aspectos relacionados con la realización de mediciones y los tipos de estudio para los niveles de exposición.

3.1.1 El concepto de campo

Podemos definir el concepto de campo como aquel que describe el valor de una entidad física para cada punto en una determinada región del espacio [2]. Aunque un campo puede definirse para la mayoría de las magnitudes físicas, es bastante común utilizarlo para aquellos casos donde existe la capacidad de ejercerse una fuerza. El campo gravitatorio, por ejemplo, describe la fuerza ejercida sobre una unidad de masa para cada punto en el espacio. De forma similar, el campo eléctrico describe la fuerza ejercida sobre una unidad de carga eléctrica, y el campo magnético se define en términos de la fuerza ejercida sobre una unidad de carga en movimiento. Los campos eléctricos y magnéticos se pueden representar por líneas de fuerza que rodean a cualquier dispositivo eléctrico.

Los campos eléctricos se producen debido a las cargas eléctricas, independientemente de su estado de movimiento. Una única carga en un punto determinado produce

un campo eléctrico en todas las direcciones, con un patrón de simetría esférica. Una distribución de cargas en forma rectilínea (como por ejemplo, las líneas de transporte de energía eléctrica) produce un campo eléctrico alrededor de la línea dando lugar a un patrón con simetría cilíndrica. En la práctica, no es posible aislar una única carga o un objeto cargado, y en lugar de tener líneas de campo indefinidas, éstas terminarán en otra carga (que puede ser una carga presente en un conductor o una carga inducida por el propio campo en un objeto conductor). De forma global, el patrón de campo eléctrico producido en cualquier punto va a depender de la distribución de cargas y de los objetos presentes en la región cercana. Los campos eléctricos se producen por la existencia de tensión eléctrica.

Por otra parte, los campos magnéticos se producen por cargas en movimiento (aunque también se pueden producir por imanes permanentes), siendo proporcionales a la corriente eléctrica que circula por un sistema, independientemente de la tensión que haya. Siempre que las cargas y las corrientes sean estáticas, electricidad y magnetismo se pueden considerar fenómenos separados. Sin embargo, cuando hay una variación en el tiempo, ocurre un acoplamiento entre los campos eléctrico y magnético que se hace más fuerte conforme aumenta la frecuencia. Las características e interacciones de los campos magnético y eléctrico se definen completamente mediante las *ecuaciones de Maxwell*. En [2, a¹, b²] se puede encontrar información más detallada sobre estos conceptos, desde un punto de vista físico.

Para centrar ideas y afrontar de forma básica este documento, podemos decir respecto a los campos magnéticos y eléctricos lo siguiente [2, 3, a]:

- Son producidos por dispositivos eléctricos (campos generados de forma artificial) o por la propia naturaleza (tormentas, campo magnético terrestre...).
- Los campos eléctricos se debilitan ante materiales conductores de la electricidad, incluso materiales con una conductividad pobre, incluyendo árboles, edificios, piel humana...
- El aislamiento de los campos magnéticos es más difícil y complejo que el de los campos eléctricos.
- Para un equipo eléctrico conectado a la red pero sin poner en marcha, sólo existirá campo eléctrico (debido a la diferencia de tensión). Para que exista campo magnético debe además ponerse en marcha dicho equipo (**Figura 3.1**).

¹ www.emfs.info/what_Intro.asp

² www.who.int/peh-emf/about/WhatIsEMF/en/

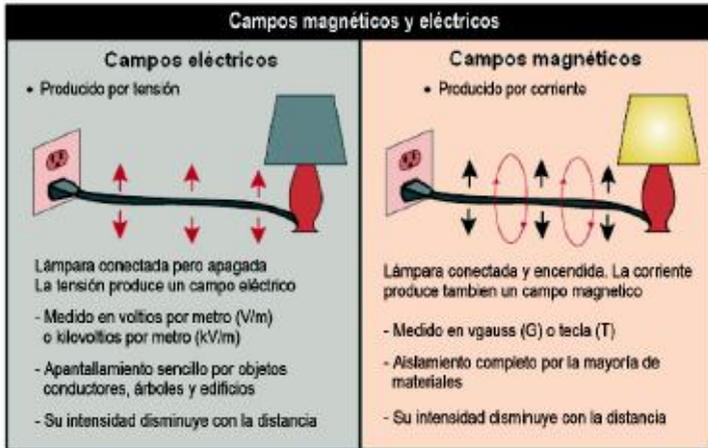


Figura 3.1 Comparación de los campos magnético y eléctrico (modificada de [3])

- Las intensidades de campo magnético y eléctrico decrecen rápidamente conforme aumenta la distancia respecto a la fuente que las produce (**Figura 3.2**)
- Los estudios más recientes sobre efectos potenciales en la salud humana se han centrado en los campos magnéticos, debido a que algunos estudios epidemiológicos han determinado una ligera asociación entre el cáncer y la exposición a los mismos. Este tipo de asociaciones no se encontraron con los campos eléctricos.



Figura 3.2 Ilustración de la disminución de la intensidad de campo magnético

3.1.2 Magnitudes y unidades

Para los campos magnéticos se utilizan dos parámetros diferentes: la densidad de flujo magnético, usualmente designada por B , y la intensidad de campo magnético, de-

signada normalmente por H . La distinción entre B y H se hace especialmente importante para la descripción de los campos magnéticos en materiales con ciertas propiedades ferromagnéticas, como el hierro. Sin embargo, los tejidos biológicos, en general, no tienen tales propiedades, y por tanto en la práctica pueden usarse B y H indistintamente.

Para la descripción de los campos eléctricos se utiliza generalmente la intensidad de campo eléctrico E .

Las unidades del Sistema Internacional son:

- Densidad de flujo magnético (B): Tesla (T).
- Intensidad de campo magnético (H): amperio por metro ($A\ m^{-1}$). B se suele utilizar con mayor frecuencia en la temática aquí tratada. Otra unidad utilizada especialmente en el ámbito estadounidense es el Gauss (G), siendo $1\ T = 10^4\ G$ ($1\ \mu T = 10\ mG$). La **Figura 3.3** muestra un cuadro de conversión de las unidades de campo magnético.
- Intensidad de campo eléctrico E : voltio por metro ($V\ m^{-1}$).

Aunque los parámetros comentados son magnitudes vectoriales, para el tema aquí tratado es suficiente con distinguir la amplitud, la frecuencia, los valores medios y todas las características que estén relacionadas con la exposición de los seres humanos a las mismas, las cuales se irán comentando a lo largo de todo el documento, y en especial en el **Apartado 7.3**.

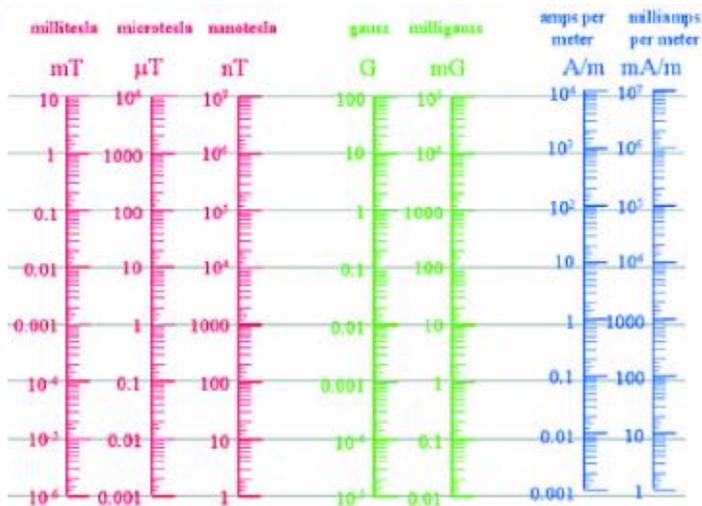


Figura 3.3 Cuadro de conversión de unidades de campo magnético [a]

3.1.3 Principales características

A continuación se muestran algunos conceptos fundamentales de los campos magnéticos y eléctricos desde el punto de vista de su naturaleza y de cómo se presentan en el entorno ambiental.

El campo alterno básico se puede describir como una onda cuya amplitud varía de forma sinusoidal a lo largo del tiempo. Al valor máximo de intensidad de campo se le denomina amplitud, y al número de ciclos que ocurren durante un segundo, la frecuencia. En la mayoría de los países, las frecuencias más comunes utilizadas en los sistemas de electricidad son de 50 o 60 Hz. De forma básica, los campos magnéticos y eléctricos se pueden caracterizar por su longitud de onda, y amplitud (intensidad). La longitud de onda se define como la distancia entre dos crestas consecutivas de una onda. En el espacio libre, la frecuencia se puede relacionar con la longitud de onda mediante la ecuación:

$$\text{Longitud de onda} = \frac{\text{velocidad luz}}{\text{frecuencia}} \quad (3.1)$$

A 50 Hz, la longitud de onda es grande, 6000 km (para 60 Hz es de 5000 km). Poniendo un ejemplo de comparación, una onda de radio con una frecuencia de 100 kHz tiene una longitud de onda de 3 km. En la **Figura 3.4** se ilustran los conceptos longitud de onda y frecuencia:

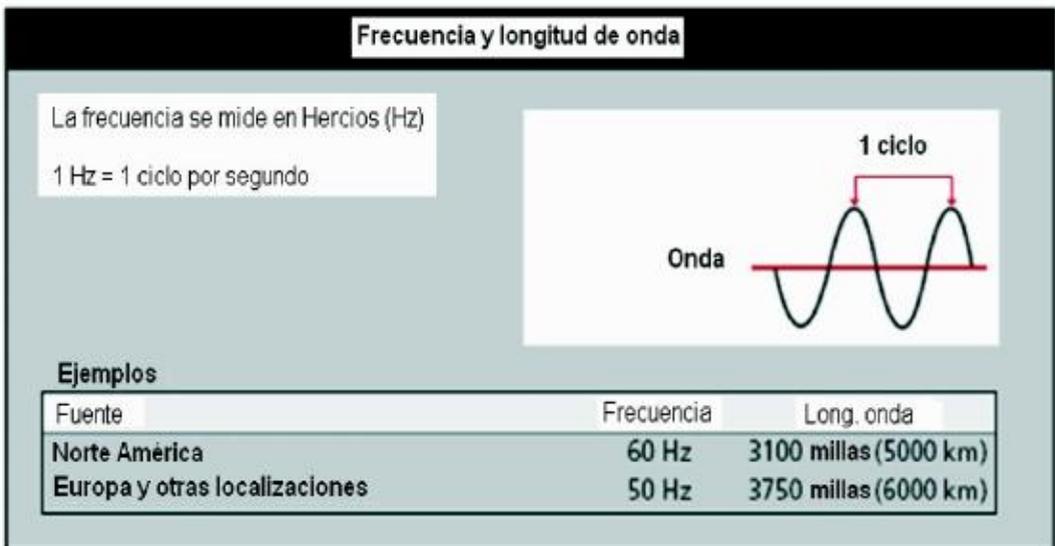


Figura 3.4 Longitud de onda y frecuencia (modificada de [3])

Cuando se combinan campos de más de una frecuencia, considerando fuentes de generación sinusoidal, el campo resultante ya no será una onda sinusoidal si se describiese su amplitud a lo largo del tiempo. La variación a lo largo del tiempo puede adoptar otra forma cualquiera, como puede ser una onda cuadrada o una onda triangular. De forma inversa, cualquier forma de onda puede descomponerse mediante un número de ondas sinusoidales con diferentes frecuencias. Este proceso de descomposición se denomina análisis de **Fourier**, y cada componente recibe el nombre de componente de Fourier.

En muchos sistemas eléctricos, las señales sinusoidales sufren una distorsión debido al comportamiento no lineal de los aparatos eléctricos conectados. Tales distorsiones introducen componentes de Fourier en el sistema además de la frecuencia fundamental de la señal (siendo esta última la frecuencia de funcionamiento del sistema), y reciben el nombre de **armónicos**. Por ejemplo, dada una frecuencia fundamental de 50 Hz, 100 Hz será el segundo armónico, 150 Hz el tercer armónico, y así sucesivamente.

Todas las componentes de frecuencia hasta aquí consideradas son periódicas: esto es, aunque la amplitud del campo varía a lo largo del tiempo, el patrón de variación se refiere a intervalos fijos (por ejemplo intervalos de 20 ms de tiempo se corresponden con un período de repetición de una frecuencia de 50 Hz). Sin embargo, la propia naturaleza y el ser humano dan lugar a fuentes emisoras de campos que no siguen una periodicidad, sino que por el contrario ocurren sólo una vez. La variación del campo resultante, para este caso, se suele denominar **transitorio**. Durante un período de tiempo, pongamos como ejemplo, de un día, se producen un número de transitorios, pero no hay una regularidad o periodicidad asociadas a ellos; este tipo de fenómenos están lo suficientemente diferenciados para tratarse como eventos aislados.

Los transitorios ocurren de forma natural en cualquier operación de conmutación y se caracterizan por un cambio brusco de la amplitud del campo. De hecho, existe un amplio rango de casos que encajan perfectamente con la definición básica de transitorio como evento no periódico. La presencia de transitorios puede complicar la realización de mediciones de los campos.

Las características mencionadas son conceptos básicos de los campos magnéticos y eléctricos. También, existen otros conceptos de carácter más complejo, como el tipo de **polarización** del campo (lineal, elíptica o circular...), etc... Más información sobre estos aspectos se puede encontrar en [**a³, b, 90, 93**].

³ www.emfs.info/what_ellipse.asp

3.1.4 Perturbaciones a los campos. Apantallamiento

Los campos magnéticos son perturbados por materiales con elevada permeabilidad magnética. Un ejemplo puede ser el material *mu-metal* [f], un material que muestra ser efectivo para el aislamiento de campos magnéticos, pero es caro y difícil trabajar con él [a]⁴, además de poderse producir un fenómeno perjudicial denominado *blooming* (relacionado con la aparición o incremento del campo magnético que se pretende aislar en las áreas de la periferia).

El aislamiento de los campos magnéticos ELF con este tipo de materiales es, en la práctica, sólo una opción viable para proteger pequeñas áreas, como por ejemplo monitores de ordenador. Otra opción es la compensación (cancelación de campos) a partir de una fuente especialmente diseñada para ello. Como ya se ha visto anteriormente (**Figura 3.1**), el aislamiento de los campos magnéticos es más complejo que el de los campos eléctricos. Existen otras técnicas de apantallamiento, como la cancelación de corrientes *eddy*, (más información sobre la misma se puede encontrar en [c]).

Los campos eléctricos, al contrario que los campos magnéticos, sufren perturbaciones incluso por cualquier material ligeramente conductor. Un objeto conductor elimina por completo el campo eléctrico dentro de él. A las frecuencias a las que se realiza el transporte de energía, una estructura metálica en forma de jaula es una pantalla efectiva, y los edificios son lo suficientemente conductores para reducir el campo eléctrico dentro de ellos, producido por una fuente externa, reduciendo los niveles por factores entre 10 y 100, o incluso más. Por tanto, el campo eléctrico producido por una línea de transporte de energía es mucho menor dentro de una edificación cercana que fuera de la misma.

En el **Capítulo 8** se estudian de forma más detallada las opciones de prevención y disminución de la exposición a los campos ELF.

3.2 Fuentes

En este apartado se describen las principales fuentes generadoras de campos eléctricos y magnéticos. En la mayoría de los estudios rigurosos sobre medidas de campos, especialmente en instalaciones domésticas, se ha comprobado que éstos siguen una distribución logarítmico-normal. Se asume, salvo que se especifique lo contrario, que los datos proporcionados se han basado en este tipo de distribución, la cual se suele caracterizar por la media geométrica (*geometric mean*, GM) y la desviación estándar geométrica (*geometric standard deviation*, GSD), en lugar de por la media aritmética (*arithmetic mean*,

⁴ www.emfs.info/what_Screening_EMF.asp

AM) y la desviación estándar (*standard deviation*, SD). Para una distribución logarítmico-normal, GM y GSD se pueden calcular a partir de las siguientes ecuaciones [2]:

$$GM = \frac{AM^2}{\sqrt{AM^2 + SD^2}} \quad (3.2)$$

$$GSD = \exp\left(\sqrt{\ln\left(1 + \left(\frac{SD}{AM}\right)^2\right)}\right) \quad (3.3)$$

Cabe también decir que siempre se cumple la desigualdad $GM \leq AM$.

3.2.1 Campos eléctricos

Aunque existen campos eléctricos naturales, como los producidos por fenómenos como las tormentas, este documento se centra en los campos eléctricos producidos de forma artificial.

Las principales fuentes generadoras de campos eléctricos en el rango ELF son resultado de la actividad humana y, concretamente, del funcionamiento de los sistemas de energía, equipos industriales, y dispositivos domésticos dentro del hogar. Para establecer una clasificación, podemos diferenciar las siguientes fuentes:

- Líneas de transporte de energía aéreas (tendidos eléctricos)

La intensidad de campo eléctrico generada por una línea de transporte, en un punto determinado, depende de la tensión de dicha línea, la distancia respecto a la misma, y la cercanía entre los conductores que la componen. El radio de éstos también es una característica relevante. Conductores de mayor grosor darán como resultado mayores campos eléctricos al nivel del suelo. Además, como ya se ha dicho, los objetos conductores tienen un efecto significativo en el campo eléctrico.

Los campos eléctricos son menores cuando las tres fases están balanceadas (amplitudes y frecuencias idénticas, además de un desfase de 120°, considerando un sistema trifásico) y aumentan en el caso contrario. El valor máximo de intensidad de campo eléctrico, a nivel del suelo, producido por una línea de transporte aérea es de alrededor de 10 kV m⁻¹ [2]. En [a]⁵ se puede encontrar una amplia recopilación de valores típicos de campos

⁵ www.emfs.info/Source_overhead_index.asp

eléctricos y magnéticos (máximos, mínimos...) en líneas de transporte de energía, tanto aéreas como bajo el suelo. Las siguientes figuras muestran el valor máximo de campo eléctrico y magnético para líneas de transporte de energía con diferentes tensiones:

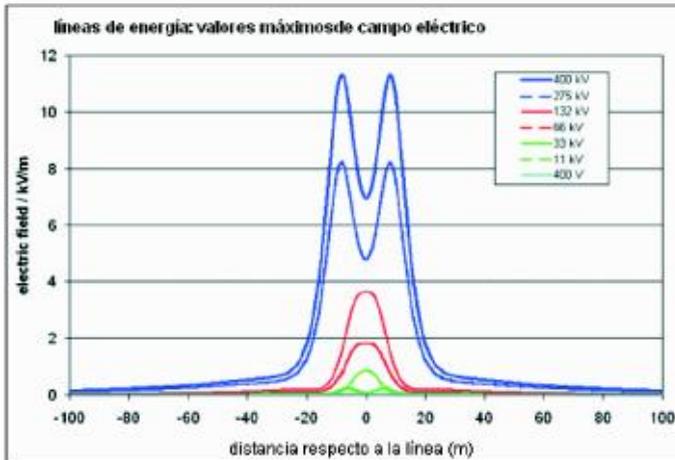


Figura 3.5 Valores máximos de campo eléctrico (modificada de [a])

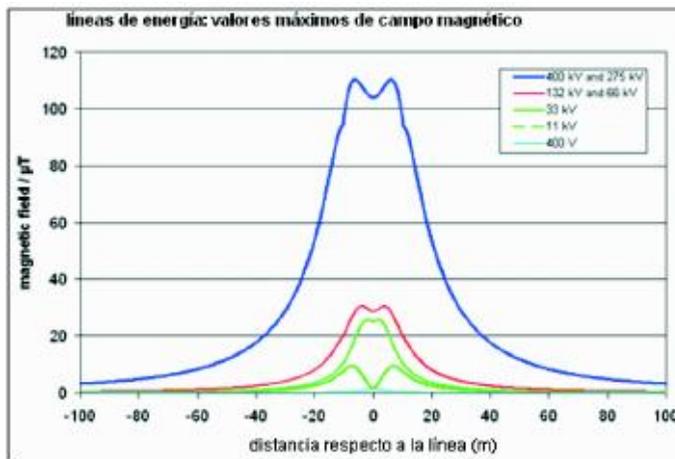


Figura 3.6 Valores máximos de campo magnético (modificada de [a])

- Cableado doméstico y dispositivos

El campo eléctrico producido por cualquier fuente exterior a una casa sufre una atenuación considerable por la estructura de ésta. La mayoría de los materiales de construcción son lo suficientemente conductores para apantallar campos, con lo que el valor de los campos fuera es del orden de 10 a 100 veces mayor [2].

Sin embargo, dentro de los hogares, hay fuentes de campo eléctrico que también lo son de campo magnético, como la televisión, la lavadora, el frigorífico, etc. El cableado (los cables que conforman la instalación eléctrica) en un hogar también produce campos eléctricos, que lógicamente son de mayor magnitud en la cercanía de éstos, pero que también pueden alcanzar valores considerables en el volumen que abarca la casa. El campo eléctrico producido por este cableado depende en parte de su instalación; por ejemplo, el cableado instalado utilizando conductos metálicos produce campos eléctricos de muy baja intensidad, o los campos producidos por cables instalados en el interior de las paredes sufren una atenuación significativa, en función de los materiales de ésta.

Cualquier dispositivo alimentado con energía eléctrica produce campos eléctricos a la frecuencia de alimentación (50-60 Hz) cuando están conectados (al contrario que los campos magnéticos, que se producen únicamente cuando existe un flujo de corriente), y muchas veces los equipos se dejan conectados a la alimentación incluso cuando no están funcionando. Con los campos eléctricos, excepto en hogares que se encuentran muy cerca de fuentes generadoras de campos eléctricos intensos, no existe un campo eléctrico significativo en el entorno externo al hogar. Por tanto, el campo eléctrico de las fuentes internas puede no ser despreciable, aunque sí es más pequeño conforme se aumenta la distancia a la fuente, en comparación con el campo magnético.

Ya que los campos eléctricos se perturban fácilmente por los objetos conductores, los campos dentro del volumen de una habitación raramente son uniformes o de poca variabilidad. Muchos tipos de objetos, en particular los objetos metálicos, perturban el campo y pueden crear áreas con mayor intensidad de campo eléctrico.

- Líneas subterráneas y subestaciones

Cuando un cable está enterrado bajo tierra, produce un campo magnético sobre la superficie. Por el contrario, no va a producir un campo eléctrico debido al apantallamiento provocado por la propia tierra, pero también porque la mayoría de estos cables suelen incluir una cubierta metálica que apantalla el campo eléctrico.

En cuanto a las subestaciones, raramente producen campos eléctricos significativos fuera de su perímetro. En el caso de las subestaciones de distribución, las barras de alta tensión y otros elementos se encuentran encerrados en cabinas metálicas o recintos adecuados, que apantallan el campo eléctrico generado. Las estaciones de alta tensión no están rigurosamente encerradas, pero sí se encuentran rodeadas por vallas de seguridad, las cuales, al ser metálicas, consiguen hacer de pantalla para el campo eléctrico.

- Industria eléctrica

Diferentes estudios han evaluado el campo eléctrico en entornos cercanos a torres de líneas de transporte de energía entre 230 y 765 kV. Operaciones relacionadas con

la reparación de estas torres, y que la subida a las mismas, dan lugar a exposiciones a campos eléctricos que pueden alcanzar valores entre los 10 y 30 kV m⁻¹. En algunas operaciones donde se trabaja directamente sobre la línea, el operario lleva puesto un traje conductor, que permite aislarlo del campo eléctrico. En posteriores apartados se estudian de forma más detallada los niveles de exposición en diferentes entornos industriales.

3.2.2 Campos magnéticos

Al igual que con los campos eléctricos, también existen campos magnéticos naturales, como el campo magnético terrestre (algunos conceptos sobre el mismo se pueden encontrar en [e]). Nuevamente, este documento se centra en los campos magnéticos producidos de forma artificial, explicando en mayor grado de detalle la casuística, ya que los campos magnéticos suscitan un mayor interés por ser los posibles causantes de efectos perjudiciales para la salud humana.

3.2.2.1 Líneas de transporte de energía eléctrica

El campo magnético producido por una línea de transporte de energía depende de varios factores:

- Número de conductores que la forman (relacionado con las corrientes portadas).
- El modo de transporte de esas corrientes. Influyen las siguientes características:
 - **La separación de los conductores:** la distancia de separación es necesaria para evitar posibles arcos eléctricos entre conductores adyacentes, donde además hay que considerar un posible desplazamiento de los mismos debido al viento.
 - **La posición relativa de múltiples circuitos:** suponiendo que las tres fases de un circuito están ordenadas de la forma a-b-c de arriba a abajo; si un segundo circuito se encuentra ordenado de igual manera, ambos circuitos producirán campos magnéticos que se encuentran alineados entre sí, y que por tanto se refuerzan mutuamente. Sin embargo, si el segundo circuito sigue la secuencia opuesta, es decir, c-opuesta, es decir, c-b-a, el campo magnético se producirá en el sentido contrario, resultando una cancelación parcial de los campos de ambos circuitos. Este ordenamiento de fases se conoce como fases rotadas o invertidas (*reversed or rotated pha-*

sing). Existen otras formas de estructura posibles, aunque generalmente producen mayores campos a nivel de suelo.

- Las corrientes portadas por la línea. Se ha de tener en cuenta:
 - La corriente demandada por la carga.
 - Cualquier desequilibrio en el balance entre corrientes.
- Cualquier corriente que circule por el conductor de tierra o por la propia tierra.
- **La altura de los conductores sobre el suelo:** la distancia mínima permitida para una tensión de línea dada se determina generalmente para garantizar que no se formen arcos eléctricos entre la línea y objetos a nivel del suelo. En la **Figura 3.7** se muestran los niveles de campo magnético en función de la altura de la línea:

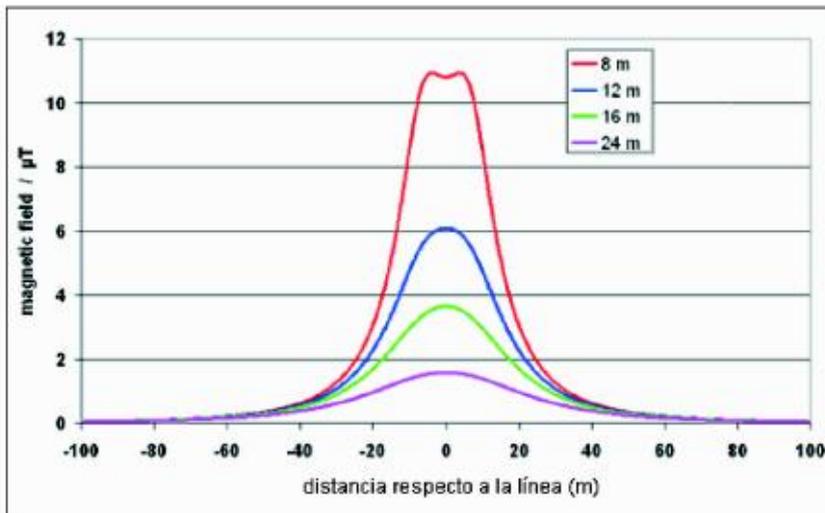


Figura 3.7 Valores de campo magnético en función de la altura de la línea (modificada de [a])

Mayores tensiones de línea generalmente transportan mayores potencias y tienen una separación mayor entre conductores, debido a que la intensidad que circula es mucho más elevada que en líneas de menor tensión. Por tanto, se producen mayores campos magnéticos, aunque el campo magnético en sí mismo no depende de la tensión. Un ejemplo claro puede ser el campo magnético generado por una línea de alta tensión (rango 30 - 400 kV) en comparación con el producido por una línea de distribución de baja tensión (menos de 1000 V). Esta afirmación no debe confundirse con el hecho de que el aumento de tensión en las instalaciones de alta tensión se realiza para disminuir la intensidad que

circula por los conductores (manteniendo constante la potencia inyectada a la red), disminuyendo las pérdidas de energía en el transporte de la misma.

Las corrientes en las líneas de transporte varían a lo largo del día dependiendo de la demanda. Lógicamente, esto afecta al campo magnético generado de forma directa. Generalmente, las líneas trabajan con valores de corriente menores que para las que han sido diseñadas, por lo que los campos magnéticos generados van a ser menores que el valor máximo que la línea podría producir teóricamente. En [a]⁶ se pueden consultar los valores de campo magnético de diferentes tipos de líneas de distribución, además de mostrarse tablas de comparación en función de la altura.

3.2.2.1.1 Niveles de campo para líneas aéreas

Las líneas de transporte de energía pueden producir valores de campo magnético de hasta unas pocas decenas de μT cuando se produce un pico de demanda; sin embargo, los niveles medios generalmente suelen ser de unos pocos microteslas. La densidad de flujo magnético se suele reducir a unos pocos cientos de nanoteslas a distancias de varios metros de la línea de transporte considerada. La densidad de flujo magnético es menor en los sistemas de baja tensión, principalmente debido a que generalmente circulan corrientes menores y la separación entre conductores también es menor.

Las líneas de transporte de energía trabajan a niveles de tensión de hasta 1150 kV, forman una malla que cubre todo el territorio y permiten el suministro de la energía desde los centros de generación que resulten más adecuados. En España hay distintos escalones de tensión, desde los 30 hasta los 400 kV. Como ejemplo, en Reino Unido, la mayor línea de transporte trabaja a 400 kV con demandas de corriente de hasta 4 kA por circuito y una distancia mínima con tierra de 7.6 m. Estas características producen teóricamente hasta 100 μT justo debajo de los conductores. En la práctica, como generalmente la carga no suele ser máxima, así como la distancia no es mínima, el valor típico de campo a nivel del suelo, justo debajo de los conductores es de unos 5 μT . La **Tabla 3.1** muestra en detalle el campo magnético medio tomado a varias distancias de una red de suministro nacional típica del Reino Unido, trabajando a una tensión de 400 kV y con una distancia mínima respecto al suelo de 7.6 m [g]. Los datos fueron tomados a lo largo de un año y muestran el valor medio a partir de 43 líneas consideradas como representativas. Asimismo, en la **Tabla 3.2** se muestran valores típicos de líneas en USA. Es de suponer que para parámetros similares de líneas, estos valores son extrapolables al caso de España y otros países.

⁶ www.emfs.info/Source_overhead_index.asp (en sección "more detail")

Tabla 3.1 Campo magnético medio a varias distancias de una línea eléctrica nacional en Reino Unido, 400 kV, medida realizada a nivel del suelo (modificada de [2])

| Campo magnético medio a varias distancias de una línea de suministro nacional típica (400 kV, medidas a nivel del suelo) | |
|--|--------------------------------------|
| Distancia (m) | C. Magnético medio (μT) |
| 0 | 4.005 |
| 50 | 0.520 |
| 100 | 0.136 |
| 200 | 0.034 |
| 300 | 0.015 |

Tabla 3.2 Niveles típicos de campos magnéticos de líneas de transporte de energía en USA (modificada de [2])

| Niveles típicos de campo magnético de líneas de transporte de energía | | | | | | |
|---|---------------|---|---|-------|-------|-------|
| Tipo de línea | Medida | Valor medido debajo de la línea (μT) | Distancias respecto a la línea y niveles de campo magnético (μT) | | | |
| | | | 15 m. | 30 m. | 61 m. | 91 m. |
| 115 kV | Valor medio | 3 | 0.7 | 0.2 | 0.04 | 0.02 |
| | Valor de pico | 6.3 | 1.4 | 0.4 | 0.09 | 0.04 |
| 230 kV | Valor medio | 5.8 | 2.0 | 0.7 | 0.18 | 0.08 |
| | Valor de pico | 11.8 | 4.0 | 1.5 | 0.36 | 0.16 |
| 500 kV | Valor medio | 8.7 | 2.9 | 1.3 | 0.32 | 0.14 |
| | Valor de pico | 18.3 | 6.2 | 2.7 | 0.67 | 0.30 |

3.2.2.1.2 Niveles de campo para líneas subterráneas

Cuando una línea de alta tensión transcurre por debajo del suelo, los conductores están aislados individualmente y pueden situarse más cerca que en una línea normal de distribución. Esto tiende a reducir el campo magnético producido. Sin embargo, puede ocurrir que los conductores estén enterrados tan sólo 1 m por debajo del suelo en lugar de 10 por encima, con lo que la cercanía es mayor. El resultado total es que el campo magnético se reduce en los laterales del conductor en comparación con los valores de una línea aérea, pero, puede ser mayor por la zona donde la línea va enterrada. La **Figura 3.8** muestra lo comentado; en la **Tabla 3.3** se muestran las medidas de campo magnético tomadas para líneas subterráneas en Reino Unido.

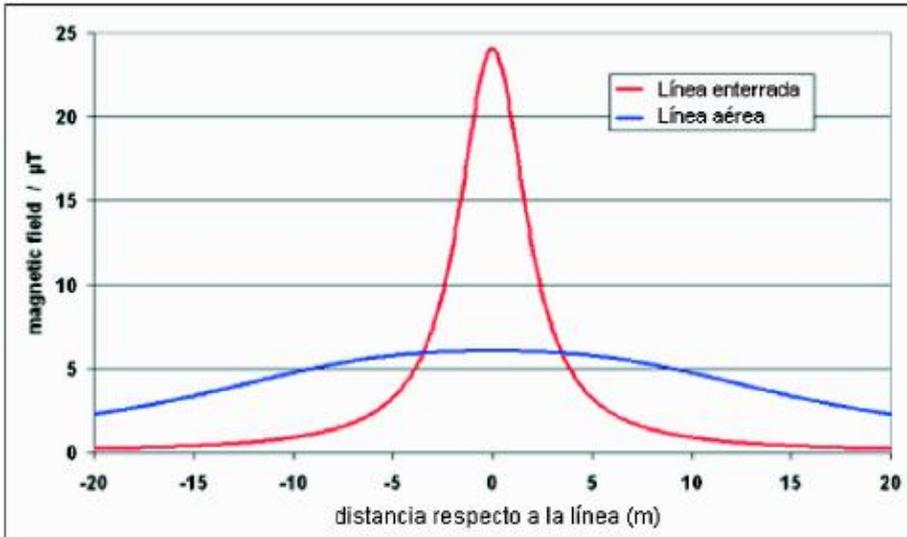


Figura 3.8 Campo magnético en línea enterrada y equivalente aérea (modificada de [a])

Tabla 3.3 Medidas de campo magnético de líneas subterráneas en Reino Unido (modificada de [2])

Campos magnéticos generados por líneas subterráneas

| Tensión | Especificaciones | Localización | Carga | Distancias respecto a la línea y campo magnético (μT) | | | |
|---------|------------------------|---|--------|--|-------|------|------|
| | | | | 0 m | 5 m | 10 m | 20 m |
| 400 kV | Canalizada | Espaciado de 0.13 m Profundidad: 0.3 m | Máx. | 83.30 | 7.01 | 1.82 | 0.46 |
| | | | Típica | 20.83 | 1.75 | 0.46 | 0.12 |
| 275 kV | Enterrada directamente | 0.5 m de espaciado Profundidad: 0.9 m | Máx. | 96.17 | 13.05 | 3.58 | 0.92 |
| | | | Típica | 24.06 | 3.26 | 0.90 | 0.23 |
| 132 kV | Cables separados | Espaciado de 0.3 m Profundidad: 1 m | Típica | 9.62 | 1.31 | 0.36 | 0.09 |
| | Cable único | Profundidad: 1 m | Típica | 5.01 | 1.78 | 0.94 | 0.47 |
| 33 kV | Cable único | Profundidad: 0.5 m | Típica | 1.00 | 0.29 | 0.15 | 0.07 |
| 11 kV | Cable único | Profundidad: 0.5 m | Típica | 0.75 | 0.22 | 0.11 | 0.06 |
| 400 kV | Cable único | Profundidad: 0.5 m | Típica | 0.50 | 0.14 | 0.07 | 0.04 |

Dependiendo de la tensión de la línea, existe la posibilidad de enfundar varios conductores, formando un único cable. Además, suelen cablearse en trenzado helicoidal, lo que produce una reducción significativa en el campo magnético producido. Más información sobre líneas enterradas se puede encontrar en [a]⁷.

⁷ www.emfs.info/Source_underground_mag fld_table.asp

3.2.2.1.3 Niveles de campo para líneas de distribución

En materia de redes de energía, se suele diferenciar, al menos, entre líneas de transporte y líneas de distribución. Las líneas de transporte (**Figura 3.9**) son de alto voltaje (más de unas pocas decenas de kV), generalmente están construidas con estructuras de acero como torretas, etc... y son capaces de transportar corrientes de gran magnitud, del orden de cientos o incluso miles de amperios; se suelen utilizar para el transporte de energía de larga distancia. Por el contrario, las líneas de distribución se utilizan para una tensión más baja (menos de unas pocas decenas de kV), y generalmente utilizan estructuras de madera como postes o estructuras simples, diseñadas para transportar corrientes de menor magnitud, además de utilizarse para una distribución más local de la energía, incluyendo la distribución final de energía a los hogares individuales.

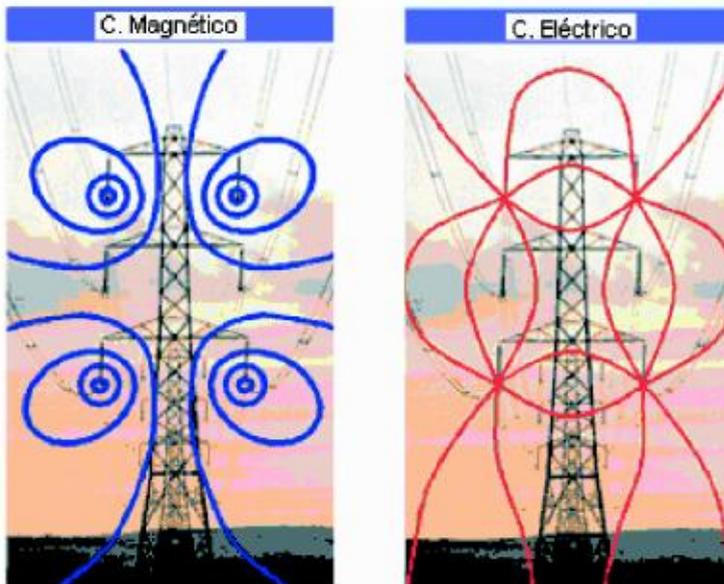


Figura 3.9 Forma del campo eléctrico y magnético de una línea de transporte (modificada de [a])

Desde el punto de vista de la generación de campos magnéticos y eléctricos, la diferencia entre las líneas de transporte y las líneas de distribución es más de grado que de tipo. Conforme la tensión en un circuito es menor, también lo es el espaciado entre conductores y la carga. Conforme la tensión decrece también lo hacen, como regla general, los campos magnéticos y eléctricos. De esta forma, conceptualmente, una línea de distribución sin corrientes de tierra no se diferencia de una línea de transporte, simplemente produce campos de menor magnitud. En la práctica, la principal diferencia entre una línea de distribución y una de transporte es que las primeras suelen llevar corrientes de tierra mientras que las últimas no [2].

La situación descrita para las líneas de transporte también es aplicable para circuitos de distribución en las que el conductor neutro se encuentra aislado para la mayoría de su recorrido. Este conductor se suele conectar a tierra una vez, o cerca de transformadores o subestaciones que alimentan la línea, pero esa es la única conexión a tierra. Sin embargo, se ha podido comprobar, mediante estudios en diferentes países, que la conexión del neutro a tierra en varios puntos a lo largo de su recorrido en lugar de únicamente en una subestación, permite aumentar la seguridad del sistema.

Cuando esto se hace, el neutro se conecta a la masa de tierra en varios puntos, y en algunas configuraciones, existe una combinación entre el conductor neutro-tierra más que dos conductores separados. En España, no se obliga a que existan conexiones intermedias del neutro a tierra, la obligación de conexión a tierra a lo largo de una línea aérea es para los apoyos de la misma (art. 12.6 de Reglamento 3151/1968, de 28 de noviembre de Líneas de Alta Tensión⁸).

Lo comentado es la base de muchos sistemas de distribución en el mundo. Lógicamente, los sistemas son más complejos que de lo que aquí se han descrito, y existen numerosas regulaciones asociadas con los mismos. Sin embargo, para los propósitos de este documento, es suficiente reseñar que en muchos sistemas se conecta varias veces el neutro a tierra.

Cada vez que el conductor neutro se conecta a tierra, existe la posibilidad de que la corriente de neutro “salga” de la línea hacia la propia tierra (o a un conductor de tierra debidamente acondicionado) y vuelva a la subestación mediante alguna ruta. En el momento que alguna corriente de neutro sale de la línea, las corrientes en la misma no estarán exactamente balanceadas. La forma más común y útil de describir esta situación es diciendo que la línea ahora tiene una corriente neta, esto es, la suma vectorial de las corrientes que fluyen por la línea (las corrientes de fase) tiene un valor distinto de cero.

Las corrientes de tierra (corrientes que “salen” del conductor neutro) fluyen a través de varios tipos de conducciones, como las tuberías de agua, pudiendo llegar incluso al hogar. Si esto sucede, podría ocurrir una situación de un nivel de campo elevado dentro del hogar; no obstante, esta situación es poco probable y sería suficiente considerar sólo la distribución de la línea (junto con sus valores de tensión, corriente, etc...) y la distancia para estimar el campo magnético respecto a un hogar específico. En los hogares relativamente cercanos a las líneas de distribución, el campo generado por las mismas es el dominante y se suele llamar “nivel de fondo” (*background field*). También, otra fuente importante de campos magnéticos en los hogares es el propio cableado de su instalación

⁸ El RD 3151/1968 quedará derogado el 19/09/2010 por el RD 223/2008

eléctrica. A veces, el diseño del cableado puede formar lazos de corriente que dan lugar a campos magnéticos significativos; esto se comentará más adelante.

El denominado “nivel de fondo” varía relativamente poco, si consideramos el volumen de un hogar, ya que, como ocurre generalmente, éste proviene del exterior. Sin embargo, dentro del hogar sí que habrá zonas con mayores intensidades de campo magnético debido a la superposición de los campos generados por los distintos dispositivos eléctricos. La intensidad de estos campos decae con el cubo de la distancia. En cualquier hogar normal, la distribución del campo magnético constará del nivel de fondo (*background field*), y “picos” de campo que rodean a cada dispositivo.

3.2.2.2 Dispositivos y aplicaciones eléctricas

La fuente común de campo magnético dentro de un hogar no es el cableado fijo de la casa, sino los dispositivos eléctricos que hay en ella. Los campos magnéticos de estos equipos se producen por las corrientes eléctricas consumidas por los mismos. Muchos de éstos contienen motores, transformadores, un estérter... y su funcionamiento depende del campo magnético creado, además, de forma deliberada. El campo magnético emitido por estas fuentes dependerá del diseño, el cual, si tiene es de bajo coste, será mayor. De esta forma, podemos decir que los campos magnéticos más intensos se producen por equipos pequeños y baratos; como ejemplos, podemos nombrar las máquinas de afeitar eléctricas, aspiradoras, etc...

Ya que la intensidad del campo magnético disminuye con la distancia, la exposición al mismo no va a depender sólo de la magnitud del campo producido por el dispositivo en cuestión, sino de su forma de manejo (y por tanto de la distancia de trabajo). En la **Tabla 3.4** se muestran los niveles de campo típicos para diferentes dispositivos.

Tabla 3.4 Campo magnético generado por distintas aplicaciones eléctricas (modificada de [2])

| Campo magnético generado por distintas aplicaciones eléctricas, de 50 y 60 Hz | | | | | |
|---|------------------------------------|---|---------|-----------------|---------------------|
| Fuente Localización | | Densidades de flujo magnético (μT) | | | |
| | | 60 Hz a 30 cm | | 50 Hz a 50 cm | |
| | | Media | Rango | Campo calculado | Desviación estándar |
| Cuarto de baño | Secadores de pelo | 1 | Bg*-7 | 0.12 | 0.1 |
| | Máquinas de afeitar eléctricas | 2 | Bg-10 | 0.84 | |
| | Duchas eléctricas | | | 0.44 | 0.75 |
| | Módulos de afeitar (shaver socket) | | | 1.24 | 0.27 |
| Cocina | Batidoras | 1 | 0.5-2 | 0.97 | 1.05 |
| | Abridores de latas | 15 | 4-30 | 1.33 | 1.33 |
| | Máquinas de café | Bg | Bg-0.1 | 0.06 | 0.07 |
| | Lavavajillas | 1 | 0.6-3 | 0.8 | 0.46 |
| | Robot de cocina | 0.6 | 0.5-2 | 0.23 | 0.23 |
| | Hornos microondas | 0.4 | 0.1-20 | 1.66 | 0.63 |
| | Hornos eléctricos | 0.4 | 0.1-0.5 | 0.39 | 0.23 |
| | Frigorífico | 0.2 | Bg-0.2 | 0.05 | 0.03 |
| | Congelador | | | 0.04 | 0.02 |
| | Tostador | 0.3 | Bg-0.7 | 0.09 | 0.08 |
| | Cuchillos eléctricos | | | 0.12 | 0.05 |
| | Licuadoras | | | 0.29 | 0.35 |
| | Teteras eléctricas | | | 0.26 | 0.11 |
| | Ventilador extractor | | | 0.5 | 0.93 |
| | Extractor de cocina | | | 0.26 | 0.10 |
| Hornilla | | | 0.08 | 0.05 | |
| Lavandería | Secadoras de ropa | 0.2 | Bg-0.3 | 0.34 | 0.42 |
| | Lavadoras | 0.7 | 0.1-3 | 0.96 | 0.56 |
| | Planchas | 0.1 | 0.1-0.3 | 0.03 | 0.02 |
| | Calentadores | 2 | 0.1-4 | 0.22 | 0.18 |
| | Aspiradoras | 6 | 2-20 | 0.78 | 0.74 |
| | Calderas | | | 0.27 | 0.26 |
| | Temporizadores de calefacción | | | 0.14 | 0.17 |
| Sala de estar | Televisiones | 0.7 | Bg-2 | 0.26 | 0.11 |
| | Videos | | | 0.06 | 0.05 |
| | Bombas de acuarios | | | 0.32 | 0.09 |
| | Radiocassette | Bg | Bg-0.1 | 0.24 | |
| | Sistemas de audio | | | 0.08 | 0.14 |
| | Radios | | | 0.06 | 0.04 |
| Oficina | Reloj de alarma | | 0-50 | 0.05 | 0.05 |
| | Filtros de aire | 3.5 | 2-5 | | |
| | Fotocopiadoras | 2 | 0.2-4 | | |
| | Fax | Bg | Bg-0.2 | | |
| | Tubos fluorescentes | 0.6 | Bg-3 | | |
| Herramientas | Monitores | 0.5 | 0.2-0.6 | 0.14 | 0.07 |
| | Cargadores | 0.3 | 0.2-0.4 | | |
| | Taladros | 3 | 2-4 | | |
| Miscelánea | Motosierras | 4 | 0.9-30 | | |
| | Bombas de calor | | | 0.51 | 0.47 |
| | Alarmas antirrobo | | | 0.18 | 0.11 |

Bg: "background field", nivel de fondo. Indica que al encender el dispositivo la medida no varió respecto al campo previo medido

Es importante destacar que muchos de los dispositivos producen un amplio rango de armónicos, por lo que la interpretación de los resultados puede ser errónea en el caso de que se desconozca todo el espectro producido por los campos. En [2, 45, a⁹] se puede encontrar una explicación más detallada de los estudios realizados sobre campos magnéticos generados por dispositivos eléctricos.

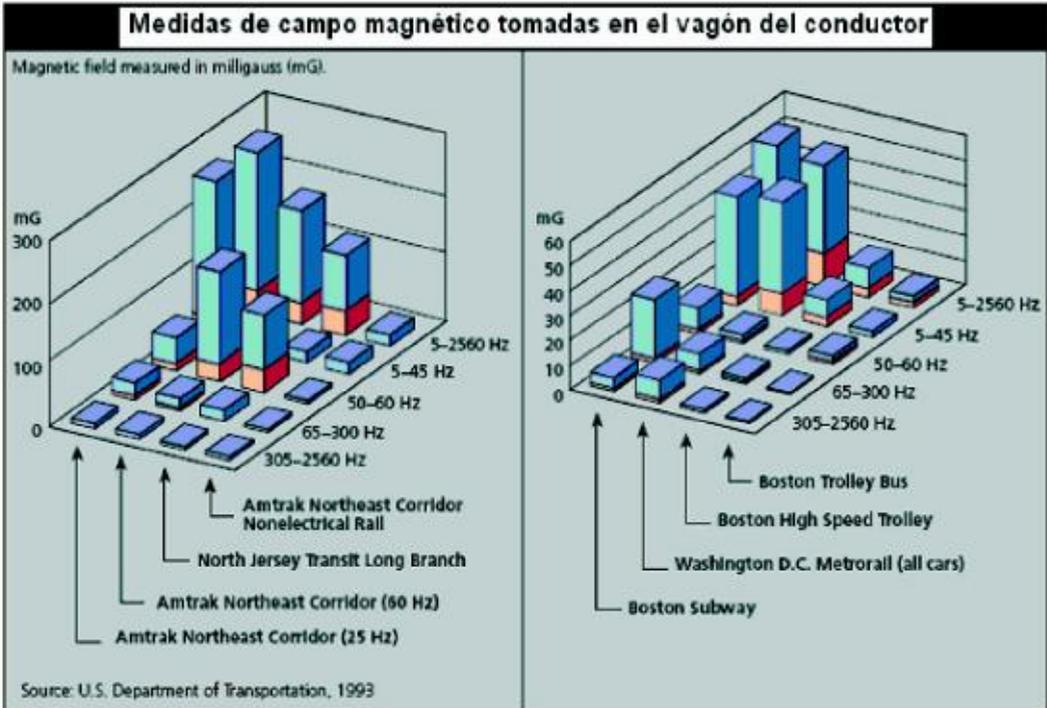
3.2.2.3 Medios de transporte

Además de las líneas de distribución de energía y los dispositivos eléctricos, algunos medios de transporte, como los tranvías, también son fuentes generadoras de campos magnéticos y se han realizado numerosos estudios sobre los mismos. La **Tabla 3.5** muestra los valores de campo magnético encontrados en diferentes sistemas de trenes. La **Figura 3.10** muestra otro estudio de exposición, en este caso de forma gráfica. Otros medios de transporte, como los aviones y vehículos eléctricos, suponen una exposición incluso mayor, pero no han sido investigados de forma rigurosa.

Tabla 3.5 Campos magnéticos generados por sistemas de trenes eléctricos en Reino Unido (modificada de [2])

| Campos magnéticos generados por trenes eléctricos en UK | | | |
|---|-----------------------------|------------|---|
| Sistema y fuente | Densidad de flujo magnético | Frecuencia | Comentarios |
| Metro de Londres | Hasta 20 μT | 100 Hz | Medida tomada en la cabina del conductor |
| Trenes suburbanos. 750 DC. Motores | Hasta 1 mT | 100 Hz | Medida tomada a nivel del suelo |
| | 16-64 μT | 100 Hz | Medida tomada en la zona de pasajeros |
| | 16-48 μT | 100 Hz | Medida tomada fuera del tren |
| Líneas principales de trenes. Motores eléctricos | Hasta 15 mT | 100 Hz | Medida tomada a nivel del suelo sobre los inductores |
| Líneas principales de trenes. Locomotoras | Hasta 2.5 mT | 100 Hz | Medida tomada 0.5 m sobre el suelo del vagón de materiales (<i>equipment car</i>) |
| | 5-50 μT | 50 Hz | Medida tomada en tren de pasajeros |

⁹ www.emfs.info/Source_Intro.asp



Las gráficas muestran que 60 Hz es una de las frecuencias de campo magnético a las que los operadores quedan expuestos. El nivel máximo de exposición es el límite superior azul, y el valor medio de la exposición la parte superior de la porción roja

Figura 3.10 Medidas de campo magnético en diferentes trenes (modificada de [3])

Existen además varios estudios sobre los niveles de campo generados por estaciones de distribución, transformadores y sistemas de calefacción. Información relacionada sobre estos estudios se puede encontrar en [2, 3].

3.3 Exposición humana

A continuación, se recoge una recopilación de los niveles de exposición humana en diferentes circunstancias, completando la información mostrada en apartados anteriores. En un primer apartado se realiza un resumen de las exposiciones laborales, según el tipo de tarea. En un segundo apartado se describen los niveles de exposición obtenidos para los entornos comunes de la población en general. Existe una amplia literatura sobre diferentes tipos de estudios poblacionales, referidos tanto en las guías ICNIRP [5], el estándar IEEE C95.6TM [4], y varios proyectos internacionales como el realizado por la OMS [2].

3.3.1 Exposición laboral

Muchos trabajadores reciben mayor exposición en el trabajo que en el hogar, aunque estén menos tiempo en él. En los lugares de trabajo los campos suelen ser mayores que en los hogares, debido a que hay un mayor número de elementos eléctricos. Por ejemplo, el valor medio del campo magnético encontrado en trabajadores de oficina es de $0.18 \mu\text{T}$, según [a]¹⁰.

Ciertos tipos de industrias tienen equipos que demandan valores elevados de corriente y producen, por tanto, mayores niveles de campo. En la industria eléctrica, algunos ejemplos pueden ser las barras de alta tensión en las instalaciones de energía, y algunos equipos de compensación de la potencia reactiva. En otro tipo de industrias, algunos procesos como los electrolíticos pueden producir campos elevados. En general, estos campos sólo afectan a trabajadores específicos y no al público en general. Un creciente número de industrias está limitando sus niveles de exposición de acuerdo a la guía elaborada por la Comisión Internacional de Protección contra Radiaciones No Ionizantes [h], y cuyos niveles han sido adoptados por la Directiva europea 2004/40/CE [42] (esta directiva ha sido modificada por la Directiva 2008/46/CE (moratoria), aplazándose su transposición hasta el 2012). En España, además, esta guía está referenciada y comentada en la NTP 698 (Nota Técnica de Prevención) [I]. En el **Capítulo 5** se puede encontrar información más detallada sobre la normativa relacionada con los campos ELF.

La exposición laboral, aunque predominantemente debida a los campos que se generan a las frecuencias de consumo, 50–60 Hz, también puede incluir otras frecuencias. Se ha encontrado que el promedio de la exposición a campos magnéticos para las ocupaciones relacionadas con la electricidad es superior al de otras tareas, tales como las de oficina, con valores que oscilan entre $0.4\text{--}0.6 \mu\text{T}$ para los electricistas y los ingenieros eléctricos, y alrededor de $1.0 \mu\text{T}$ en los trabajadores de líneas de transporte de energía, siendo máxima la exposición de los soldadores, los maquinistas de ferrocarril y los operadores de máquinas de coser (por encima de $3 \mu\text{T}$). Las exposiciones máximas a campos magnéticos en el lugar de trabajo pueden llegar a ser de alrededor de 10 mT, en casos extremos, y están asociadas de manera directa con la presencia de conductores portadores de corrientes altas. En la industria de suministro de energía eléctrica, los trabajadores pueden estar expuestos a campos eléctricos de hasta 30kV m^{-1} . En la **Tabla 3.6** se muestra una comparación de los niveles de exposición de campo magnético para diferentes tipos de trabajadores; en la **Figura 3.11** se muestra una tabla comparando los niveles de exposición de campo magnético para diferentes ocupaciones a lo largo de un día de trabajo:

¹⁰ www.emfs.info/Source_Occupational.asp

Tabla 3.6 Medidas ocupacionales de campo magnético (modificada de [3])

| Medidas ocupacionales de campo magnético | | |
|--|---|---|
| Industria y ocupación | Campo magnético medido en μT | |
| | Mediana por ocupación ¹ | Rango para el 90 % de los trabajadores ² |
| Trabajadores eléctricos en varias industrias | | |
| Ingenieros eléctricos | 0.17 | 0.05-1.2 |
| Electricistas de la construcción | 0.31 | 0.16-1.21 |
| Reparadores de TVs | 0.43 | 0.06-0.86 |
| Soldadores | 0.95 | 0.14-6.61 |
| Operarios de electricidad | | |
| Trabajadores de oficina sin computadores | 0.05 | 0.02-0.2 |
| Trabajadores de oficina con computadores | 0.12 | 0.05-0.45 |
| Trabajadores de líneas eléctricas | 0.25 | 0.05-3.48 |
| Electricistas | 0.54 | 0.08-3.4 |
| Operadores de estaciones de distribución | 0.72 | 0.11-3.62 |
| Trabajadores fuera del trabajo (de viaje, en el hogar...) | 0.09 | 0.03-0.37 |
| Telecomunicaciones | | |
| Instalación, mantenimiento y reparaciones técnicas | 0.15 | 0.07-0.32 |
| Técnicos de oficinas centrales | 0.21 | 0.05-0.82 |
| Técnicos electricistas (trabajo continuo con cables) | 0.32 | 0.07-1.5 |
| Fabricación de transmisiones automáticas | | |
| Ensambladores | 0.07 | 0.02-0.49 |
| Maquinistas | 0.19 | 0.06-2.76 |
| Hospitales | | |
| Enfermeras | 0.11 | 0.05-0.21 |
| Técnicos de rayos X | 0.15 | 0.1-0.22 |
| Ocupaciones seleccionadas de todos los sectores económicos | | |
| Operadores de maquinaria de construcción | 0.05 | 0.01-0.12 |
| Conductores de vehículos de motor | 0.11 | 0.04-0.27 |
| Profesores de escuela | 0.13 | 0.06-0.32 |
| Mecánicos de coches | 0.23 | 0.06-0.87 |
| Vendedores | 0.23 | 0.1-0.55 |
| Operarios de paneles metálicos | 0.39 | 0.03-4.84 |
| Operadores de máquinas de corte | 0.68 | 0.09-3.2 |
| Trabajos de silvicultura y taladores | 0.76 | 0.06-9.55 ³ |

1- La mediana es el punto medio de una muestra ordenada. Las medidas de exposición personal reflejan la mediana del campo magnético producido por varias fuentes y la cantidad de tiempo que el trabajador permanece expuesto a las mismas.

2- El rango estudiado abarca desde el percentil 5 hasta el 95 considerando una jornada media de trabajo para una ocupación específica.

3- Los motores de las máquinas de corte producen campos magnéticos a varias frecuencias diferentes de 60 Hz.

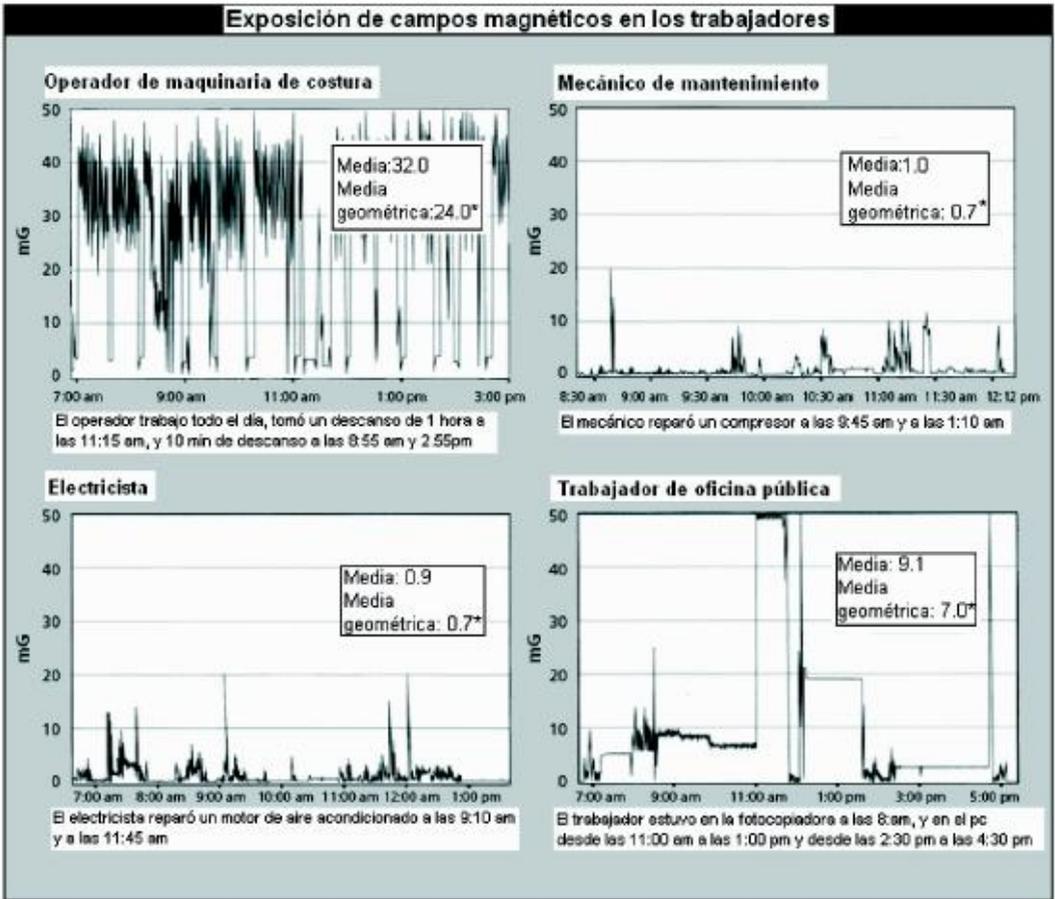


Figura 3.11 Exposición de trabajadores a campos magnéticos (modificada de [3])

En la monografía realizada por la Organización Mundial de la Salud sobre los campos ELF, se puede encontrar una amplia recopilación sobre datos de exposición en diferentes actividades de trabajo [2]. En varias recopilaciones bibliográficas encontradas se citan como estudios importantes los realizados por el Instituto Nacional de Seguridad y Salud Ocupacional (*National Institute for Occupational Safety and Health*, NIOSH) [i], la Agencia de Protección de la Salud (*Health Protection Agency*, HPA) [j], el Instituto Nacional de Ciencias de Salud Ambiental [k] (*National Institute of Environmental Health Sciences*, NIEHS) y otros organismos de importancia, también citados en la bibliografía de este documento.

Para el caso de España, en la **Tabla 3.7** se muestra un ejemplo de las dosis correspondientes a algunos puestos de trabajo del sector eléctrico, representándose la media ponderada en el tiempo (*time-weighted average*, TWA) y el nivel máximo de la jornada laboral:

Tabla 3.7 Sector eléctrico español [45]

| Sector eléctrico español | | |
|--|--|--------|
| Sector eléctrico español | Campo magnético de 50 Hz (μT) | |
| | Media | Máximo |
| Brigada de media tensión /(15-20 kV) | 0.4 | 31.2 |
| Brigada de oficinas (trabajo con ordenador) | 0.5 | 10.6 |
| Brigada de operaciones y averías(6-20 kV) | 1.1 | 551.8 |
| Brigada de mantenimiento en baja tensión (6-20 kV) | 1.8 | 301.6 |
| Brigada de mantenimiento de edificios (220/380 V) | 1.8 | 398.5 |
| Brigada de trabajos en media tensión (15 kV) | 2.0 | 57.7 |
| Trabajo dentro de subestaciones (220 kV) | 3.5 | 8.4 |
| Trabajo dentro de subestaciones (400 kV) | 6.0 | 75.0 |
| Inspección de líneas de alta tensión (400 kV) | 15.2 | 22.0 |

En este caso, según [45], los valores se corresponden con los calculados en Estados Unidos, en donde se ha hallado que los trabajadores eléctricos reciben una dosis que va desde 0.96 a 2.7 μT ; y los no eléctricos, de 0.17 a 0.41 μT . Si comparamos estos datos con los de la **Tabla 3.6**, podemos ver ligeras diferencias, pero indudablemente se puede afirmar que aquellos trabajos asociados a elementos por los que circulan cantidades importantes de corriente, serán aquellos con una mayor intensidad de exposición a campos ELF.

En aras de aclarar posibles divergencias de datos, en la **Tabla 3.8** se muestran las medias aritméticas obtenidas, según el documento [45], para distintos ambientes laborales de un estudio realizado en Suecia:

Tabla 3.8 Intensidad de campo magnético (media aritmética de la jornada laboral) en diferentes profesiones en Suecia [45]

| Campo magnético de 50 Hz | | |
|---|--|-----------|
| Ambientes laborales | Campo magnético de 50 Hz (μT) | |
| | Media | Rango |
| Trabajos con máquinas de mover terrenos | 0.05 | 0.03-0.08 |
| Conductores de vehículos de motor | 0.12 | 0.08-0.14 |
| Secretarias, administrativos | 0.12 | 0.08-0.14 |
| Médicos | 0.12 | 0.11-0.15 |
| Profesores (escuela, universidad) | 0.15 | 0.11-0.18 |
| Trabajadores de telefonía | 0.16 | 0.1-0.23 |
| Contables | 0.17 | 0.11-0.22 |
| Periodistas | 0.21 | 0.13-0.28 |
| Trabajadores de radio y TV | 0.23 | 0.14-0.33 |
| Programadores de ordenador | 0.24 | 0.13-0.25 |
| Dentistas | 0.27 | 0.18-0.35 |
| Ingenieros y técnicos eléctricos y electrónicos | 0.31 | 0.12-0.36 |
| Trabajadores de metal y fundición | 0.36 | 0.13-0.25 |
| Conductores de ferrocarril | 0.57 | 0.18-0.88 |
| Otros trabajadores de metal | 1.59 | 0.18-0.6 |
| Soldadores | 1.9 | 0.62-2.38 |
| Trabajadores de la madera, deforestación | 2.48 | 0.21-4.78 |

3.3.2 Exposición no ocupacional

La exposición residencial a campos magnéticos a la frecuencia de alimentación eléctrica, 50-60 Hz, no registra grandes variaciones en todo el mundo (considerando zonas urbanizadas de países desarrollados). La media geométrica del campo magnético en los hogares oscila entre 0.025 y 0.07 μT en Europa, y entre 0.055 y 0.11 μT en los Estados Unidos. Los valores medios de los campos eléctricos en el hogar son del orden de varias decenas de voltios por metro. En las proximidades de determinados aparatos eléctricos, los valores instantáneos del campo magnético pueden llegar a ser de unos pocos cientos de μT . Cerca de las líneas de energía, los campos magnéticos llegan a ser de alrededor de 20 μT y los campos eléctricos de varios miles de voltios por metro.

En cuanto a la exposición infantil, son pocos los niños cuya exposición residencial a campos magnéticos de 50 ó 60 Hz supera los niveles asociados con un aumento de la incidencia de la leucemia infantil, como se describe en el **Capítulo 4**. Entre el 1% y el 4% tienen una exposición media superior a 0.3 μT y sólo del 1% al 2% tienen una exposición

media que supera los $0.4 \mu\text{T}$. Estudios realizados en áreas urbanas, como el realizado en Extremadura [44], arrojan valores que generalmente no superan $0.2 \mu\text{T}$ (más del 70 % de las medidas).

En la **Figura 3.12** se muestra la exposición típica de una persona en su vida cotidiana. En la gráfica mostrada se midió el campo magnético de la persona cada 1.5 s durante un período de 24 h. Como se puede ver, para esta persona la exposición en el hogar era baja. Los picos que se observan ocurren cuando la persona pasó cerca de líneas de energía (bien subterráneas o aéreas), o estaba cerca de dispositivos eléctricos en la oficina o en el hogar.

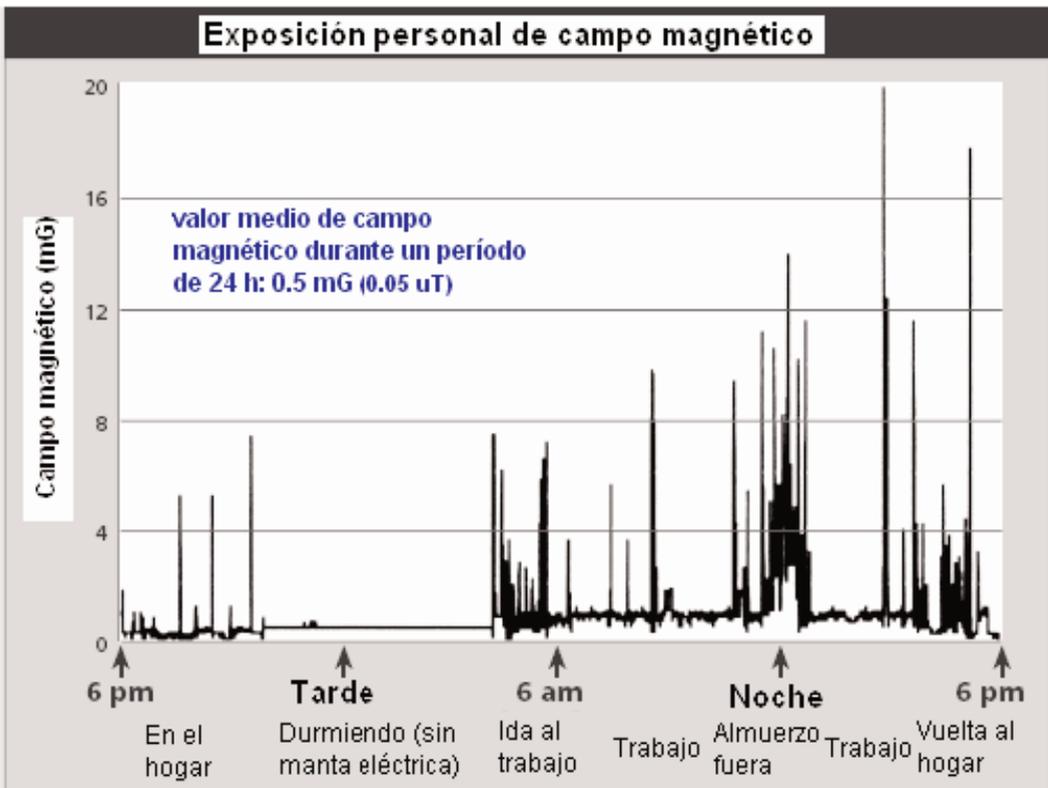


Figura 3.12 Exposición personal de campo magnético (modificada de [3])

Varios estudios han utilizado medidores personales para estimar los niveles de exposición en diferentes entornos. Estos estudios tienden a mostrar que los dispositivos eléctricos y el cableado son los elementos que más contribuyen a la exposición de campo magnético en el hogar. Las personas que viven cerca de líneas de alta tensión que portan grandes corrientes tienden a estar expuestas a niveles más altos de campo.

Para el caso de Estados Unidos, la mayoría de las personas se exponen a campos magnéticos con una media de menos de $0.2 \mu\text{T}$, si bien las exposiciones individuales pueden variar. En las tablas siguientes se muestran los niveles medios de exposición de campo magnético para la población estadounidense (Tabla 3.9) y los valores medios para varias actividades (Tabla 3.10) y entornos (Tabla 3.11).

Tabla 3.9 Estimación de exposición poblacional a campos magnéticos (modificada de [3])

| Media estimada de campo magnético en la población estadounidense | | | |
|---|------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|
| Media de campo tomada en 24 h (μT) | Población expuesta (%) | 95% de intervalo de confianza (%) | Población expuesta (millones) |
| >0.05 | 76.3 | 73.8-78.9 | 197-211 |
| >0.1 | 43.6 | 40.9-46.5 | 109-124 |
| >0.2 | 14.3 | 11.8-17.3 | 31.5-46.2 |
| >0.3 | 6.3 | 4.7-8.5 | 12.5-22.7 |
| >0.4 | 3.6 | 2.5-5.2 | 6.7-13.9 |
| >0.5 | 2.42 | 1.65-3.55 | 4.4-9.5 |
| >0.75 | 0.58 | 0.29-1.16 | 0.77-3.1 |
| >1 | 0.46 | 0.20-1.05 | 0.53-2.8 |
| >1.5 | 0.17 | 0.035-0.83 | 0.09-2.2 |

*Esta tabla resume los resultados de un estudio realizado a partir de una muestra de 1000 personas en USA. Asumiendo que la muestra es aleatoria, podemos decir con un 95% de confianza que el porcentaje de población expuesta a campos magnéticos de más de $0.05 \mu\text{T}$ (0.5 mG) está entre el 73.8 % y el 78.9 %.

Tabla 3.10 Campo magnético medio según el tipo de actividad realizada (modificada de [3])

| Media campo magnético (μT) | Población expuesta (%) | | | | |
|---|------------------------|------|---------|---------|-------|
| | Hogar | Cama | Trabajo | Escuela | Viaje |
| >0.05 | 69 | 48 | 81 | 63 | 87 |
| >0.1 | 38 | 30 | 49 | 25 | 48 |
| >0.2 | 14 | 14 | 20 | 3.5 | 13 |
| >0.3 | 7.8 | 7.2 | 13 | 1.6 | 4.1 |
| >0.4 | 4.7 | 4.7 | 8.0 | <1 | 1.5 |
| >0.5 | 3.5 | 3.7 | 4.6 | | 1.0 |
| >0.75 | 1.2 | 1.6 | 2.5 | | 0.2 |
| >1 | 0.9 | 0.8 | 1.3 | | <0,2 |
| >1.5 | 0.1 | 0.1 | 0.9 | | |

Tabla 3.11 Niveles de campo magnético en ambientes comunes (modificada de [3])

| Niveles de campo magnético en ambientes comunes (campo magnético medido en μT) | | | | | |
|---|---------------------------------------|-----------------------|---|---------------------|-----------------------|
| Entorno | Media de Exposición (μT) | Percentil 5% superior | Entorno | Media de Exposición | Percentil 5% superior |
| Oficina | | | Tiendas de máquinas | | |
| Personal de apoyo | 0.06 | 0.37 | Maquinista | 0.04 | 0.60 |
| Profesionales | 0.05 | 0.26 | Soldador | 0.11 | 2.46 |
| Mantenimiento | 0.06 | 0.38 | Ingeniero | 0.1 | 0.51 |
| Visitante | 0.06 | 0.21 | Instalador | 0.05 | 0.64 |
| Escuela | | | Personal de oficina | 0.07 | 0.47 |
| Profesores | 0.06 | 0.33 | Supermercados | | |
| Estudiantes | 0.05 | 0.29 | Cajeros | 0.27 | 1.19 |
| Guardias | 0.1 | 0.49 | Carnicería | 0.24 | 1.28 |
| Personal administrativo | 0.13 | 0.69 | Personal de oficina | 0.21 | 0.71 |
| Hospital | | | Clientes | 0.11 | 0.77 |
| Pacientes | 0.06 | 0.36 | *Para esta tabla, la media mostrada es la media aritmética de las dos medidas intermedias de todas las medidas tomadas y puestas de forma ordenada. | | |
| Personal médico | 0.08 | 0.56 | | | |
| Visitante | 0.06 | 0.24 | | | |
| Mantenimiento | 0.06 | 0.59 | | | |

También hay algunos estudios realizados en España. Por ejemplo, según el estudio realizado por Paniagua [44] ya comentado, los niveles medios de exposición de campos magnéticos en zonas urbanas de Extremadura están en torno a algo menos de $0.2 \mu\text{T}$ (el 30 % de las medidas realizadas en este estudio superaron este valor). Aunque gran parte de los estudios realizados son norteamericanos, podemos extrapolar los niveles de exposición, bajo la suposición de que en España (y en Europa, en comparación con Estados Unidos) serán, como regla general, de valores similares y algo menores, según demuestran los estudios realizados hasta el momento.

Capítulo 4

Los campos ELF y la salud humana

4.1 Introducción

Este capítulo recoge, en una primera parte, cómo se realizan los estudios científicos para valorar los posibles efectos potenciales de los campos ELF sobre la salud humana. Posteriormente, se describen los resultados y las conclusiones que actualmente se tienen de esos estudios, y que han sido ampliamente revisados en monografías y recopilaciones bibliográficas de importantes proyectos, como el *EMF Project* de la Organización Mundial de la Salud [b], el programa *EMF Rapid* desarrollado por el Instituto Nacional de las Ciencias de Salud Ambiental (*National Institute of Environmental Health Sciences*, NIEHS) [3], el estudio realizado por el grupo de trabajo ELF del comité de protección contra radiaciones de Canadá (*ELF Working Group*) [1], o el *BC Centre for Disease Control* (BCCDC) [m], así como los estándares desarrollados por IEEE [4] y la Comisión Internacional de Protección contra Radiaciones no Ionizantes [5]; también, en la base de datos del *EMF Project* [n], es posible consultar los estudios más recientes que se estén realizando en cada momento, clasificados por rangos de frecuencia, tipos, y subtipos de estudios. En España también se han realizado recopilaciones, como la elaborada por Endesa, en colaboración con UNESA, “Campos eléctricos y magnéticos de 50 Hz, análisis del estado actual de conocimientos” [45], y documentación traducida y difundida por el Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales, como la Enciclopedia de Salud y Seguridad en el Trabajo de la OIT (Organización Internacional del Trabajo) [40], donde se establecen los efectos biológicos y posibles consecuencias para la salud de los campos ELF (tomo 2, capítulo 49), o el informe técnico elaborado por el comité de expertos, solicitado por el Ministerio de Sanidad y Consumo sobre los campos electromagnéticos y la salud pública [89]. Otro trabajo realizado en el mismo ámbito fue una recopilación del conocimiento sobre los campos ELF durante los años 1995-2000, en colaboración con la Universidad de Valladolid, el CSIC, UNESA, y Red Eléctrica de España [97]. Estas recopilaciones analizan y comparan los resul-

tados obtenidos de varios estudios, algunos de ellos también españoles, como los realizados en Extremadura por Paniagua [44, 46], comunicaciones en el congreso Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo [88], etc... Bibliografía relacionada con la seguridad en el trabajo, así como algunos métodos específicos relacionados con trabajos en tensión se pueden encontrar en la página oficial de UNESA [x]¹¹. Para cubrir el conocimiento actual sobre la relación entre los campos ELF y la salud humana, en el **Apéndice II** de este documento se establecen las conclusiones obtenidas por los principales organismos que han realizado una revisión sobre los campos ELF y los riesgos para la salud humana.

Varios estudios de laboratorio han concluido que la exposición a los campos electromagnéticos produce efectos biológicos, incluyendo cambios en las funciones que realizan las células, ligeros cambios en ciertos tejidos, así como modificaciones en los niveles hormonales, en estudios realizados con animales. Es importante distinguir entre efecto biológico y efecto para la salud (**Apartado 4.3**). Muchos efectos biológicos se encuentran dentro de un rango normal de variación y no tienen que ser necesariamente dañinos. Por ejemplo, la luminosidad produce un efecto biológico en nuestros ojos, provocando una contracción de la pupila, siendo esto una respuesta normal.

Cabe aclarar que existen algunos fenómenos, como la emisión de un zumbido audible en transformadores eléctricos o en las proximidades de líneas eléctricas de alta tensión que crean efecto corona (efecto consistente en la ionización del aire circundante a un conductor, debido a elevados niveles de tensión), que el público en general puede relacionar con posibles efectos para la salud de los campos ELF. Aunque este ruido puede ser molesto, no tiene ninguna consecuencia para la salud. Algunos aparatos, como las fotocopiadoras u otros dispositivos que funcionan o generan internamente alta tensión, pueden producir ozono, que es un gas incoloro de olor acre. Al atravesar el aire, las descargas eléctricas convierten las moléculas de oxígeno en ozono. Aunque el olfato es bastante sensible a este gas, las concentraciones que se alcanzan junto a las fotocopiadoras y otros aparatos de ese tipo están muy por debajo de los niveles preocupantes para la salud. En las noches húmedas o en los días lluviosos el efecto corona resulta a veces visible, y puede producir ruido y ozono. Según la OMS, ninguno de estos efectos es suficientemente importante para afectar a la salud.

A continuación se introducen las formas de evaluación sobre las cuales se basan la mayoría de los estudios estadísticos sobre campos ELF y sus efectos en los seres humanos. Posteriormente se comentan posibles patologías, que a lo largo de los diversos estudios que se han realizado han sido cuestionadas como consecuencias de la exposición a los campos ELF. En [2] se pueden encontrar descripciones detalladas sobre estudios espe-

¹¹ www.unesa.es (Apartado "publicaciones de seguridad")

cíficos, y en [a]¹² se puede encontrar una comparación resumida de las conclusiones y opiniones de los organismos más importantes (también agregada en el **Apéndice II** del documento), siendo el más reciente el realizado por la Organización Mundial de la Salud.

4.2 Tipos de estudios

En los estudios de laboratorio se ha encontrado una evidencia limitada que sustente la hipótesis de que los campos electromagnéticos de baja frecuencia, como por ejemplo los generados por líneas de transporte de energía o transformadores, puedan producir efectos perjudiciales sobre la salud humana. Organismos científicos, a través de proyectos internacionales, han realizado re-análisis de los estudios que se han desarrollado, y han encontrado que muchos de los efectos que se informan nunca han sido verificados o duplicados por otros estudios. La evidencia epidemiológica también es poco consistente, y se ha encontrado una débil o casi inexistente asociación entre los campos ELF y los efectos nocivos. La asociación entre los campos ELF y las enfermedades humanas continúa presentando múltiples interrogantes, y es por ello por lo que se continúa la investigación sobre este tema. Cabe preguntarse por tanto, ¿cómo se evalúa si la exposición a los campos ELF provoca efectos nocivos para la salud?

Experimentos con animales, estudios clínicos, estudios de laboratorio con células, simulaciones con computador, estudios con la población humana (epidemiológicos) proporcionan importante información. Cuando se analiza la evidencia sobre si una cierta cantidad de exposición puede causar una enfermedad, los científicos consideran los resultados de estudios de varias disciplinas. Ni un solo estudio, y ni un solo tipo de estudios son definitivos por sí mismos. Las principales formas de evaluación para valorar los riesgos potenciales de la exposición a los campos ELF son:

- Estudios de laboratorio

Estudios de laboratorio con células y animales pueden determinar si un agente, como los campos ELF, puede causar una enfermedad. Los estudios basados en células sirven para explicar los mecanismos biológicos por los cuales ocurre una enfermedad. Los experimentos con animales pretenden explicar los efectos causados por agentes específicos bajo condiciones controladas. Ni los estudios celulares ni los animales pueden reproducir la compleja naturaleza del ser humano y sus interacciones con el entorno. Por tanto, es necesario tener precaución a la hora de extrapolar resultados para los seres humanos, tanto para los posibles efectos como para asegurar que un agente determinado no es nocivo.

¹² www.emfs.info/expert_Reviews.asp

Sin embargo, incluso con las limitaciones descritas, estos estudios sí que han demostrado ser muy útiles para identificar y entender la toxicidad de numerosos agentes físicos y químicos.

Se necesitan condiciones muy específicas para que los investigadores puedan detectar los efectos de los campos electromagnéticos. Además, las exposiciones experimentales no son fácilmente comparables con exposiciones humanas que ocurren en la vida real. En muchos casos, no está claro cómo la exposición a campos electromagnéticos produce ciertos efectos observados en experimentos. Además, como ya se ha dicho, muchos de los efectos biológicos pueden estar dentro de un rango normal de variación y no ser necesariamente dañinos. En la monografía de la OMS [2], se recogen varios estudios de laboratorio, como por ejemplo el realizado en el programa RAPID [3], con ratas de laboratorio.

- Estudios clínicos

En los estudios clínicos, los investigadores utilizan dispositivos sensibles para monitorizar los efectos fisiológicos producidos en humanos durante una exposición controlada a ciertos agentes. En los estudios de EMF (campos electromagnéticos, electromagnetic fields), los voluntarios se exponen a niveles de campos eléctricos y magnéticos mayores de lo normal. Los investigadores miden ciertas variables como el latido del corazón, la actividad cerebral, los niveles hormonales, y otra serie de factores, tanto en grupos expuestos como no expuestos, para encontrar las diferencias que provoca la exposición.

- Estudios epidemiológicos

Un tipo de análisis muy útil para identificar riesgos para la salud humana consiste en estudiar la población que ya ha experimentado unos niveles de exposición. Este tipo de estudio se denomina epidemiológico.

Los epidemiólogos observan y comparan grupos de personas que han o no han tenido ciertas enfermedades, para verificar si el riesgo es diferente entre personas expuestas y personas no expuestas a los campos electromagnéticos.

¿Cómo se evalúan los resultados de los estudios epidemiológicos referentes a la exposición a campos electromagnéticos? Es necesario considerar muchos factores para determinar si un agente causa enfermedad. Una exposición que un estudio epidemiológico asocia con un aumento de riesgo para una cierta enfermedad, no siempre tiene que ser la verdadera causa de esa enfermedad. Para poder asegurar que un agente causa efectos en la salud humana, deben considerarse varios tipos de evidencias:

• Intensidad de la asociación

Cuanto más consistente sea la asociación entre una exposición y una enfermedad, con mayor fiabilidad se podrá establecer que dicha enfermedad se debe al tipo de exposición estudiada. Por ejemplo, la asociación entre el cáncer de pulmón y los fumadores es muy fuerte (20 veces mayor que el riesgo normal). En los estudios donde se establece una asociación entre la exposición a campos electromagnéticos y ciertos tipos de cáncer, esta asociación es mucho más débil.

• Dosis-respuesta

Los datos epidemiológicos son más confiables si la tasa de enfermedad (respecto a la población estudiada) aumenta conforme el nivel de exposición también lo hace. Tal relación dosis-respuesta ha aparecido sólo en algunos estudios sobre EMF.

• Verosimilitud biológica

Cuando en los estudios epidemiológicos se establecen unas asociaciones débiles, los estudios de laboratorio cobran una importancia mayor para apoyar esta asociación. En muchos científicos prevalece el escepticismo en la asociación entre el cáncer y la exposición a EMF porque los estudios de laboratorio no han demostrado una evidencia consistente para los efectos de la salud, así como los estudios experimentales tampoco han mostrado una explicación biológica convincente para tal asociación.

• Confiabilidad de la información sobre la exposición

Otra consideración importante sobre los estudios epidemiológicos es cómo se obtuvo la información. Por ejemplo ¿cómo estimaron la exposición de la población los investigadores, a partir de sus tipos de trabajo, de la situación de sus casas y la distribución del cableado, tomaron medidas de los campos? ¿Qué midieron (campos magnéticos, eléctricos, ambos...)? ¿Cada cuánto tiempo fueron tomadas las medidas y cuándo? ¿En qué lugares se tomaron? Por ejemplo, los campos magnéticos medidos a la vez que se realiza el estudio (de forma contemporánea o simultánea) pueden sólo estimar la exposición ocurrida en algunos años anteriores, cuando el proceso de enfermedad puede que ya haya comenzado. La falta de información exhaustiva hace más difícil la interpretación de los resultados de un estudio, teniendo además en cuenta que cualquier persona en el mundo industrializado ha estado expuesta a los campos electromagnéticos.

• Variables o factores de confusión

Como ya se ha dicho, los estudios epidemiológicos muestran las relaciones entre enfermedades y otros factores, como puede ser la dieta, condiciones del entorno, etc... Un factor o variable de confusión es un factor de riesgo para una enfermedad, que, a su vez, está asociado a la exposición. Por ejemplo, fumar es un factor de confusión en estudios epidemiológicos sobre asbestos y cáncer de pulmón, porque los dos (asbestos y tabaco) están asociados con el cáncer de pulmón [45].

• Nivel de significación

Los investigadores utilizan métodos estadísticos para determinar que la probabilidad de la asociación entre la exposición y la enfermedad se deba simplemente a una casualidad. Para considerar un resultado "estadísticamente significativo", la asociación debe ser más fuerte que la esperada por una casualidad por sí sola.

• Meta-análisis

Una forma mediante la cual los investigadores intentan obtener información de los estudios epidemiológicos es a partir de los meta-análisis. Un meta-análisis **combina** un resumen estadístico de varios estudios para examinar sus diferencias y, si es apropiado, obtiene una estimación global del riesgo. El principal desafío de los meta-análisis realizados por los investigadores son que las poblaciones, las medidas, las técnicas de evaluación, el nivel de participación y los factores potenciales de confusión varían según los estudios originales. Estas diferencias dificultan la combinación de los resultados de diferentes estudios.

• Análisis de muestra conjunta o combinado

Los análisis de muestra conjunta (*pooled analysis*) combinan los **datos originales** de varios estudios y realizan un nuevo análisis sobre los datos primarios. Se requiere por tanto acceso a los datos originales individuales de cada estudio y que sólo incluyan enfermedades y factores comunes entre ellos. Como ocurre con los meta-análisis, los análisis de muestra conjunta están sujetos a las limitaciones del diseño experimental de los estudios originales (por ejemplo, técnicas de evaluación, tasas de participación, etc...). La principal diferencia con los meta-análisis es que estos últimos combinan las estadísticas obtenidas de cada estudio, y no los datos originales, como hacen los análisis de muestra conjunta.

Por otra parte, cabe preguntarse: ¿cómo se caracteriza la exposición a los campos electromagnéticos? Se desconoce qué característica, en el caso de existir, afecta a la salud

humana, aunque se hayan sugerido “parámetros candidatos”, como la media promediada en el tiempo (TWA) [90]. Debido a esta incertidumbre, además de la intensidad de campo, debemos preguntarnos cuánto tiempo puede durar una exposición, cómo varía, a qué hora del día o de la noche ocurre... El cableado de una casa por ejemplo, es generalmente una fuente significativa de EMF, pero los campos magnéticos generados dependen de la cantidad de corriente que circula por los cables. Ya que el funcionamiento de las aplicaciones varía (más número de luces encendidas, más o menos equipos electrodomésticos funcionando...) la exposición al campo magnético también variará.

Para muchos estudios, los investigadores han descrito las exposiciones EMF a partir de una estimación de la media aritmética de las intensidades de campo. Algunos científicos piensan que la exposición media no tiene por qué ser la mejor medida para una exposición a campos electromagnéticos; los picos de exposición o el tiempo de exposición también son importantes.

Aspectos más detallados sobre las formas de medida y los métodos empleados se comentan en el **Capítulo 6** de este documento.

4.3 Efectos biológicos

Los efectos biológicos son respuestas medibles, a nivel orgánico o celular, a un estímulo o cambio en el ambiente [6]. Tales respuestas, como por ejemplo el incremento cardíaco después de beber café, o la somnolencia en un salón mal ventilado, no necesariamente son efectos dañinos para la salud. Por el contrario, puede ocurrir que el cuerpo humano no tenga todos los mecanismos de compensación necesarios para mitigar ciertos cambios, dando lugar a un efecto adverso para la salud, que resulta de un efecto biológico que cause perjuicios detectables en la salud o en el bienestar de los individuos expuestos. Un nuevo término, utilizado para definir las radiaciones electromagnéticas producidas por diferentes fuentes (pantallas de ordenador, móviles, etc...) es “electrosmog”. Este término asocia la exposición, y las posibles consecuencias (efectos biológicos y posibles patologías) que puedan tener los campos electromagnéticos en la salud humana [96, b1¹³].

Los efectos biológicos detectados por la exposición a los campos electromagnéticos de baja frecuencia (teniendo que cumplirse ciertas condiciones, como ciertas intensidades de campo, duración de la exposición...) son:

- **Frecuencia cardíaca:** en varios estudios se ha determinado un efecto en la frecuencia cardíaca debido a la exposición a los campos electromagnéticos. Cuando

¹³ www.elektrosmog.com (sección *Wissenswertes*)

este efecto se ha observado, la respuesta biológica ha sido pequeña (un decrecimiento de aproximadamente cinco latidos por minuto), y además ésta no persiste una vez que cede la exposición. Los niveles de exposición para que se produjeran estos efectos son relativamente altos (30 μ T). Sin embargo, los efectos no se han observado de forma consistente en experimentos repetitivos.

- **Electrofisiología del sueño:** en un estudio de laboratorio se encontró que la exposición a los campos magnéticos de 60 Hz durante la noche podía trastornar la actividad eléctrica cerebral durante el sueño. En este estudio, los individuos fueron expuestos a campos magnéticos continuos o intermitentes de 28.3 μ T. Los individuos expuestos a campos magnéticos intermitentes mostraron alteraciones de la actividad cerebral mostrando una serie de parámetros indicativos de sueño pobre o trastornado. En cuanto a la exposición continua, varios estudios no han podido determinar ningún efecto biológico.
- **Hormonas, sistema inmunitario, características químicas de la sangre:** en varios estudios clínicos con voluntarios se han evaluado los efectos de la exposición a los campos electromagnéticos en hormonas, el sistema inmunitario, y las características químicas de la sangre. Estos estudios no proporcionaron resultados consistentes.
- **Melatonina:** La hormona de la melatonina se segrega principalmente durante la noche y por la glándula pineal, una pequeña glándula que se encuentra en el cerebro. Algunos experimentos de laboratorio con células y animales han demostrado que la melatonina puede disminuir el crecimiento de cáncer en las células, incluyendo el cáncer de pecho. En algunos estudios se ha comprobado una disminución de los niveles de melatonina segregados durante la noche en animales expuestos a campos magnéticos y eléctricos. Por tanto, surge la hipótesis de si la exposición a los campos electromagnéticos puede reducir los niveles de melatonina y así debilitar las defensas del cuerpo humano contra el cáncer. Varios estudios clínicos con voluntarios han examinado si, en función de los niveles de exposición y el tipo de exposición de campo magnético, se afectan los niveles de melatonina en la sangre. La exposición de voluntarios a campos con frecuencias de energía (50-60 Hz) bajo condiciones controladas no produjo ningún efecto aparente en la melatonina. Algunos estudios de personas expuestas a campos ELF en el trabajo o en el hogar sí determinaron una pequeña disminución de estos niveles. No está del todo claro si la disminución de los niveles de melatonina en condiciones medioambientales está relacionada con la presencia de campos electromagnéticos o se debe a otros factores. En la **Tabla 4.1** se muestra un resumen de algunos estudios realizados sobre la melatonina.

Tabla 4.1 Algunos estudios realizados sobre la melatonina [45]

| Otros mecanismos investigados | |
|-------------------------------|---|
| Tipo de estudio | Resultados |
| Estudios "in Vitro" | <ul style="list-style-type: none"> - La melatonina no modifica el crecimiento de las células cancerosas (mama, cuello, uterino, huesos y sangre) - Únicamente un tipo de célula de cáncer de mama modifica su crecimiento, posiblemente en relación con el método experimental, y no con la melatonina. |
| Estudios en animales | <ul style="list-style-type: none"> - En general, disminuye la melatonina en roedores, pero no en otros animales, como ganado estabulado bajo líneas de alta tensión. |
| Voluntarios | <ul style="list-style-type: none"> - 30 voluntarios expuestos a 28 y 127 μT durante varias noches no muestran alteraciones significativas en los niveles de melatonina. |
| Exposición doméstica | <ul style="list-style-type: none"> - Mujeres que viven a menos de 150 metros de una línea de 735 kV tienen niveles de melatonina similares a mujeres que viven a más de 400 metros de cualquier línea eléctrica. |
| Trabajadores | <ul style="list-style-type: none"> - 60 mujeres expuestas durante el día no muestran variaciones en niveles de melatonina. - En un estudio sobre 142 varones se ven alteraciones en los niveles de melatonina en relación con las fluctuaciones del campo electromagnético, pero no con su intensidad. |

4.3.1 Mecanismos biofísicos

En la revisión realizada por la Organización Mundial de la Salud [2], se describen detalladamente los mecanismos de interacción de los campos ELF con los seres humanos. De acuerdo con [4], un mecanismo se puede definir como aquel que:

- Puede utilizarse para predecir efectos biológicos en humanos. Además, es posible establecer un modelo mediante ecuaciones (relaciones con parámetros).
- Se ha verificado con humanos, o los datos obtenidos mediante estudios con animales se pueden extrapolar con total fiabilidad a los mismos.
- Se sustenta bajo una fuerte evidencia.
- Está ampliamente aceptado por la comunidad de expertos.

Muchos de los mecanismos propuestos se hacen efectivos solamente en campos por encima de una intensidad determinada. No obstante, la ausencia de mecanismos iden-

tificados no excluye la posibilidad de efectos en la salud incluso con niveles de campo muy bajos. Entre los numerosos mecanismos propuestos para la interacción directa de los campos dentro del cuerpo humano, hay tres que destacan más que los otros, por su potencial actuación a niveles más bajos del campo: los campos eléctricos inducidos en redes neurales, los radicales libres y la magnetita.

Los **campos eléctricos inducidos** en los tejidos por la exposición a campos eléctricos o magnéticos de ELF estimulan directamente las fibras nerviosas mielinizadas (fibras que contienen una vaina de mielina) cuando la intensidad del campo interno es superior a algunos voltios por metro. La transmisión sináptica en las redes neurales, en contraposición a las células aisladas, se puede ver afectada por campos mucho más débiles [2].

Los **radicales libres** son átomos o moléculas que han perdido algún electrón de las capas externas como consecuencia de roturas en sus enlaces, por lo que tienen electrones libres (desemparejados) con una gran capacidad para reaccionar (o recombinarse) con otras moléculas de forma muy rápida, en microsegundos. Se generan de forma natural en las reacciones bioquímicas que tienen lugar en el organismo.

Teóricamente, un campo magnético puede actuar sobre estos radicales aumentando su concentración o prolongando el tiempo que pueden estar activos. Existen evidencias de que un campo magnético estático extraordinariamente intenso (100000 μT) puede alterar la dinámica de reacciones en las que están involucradas radicales libres. La recombinación de los radicales libres puede dañar otras fórmulas, por ejemplo el ADN.

Se ha propuesto que campos intensos de frecuencia industrial pueden tener un efecto similar, aunque lo importante es si este fenómeno se puede dar a las intensidades que se encuentran habitualmente en viviendas o en las cercanías de instalaciones eléctricas.

Esto no parece posible, puesto que un campo de 50 Hz cada ciclo dura 20 milisegundos, mientras que los radicales libres reaccionan con otras moléculas en microsegundos. Así pues, un campo de 50 Hz se comporta en realidad como un campo estático durante el tiempo que duran las reacciones químicas de estos radicales. Dado que en la tierra existe un campo magnético geoestático natural entre 30 y 70 μT , sólo cabría esperar que campos magnéticos de 50 o 60 Hz ejercieran algún efecto sobre estas reacciones si su intensidad fuera netamente superior a la del campo estático terrestre.

Por otra parte, se ha comprobado experimentalmente que no se incrementa el daño genético en células expuestas a un campo magnético de hasta 5000 μT , aunque se aumenten los niveles de radicales libres, por lo que no se puede concluir que los campos electromagnéticos, a estas intensidades, modifiquen la interacción de los radicales libres con moléculas importantes como el ADN.

En los tejidos de los animales y seres humanos se encuentran **crisales de magnetita**, pequeños cristales ferromagnéticos de óxido de hierro de diversas formas, aunque en cantidades ínfimas. Los cálculos basados en hipótesis extremas parecen indicar para los efectos de los campos de ELF en los cristales de magnetita un límite inferior de $5 \mu\text{T}$.

Con respecto a los efectos indirectos, la carga eléctrica superficial inducida por campos eléctricos puede ser percibida y dar lugar a microchoques dolorosos al tocar un objeto conductor, o el acoplamiento de los campos electromagnéticos con dispositivos médicos [5].

Ninguno de los tres mecanismos directos considerados anteriormente parece ser una causa posible del aumento de incidencia de enfermedades, a los niveles de exposición que se suelen encontrar en la población. De hecho, solamente comienzan a ser efectivos a niveles de varios órdenes de magnitud superiores, y los mecanismos indirectos todavía no se han investigado suficientemente. Esta ausencia de un mecanismo posible identificado no excluye la posibilidad de efectos adversos en la salud, pero hace necesaria la obtención de evidencias más sólidas a partir de la biología y la epidemiología.

Además de los mecanismos comentados, y que la OMS propone como destacados, en la siguiente tabla se muestran otros mecanismos investigados (alguno ya comentado como la variación de los niveles de melatonina), obtenidos de la recopilación realizada por Endesa, en colaboración con UNESA [45]:

Tabla 4.2 Otros mecanismos investigados [45]

| Otros mecanismos investigados | |
|--|---|
| Mecanismo investigado | Resultados |
| Alteración en la estructura del material genético y/o alteraciones en su reparación | Ningún efecto |
| Alteraciones en síntesis de ADN | Ningún efecto |
| Alteraciones en la expresión de algunos genes relacionados con el cáncer (oncogenes) | En general, ningún efecto. Resultados positivos únicamente de un grupo de investigación |
| Efectos sobre células preleucémicas | Ningún efecto |
| Transformación tumoral | En general ningún efecto. Un único experimento positivo |
| Alteración del movimiento iónico | En general, sin efectos |
| Alteración en la respuesta a la melatonina en células de cáncer de mama | Bloqueo de la acción de la melatonina |
| Alteración en ODC (complemento relacionado con la proliferación celular) | En general, sin efectos |
| Alteración en interleukinas (sistema inmune) | Ningún efecto |

En cuanto a las posibles enfermedades que pueden ser consecuencia de la exposición a los campos magnéticos y eléctricos de baja frecuencia, existe cierto grado de incertidumbre en algunos tipos de cáncer; además, se han realizado muchos estudios con animales acerca de si la exposición a los campos ELF puede provocar enfermedades diferentes al cáncer; y a partir de ellos, los investigadores han examinado varios criterios de valoración final, incluyendo defectos de nacimiento, funcionamiento del sistema inmunológico, reproducción, comportamiento y capacidad de aprendizaje. Como regla general, los estudios con animales no han favorecido las hipótesis para enfermedades diferentes del cáncer debidas a la exposición a los campos ELF [2].

4.4 Posibles efectos y patologías en la salud humana

En este apartado se recogen los resultados encontrados en relación a posibles efectos debidos a la exposición a los campos ELF. Hay que diferenciar los efectos a corto plazo, y (tal y como denomina la OMS) los posibles efectos crónicos, asociando este término con enfermedades como la leucemia infantil, enfermedades neurológicas, etc... Debe quedar claro que este apartado pretende describir de manera global los estudios que se han realizado sobre los efectos para la salud humana, así como la evidencia encontrada; en muchos casos esta evidencia no ha sido consistente y por tanto no es posible sacar conclusiones; en otros, hay una evidencia de carácter débil que establece una relación entre la exposición a ELF y ciertas enfermedades, especialmente para algunos tipos de cáncer.

4.4.1 Efectos a corto plazo

Según [2], ha quedado establecido que la exposición aguda a niveles elevados (muy por encima de las 100 μT) tiene efectos biológicos, atribuibles a mecanismos biofísicos conocidos. Los campos magnéticos externos ELF originan en el cuerpo humano corrientes y campos eléctricos que, si la intensidad del campo es muy elevada, causan estimulación muscular, así como cambios en la excitabilidad neuronal del sistema nervioso central, sensaciones dolorosas, etc... De hecho, los principales estándares vigentes basan sus niveles de exposición en los efectos a corto plazo, y la OMS afirma que dichas recomendaciones proporcionan una protección adecuada frente a tales efectos. Sin embargo, no sucede lo mismo para los efectos a largo plazo [4, 5], siendo éste el punto principal de las investigaciones actuales.

4.4.2 Efectos a largo plazo

Buena parte de las investigaciones científicas sobre los riesgos a largo plazo asociados a la exposición a campos magnéticos ELF se han centrado en la leucemia infantil.

En 2002, el Centro Internacional de Investigaciones sobre el Cáncer [o] (*Internacional Agency for Research on Cancer, IARC*) publicó un estudio monográfico en el que los campos magnéticos ELF se calificaban como “posiblemente carcinógenos para las personas”. Esta calificación se aplica a aquellos agentes cuya acción cancerígena está escasamente probada en las personas e insuficientemente probada en experimentos con animales (otros ejemplos incluyen efectos del café y de los humos de soldadura); en el **Apéndice II** del documento se clarifican los tipos de clasificaciones establecidos por la IARC. La calificación en cuestión se estableció sobre la base de análisis conjuntos de estudios epidemiológicos que demuestran un cuadro sistemático de aumento al doble de la leucemia infantil, asociada a una exposición media a campos magnéticos de frecuencia de red doméstica (50-60 Hz) superior a $0,3 \mu\text{T}$ - $0,4 \mu\text{T}$. El estudio realizado por la OMS [2] concluyó que, a la luz de los estudios adicionales efectuados ulteriormente, esa calificación debe mantenerse.

No obstante, las evidencias epidemiológicas se ven debilitadas por problemas de tipo metodológico, como los posibles sesgos de selección. Además, no existen mecanismos biofísicos comúnmente aceptados que sugieran una correlación entre la exposición a campos ELF y el cáncer. En consecuencia, de existir algún efecto atribuible a este tipo de exposición, tendría que producirse a través de un mecanismo biológico aún desconocido. Por otra parte, los estudios con animales han arrojado en su mayor parte resultados negativos. El balance que cabe hacer de todo ello es que las evidencias relacionadas con la leucemia infantil no son suficientemente sólidas para establecer una relación de causalidad.

La leucemia infantil es una enfermedad relativamente infrecuente; según las estimaciones efectuadas en el año 2000, el número total anual de nuevos casos asciende a 49000 en el mundo entero. Por término medio, la exposición a campos magnéticos de baja frecuencia superior a $0,3 \mu\text{T}$ en los hogares es poco frecuente: se estima que sólo entre un 1% y un 4% de los niños viven en esas condiciones. Si la relación entre campos magnéticos y leucemia infantil es causal, se estima que el número de casos atribuibles a nivel mundial a la exposición a campos magnéticos podría oscilar entre 100 y 2400 casos anuales, sobre la base de los valores correspondientes al año 2000, lo que representa entre un 0,2% y un 4,95% de la incidencia total correspondiente a ese mismo año. En consecuencia, aun suponiendo que los campos magnéticos ELF aumenten el riesgo de leucemia infantil, si se considera en un contexto global, el impacto en la salud pública de la exposición a campos ELF sería limitado.

Se han estudiado otros efectos adversos para la salud en aras de establecer una posible correlación con la exposición a campos magnéticos ELF. Los análisis se han centrado en varios tipos de cáncer infantil, diversos tipos de cáncer en adultos, la depresión, el suicidio, trastornos cardiovasculares, disfunciones reproductivas, trastornos del desarrollo, modificaciones inmunológicas, efectos neuroconductuales, enfermedades neurodegenerativas, etc. El grupo de trabajo de la Organización Mundial de la Salud ha concluido

que las pruebas científicas que respaldan la existencia de una correlación entre la exposición a campos magnéticos ELF y todos estos efectos adversos para la salud **son mucho más débiles** que en el caso de la leucemia infantil. En algunos casos (por ejemplo, las enfermedades cardiovasculares o el cáncer de mama) las evidencias sugieren que los campos magnéticos no son la causa de esos efectos.

4.4.3 Resumen de efectos potenciales y enfermedades asociadas

En los siguientes apartados se resumen los resultados por áreas, de los estudios sobre los niveles de exposición, efectos desencadenados (como pueden ser los cardiovasculares, o la disminución de la segregación de un tipo de hormona durante la exposición...), y posibles enfermedades asociadas (cáncer, esclerosis lateral amiotrófica, depresión, etc...) que pudieran ser consecuencia de la exposición crónica a los campos ELF. En cada apartado se establece una conclusión de la consistencia que han proporcionado los resultados de los diferentes estudios. En la monografía 238 de la OMS [2] se especifican los estudios más importantes realizados en cada área.

4.4.3.1 Neurocomportamiento

Los estudios del neurocomportamiento abarcan los efectos de la exposición del sistema nervioso a los campos electromagnéticos y sus respuestas a diferentes niveles. Éstos incluyen estimulación directa de los tejidos nerviosos, efectos de percepción producidos por estimulación sensorial, y efectos en funciones del sistema nervioso central. Estos últimos efectos pueden valorarse electrofisiológicamente registrando la actividad eléctrica en el cerebro, y mediante tests de cognición, valoración del estado anímico, y otros tipos de estudios.

El sistema nervioso juega un papel fundamental en el control de otros sistemas del cuerpo, particularmente en el sistema cardiovascular, a través de un control directo, y del sistema endocrino. El cerebro y el sistema nervioso funciona utilizando señales eléctricas, por lo que esta acción puede considerarse vulnerable a los campos ELF. En varios experimentos de laboratorio con voluntarios y animales se han investigado posibles consecuencias de exposición a campos ELF débiles, considerando varios aspectos del funcionamiento del sistema nervioso. Además, se han llevado a cabo estudios epidemiológicos de una posible relación entre la exposición a los campos electromagnéticos con el suicidio y la depresión. Estos estudios han sido revisados por NRC [50], NIEHS [52], IARC [41], ICNIRP [53] y McKinlay et al. [54]. En particular, ICNIRP realizó una revisión en detalle.

En los estudios comentados, se ha observado que la exposición a campos eléctricos de frecuencias 50-60 Hz provoca respuestas biológicas bien definidas, que van desde

la percepción hasta las molestias, por medio de los efectos de la carga eléctrica superficial. Estas respuestas dependen de la intensidad del campo, las condiciones ambientales y la sensibilidad individual. En un grupo de voluntarios se encontró que los umbrales para la percepción directa por el 10% del mismo eran de 2 a 20 kV m⁻¹, mientras que el 5% encontraban molestias con exposiciones 15–20 kV m⁻¹. Se observó que la descarga de chispas era dolorosa en el 7% de los voluntarios para un campo de 5 kV m⁻¹. Los umbrales para la descarga a partir de un objeto cargado a través de una persona con conexión a tierra dependen del tamaño del objeto, por lo que se requiere una evaluación específica en cada caso.

Los campos magnéticos pulsantes de intensidad elevada pueden estimular el tejido nervioso periférico o central; tales efectos se pueden presentar durante los procedimientos de imaginología (pruebas que producen imágenes de áreas del interior del cuerpo) por resonancia magnética (IRM) y se utilizan en la estimulación magnética transcraneal. Las intensidades umbrales de un campo eléctrico inducido para la estimulación directa de los nervios podrían ser de apenas unos voltios por metro. El umbral probablemente es constante dentro del rango de frecuencias desde unos pocos hercios a algunos kilohercios. Es probable que las personas que sufren epilepsia o están predispuestas a ella sean más susceptibles a los campos eléctricos ELF inducidos en el sistema nervioso central (SNC).

La función de la retina, que forma parte del SNC, puede verse afectada por la exposición a campos magnéticos ELF mucho más débiles que los causantes de una estimulación directa de los nervios. La interacción del campo eléctrico inducido con las células de la retina, excitables eléctricamente, da lugar a una sensación de destellos luminosos, denominados fosfenos magnéticos o magnetofosfenos. Se ha estimado que las intensidades umbral de los campos eléctricos inducidos en el fluido extracelular de la retina están comprendidas entre unos 10 y 100 mV•m⁻¹ a 20 Hz. Sin embargo, existe una incertidumbre considerable en relación con estos valores.

La evidencia de otros efectos del neurocomportamiento en estudios con voluntarios, tales como los efectos en la actividad eléctrica del cerebro, la cognición, el sueño, la hipersensibilidad y el estado anímico, son menos claras. En general, dichos estudios se han realizado con niveles de exposición por debajo de los necesarios para inducir los efectos descritos anteriormente, y en el mejor de los casos solamente se han obtenido evidencias de efectos sutiles y transitorios. Las condiciones necesarias para que se den tales respuestas no están bien definidas por el momento. Hay algunos indicios que parecen indicar la existencia de efectos dependientes del campo sobre el tiempo de reacción y sobre la precisión reducida en la realización de algunas funciones cognitivas, que están respaldados por los resultados de estudios sobre la actividad eléctrica general del cerebro.

En los estudios en los que se investigó si los campos magnéticos afectaban a la calidad del sueño se han encontrado resultados inconsistentes. Es posible que estas inconsistencias puedan atribuirse en parte a diferencias en el diseño de los estudios.

Algunas personas afirman que son hipersensibles a los campos electromagnéticos en general. Sin embargo, los resultados obtenidos en estudios de doble ciego parecen indicar que los síntomas notificados no guardan relación con la exposición a dichos campos.

En animales, se ha estudiado desde varias perspectivas la posibilidad de que la exposición a campos de ELF afecte a las funciones del neurocomportamiento, utilizando una serie de condiciones de exposición. Son pocos los efectos sólidamente establecidos. Existe una evidencia convincente de que los animales pueden detectar campos eléctricos en frecuencias de energía, muy probablemente como consecuencia de los efectos de la carga superficial, que pueden provocar agitación transitoria o un estrés ligero. En las ratas, la gama de detección está comprendida entre 3 y 13 kV m⁻¹. Se ha comprobado que los roedores muestran rechazo hacia las intensidades de campo superiores a 50 kV m⁻¹. Existen algunas evidencias de que la exposición a campos magnéticos puede modular las funciones de los sistemas de neurotransmisores opioides y colinérgicos en el cerebro, respaldadas por los resultados de estudios en los que se investigaron los efectos en la analgesia y en el desempeño de funciones de memoria espacial, entre otros.

Como conclusión general, no se puede afirmar que los campos ELF sean los causantes de estados de depresión, suicidio o estados de hipersensibilidad a los mismos. En [a]¹⁴ se puede encontrar más información de estudios sobre la hipersensibilidad.

4.4.3.2 Sistema neuroendocrino

Las glándulas endocrinas pineal y pituitaria, ambas situadas en el cerebro, y conectadas y controladas por el sistema nervioso, liberan hormonas en la sangre, las cuales producen una importante influencia en el metabolismo y fisiología del cuerpo humano, particularmente en las etapas de desarrollo y reproducción, debido en parte a la influencia que provocan en la liberación de otras hormonas de glándulas endocrinas situadas en otras partes del cuerpo. Estos estudios han sido revisados por NIEHS [52], IARC [41], McKinlay et al. [54], y recientemente por AGNIR [55]. La hipótesis, sugerida por primera vez por Stevens [56], de que la exposición a los campos ELF podría reducir la secreción de la melatonina e incrementar el riesgo de cáncer de pecho ha estimulado un gran número de estudios e investigaciones sobre los niveles de melatonina en personas expuestas a campos ELF, tanto en situaciones domésticas como ocupacionales.

¹⁴ www.emfs.info/sci_hypersensitivity.asp

Los resultados de varios estudios con voluntarios, así como de estudios epidemiológicos residenciales y ocupacionales, sugieren que el sistema neuroendocrino no sufre efectos adversos por la exposición a campos eléctricos o magnéticos en frecuencias de 50-60 Hz. Esto se aplica particularmente a los niveles de hormonas específicas del sistema neuroendocrino, como la melatonina (uno de los efectos biológicos comentados anteriormente), liberada por la glándula pineal (epífisis), y a varias hormonas liberadas por la glándula pituitaria (hipófisis) que intervienen en el control del metabolismo y la fisiología del cuerpo. A veces se han observado ligeras diferencias en el tiempo de liberación de la melatonina, relacionadas con ciertas características de la exposición, pero estos resultados no fueron consistentes.

Es muy difícil eliminar la posible confusión debida a diversos factores ambientales y al estilo de vida, factores que también podrían influir en los niveles hormonales. En la mayor parte de los estudios de laboratorio sobre los efectos de la exposición a campos ELF, en los niveles nocturnos de melatonina en voluntarios no se encontró ningún efecto cuando se realizó un control de los posibles factores de confusión. No pudieron reproducirse los cambios en los niveles de melatonina observados por primera vez en estudios iniciales de exposición a campos eléctricos de hasta 100 kV m^{-1} . Los resultados de una serie de estudios más recientes, que mostraban que los campos magnéticos polarizados circularmente suprimían los niveles nocturnos de melatonina, fueron debilitados por las comparaciones inapropiadas entre los animales expuestos y los controles históricos. Los datos de otros experimentos en roedores, que abarcaban niveles de intensidad comprendidos desde unos pocos microteslas hasta 5 mT, fueron inconsistentes.

En animales de reproducción estacional, la evidencia de algún efecto de la exposición a campos en frecuencias de transporte de energía sobre los niveles de la melatonina y en el estatus reproductivo fue predominantemente negativa. En un estudio con primates sometidos a una exposición crónica a campos en frecuencias de 50-60 Hz no se detectó ningún efecto convincente en los niveles de melatonina.

Los efectos de la exposición a campos ELF sobre la producción o liberación de melatonina en glándulas pineales aisladas fueron variables, aunque se han realizado relativamente pocos estudios *in vitro*. Las evidencias de que la exposición a campos de ELF interfiere con la acción de la melatonina en las células de cáncer de mama *in vitro* son complicadas.

No se han observado efectos consistentes en las hormonas relacionadas con el estrés en diversas especies de mamíferos, con la posible excepción de un estrés de corta duración tras el inicio de la exposición a campos eléctricos ELF de niveles suficientemente altos para poder percibirlos. Similarmente, si bien son pocos los estudios que se han realizado, en la mayoría se han observado efectos negativos o inconsistentes en los niveles de hormonas del crecimiento y de las hormonas que intervienen en el control de la acti-

vidad metabólica, o que están asociadas con el control de la reproducción y el desarrollo sexual.

Considerados en conjunto, estos datos no indican que los campos eléctricos y/o magnéticos de ELF afecten al sistema neuroendocrino de manera que se produzcan efectos perjudiciales en la salud humana y enfermedades como por ejemplo el cáncer de mama, ya que las pruebas se consideran **insuficientes**.

4.4.3.3 Trastornos neurodegenerativos

Un conjunto de estudios han examinado las asociaciones entre la exposición a los campos electromagnéticos y la enfermedad del Alzheimer, enfermedades asociadas con las neuronas como la esclerosis, y el Parkinson. Estas enfermedades pueden clasificarse como patologías neurodegenerativas, ya que involucran la muerte de neuronas. Aunque su etiología parece ser diferente, según los estudios de Savitz et al. [57, 58], una parte de los mecanismos patógenos pueden ser comunes. En la mayoría de las investigaciones realizadas se han estudiado estas enfermedades de forma separada. En relación con los campos electromagnéticos, la esclerosis lateral amiotrófica ha sido la más estudiada.

Se han realizado estudios sobre análisis de factores críticos de la producción de diferentes especies de oxígeno reactivo en la degeneración neuronal, como Felician et al. [59] y Coyle et al. [60]. También, autores como Lacy-Hulbert [63] han examinado los efectos de los campos ELF en relación con los niveles de calcio en las neuronas, o investigado la posibilidad de que la exposición a shocks eléctricos pueda aumentar el riesgo de esclerosis lateral amiotrófica (ELA) [61, 62].

En cuanto a la hipótesis de que la exposición a campos ELF pueda estar asociada con varias enfermedades neurodegenerativas, en relación con la enfermedad de Parkinson y ELA, el número de estudios realizados ha sido pequeño y no hay evidencias de asociación con estas enfermedades. En el caso de la enfermedad de Alzheimer y ELA, se ha publicado algo más. Algunos de estos informes parecen indicar que las personas que trabajan en ocupaciones relacionadas con la electricidad podrían tener mayor riesgo de ELA. Hasta ahora no se ha establecido ningún mecanismo biológico que pueda explicar esta asociación; en conjunto, se considera que las pruebas de la asociación entre la exposición a campos ELF y la esclerosis lateral amiotrófica son **insuficientes**.

Los pocos estudios en los que se ha investigado la asociación entre la exposición a campos ELF y la enfermedad de Alzheimer son contradictorios. Sin embargo, los estudios de mayor calidad, que se concentraron en la morbilidad (proporción de personas que enferman en un sitio y tiempo determinado) de la enfermedad de Alzheimer más que en la

mortalidad, no indicaron una asociación. En conjunto, las pruebas de una asociación entre la exposición a campos ELF y la enfermedad de Alzheimer son **insuficientes**, según la OMS. No obstante, se han encontrado estudios recientemente publicados, como en [48], donde se realiza un meta-análisis a partir de 14 estudios previos y se obtiene como conclusión una asociación entre la enfermedad de Alzheimer y la exposición a los campos ELF, aclarando también las limitaciones del propio estudio.

Según [45] no existe una clara evidencia de que los trabajadores expuestos a campos electromagnéticos tengan un riesgo aumentado de padecer determinadas enfermedades neurológicas, ni que la incidencia de enfermedades comunes les haga ausentarse de su trabajo con una incidencia mayor que la de los trabajadores no expuestos.

4.4.3.4 Trastornos cardiovasculares

Los primeros estudios relacionados sobre trastornos cardiovasculares y campos ELF datan de los años 60 y 70, donde autores como Asanova y Rakov [64] investigaron síntomas relacionados en operadores de vías de tren. También se han realizado estudios donde se han reportado cambios en el sistema cardiovascular, como hipertensión en trabajadores de instalaciones de energía de 500, 750 y 1150 kV [65]. Las investigaciones más recientes se han centrado en los efectos directos con la exposición. Autores como Hocking [66] o Knave et al. [67] han estudiado los efectos a corto y largo plazo, respectivamente.

Los estudios experimentales de exposición, tanto de corta como de larga duración, indican que, si bien el choque eléctrico representa un peligro evidente para la salud, es improbable que se produzcan otros efectos cardiovasculares peligrosos asociados con los campos de ELF a los niveles de exposición ambiental u ocupacional comúnmente encontrados. Se han determinado diversos cambios cardiovasculares en la literatura, la mayoría de los efectos son pequeños y los resultados no han sido consistentes. La posibilidad de que exista una asociación específica entre la exposición y el funcionamiento del corazón sigue siendo una mera especulación. En conjunto, las pruebas **no respaldan** una asociación entre la exposición a campos ELF y las enfermedades cardiovasculares.

4.4.3.5 Inmunología y hematología

Las evidencias de los efectos de los campos eléctricos o magnéticos ELF sobre los componentes del sistema inmunológico en general son **inconsistentes**. De la literatura disponible, podemos nombrar algunos estudios como los realizados por Dasdag et al. [68], donde se realizaron análisis de sangre en trabajadores de soldadura, o Thun-Battersby et al. [69], que expusieron a ratas hembra a campos de 100 μ T durante diferentes periodos (3, 14 días, y 13 semanas). También podemos nombrar a Ikeda et al. [70], que investigaron

las funciones inmunológicas del ser humano en voluntarios expuestos a campos magnéticos de distintas intensidades.

En algunos estudios humanos, utilizando campos de $10 \mu\text{T}$ hasta 2 mT , se observaron cambios en las células citolíticas, que mostraron tanto un aumento como una disminución de su número, y en el recuento total del número de células blancas (leucocitos), sin cambios o con una disminución del número. En estudios en animales, se observó una actividad reducida de las células citolíticas en ratones hembras, pero no en los machos ni en las ratas de ambos sexos. También, en el recuento de leucocitos se obtuvieron resultados inconsistentes, con una disminución o ningún cambio en los distintos estudios. La gama de exposición de los animales fue aún más amplia, de $2 \mu\text{T}$ a 30 mT .

La dificultad para interpretar el impacto potencial de estos datos en la salud radica en las grandes variaciones de las condiciones de exposición y ambientales, el número relativamente pequeño de individuos sometidos a prueba y la amplia variedad de efectos finales.

Son pocos los estudios realizados sobre los efectos de los campos magnéticos ELF en el sistema hematológico. En los experimentos de evaluación del recuento diferencial de células blancas (leucocitos), las exposiciones fueron desde $2 \mu\text{T}$ a 2 mT . No se han encontrado efectos consistentes de la exposición aguda a campos magnéticos de ELF o a campos eléctricos y magnéticos ELF combinados, ni en los estudios con personas ni con animales. Por consiguiente, de manera global, las evidencias de los efectos de los campos eléctricos o magnéticos ELF en los sistemas inmunológico y hematológico se consideran **insuficientes**.

4.4.3.6 Reproducción y desarrollo

Los efectos de exposición a los campos ELF en la fertilidad, reproducción, crecimiento y desarrollo han sido investigados en estudios epidemiológicos y de laboratorio durante varios años. Los estudios epidemiológicos han examinado los resultados en relación al uso de monitores, y la exposición residencial (donde se ha considerado muy en particular la exposición provocada por camas calentadas eléctricamente). Experimentalmente, se ha estudiado este enfoque en especies mamíferas y no mamíferas, especialmente los pájaros. Se han realizado varias revisiones sobre estos estudios, como por ejemplo la de AGNIR [71], Brent et al. [72], Huuskonen et al. [73], e ICNIRP [53], entre otras. En la **Tabla 4.3** se muestran los resultados de algunos estudios sobre la reproducción

Tabla 4.3 Resultados de algunos estudios sobre la reproducción y los campos ELF [45]

| Resultados de algunos estudios sobre la reproducción y los campos ELF | | | |
|---|---|--|---|
| Tipo de estudio | Exposición | Resultados | |
| Laboratorio | Ratas (14 estudios) - Ratones (10 estudios) - Vacas (1 estudio) | - Ausencia de efectos en la gran mayoría | |
| Epidemiológico | | | |
| | Doméstico | Uso de mantas eléctricas (8 estudios) - Cercanía a línea eléctrica (3 estudios) | - No se observa un riesgo estadísticamente significativo - En uno de los estudios se encuentra un riesgo ligeramente aumentado de perder el embarazo en las primeras semanas |
| | Laboral | - Trabajadores del sector eléctrico (2 estudios) | - Alguno refiere disminución de la libido - No hay relación con aborto precoz en mujeres del sector. - Un estudio refiere mayor riesgo de parto prematuro en mujeres trabajadoras |

En conjunto, los estudios epidemiológicos no han demostrado que haya una asociación entre resultados adversos en la reproducción **humana**, con la exposición materna o paterna a campos ELF. Hay algunas evidencias de un aumento del riesgo de aborto asociado con la exposición materna a campos magnéticos, pero éstas son insuficientes.

En varias especies de mamíferos se han evaluado exposiciones a campos eléctricos ELF de hasta 150 kV m^{-1} , incluidos estudios con grupos de gran tamaño y exposiciones durante varias generaciones. Los resultados no mostraron ningún efecto adverso en el desarrollo. La exposición de mamíferos a campos magnéticos ELF de hasta 20 mT no ha mostrado dar lugar a malformaciones externas, viscerales o esqueléticas graves, aunque algunos estudios muestran un aumento de pequeñas anomalías esqueléticas, tanto en ratas como en ratones.

En estudios teratológicos son relativamente frecuentes las variaciones en el esqueleto, las cuales normalmente se consideran biológicamente insignificantes. Sin embargo, no se pueden excluir pequeños efectos de los campos magnéticos en el desarrollo del esqueleto.

Se han publicado muy pocos estudios en los que se aborden los efectos en la reproducción, y de ellos no se puede extraer ninguna conclusión. En varios de ellos, sobre

modelos experimentales con no mamíferos (embriones de pollo, peces, erizos de mar e insectos), se han determinado resultados, mostrando que los campos magnéticos ELF a niveles de microteslas pueden alterar el desarrollo inicial. Sin embargo, los resultados de los modelos experimentales con no mamíferos en la evaluación global de la toxicidad en el desarrollo tienen un valor menor que los obtenidos en los estudios correspondientes con mamíferos. En conjunto, las pruebas de efectos en el desarrollo y la reproducción son **insuficientes**.

4.4.3.7 Cáncer

La posibilidad de que la exposición a campos ELF incremente el riesgo de cáncer ha sido objeto de investigación de numerosos estudios epidemiológicos y experimentales durante las dos últimas décadas, y ha tenido importantes revisiones por parte de grupos expertos, tanto a nivel nacional como internacional, (como por ejemplo los organismos IC-NIRP [53], IARC [41] y NIEHS [52], o los estudios realizados por los autores Ahlbom y Feychting [74]).

La asociación entre la leucemia infantil y la exposición residencial a campos magnéticos ELF fue identificada por primera vez por Wertheimer y Leeper [12], y posteriormente ha sido apoyada por algunos estudios epidemiológicos. Estas investigaciones han llevado a que la Agencia Internacional de Investigación del Cáncer (IARC) clasifique a los campos magnéticos ELF como “posiblemente carcinógenos para los seres humanos”. Es importante destacar que este término significa que se ha podido observar una asociación positiva para la cual una interpretación causal podría considerarse creíble, pero la posibilidad de que dicha asociación sea falsa no puede descartarse (en el **Apéndice II** se muestran las clasificaciones que establece la IARC).

Esta clasificación se basa en todos los datos disponibles hasta 2001 inclusive. El estudio realizado por la OMS se ha concentrado principalmente en los publicados después de la revisión de la IARC. Ya que el cáncer es la enfermedad con un mayor soporte científico en cuanto a poder o no ser una consecuencia de las exposiciones a los campos ELF, se comentan a continuación algunos aspectos más detallados de los tipos estudios realizados sobre la misma, y que forman las conclusiones obtenidas por la OMS en su monografía [2]:

- Estudios epidemiológicos

En la clasificación de la IARC [o] influyeron fuertemente las asociaciones observadas en los estudios epidemiológicos sobre la leucemia infantil. Desde la publicación de la monografía de la IARC, las evidencias de otros casos de cáncer infantil siguen siendo insuficientes, y dos estudios posteriores a la revisión realizada por la IARC (Kabuto et al. [75]

y Draper et al. [76]) siguen sin modificar la clasificación. También, posterior a la clasificación de la IARC, se han publicado varios informes relativos al riesgo de cáncer de mama en mujeres adultas asociado con la exposición a campos magnéticos ELF, como por ejemplo los realizados por Kabat et al. [77] o Schoenfeld et al. [78]. Estos estudios son más amplios que los anteriores y menos susceptibles a sesgos, y en conjunto son negativos. Con estos resultados, la evidencia de una asociación entre la exposición a campos magnéticos de ELF y el riesgo de **cáncer de mama** en mujeres se debilita considerablemente.

En el caso del **cáncer cerebral** y la **leucemia en adultos**, los nuevos estudios publicados después de la monografía de la IARC, como los realizados por los autores Tynes y Haldorsen en 2003 [79], o Kleinerman et al. en 2005 [80], entre otros, no modifican la conclusión de que la evidencia global de una asociación entre los campos magnéticos de ELF y el riesgo de estas enfermedades siguen siendo insuficientes. Para otras enfermedades y todos los demás tipos de cáncer, las pruebas permanecen igualmente **insuficientes**.

- Estudios en animales de laboratorio

Se han utilizado varios animales modelo para investigar la posibilidad de que los campos ELF puedan influir en el proceso de carcinogénesis. Las revisiones más recientes son las realizadas por Boorman et al. [81, 82], McCann [83], IARC [41] e ICNIRP [53].

En la actualidad no se ha encontrado ningún modelo animal adecuado para la forma más frecuente de leucemia infantil, la leucemia linfoblástica aguda. Por otra parte, tres estudios independientes de gran escala con ratas no proporcionaron ninguna evidencia de algún efecto de los campos magnéticos ELF sobre la incidencia de tumores de mama espontáneos. La mayoría de los estudios no han determinado ningún efecto de los campos magnéticos ELF sobre la leucemia o los linfomas en modelos roedores. Además, varios estudios de gran escala y de larga duración en roedores no han mostrado ningún aumento consistente de ningún tipo de cáncer, incluyendo tumores de mama, cerebrales y de piel.

Un número sustancial de estudios examinaron los efectos de los campos magnéticos ELF sobre tumores de mama inducidos por sustancias químicas en ratas. Se obtuvieron resultados inconsistentes, que pueden deberse totalmente o en parte a diferencias en los protocolos experimentales.

La mayoría de los estudios sobre los efectos de la exposición a campos magnéticos ELF en modelos de leucemia/linfomas inducidos por sustancias químicas o por radiación fueron negativos, aunque en uno se determinó una aceleración de la tumorigénesis (formación de tumores en el cuerpo) cutánea inducida por radiaciones ultravioleta (UV) tras la exposición a campos magnéticos ELF.

Dos grupos de investigación [98, 99] determinaron un aumento de los niveles de ruptura de las cadenas de ADN en el tejido cerebral, tras la exposición a campos magnéticos ELF. Sin embargo, otros grupos, utilizando una variedad de diferentes modelos de genotoxicidad en roedores, no encontraron ninguna evidencia de efectos genotóxicos.

Así, en conjunto, no hay ninguna prueba de que la exposición a campos magnéticos ELF provoque por sí sola la aparición de tumores. La evidencia de que la exposición a campos magnéticos ELF pueda potenciar el desarrollo de tumores en combinación con carcinógenos es por tanto **insuficiente**. En la **Tabla 4.4** se muestra un resumen de algunos estudios realizados sobre la incidencia de leucemias y/o linfomas en ratas y ratones hasta 2001 (y que por tanto fueron objeto de consideración en la clasificación realizada por la IARC)

Tabla 4.4 Resumen de estudios sobre incidencia de leucemias y/o linfomas en ratas y ratones expuestos a campos ELF [45]

| Estudios con ratas y ratones expuestos a campos ELF | | |
|--|---|---|
| Tipo de estudio y exposición | Tipo de exposición | Resultados |
| Campo magnético sólo (4 estudios) De 2 a 5000 μT | Continua (18-20 horas/día) o intermitente (intervalos de una hora) durante 24 meses. Incluye un grupo expuesto durante periodo prenatal | No aumenta la incidencia de leucemia o linfoma en ninguno de los estudios |
| Campo magnético más un agente promotor del cáncer (radiación ionizante o DMBA) (1 estudio) 1000 μT 1400 μT | Expuestos 3 horas/día, 16 semanas Continua, 18 horas/día, 24 meses | No aumenta la incidencia de leucemia o linfoma |
| Campo magnético más un agente promotor del cáncer (etilnitrosourea) en animales transgénicos 1, 2, 100, 200 y 1000 μT | Continua, 18 horas/día entre 23 semanas y 18 meses | No aumenta la incidencia de leucemia o linfoma |
| Campo magnético y progresión tumoral 100 μT (1 estudio) 1000 μT (3 estudios) | Continua, 18-20 horas/día durante 1-2 meses | No aumenta la incidencia de leucemia o linfoma |

- Estudios *in vitro*

Se han realizado varios estudios *in vitro* posteriores a la monografía de la IARC publicada en 2002, como los de Stronati et al. [84], Testa et al. [85], Del Re et al. [86], y Wolfet et al. [87], entre otros.

En general, los estudios de los efectos de la exposición de células a campos ELF no han mostrado ninguna inducción de genotoxicidad para campos por debajo de 50 mT. Sin embargo, se ha obtenido la evidencia en estudios recientes, de daños en el ADN con campos de una intensidad de apenas 35 μ T; pero estos estudios todavía están siendo evaluados y la comprensión de estos hallazgos todavía es incompleta. También existen indicios crecientes de que los campos magnéticos ELF puedan interactuar con agentes causantes de daños en el ADN. No hay ninguna evidencia clara de la activación por campos magnéticos ELF de genes asociados con el control del ciclo celular. Sin embargo, todavía no se han realizado estudios sistemáticos en los que se analice la respuesta del genoma completo. Muchos otros estudios celulares, por ejemplo sobre proliferación celular, apoptosis y transformación maligna, han dado resultados **inconsistentes o no concluyentes**.

4.5 Conclusiones generales

Los nuevos estudios en seres humanos, en animales e in vitro, publicados desde la monografía de 2002 de la IARC, no modifican la clasificación global de los campos magnéticos ELF como **posibles carcinógenos para los seres humanos [2, a]**. En cuanto a otras enfermedades, como pueden ser las cardiovasculares, neurodegenerativas, etc... los estudios realizados sugieren que los campos ELF, o no son la causa de estos efectos, o no hay una evidencia consistente hallada; resultados similares se muestran en otras recopilaciones, como la realizada por UNESA [45]. Considerando la mayoría de los estudios sobre la leucemia, si bien no todos, existe una cierta asociación estadística que relaciona un aumento de la incidencia de esta enfermedad en niños cuyos hogares se encuentran cerca de líneas de distribución de energía [a], pero esta asociación es débil.

Por otro lado, están demostrados y son bien conocidos los efectos de exposición a corto plazo sobre la salud de los campos ELF, siendo éstos los que conforman la base de dos conjuntos de directrices internacionales sobre los límites de exposición (ICNIRP [5] e IEEE C95.6TM [4]), que se explican y comparan en el **Capítulo 5**, junto con más normativa relacionada, como la Directiva 2004/40/CE, que adopta los niveles límites propuestos por ICNIRP.

En la actualidad, los dos organismos comentados consideran que las pruebas científicas relacionadas con los posibles efectos sobre la salud, atribuibles a la exposición a largo plazo, son insuficientes para justificar una reducción de los límites actualmente establecidos.

Así pues, queda por establecer un consenso internacional donde se elabore un estándar que proporcione límites de exposición ELF considerando los efectos a largo plazo, pero para ello es necesario continuar investigando.

Capítulo 5

Estándares ICNIRP e IEEE C95.6™

5.1 Introducción

En este capítulo se realiza la comparación de dos de los principales estándares vigentes que consideran el espectro ELF (0-3 kHz), éstos son, los propuestos por el organismo IEEE, IEEE C95.6™ *“IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Electromagnetic Fields, 0-3 kHz”* [4]; y la Comisión Internacional de Protección contra Radiaciones No Ionizantes (ICNIRP) *“Guidelines for limiting Exposure to Time-Varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz)”* [5]. Las diferencias existentes entre ambos estándares están relacionadas con los límites umbrales establecidos, los factores de seguridad, de probabilidad, los modelos de inducción magnética utilizados, los umbrales determinados en función de los tipos de tejidos, y las corrientes inducidas y descargas eléctricas según la exposición a un campo eléctrico determinado. Todos estos aspectos se comparan con los dos estándares comentados. La comparación realizada se ha obtenido principalmente de los dos estándares y de [8].

Las Comisión Internacional en Seguridad Electromagnética (*The International Committee on Electromagnetic Safety*, ICES) fue la encargada del desarrollo del estándar IEEE C95.6™, en relación con la exposición humana a campos eléctricos y magnéticos en el rango 0-3 kHz. El estándar desarrollado por la Comisión Internacional de Protección contra Radiaciones No Ionizantes (ICNIRP) también incluye el rango de frecuencia analizado en este documento. A pesar de que ambos estándares se basan en objetivos y fuentes similares, sus límites de exposición difieren sustancialmente en algunas zonas del espectro.

Estos estándares son recomendaciones y en ningún caso suponen un obligado cumplimiento (a no ser que se hayan adoptado por el marco legal de un país o región). Sin embargo, organismos de ciertos países han desarrollado sus propios estándares, que en algunos casos pueden diferir de los desarrollados por ICES e ICNIRP; un ejemplo podrían

ser los estudios realizados por parte del gobierno australiano y la agencia federal ARPANSA (*Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency*) [p]¹⁵, que podrían dar lugar a una guía o recomendación desarrollada por ellos mismos. No obstante, debido al carácter internacional de los estándares aquí considerados, además de su reconocido prestigio y aceptación, el estudio realizado se ha centrado en ellos.

5.1.1 Objetivos generales de los estándares

Ambos estándares proporcionan dos escalas de protección, que si bien son parecidas entre ellas, no son coincidentes, aunque sí es cierto que son bastante similares. En el caso del estándar C95.6TM se diferencia entre:

- **Público general:** cualquier individuo que pueda recibir una exposición, exceptuando aquellos que se encuentren en un entorno controlado.
- **Entorno controlado:** área accesible a aquellas personas que son conscientes del potencial de la exposición, la cual es además consecuencia del trabajo; o también como el entorno no accesible al público general, siendo aquellos individuos que sí tienen acceso, conscientes de los posibles efectos adversos.

El estándar de ICNIRP distingue entre:

- **Público general:** individuos de cualquier edad y diferentes estados de salud, pudiéndose incluir grupos o individuos propensos a alguna característica. Además, en muchos casos, es posible que estos individuos desconozcan si están o no expuestos a campos magnéticos.
- **Exposiciones ocupacionales:** conjunto de adultos que generalmente están expuestos bajo condiciones conocidas, y están preparados para tomar las precauciones adecuadas a los riesgos potenciales.

Ambos estándares definen restricciones en función de las fuerzas eléctricas inducidas dentro de los tejidos, bajo el nombre de **Restricciones Básicas** (*Basic Restrictions, BRs*); por otra parte, se establecen restricciones en función de los campos (magnético y eléctrico) presentes en el entorno, denominadas en este caso **Niveles máximos de exposición permisibles** (*Maximum Permissible Exposure Levels, MPE*) en el estándar C95.6TM, y **Niveles de Referencia** (*Reference Levels, RLs*) en el estándar ICNIRP. ICES (la comisión encargada del desarrollo del estándar IEEE C95.6TM) define las restricciones básicas en función del campo

¹⁵ www.arpansa.gov.au/RadiationProtection/ELF/survey.cfm

eléctrico “in situ” (en el tejido biológico); sin embargo ICNIRP se basa en la densidad de corriente. El campo eléctrico y la densidad de corriente pueden relacionarse por la conductividad del tejido, σ , si ésta es conocida.

Para ambos estándares, las restricciones básicas comentadas anteriormente son las **restricciones fundamentales**. Los niveles MPE o RL se derivan de las restricciones básicas bajo condiciones conservadoras, y se proporcionan con el propósito de determinar si las restricciones básicas se cumplen, y para poder realizar una comparación con valores físicos medibles [5]; es por ello por lo que dichos niveles son los que verdaderamente se utilizan.

En los dos estándares, tanto los MPEs como los RLs se definen como niveles de campo magnético y eléctrico para el caso de exposiciones a estos campos, y como valores de corriente para el caso de contactos con conductores con conexión a tierra.

Ambos estándares protegen contra reacciones o efectos a “corto plazo” (*short-term*) como pueden ser la electroestimulación de nervios o músculos. Sin embargo, en ambos se concluye que no existe una evidencia de efectos perjudiciales a **largo plazo** por debajo de los niveles establecidos (los cuales, de no cumplirse, sí pueden provocar reacciones adversas a corto plazo).

Aunque ICES ha podido acceder a datos de investigación más actuales, debido a que su publicación es posterior al estándar ICNIRP, esto no ha supuesto una diferencia considerable entre ambos. Teniendo en cuenta además que los dos organismos persiguen unos objetivos prácticamente idénticos, que la información disponible para ambos ha sido prácticamente la misma, y que los dos presentan sus estándares basados en consideraciones de evidencia científica, sus estándares no deberían presentar diferencias considerables, no siendo éste el caso. En los apartados siguientes se pretenden clarificar las razones de estas diferencias en los rangos de frecuencia comunes (0-3 kHz).

5.2 Restricciones básicas

En las **Tablas 5.1** y **5.2** se muestran, a modo de referencia, las restricciones básicas de los estándares ICNIRP e ICES, en el rango ELF. ICES diferencia las restricciones básicas que establece en función del tipo de tejido, mientras que ICNIRP no. Se pueden observar además diferencias en las unidades de medida empleadas y los límites numéricos establecidos. Como ya se ha dicho, ICES define sus restricciones básicas a partir del campo eléctrico in situ; sin embargo ICNIRP lo hace en función de la densidad de corriente J (al igual que también lo han hecho otros estándares previos). El campo eléctrico relaciona las fuerzas eléctricas in situ con la polarización celular, el considerado como principal mecanismo de electroestimulación [4].

En el **Apartado 5.6** se da una explicación detallada sobre algunos fundamentos que completan la información mostrada en las tablas, y que mejoran su comprensión:

Tabla 5.1 Restricciones básicas de ICES (modificada de [8])

| Restricciones Básicas de ICES | | | |
|---|------------|----------------------|----------------------|
| Tejido expuesto | f_e (Hz) | Público General | Entorno Controlado |
| | | E_o rms (V/m) | E_o rms (V/m) |
| Cerebro | 20 | $5.89 \cdot 10^{-3}$ | $1.77 \cdot 10^{-2}$ |
| Corazón | 167 | 0.943 | 0.943 |
| Manos, muñecas, pies y tobillos | 3350 | 2.10 | 2.10 |
| Otros tejidos | 3350 | 0.701 | 2.10 |
| <ul style="list-style-type: none"> - La interpretación de la tabla es la siguiente: $E_i = E_o$ para $f \leq f_e$; $E_i = E_o(f/f_e)$ para $f \geq f_e$ - Además de las restricciones citadas, la exposición en la cabeza y el torso a campos magnéticos por debajo de los 10 Hz debe restringirse a un valor de pico de 167 mT para el público en general, y a 500 mT para un entorno controlado. - El parámetro E_i denota el campo eléctrico in situ; E_o es el mínimo (rheobase) campo a frecuencias por debajo de f_e; siendo f_e un parámetro de frecuencia que diferencia el punto en una curva frecuencia-intensidad por encima del cual los valores límite convergen a una línea proporcional a la frecuencia f. | | | |

Tabla 5.2 Restricciones básicas de ICNIRP (modificada de [8])

| Restricciones Básicas de ICNIRP | | | |
|---|--------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Tejido expuesto | Rango de frecuencia (Hz) | Público General | Ocupacional |
| | | J rms (mA/m ²) | J rms (mA/m ²) |
| No especificado | 0-1 | 8 | 40 |
| | 1-4 | $8/f$ | $40/f$ |
| | 4-1000 | 2 | 10 |
| | 10^3 - 10^5 | $f/500$ | $f/100$ |
| f = frecuencia en Hz; J = densidad de corriente in situ | | | |

5.3 Exposición máxima permisible (MPEs) y niveles de referencia (RLs)

Además de los límites establecidos por las restricciones básicas referentes al campo eléctrico *in situ* y a la densidad de corriente, como ya se ha dicho, ambos grupos especifican restricciones relativas al entorno denominadas "Niveles de exposición máximos permisibles", por ICES; y "Niveles de referencia" por ICNIRP. Estos límites son los que verdaderamente se pueden medir (con instrumentos de medición apropiados, como se describe en el **Capítulo 7**) y por tanto los que **por regla general se van a utilizar** a la hora

de valorar los niveles de exposición en un entorno determinado. Se describen a continuación, haciendo hincapié en los límites establecidos para el campo magnético. Es importante aclarar lo siguiente:

- Los niveles MPE se han establecido debido a la complejidad computacional que puede suponer calcular las restricciones básicas. De esta forma, es preferible definir los niveles en función del “campo en el entorno” en lugar del “campo *in situ*”.
- Además, los MPE se han establecido mediante suposiciones conservadoras, de modo que el cumplimiento de los mismos asegura el cumplimiento de las restricciones básicas de las cuales se han derivado.
- **Es posible no cumplir los MPEs y cumplir las BRs, dado que los primeros se han establecido a partir de condiciones conservativas.** Esto también es cierto para el estándar de ICNIRP.

Por tanto, podemos concluir que satisfacer los MPEs o RLs **asegura** el cumplimiento del estándar (según el que estemos considerando) y el incumplimiento de éstos no implica necesariamente que se sobrepasen los límites, requiriéndose en este último caso un estudio más detallado para comprobar si se verifican las restricciones básicas.

5.3.1 MPEs y RLs para el campo magnético

A continuación, se muestran los MPEs y los RLs para el campo magnético, expresadas tanto en densidad de flujo magnético (B), como intensidad de campo magnético (H). Estos límites consideran campos con formas de onda sinusoidal, a una frecuencia determinada. Sin embargo, cuando esto no sucede así, en ambos estándares se proporcionan métodos de cálculo que permiten utilizar estos límites con otras formas de campo (campos con presencia de múltiples frecuencias o campos pulsantes). También, como se puede observar, ICES utiliza distintos límites en función de las partes del cuerpo expuestas, al contrario que ICNIRP. Se han omitido los datos referentes a los límites de campo eléctrico, aunque en apartados posteriores se comentan aspectos que se han considerado de interés.

Tabla 5.3 Niveles MPE de campo magnético: cabeza y torso [4]

| Niveles MPE de campo magnético: cabeza y torso | | | | |
|--|-----------------|---------------------|--------------------|---------------------|
| Frecuencia (Hz) | Público General | | Entorno controlado | |
| | B rms (mT) | H rms (A/m) | B rms (mT) | H rms (A/m) |
| <0.153 | 118 | $9.39 \cdot 10^4$ | 353 | $2.81 \cdot 10^5$ |
| 0.153-20 | $18.1/f$ | $1.44 \cdot 10^4/f$ | $54.3/f$ | $4.32 \cdot 10^4/f$ |
| 20-759 | 0.904 | 719 | 2.71 | $2.16 \cdot 10^3$ |
| 759-3000 | $687/f$ | $5.47 \cdot 10^5/f$ | $2060/f$ | $1.64 \cdot 10^6/f$ |

f = frecuencia en Hz;
Los MPEs se refieren al valor rms máximo en el espacio

Tabla 5.4 Niveles MPE de campo magnético: exposición de brazos o piernas [4]

| Niveles MPE de campo magnético: cabeza y torso | | |
|--|-------------------------------|----------------------------------|
| Frecuencia (Hz) | Público General B rms (mT) | Entorno controlado B rms (mT) |
| < 10.7 | 353 | 353 |
| 10.7 – 3000 | $3790/f$ | $3790/f$ |

f = frecuencia en Hz;

Tabla 5.5 Niveles RL para el público general (ICNIRP) [5]

| Niveles RL de campo magnético propuestos por ICNIRP | | |
|---|--------------------|----------------------|
| Frecuencia (Hz) | Público General | |
| | B rms (μ T) | H rms (A/m) |
| Hasta 1 Hz | $4 \cdot 10^4$ | $3.2 \cdot 10^4$ |
| 1 – 8 Hz | $4 \cdot 10^4/f^2$ | $3.2 \cdot 10^4/f^2$ |
| 8-25 Hz | $5000/f$ | $4000/f$ |
| 0.025 – 0.8 kHz | $5/f$ | $4/f$ |
| 0.8 – 3 kHz | 6.25 | 5 |

f = frecuencia en Hz; ;

Tabla 5.6 Niveles RL, exposición ocupacional (ICNIRP) [5]

| Niveles RL de campo magnético propuestos por ICNIRP | | |
|---|------------------------|-----------------------|
| Frecuencia (Hz) | Exposición ocupacional | |
| | B rms (μ T) | H rms (A/m) |
| Hasta 1 Hz | $2 \cdot 10^5$ | $1.63 \cdot 10^5$ |
| 1 – 8 Hz | $2 \cdot 10^5/f^2$ | $1.63 \cdot 10^5/f^2$ |
| 8-25 Hz | $2.5 \cdot 10^4/f$ | $2 \cdot 10^4/f$ |
| 0.025 – 0.82 kHz | $25/f$ | $20/f$ |
| 0.82 – 65 kHz | 30.7 | 24.4 |

f = frecuencia en Hz; ;

Tomando como base las tablas anteriores, es posible generar una comparación gráfica. En la **Figura 5.1** compara los MPEs de ICES con los RLs de ICNIRP en el rango 0.1-10 kHz, considerándose los valores de ICES para la cabeza y el torso [4]. Por debajo de 10 Hz sus diferencias están dentro de un factor de 3, por encima de 10 Hz, aumenta la divergencia, alcanzándose una diferencia máxima por un factor de 110 a la frecuencia de 1000 Hz.

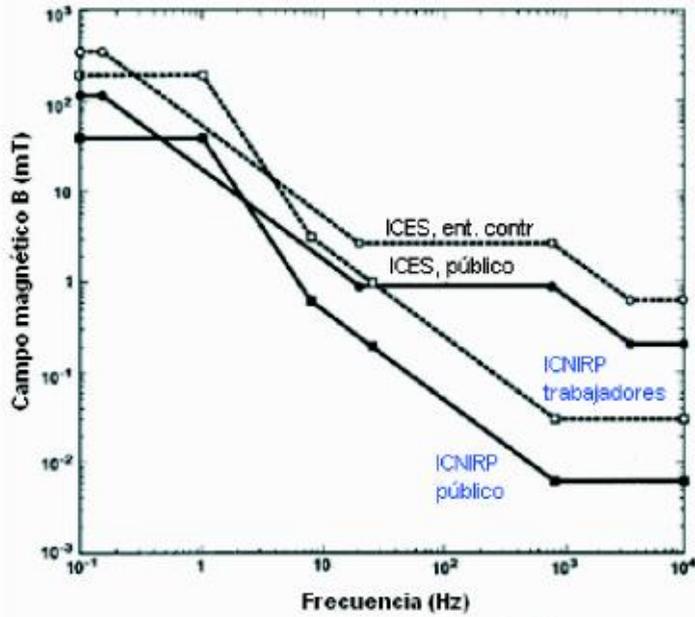
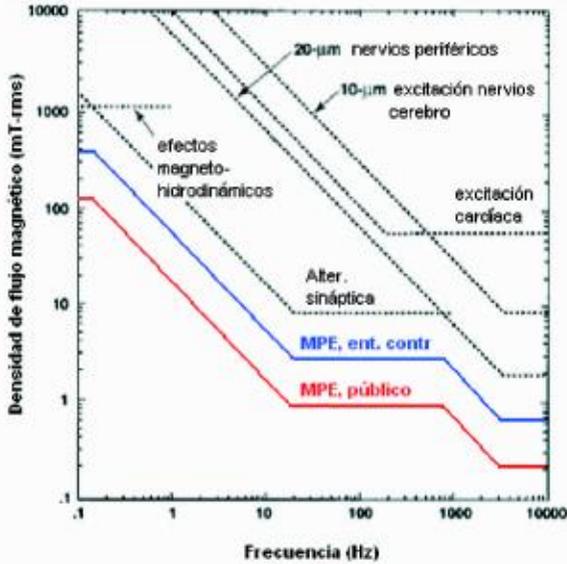


Figura 5.1 Densidades de flujo magnético máximas permitidas en ICNIRP e ICES (MPEs y RLs) (modificada de [8])

5.3.1.1 Modelos de inducción

Se necesita de un modelo de inducción para relacionar el campo magnético del entorno con las BRs. ICES utiliza un modelo elipsoidal con conductividad homogénea y ajustado al cuerpo o a la parte del cuerpo que se esté analizando [4]. Basándose en este modelo, las líneas a trazos de la **Figura 5.2** especifican el campo magnético necesario para inducir los niveles de reacción adversos especificados para un tejido en particular. Aplicando un divisor de 3 (factor de baja probabilidad) a los valores más bajos de las líneas de trazos de la **Figura 5.2**, se obtienen los MPEs (línea continua azul) para el entorno controlado; dividiendo de nuevo por 3 (factor de seguridad), se obtienen las MPE para el público en general (línea continua roja, más restrictiva que la azul). Como se puede ver, los MPEs se obtienen de los valores mínimos de límites de reacción adversa para cada frecuencia (en el **Apartado 5.6** se definen estos términos).



Las líneas de trazos representan los niveles medios de estimulación adversa producidos por los campos magnéticos. Las líneas continuas representan los MPEs

Figura 5.2 Niveles medios de estimulación adversa y MPEs (modificada de [8])

Para el caso del estándar ICNIRP, se utiliza un modelo de inducción circular. La **Figura 5.3** muestra el modelo utilizado por ICES para toda la exposición en el cuerpo, así como el modelo de ICNIRP. Para un campo magnético uniforme perpendicular al lazo, el campo máximo inducido en el lazo circular es 1.7 veces mayor que en el lazo elíptico. Como resultado, los niveles de referencia de ICNIRP son menores por un factor de 1.7 veces que los que serían calculados con el modelo de ICES.

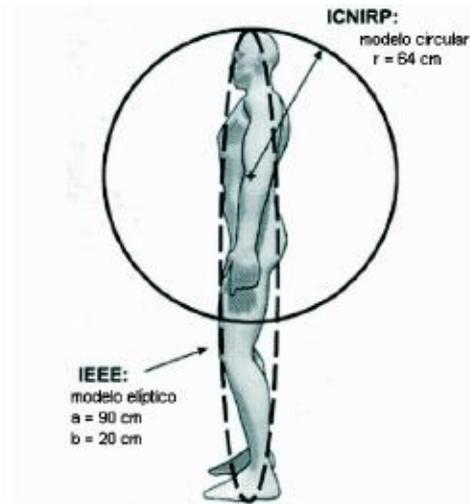


Figura 5.3 Modelos de inducción magnética utilizados por ICES e ICNIRP [8]

5.3.2 Límites para el campo eléctrico

En ICES, el MPE para el campo eléctrico no está limitado principalmente por las BRs, sino por la necesidad de evitar corrientes de contacto de magnitudes inaceptables. Para apreciar lo comentado, basta considerar que a 60 Hz se requeriría un campo eléctrico no perturbado en el entorno (considerando como no perturbado a un campo eléctrico constante en dirección, magnitud y fase relativa [4]) de 59 kV m^{-1} para inducir los valores impuestos por restricción básica dentro del cerebro. No obstante, el propio estándar cita que, si no existe la posibilidad de que el individuo expuesto pueda tocar un objeto conductor con conexión a tierra, podría ser aceptable exceder los niveles MPE para el campo eléctrico.

La corriente de contacto para una persona de pie, tocando un conductor conectado a tierra dentro de un campo eléctrico polarizado verticalmente es:

$$I_c = 9.0 \times 10^{-11} h^2 f E \quad (5.1)$$

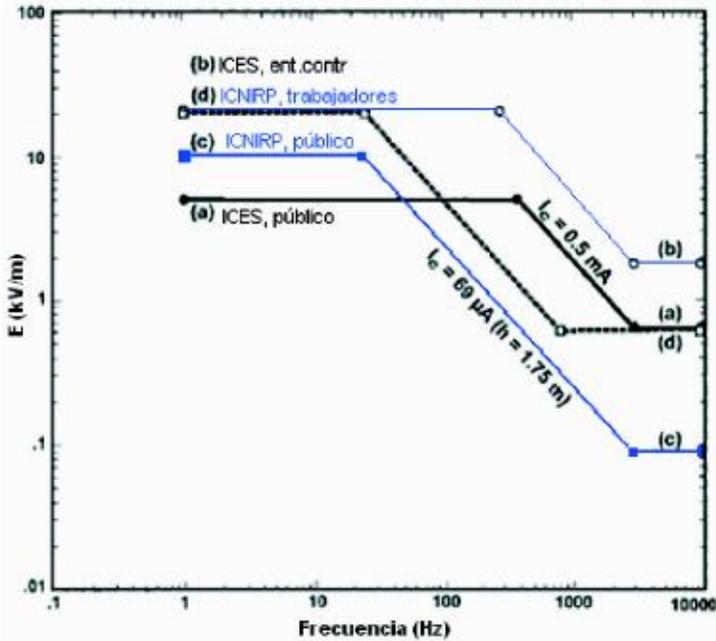
, donde h es la altura de la persona (en m), f es la frecuencia del campo (Hz), y E es el campo eléctrico (V m^{-1}), que para las frecuencias estudiadas en este documento podría sustituirse por el campo eléctrico medio en la zona donde se encuentre el cuerpo humano [4], I_c es la corriente de contacto (A). En el estándar ICES se asume un valor h de 1.75 m. Como límites de I_c se puede consultar el estándar C95.6™, siendo las corrientes de contacto 0.5 mA para el público general, y 1.5 mA para entornos controlados.

En el estándar ICES, por debajo de 3 kHz, el valor límite de E decrece con el aumento de la frecuencia, de forma que la corriente obtenida mediante la ecuación anterior estaría limitada a los valores de corriente de contacto establecidos por el estándar. Si los valores obtenidos por la ecuación se extendieran de forma arbitraria a bajas frecuencias, el campo eléctrico alcanzaría valores inaceptables debido a las descargas que podrían ocurrir cuando una persona que se encuentra aislada de tierra toca un conductor conectado a ésta. Por esa razón, E se limita en el MPE para el campo eléctrico, tal y como se muestra en la **Figura 5.4**, para así establecer un límite inferior para las descargas.

ICNIRP, por otro lado, establece que sus niveles de referencia definidos para el campo eléctrico, pretenden limitar la densidad de corriente inducida en el cuello o tronco a la restricción básica (2 mA m^{-2}) para el público general. Para el caso ocupacional, ICNIRP cita que los niveles de campo eléctrico podrían aumentarse en un factor de 2 si se pueden excluir efectos indirectos de electroestimulación (contactos con conductores).

Para el rango de frecuencias de 1-368 Hz, ICES limita el campo eléctrico a 5 kV m^{-1} para el público en general. Sin embargo, dentro de las líneas de distribución de energía (*line-rights of way*, ROWs), el límite se lleva a 10 kV m^{-1} , dando como justificación que las

líneas de energía se pueden considerar entornos “cuasi-controlados”. Por el contrario, los límites de exposición por ICNIRP para el público en general son de 5 y 4.2 kV m^{-1} para 50 y 60 Hz [5], respectivamente, aunque admite exposiciones de hasta 10 kV m^{-1} por debajo de 25 Hz.



En ICES, los MPEs para el campo eléctrico se han elegido a partir de la corriente de contacto admisible, estableciéndose además un límite para bajas frecuencias debido a posibles descargas.

Figura 5.4 MPEs y RLs de campos eléctricos propuestos por ICES e ICNIRP (modificada de [8])

5.4 Resumen de la comparación y conclusiones

En las **Tablas 5.7 y 5.8 y 5.9** se ha establecido una comparación sobre los estándares ICNIRP e ICES para las frecuencias ELF (de 0-3 kHz). La columna ICES/ICNIRP muestra la razón entre los límites de ICES y los de ICNIRP a las frecuencias indicadas. Para las restricciones básicas (**Tabla 5.7**), la máxima diferencia en el cerebro ocurre por encima de los 1000 Hz, debido principalmente a los valores asumidos de f_e . En la columna “otros tejidos”, el cociente comentado tiene un valor de 70 en un rango considerable de frecuencias, debido en este caso a que ICES distingue entre tipos de tejidos, e ICNIRP no. Para los MPEs y RLs (**Tabla 5.8**), el cociente máximo es de 110, a 1000 Hz, y esto es debido a los diferentes modelos de inducción utilizados. En la **Tabla 5.10** del **Apartado 5.6** se resumen las principales razones técnicas que originan las diferencias en los límites determinados por ICES e ICNIRP.

Tabla 5.7 Comparación de las restricciones básicas de ICES e ICNIRP (modificada de [8])

| Comparación de las BRs de ICES e ICNIRP | | | | | | |
|---|------------|--------------|-------------------|---------------|--------------|-------------------|
| Público General | | | | | | |
| Cerebro | | | | Otros tejidos | | |
| Frecuencia (Hz) | ICES (V/m) | ICNIRP (V/m) | Razón ICES/ICNIRP | ICES (V/m)* | ICNIRP (V/m) | Razón ICES/ICNIRP |
| 20 | 0.0059 | 0.01 | 0.59 | 0.70 | 0.01 | 70 |
| 60 | 0.018 | 0.01 | 1.8 | 0.70 | 0.01 | 70 |
| 1000 | 0.29 | 0.01 | 29 | 0.70 | 0.01 | 70 |
| 3000 | 0.88 | 0.03 | 29 | 0.70 | 0.03 | 23 |
| Entorno controlado | | | | | | |
| 20 | 0.018 | 0.05 | 0.36 | 2.10 | 0.05 | 42 |
| 60 | 0.053 | 0.05 | 1.1 | 2.10 | 0.05 | 42 |
| 1000 | 0.89 | 0.05 | 18 | 2.10 | 0.05 | 42 |
| 3000 | 2.7 | 0.15 | 18 | 2.10 | 0.15 | 14 |

Notas: - La densidad de corriente se ha convertido a campo eléctrico a partir de:

$\sigma = 0.2 \text{ S/m}$ (siemens por metro), $E = J/\sigma$

*Hay otros valores de ICES para el corazón, manos, pies, muñecas y tobillos [4]

Tabla 5.8 MPEs y RLs de ICES e ICNIRP. Exposición de todo el cuerpo (modificada de [8])

| MPEs y RLs de ICES e ICNIRP | | | | | | |
|-----------------------------|-----------|-------------|-------------------|-----------------|--------------|-------------------|
| Público en General | | | | | | |
| Campo magnético | | | | Campo eléctrico | | |
| Frecuencia (Hz) | ICES (mT) | ICNIRP (mT) | Razón ICES/ICNIRP | ICES (V/m) | ICNIRP (V/m) | Razón ICES/ICNIRP |
| 20 | 0.9 | 0.26 | 3.6 | 5000 | 10000 | 0.5 |
| 60 | 0.90 | 0.083 | 11 | 5000(10000*) | 4170 | 1.2(2.4*) |
| 1000 | 0.69 | 0.0063 | 110 | 1840 | 250 | 7.4 |
| 3000 | 0.23 | 0.0063 | 37 | 614 | 83 | 7.4 |
| Entorno controlado | | | | | | |
| 20 | 2.71 | 1.25 | 2.2 | 20000 | 20000 | 1 |
| 60 | 2.71 | 0.417 | 6.5 | 20000 | 8330 | 2.4 |
| 1000 | 2.06 | 0.031 | 67 | 5440 | 610 | 8.9 |
| 3000 | 0.68 | 0.031 | 22 | 1813 | 610 | 3.0 |

*Excepción para el campo eléctrico cerca de líneas de transmisión (10000 V/m, público general)

Tabla 5.9 Diferencias entre MPEs/RLs entre ICES e ICNIRP (modificada de [8])

| Diferencias entre MPEs/RLs entre ICES e ICNIRP | | |
|--|--|--|
| Diferencias | ICES | ICNIRP |
| Modelo de Inducción de campo magnético | Elipsoidal (cuerpo, torso, cerebro, extremidades) | Circular |
| Corriente de contacto (persona de 1.80 m. aislada. tocando el suelo, campo vertical) | Corriente de contacto 0.5 mA (rms), público 1.5 mA (rms), entorno controlado | Corriente de contacto 0.5 mA, público 1 mA, trabajadores |
| Valor máximo de campo eléctrico | 5kV/m (rms), público* 20kV/m (rms), entorno controlado | 10 kV/m (rms), público 20kV/m (rms), trabajadores |

Los MPEs de ICES son para una exposición de todo el cuerpo*Para el público general, ICES establece un MPE de 10 kV/m en áreas de líneas de transmisión de energía

Las tablas anteriores muestran las principales divergencias que deberían clarificarse para alcanzar una armonización entre los dos estándares.

Lo ideal sería llegar a un consenso que finalmente pueda ser utilizado internacionalmente por los organismos de estandarización, y unificar los límites de exposición. Para conseguir este objetivo, debería existir, entre otros factores, un estándar de carácter internacional desarrollado específicamente para mediciones de campos ELF, y que ahora no existe, aunque sí que hay una propuesta ya hecha (y algunas pautas de medición de carácter general [90]), que se recoge en el desarrollo del estándar IEEE PC95.3.1™, "*Recommended Practice for Measurements and Computation of Electric, Magnetic and Electromagnetic Fields With Respect to Human Exposure to Such Fields, 0 - 100 kHz*" [q], el cual permitirá describir las formas de medida para asegurar el cumplimiento con los estándares relacionados con los niveles de exposición de los seres humanos a campos magnéticos y eléctricos, en el rango 0-100 kHz. El desarrollo de dicho estándar se ha extendido hasta el 31 de diciembre de 2008. Posteriormente, será necesario un tiempo para el proceso de aprobación y certificación.

El **Apartado 5.6** cubre aspectos de la comparación de carácter más complejo y que explican con mayor grado de detalle las diferencias ya mostradas.

5.5 Normativa

La principal normativa (se incluyen también las directivas europeas que podrían transponerse en el futuro a la legislación nacional) relacionada con los campos ELF es la siguiente:

- ICNIRP. "*Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz)*" [5].
- IEEE Std C95.6TM. "*IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Electromagnetic Fields, 0-3 kHz*" [4].
- NTP 698 "*Campos electromagnéticos entre 0 Hz y 300 GHz: criterios ICNIRP para valorar la exposición laboral*" [1].
- Directiva europea 2004/40/CE [42] "*Sobre disposiciones mínimas de seguridad y de salud relativas a la exposición de los trabajadores a los riesgos derivados de los agentes físicos (campos electromagnéticos)*", y que ha sido modificada por la Directiva 2008/46/CE [49] (moratoria) del Parlamento Europeo y del Consejo, prolongándose el plazo de transposición a 4 años más. "*Por la que se modifica 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 los agentes físicos (campos electromagnéticos)”

- Recomendación del Consejo 1999/519/CE [51] *“relativa a la exposición de público en general a campos electromagnéticos (0 Hz a 300 GHz)”*. 12 de julio de 1999. En esta recomendación se exponen los valores límite de referencia del Organismo ICNIRP para el público en general.
- Real Decreto 1066/2001 *“Condiciones de protección en el dominio público radioeléctrico, restricciones a las emisiones radioeléctricas y medidas de protección sanitaria frente a emisiones radioeléctricas”* [94].

En cuanto a procedimientos de medida, y que pueden ser de utilidad para valorar los niveles de exposición en seres humanos, se tiene lo siguiente:

- Norma UNE 215001:2004 *“Procedimientos normalizados para la medida de los campos eléctricos y magnéticos producidos por las líneas eléctricas de alta tensión”* [95].
- IEEE Std 644-1944™: *“IEEE Standard Procedures for Measurements of Power Frequency Electric and Magnetic Fields From Ac Power Lines”* [39].
- IEEE Std 1460-1996™. *“IEEE Guide for the measurement of Quasi-Static Magnetic and Electric Fields”* [90].
- IEEE Std 1140-1994™. *“IEEE Standard Procedures for the Measurement of Electric and Magnetic Fields from Video Display Terminals (VDTs) From 5 Hz to 400 kHz”* [91].
- IEEE Std 1308-1994™. *“IEEE Recommended Practice for Instrumentation: Specifications for Magnetic Flux Density and Electric Field Strength Meters- 10 Hz to 3 kHz”* [93].

En la NTP 698 *“Campos electromagnéticos entre 0 Hz y 300 GHz: criterios ICNIRP para valorar la exposición laboral”* [1], se exponen de manera concisa los valores de referencia para la exposición laboral a campos electromagnéticos (CEM) propuestos por el organismo ICNIRP [5]. Se cita textualmente:

“Actualmente, para dar cumplimiento a la Ley 31/1995 de Prevención de Riesgos Laborales, y ante la ausencia de una legislación específica que regule la exposición laboral a campos electromagnéticos (CEM), el CNNT (Centro Nacional de Nuevas Tecnologías) evalúa el riesgo por exposición a campos electromagnéticos si-

guiendo los criterios de valoración expuestos en las guías que publica el organismo ICNIRP”

Por tanto, en España, el organismo CNNT, adopta los niveles de referencia propuestos por el organismo ICNIRP, que también son los adoptados por la Directiva europea 2004/40/CE, y la Recomendación del Consejo 1999/519/CE. Como se ha dicho, la Directiva 2004/40/CE ha sido modificada por la Directiva 2008/46/CE (moratoria), prolongándose el plazo de transposición a 4 años más, citándose textualmente como razón principal:

“[...] Se han comunicado al Parlamento Europeo, al Consejo y a la Comisión nuevos estudios científicos sobre los efectos para la salud de las exposiciones a las radiaciones electromagnéticas, publicados tras la adopción de la directiva. Están examinando actualmente los resultados de estos estudios científicos tanto la ICNIRP, como la Organización Mundial de la Salud, en el marco de la revisión de sus criterios de salubridad ambiental. Estas nuevas recomendaciones, cuya publicación está prevista de aquí a finales del año 2008, pueden contener elementos que originen modificaciones importantes de los valores que dan lugar a una acción y de los valores límite. [...] La duración necesaria para obtener y analizar estos nuevos datos, y para elaborar y adoptar una nueva propuesta de directiva, justifica el aplazamiento de cuatro años de la fecha límite de la Directiva 2004/40/CE al Derecho interno”.

Una de las razones de este aplazamiento ha sido considerar el impacto de la directiva en las actividades de resonancia magnética de los hospitales. Es conveniente reexaminar los últimos estudios realizados en los Estados Miembros, para garantizar el equilibrio entre la prevención de los posibles riesgos para la salud de los trabajadores, y el acceso a los beneficios que permiten la utilización eficaz de ciertas tecnologías médicas que se basan en la imagen médica y determinadas actividades industriales.

Anteriormente, ya había una propuesta [43] para la modificación de la Directiva 2004/40/CE. También se citaba que la medición o el cálculo de la exposición de los trabajadores se rige mediante las normas europeas armonizadas de CENELEC, y en la propia directiva se cita que *“mientras no existan normas europeas armonizadas del Comité Europeo de Normalización Electrotécnica (CENELEC) que regulen todas las situaciones de evaluación, medición y cálculo pertinentes, los Estados miembros podrán servirse de otras normas o directrices que posean una base científica para evaluar, medir y/o calcular la exposición de los trabajadores a los campos electromagnéticos.”*

Básicamente, la Directiva 2004/40/CE adopta los niveles ICNIRP como límites de exposición en los trabajadores (y por tanto **no** considera los efectos a largo plazo), y define las obligaciones de los empresarios (vigilancia, evaluación de riesgos, información y forma-

ción de los trabajadores...), disponiendo además que se aplica la Directiva 89/391/CEE “relativa a la aplicación de medidas para promover la mejora de la seguridad y de la salud de los trabajadores en el trabajo (Directiva Marco)”, la cual sí está transpuesta al Derecho Interno nacional español, a través de la Ley 31/95 de Prevención de Riesgos Laborales.

En cuanto a la norma UNE 215001:2004 “Procedimientos normalizados para la medida de los campos eléctricos y magnéticos producidos por las líneas eléctricas de alta tensión”, ésta establece un procedimiento uniforme para la medida de determinadas magnitudes representativas de los campos eléctricos y magnéticos a frecuencia industrial producidos por las líneas eléctricas de alta tensión. En el siguiente capítulo y en el **Apéndice III** se muestra más información sobre el procedimiento que indica. De los otros procedimientos de medida citados anteriormente [39, 90, 93], el estándar IEEE Std 1460-1996™ establece unas pautas de medida para la determinación de ciertos parámetros de los campos ELF, que pudieran ser relevantes en la caracterización de los niveles de exposición humana; estos procedimientos se comentan en el **Capítulo 7**.

Indirectamente, también podemos mencionar la legislación para las líneas de alta tensión, como el nuevo RD 223/2008, “Reglamento sobre condiciones técnicas y garantías de seguridad en líneas eléctricas de alta tensión y sus instrucciones técnicas complementarias ITC-LAT 01 a 09” (que derogará al RD 3151/1968), o el RD 1955/2000 “por el que se regulan las actividades de transporte, distribución, comercialización, suministro y procedimientos de autorización de instalaciones de energía eléctrica”. Estas dos leyes, si bien no consideran los campos ELF, sí que imponen ciertas limitaciones al transporte de energía eléctrica respecto a ciertas construcciones (escuelas, etc...).

Teniendo en cuenta todo lo anterior, en España actualmente los límites ICNIRP no son, en términos generales, de obligado cumplimiento. La única legislación existente en España que considere los niveles ICNIRP concierne a las emisiones producidas por estaciones radioeléctricas de radiocomunicaciones, o recibidas por estaciones del servicio de radioastronomía, en el RD 1066/2001.

Respecto a otros países, en la base de datos del *International EMF Project* de la OMS [b]¹⁶ se pueden consultar todos los estándares a nivel mundial, por países, de normas y directrices relacionadas con los niveles de exposición a campos electromagnéticos.

En [z] es posible consultar la legislación vigente Comunitaria de la Unión Europea.

¹⁶ Sección “The EMF Standards World Wide Database”

5.6 Aspectos avanzados de la comparación

En este apartado se comentan algunos fundamentos de carácter más complejo que se han omitido en las explicaciones anteriores.

Las restricciones básicas establecidas por ICES se obtienen a partir de las siguientes consideraciones:

- Identificación de los niveles medios de reacción mínima en diferentes tipos de tejido.
- Conversión de esos niveles medios a niveles adversos de reacción a partir de factores de conversión (multiplicadores).
- Definición de una baja probabilidad (como mucho del 1 %) de nivel de reacción adversa.
- Aplicación de un factor de seguridad al considerar una población especialmente sensible, así como la consideración de un margen de incertidumbre.

ICES define sus BRs a través de dos funciones: la función intensidad-duración (strength-duration, **S-D**), o la función intensidad-frecuencia (strength frequency, **S-F**), definido en términos de frecuencia para ondas sinusoidales. Para estas formulaciones se requieren dos parámetros:

- *Rheobase*: término designado para definir el valor mínimo de excitación considerando una curva (función) intensidad-duración [4].
- Constante de tiempo, τ_e , para la función **S-D**, o la constante f_e para la función **S-F**, de la manera que se indica a continuación:

Para las funciones S-D:

$$\begin{aligned}
 E_i &= E_0 \text{ para } t_p \geq \tau_e \\
 E_i &= E_0 \left(\frac{\tau_e}{t_p} \right) \text{ para } t_p \leq \tau_e
 \end{aligned}
 \tag{5.2}$$

Para las funciones S-F:

$$\begin{aligned}
 E_i &= E_0 \text{ para } f \leq f_e \\
 E_i &= E_0 \left(\frac{f}{f_e} \right) \text{ para } f \geq f_e \\
 f_e &= \frac{1}{2\tau_e}
 \end{aligned}
 \tag{5.3}$$

, donde:

E_0 : campo eléctrico rheobase

E_i : campo eléctrico in-situ admisible

t_p : duración de fase de la forma de onda pulsante (ver **Apéndice II**)

τ_e : constante de tiempo que separa la zona mínima (*rheobase*) de la parte creciente de la función S-D

f_e : constante de frecuencia que separa la zona mínima (*rheobase*) de la parte creciente en la función S-F.

Los parámetros de la **Tabla 5.1**, basados en datos experimentales y modelos teóricos, se diferencian por el tipo de tejido. En la **Tabla 5.10** se han recopilado los datos de ICES en base a los efectos sinápticos en el cerebro, los cuales presentan la *rheobase* más baja de las BRs (tal y como quedó reflejado en la **Tabla 5.1**). Las diferencias entre ambos estándares se describen a continuación, junto con las ya mostradas en tablas anteriores.

Tabla 5.10 Diferencias entre los estándares ICNIRP e ICES; rheobase mínimo tomado como referencia (modificada de [8])

| Diferencias entre los estándares ICES e ICNIRP | | |
|--|--|---|
| CONCEPTO | ICES | ICNIRP |
| 1- Magnitud en la que se basa la BR | Campo eléctrico | Densidad de corriente |
| 2- Valor medio límite <i>rheobase</i> | $E_i=53$ mV/m (rms) | -- |
| 3- Límite umbral <i>rheobase</i> de baja probabilidad | $E_i=17.7$ mV/m | $J=100$ mA/m ² ($E_i=500$ mV/m) |
| 4- Nivel de probabilidad | $P<1\%$ | No establecido |
| 5- Factor de seguridad F_s | Público general | 1/3 |
| | Ocupacional | 1 |
| 6- Valor mínimo de BR después de aplicar F_s | Público general | 1/50 |
| | Ocupacional | 1/10 |
| 7- Transición superior en la función S-F para los efectos del sistema nervioso central | $E_i=5.9$ mV/m | $J=2$ mA/m ² ($E_i=10$ mV/m) |
| 8- Transición inferior en la función S-F para los efectos del sistema nervioso central | $E_i=17.7$ mV/m | $J=10$ mA/m ² ($E_i=50$ mV/m) |
| 9- Mecanismo para el efecto mínimo en el sistema nervioso central | 20 Hz | 1000 Hz |
| 10- Distinción de BRs en función del tipo de tejido | Ninguno | 4 Hz |
| 11- Área aplicable de la mínima BR en el sistema nervioso central | Alteración del potencial sináptico (<i>synapse potencial alteration</i>) | No establecido |
| 12- Reducción por debajo de los efectos Magnetohidrodinámico | Sí | No |
| 12- Reducción por debajo de los efectos Magnetohidrodinámico | Cerebro | Cabeza y torso |
| | Público general | 1/9 |
| | Ocupacional | 1/3 |
| | | 1/50 |
| | | 1/10 |

Notas: Conductividad $\sigma = 0.2$ S/m (siemens por metro), $E = J/\sigma$; los valores de las BRs listados son los valores *rheobase* (límite mínimo en una función S-F) para el órgano más sensible (el cerebro o el sistema nervioso central); las BRs de ICES se aplican a las interacciones sinápticas del cerebro. Para ICNIRP se ha calculado J utilizando $\sigma = 0.2$ S/m

* Es importante considerar que en esta tabla para ICES se ha tomado la BR más limitativa como referencia.

A continuación se van a comentar cada uno de los apartados expuestos en la tabla anterior:

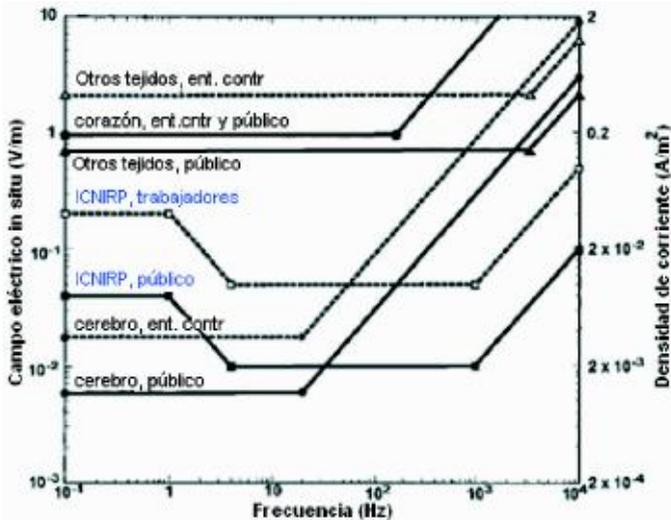
Unidades de medida de las restricciones básicas

Aunque es posible relacionar el campo eléctrico in situ con la densidad de corriente mediante la ecuación $E = J\sigma$, donde σ es la conductividad del medio, esta conversión introduce un parámetro adicional, y por tanto un mayor grado de incertidumbre.

No obstante, con los modelos de inducción magnética de conductividad uniforme utilizados por ICES e ICNIRP, la medida del campo eléctrico inducido no depende de σ .

A pesar de las diferencias entre ICES e ICNIRP en cuanto a unidades de medida, éste no es el factor principal que diferencia ambos estándares. Existen otros factores, que se explican a continuación, y que tienen una mayor relevancia. También es de destacar que la elección de E o J tiene mayor influencia si se derivan las BRs o se determina su cumplimiento a partir de un modelo de inducción anatómica complejo, para el cual los valores máximos de E y J no tienen por qué ocurrir en el mismo punto.

La **Figura 5.5** muestra la gráfica BRs-frecuencia para ambos estándares. Para realizar el trazado en una única gráfica, se ha obtenido E a partir de J utilizando $\sigma = 0.2 \text{ S m}^{-1}$, valor de conductividad citado en la guía ICNIRP [5], y que se considera razonable para las bajas frecuencias y los tipos de tejidos aquí considerados. Como se puede observar, las distintas suposiciones tomadas por ambos estándares dan como resultado diferencias significativas en las restricciones básicas.



Nota: las líneas a trazos representan las BRs para un entorno controlado u ocupacional.

“Ent cntr” = entorno controlado

“público” = público general

$\sigma = 0.2 \text{ S/m}$

Figura 5.5 Restricciones básicas de ICES e ICNIRP, densidad de corriente (modificada de [8])

Límites de reacciones adversas

ICES define **umbrales medios límite** (*median rheobase excitation thresholds*) como aquéllos que, dada una distribución estadística, se encuentran en el punto medio (50% de la muestra tienen límites mayores, y 50 % límites menores, [4]). Éstos se incre-

mentan (entendiéndose como un incremento en margen de seguridad) mediante un factor, denominado factor de reacción adversa, F_a , obteniéndose de esta forma los **umbrales medios de reacciones adversas** (*median adverse reaction thresholds*). A estos valores medios, ICES aplica otro factor, denominado factor de probabilidad, F_p , de modo que finalmente se obtiene un **valor de baja probabilidad (< 1%) de límite umbral de reacción adversa**, en este caso de 17.7 mV m^{-1} (apartado 3 de la **Tabla 5.10**).

Considerando ahora el estándar ICNIRP, en éste se define un umbral de reacción adversa para $J = 100 \text{ mA m}^{-2}$, al cual se le aplica una serie de factores de seguridad, para así obtener finalmente las BRs. Utilizando $\sigma = 0.2 \text{ S m}^{-1}$, se puede comprobar que se obtiene un valor de campo eléctrico in situ de $E_i = 500 \text{ mV m}^{-1}$, 28 veces mayor que el establecido por el estándar ICES.

No queda del todo claro qué reacción adversa ocurre para $J = 100 \text{ mA m}^{-2}$, y a qué nivel de probabilidad. ICNIRP indica cambios en la función cognitiva y el fenómeno de fosfenos a 10 mA m^{-2} , citando textualmente: *“La severidad y probabilidad de efectos irreversibles en un tejido determinado aumenta con la exposición crónica a densidades de corriente inducidas por encima del nivel 10-100 mA m⁻²”*. Considerando que ICNIRP establece posibles efectos irreversibles dentro del rango comentado, no queda clara la elección de 100 en lugar de 10 mA m^{-2} como valor para el cual se aplicaría el factor de seguridad. 100 mA m^{-2} es más de 10 veces los umbrales límite medios que causan efectos adversos sinápticos a la frecuencia de 20 Hz [4]¹⁷, y también es un valor muy pequeño para aplicarse a los nervios de la periferia o a una excitación cardíaca, para los cuales los valores límite medios han demostrado ser de 10 a 20 veces mayores, o también fibrilación ventricular, el único efecto irreversible considerado en ambos estándares, para el cual los umbrales son mayores (y por tanto menos restrictivos).

Probabilidad de reacciones adversas (apartado 4, Tabla 5.10)

A partir de la utilización de distribuciones de probabilidad experimentales de umbrales de electroestimulación, ICES define un nivel de reacción adversa medio, al cual se le aplica un factor de reducción de un tercio para obtener una baja probabilidad (< 1%) de nivel de reacción adversa. En contraste con lo anteriormente comentado, ICNIRP no cita una probabilidad de reacción adversa para los niveles que identifica. No se sabe, por ejemplo, si los valores se tratan de medias, niveles de baja probabilidad, o quizás los niveles de reacción adversa más bajos encontrados en la literatura.

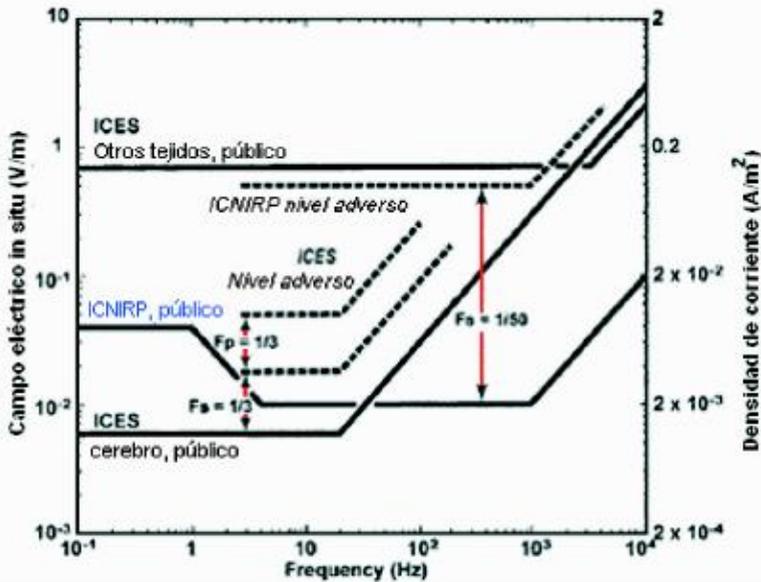
¹⁷Sección 6.1.3 de [4]

Factores de seguridad (apartados 5 y 6, Tabla 5.10)

Ambos estándares incluyen factores de seguridad (F_s) como margen de incertidumbre y suponiendo sensibilidades excepcionales a la exposición de campos magnéticos y eléctricos. Para ICNIRP, el factor de seguridad es de **1/10** y **1/50** para grupos ocupacionales y público general, respectivamente; para ICES, el factor de seguridad es **1** y **1/3** para ambientes controlados y público en general, respectivamente. Mientras que una lectura casual de los estándares podría llevar a pensar que, ya que los factores de seguridad de ICNIRP son mayores que aquellos de ICES, sus restricciones son básicas más restrictivas, hay que considerar que ICES aplica diferentes BRs en función del tipo de tejido expuesto. La confusión también puede llegar de los niveles a los cuales F_s se aplica, que son muy diferentes en ambos grupos.

Como ya se ha dicho, para el público en general, ICES aplica el factor $F_s=1/3$ al límite de baja probabilidad de 17.7 mV m^{-1} , resultando en una BR de 5.9 mV m^{-1} (apartado 6 de la **Tabla 5.10**). ICES también establece que esta última restricción protege contra los efectos sinápticos adversos en el cerebro, y define otras BRs mayores (entendiéndose mayores como más permisivas) para el resto del cuerpo (por ejemplo 0.7 V en la mayoría de los otros tejidos). En contraste, ICNIRP aplica sus factores de seguridad a un valor mucho mayor, en este caso de $100 \text{ mA}\cdot\text{m}^{-2}$ ($E = 500 \text{ mV m}^{-1}$), resultando en una BR de 2 mA m^{-2} ($E = 10 \text{ mV}\cdot\text{m}^{-1}$) para el público general.

La **Figura 5.6** muestra los factores de seguridad utilizados en los dos estándares. Para reducir su complejidad, la figura muestra límites sólo para el público general. Las líneas sólidas son las BRs, y las líneas de trazos son los niveles de reacción tomados de los estándares. Para un nivel de reacción adverso medio, ICES aplica factores de reducción separados para considerar una baja probabilidad de reacción ($F_p=1/3$), y un factor de seguridad ($F_s=1/3$). Por el contrario, ICNIRP aplica sólo un factor de seguridad ($F_s=1/3$) para una probabilidad de nivel de reacción no especificada.



Las líneas a trazos muestran los niveles medios de reacción

Figura 5.6 Factores aplicados a los niveles medios límite, ICNIRP e ICES (modificada de [8])

Aunque tanto ICES como ICNIRP establecen niveles límites similares de interacción con el sistema nervioso central (*central nervous system, CNS*), ICNIRP no aplica un factor de seguridad a ese bajo nivel, sino a un nivel bastante mayor, mientras que ICES aplica su factor de seguridad a ese bajo nivel. En la gráfica anterior se puede observar como la BR mínima de ICES es menor que la de ICNIRP por debajo de 30 Hz. Esto se debe a diferentes conclusiones sobre una mayor frecuencia de inflexión (este concepto se explica en el apartado siguiente) y la diferenciación de ICES de las BRs según el tipo de tejido, más que a una diferencia de factores de seguridad.

Frecuencias de inflexión

Suponiendo una estimulación sinusoidal y causante de una serie de efectos, los límites tienen un valor mínimo constante (*minimum plateau o rheobase*) y, por encima de un valor de frecuencia f_e , convergen a una línea que aumenta proporcionalmente con ésta. En ICES se establece que f_e y E_0 dependen del tipo de tejido (Tabla 5.1). La rheobase mínima se aplica a los efectos sinápticos, para la cual la frecuencia de inflexión tiene un valor $f_e=20$ Hz. Por el contrario, ICNIRP considera como valor $f_e=1000$ Hz para los límites justificados por efectos de fosfenos, aunque aparentemente aplicado a todos los tipos de tejidos sin distinción, el efecto de esta elección es importante. Por ejemplo, las restricciones básicas de ICNIRP a 1000 Hz serían 50 veces mayores si se hubiera elegido $f_e=20$ Hz.

Como se observa en las Figuras 5.5 y 5.6, ICNIRP aplica una subida a sus restricciones básicas por debajo de 4 Hz, e ICES no. ICES reconoce que un aumento de la restricción

en las bajas frecuencias se puede encontrar en la literatura, en lo que a estimulación nerviosa se refiere, pero sólo existiría para un estímulo sinusoidal iniciado cerca del paso por cero, y no para uno iniciado cerca del pico, ni tampoco para ondas oscilatorias cuadradas. ICES establece que, no incluyendo esta subida en la baja frecuencia, su estándar es más inclusivo. La **Figura 5.5** muestra que esta distinción es importante sólo para frecuencias por debajo de 4 Hz.

Aplicación a los diferentes tipos de tejidos (apartados 9 y 10, Tabla 5.10)

Como ya se ha comentado en apartados anteriores, ICES hace una diferenciación de sus BRs en función de los tipos de tejidos, mientras que ICNIRP no. La BR más baja (y por tanto la más restrictiva) de ICES, mostrada en la **Figura 5.5**, protege contra la alteración de procesos sinápticos (un mecanismo que ha demostrado un nivel de reacción sustancialmente menor comparado con otros efectos de electroestimulación, aunque a muy bajas frecuencias). Entre esas reacciones están los efectos visuales conocidos como fosfenos, que se atribuyen a la alteración de los procesos sinápticos en la retina. Aunque ICES no considera los fosfenos como un efecto adverso, el campo eléctrico que los causa dentro de la retina considera como un efecto potencial adverso cuando se aplica en las neuronas del cerebro.

ICNIRP utiliza el efecto de los fosfenos para justificar el valor mínimo (minimum plateau) de la **Figura 5.5**. Sin embargo, no especifican las restricciones básicas para otros tejidos en los cuales los datos relativos a los fosfenos no se aplicarían. La aplicación de las BRs a todos los tejidos del cuerpo, en lugar de únicamente al cerebro, provoca un **mayor impacto** en las restricciones de ICNIRP. Poco después de que su estándar se publicara, se realizó la siguiente clarificación en un conjunto de cuestionarios y contestaciones [9]:

Cuestión: *¿La restricción básica de 10 mA m^{-2} (caso ocupacional, 4 Hz – 1 kHz) se ha establecido para la protección contra los efectos de exposiciones agudas en los tejidos del sistema nervioso central (CNS)? ¿O se aplica a todos los tejidos del cuerpo?*

Respuesta: La restricción básica de $10 \text{ mA}\cdot\text{m}^{-2}$ se ha establecido para establecer una protección contra los efectos de exposición en los tejidos de la cabeza (el cerebro) y el tronco del cuerpo (médula espinal), con un factor de seguridad de 10. ICNIRP reconoce que esta restricción básica puede permitir mayores densidades de corriente en otros tejidos distintos de los del sistema nervioso central, bajo las mismas condiciones de exposición.

Queda por tanto la cuestión: ¿Qué BR debería utilizar un usuario si la exposición se da principalmente en otros tejidos que no sean del sistema nervioso? Casos relacionados con esta pregunta se pueden dar cuando el individuo, por ejemplo, tiene sus brazos cerca de una fuente que genere un campo, y sin embargo el cerebro no está recibiendo ningún tipo de exposición.

La clarificación que hace ICNIRP establece que podrían tolerarse mayores densidades de corriente, pero el estándar en sí mismo no especifica cuál sería el incremento admisible.

Restricciones sinápticas en el cerebro vs. médula espinal (apartado 11, Tabla 5.10)

ICNIRP establece que sus BRs se aplican tanto en la médula espinal como en el cerebro. Por el contrario, ICES afirma que las BRs más bajas (entendiéndose como las más restrictivas, y por tanto con menor magnitud admisible) se aplican al cerebro pero no a la médula espinal, debido a la falta de evidencia de que los efectos medidos en la médula espinal puedan ocurrir por debajo de los niveles que provocan excitación nerviosa directa [4]. Estas conclusiones dan lugar a una diferencia significativa en las BRs dentro de las frecuencias consideradas en este documento. Por ejemplo, el estándar ICES, para el público general, permite un campo eléctrico de 5.9 mV m^{-1} en el cerebro, pero de 0.70 V m^{-1} en otros tejidos (incluyendo la médula espinal), un factor más de 100 veces mayor. Tal distinción no se hace en el estándar ICNIRP.

Efectos magnetohidrodinámicos (campos estáticos)

Los efectos magnetohidrodinámicos (los que principalmente se producen a frecuencias por debajo de 1 Hz [4]) ocurren como resultado de las fuerzas ejercidas sobre cargas en movimiento (por ejemplo el torrente sanguíneo) dentro de fuertes campos estáticos o casi estáticos. ICES determinó que esos efectos no estaban cubiertos por sus BRs, y que por tanto se requería una especificación separada para el campo magnético in situ por debajo de los 10 Hz.

Aunque las restricciones básicas de ICNIRP no ofrecen un límite correspondiente que pueda aplicarse a una frecuencia estática, información comparable se proporcionó en una publicación anterior del propio ICNIRP [10], en la cual se concluía que campos de hasta 2 T no estaban asociados a efectos con un mayor perjuicio. ICNIRP aplica a ese valor un factor de seguridad de 1/10 y 1/50, dando lugar a niveles de exposición crónica de 200 mT y 40 mT (valores rms) para los dos grupos ocupacional y general, respectivamente. ICES, a partir de la evaluación de datos similares, encontró que un campo de 1.5 T estaba asociado con reacciones adversas en aproximadamente el 50 % de los sujetos sometidos a pruebas. El estándar ICES aplica un factor de 1/9 para el público general y de 1/3 para entornos controlados, resultando en unas BRs de 500 mT para entornos controlados, y 167 mT para el público en general (valores pico).

La mayor discrepancia entre ICES e ICNIRP en lo que a límites de exposición de campos estáticos se refiere es, en este caso, grande debido a los diferentes factores de seguridad adoptados por los dos grupos.

En resumen, los siguientes factores constituyen los principales elementos diferenciales:

Restricciones básicas

- Diferencias en la frecuencia superior de transición (f_e) para los efectos adversos de electroestimulación en el sistema nervioso central.
- Límites para los efectos adversos en el sistema nervioso central.
- Inclusión de la médula espinal junto con el cerebro para las BRs más bajas (y por tanto más restrictivas).
- Aplicación de los “efectos retina” en el cerebro/sistema nervioso central.
- Diferentes BRs según los tejidos expuestos.
- Definición de los rangos de probabilidad para los efectos adversos.

Límites establecidos (MPEs y RLs)

- Modelo físico para la inducción magnética.
- Factores de seguridad establecidos para la exposición de campos magnéticos estáticos y cuasi-estáticos.
- Corte realizado a bajas frecuencias para el campo eléctrico in situ (**Figura 5.6**).
- Frecuencias de transición en la exposición de campos eléctricos.

Capítulo 6

Métodos de medida

6.1 Introducción. Valoración de la exposición

6.1.1 Consideraciones generales

Los campos magnéticos y eléctricos pueden caracterizarse mediante diferentes parámetros físicos; entre los cuales pueden considerarse los transitorios, el contenido armónico, valores pico y duración, valores medios, etc... Se desconoce cuáles de estos parámetros, o qué combinación de los mismos (en el caso de existir), son los que tienen una mayor relevancia en lo que a efectos sobre la salud se refiere. Si se conocieran los mecanismos biofísicos de interacción, de por ejemplo, la carcinogénesis, sería posible identificar los parámetros críticos de la exposición. Sin embargo, ante la ausencia de un mecanismo genérico, la mayoría de las valoraciones realizadas en estudios epidemiológicos se basan en valores medios de campo ponderados en el tiempo (*time-weighted average*, TWA), una medida que relaciona algunas, pero no todas las características del campo.

Las características físicas de los campos magnéticos y eléctricos se describieron en el **Capítulo 2** de este documento. También, en el **Capítulo 4** ya se habló algo sobre los tipos de estudios existentes. A continuación se muestran algunos de los principales factores a considerar sobre la exposición a campos magnéticos y eléctricos, desde un punto de vista general:

- **Prevalencia de la exposición:** cualquier habitante de una población está expuesto, en mayor o menor grado, a los campos magnéticos y eléctricos ELF; por tanto, la valoración de la exposición podrá separar solamente aquéllos con mayor nivel de exposición de aquéllos con menor nivel de exposición, y no separar aquéllos que están expuestos de aquéllos que no.

- **Incapacidad de los sujetos para identificar su propia exposición:** la exposición a campos magnéticos y eléctricos no es generalmente detectable por la persona expuesta, por lo que no es posible basar estudios epidemiológicos en datos derivados de cuestionarios que caractericen de forma adecuada exposiciones pasadas.
- **Falta de diferenciación entre “baja” y “alta” exposición:** la diferencia entre las intensidades de campo medias a las cuales se exponen los individuos en una población no está claramente diferenciada. El valor medio típico de campo magnético en los hogares parece ser de 0.05-0.1 μT . Análisis sobre la leucemia infantil y los campos magnéticos han utilizado 0.4 μT como “categoría de alta exposición”. Por tanto, un método adecuado de valoración de la exposición debe separar fielmente exposiciones que difieran en un factor de 2 ó 4.
- **Variabilidad de la exposición durante el tiempo, corto plazo:** Los campos (particularmente los campos magnéticos) varían en escalas de tiempo de segundos o mayores. La valoración de la exposición de un individuo sobre cualquier periodo de tiempo implica una toma de datos única para una cantidad que puede ser altamente variable, por lo que parece lógico establecer la necesidad de comparar los datos obtenidos en situaciones similares.
- **Variabilidad de la exposición sobre el tiempo, largo plazo:** las intensidades de los campos pueden variar según la estación, e incluso según el año. Con la excepción de historiales de cargas en líneas de alta tensión, no hay mucha información relativa a esas variaciones. Por tanto, cuando se evalúa la exposición de un individuo en un periodo de tiempo pasado a partir de datos posteriores a esa exposición, se deben establecer una serie de suposiciones. La principal suposición que generalmente se toma es que la exposición no ha variado. Algunos autores han intentado estimar las variaciones de la exposición a partir de registros de datos disponibles, como por ejemplo, el consumo de electricidad. De esta forma, se ha pretendido calcular la exposición para la población en general, siendo sin embargo este cálculo impreciso para exposiciones individuales.
- **Variabilidad de la exposición en el espacio:** Los campos magnéticos varían en el espacio, como puede ser, por ejemplo, un edificio; de este modo, los individuos que se mueven dentro del edificio pueden estar expuestos a campos de intensidad variable. Una monitorización personal de la exposición medirá estos valores, pero por el contrario otros métodos de medida no podrán hacerlo.

Los individuos están expuestos a los campos ELF en diferentes situaciones, como en el hogar, la escuela, en el trabajo, durante un viaje etc... El actual conocimiento de la exposición debida a diferentes tipos de fuentes es limitado. La mayoría de los estudios

hacen una valoración de la exposición considerando una situación única, típicamente el hogar para estudios de exposición residencial, o en el trabajo para estudios de exposición ocupacional. Estudios más recientes han incluido medidas de exposición de más de una situación.

En estudios epidemiológicos, la distribución de la exposición en la población influye en los resultados de los estudios estadísticos. La mayoría de las poblaciones se caracterizan por una distribución logarítmico-normal, donde predomina la exposición de bajo nivel respecto a la exposición elevada. Por tanto, los estudios sobre la distribución de la exposición son importantes a la hora de desarrollar un análisis efectivo.

Ya que la mayoría de los estudios epidemiológicos han investigado los campos magnéticos más que los eléctricos (en parte porque existe una mayor incertidumbre relacionada con una posible asociación entre enfermedades del cáncer y los campos magnéticos), los siguientes apartados tratan sobre los métodos de medida de los primeros, mientras que un último apartado se centra en los campos eléctricos, aunque también sean aplicables los mismos principios.

6.2 Valoración de la exposición residencial a campos magnéticos: métodos que no involucran medidas

A continuación se describen una serie de métodos que no involucran una medida directa.

6.2.1 Distancia

La manera más sencilla de valorar una exposición consiste en registrar la proximidad a una instalación (como, por ejemplo, una línea de transporte o una subestación) generadora de campos. Este método proporciona una estimación poco precisa de la exposición, tanto de los campos magnéticos como eléctricos emitidos por la fuente analizada, además de no tener en consideración otras fuentes o cómo varían los campos según la distancia respecto a la fuente (la cual será diferente según las fuentes consideradas). Recientemente, alrededor de la mitad de los valores medios de exposición de campos magnéticos por encima de $0.4 \mu\text{T}$ en UKCCS (UK *Childhood Cancer study*) se atribuyeron a otras fuentes, distintas de las líneas de alta tensión [33].

6.2.2 Código de cables (*wire coding*)

El método *wire coding* es una forma no intrusiva de clasificar viviendas a partir de su distancia respecto a instalaciones eléctricas, y teniendo en cuenta las características de

esas instalaciones. Este método no tiene en cuenta la exposición respecto a las fuentes dentro del hogar. En el estudio realizado por Wertheimer y Leeper [12] se elaboró un conjunto de reglas para clasificar las residencias con respecto a un potencial de exposición a los campos magnéticos mayor del usual. Se tomaron las siguientes premisas:

- La intensidad de campo disminuye con la distancia respecto a la fuente considerada.
- La corriente que fluye en las líneas de energía disminuye con cada punto desde el cual se proporciona energía a los hogares (entendiéndose como la disminución de la corriente que permanece en la línea).
- Si tanto conductores gruesos como delgados se utilizan para las líneas de transporte de energía a una tensión dada, y más de un conductor está presente, es razonable asumir que más conductores, y más gruesos, serán necesarios para portar corrientes de mayor magnitud.
- Cuando las líneas sean subterráneas, su contribución a la exposición se podrá considerar despreciable. Esto es debido a que los cables enterrados están situados juntos entre sí, y los campos producidos por las corrientes que fluyen por los mismos se cancelan entre ellos de manera mucho más efectiva, (sin embargo, otras fuentes como [a]¹⁸ citan la posibilidad de que existan mayores niveles de exposición para líneas subterráneas, por lo que habría que comprobar si utilizan algún sistema de apantallamiento).

Un estudio posterior definió hasta cinco clases de hogares [35]:

- **VHCC** (*very high current configuration*), configuración de muy alta corriente.
- **OHCC** (*ordinary high current configuration*), configuración de alta corriente ordinaria.
- **OLCC** (*ordinary low current configuration*), configuración de baja corriente ordinaria.
- **VLCC** (*very low current configuration*), configuración de muy baja corriente.
- **UG** (*underground*), bajo tierra o enterrado, haciendo referencia a cables debajo del suelo.

¹⁸ www.emfs.info/Source_underground.asp

Evidentemente, los hogares que entran en las clasificaciones más altas deberían tener mayores intensidades de campo en su entorno que aquéllos enmarcados en las clasificaciones más bajas. De acuerdo con este esquema de clasificación, los hogares que se encuentran a más de 40 m respecto a los ejes de las líneas de transporte, se consideraron como “no expuestos a campos magnéticos”.

Este método ha sido utilizado por diferentes estudios. Los rangos de medida utilizados para la clasificación de categorías indican una posible relación entre la media de las distribuciones y la clasificación (es decir, mayores medias para las clasificaciones más altas), pero aún así, existe un solape no despreciable entre las distintas categorías.

Estudios posteriores evaluaron las relaciones entre las categorías y las medidas de campo disponibles. Los estudios realizados han mostrado varias incoherencias entre las categorías anteriores y las clasificaciones a partir de medidas. Por ejemplo, mientras el número y grosor de los cables pueden reflejar la capacidad total de corriente que se puede transportar, no se consideran las diferencias en cuanto a la geometría del sistema, fase, y cargas del sistema, que pueden realzar o cancelar los campos generados. De este modo, las categorías “altas” pueden estar expuestas a niveles bajos de campo; y de forma similar, las categorías “bajas” pueden estar expuestas a niveles mayores de los esperados debido a los campos emitidos por otras fuentes distintas a las líneas de transporte, o por cargas externas con un consumo considerable. En relación a esto último, los datos disponibles muestran que la relación “categoría elevada-baja medida” es más frecuente que la de “baja categoría- alta medida”.

Mientras que el método *wire coding* explica poco acerca de la variabilidad de intensidades de los campos magnéticos en los hogares, sí es útil a la hora de identificar zonas con altas posibilidades de exposición a campos magnéticos intensos. El concepto de *wire coding* es válido por tanto para una aproximación de carácter impreciso, siendo en sí mismo un método imperfecto para valorar la exposición de los campos magnéticos en diferentes entornos. La mayoría de los estudios que han utilizado este método son norteamericanos, mientras que en otros países su aplicación ha sido más bien limitada, ya que la alimentación a los hogares llega por cableado subterráneo.

6.2.3 Cálculo de historial de campos

En el estudio realizado por Feychting y Ahlbom [11] se llevó a cabo un análisis caso-control basado en cohortes de residentes viviendo en un radio de no más de 300 m respecto a líneas de transporte, en Suecia. Los datos utilizados fueron la geometría de los conductores en la línea de transporte, la distancia de las casas con respecto a las líneas, y un registro de las corrientes consumidas. Esta situación permitió a los investigadores calcular los campos a los que los residentes estaban expuestos, en varias ocasiones.

Las similitudes con respecto al método anterior son, en primer lugar, el criterio básico de que los campos se incrementan en intensidad conforme lo hacen las corrientes, y disminuyen conforme se aumenta la distancia respecto a la línea que los emite; y en segundo lugar, el hecho de que ambos métodos consideraran despreciables los campos generados por otras fuentes distintas a las líneas de transporte de energía. Hay, sin embargo, una diferencia importante: en el método *wire coding*, el grosor y tipo de línea son una medida potencial de la capacidad de transporte de corriente. En el estudio [11] se realizó una aproximación de la corriente media anual a partir de una serie de registros; así, se pudieron obtener diferentes estimaciones, utilizando diferentes cargas, etc... Este enfoque se ha utilizado en varios países nórdicos, además de otros lugares, aunque la precisión de los cálculos realizados ha dependido en parte de la exactitud y fiabilidad de la información relativa al historial de las cargas conectadas. La necesidad de suponer que otras fuentes de campo eran insignificantes, es razonable sólo para los individuos relativamente cerca de las líneas de transporte de alta tensión. La validez de esta suposición también depende de otros factores, como la intensidad media de los campos emitidos por otras fuentes.

Existe además cierta evidencia de que el enfoque anterior funciona mejor en casas unifamiliares que en apartamentos. En este estudio también se analizó la diferencia entre los cálculos a partir de historiales, y las medidas tomadas al mismo tiempo que se realiza el estudio, llegándose a la conclusión de que las medidas actuales daban como resultado un aumento en los niveles de exposición respecto a las estimaciones basadas en registros históricos.

Como ya se ha dicho, cuando para estimar la exposición de una persona los campos se calculan a partir de las líneas de transporte, se hace la suposición de que otros campos generados son insignificantes. Esta premisa es válida para hogares que se encuentren cercanos a la o las líneas de transporte, de forma que este campo sea el dominante. A medida que la distancia aumenta, la suposición anterior va teniendo menor validez, aumentándose por tanto el error de la exposición estimada. Este error, tal y como el estudio [11] deduce, es mayor en las categorías de baja exposición, donde los campos debidos a otras fuentes tienen una contribución más significativa. Dicho error, por tanto, puede invalidar la estimación de los niveles de exposición a partir de registros, de manera que un estudio basado en medidas actualizadas podría aportar una mayor fiabilidad.

6.3 Valoración de la exposición residencial a campos magnéticos: métodos a partir de medidas

Posteriormente a la publicación del estudio de Wertheimer y Leeper [12], surgieron dudas sobre una posible asociación entre el cáncer y las configuraciones del cableado eléctrico del suelo, cuyas exposiciones no habían sido medidas. Consecuentemente, varios estudios posteriores incluyeron nuevas medidas de varios tipos.

Tomar una medida tiene como ventaja la capacidad de captar la emisión de cualquier fuente presente, sin identificación previa de las mismas, al contrario que ocurre en los tres métodos descritos en el apartado anterior. Además, ya que las medidas pueden clasificar los campos en una escala continua en lugar de por categorías, proporcionan una mayor información a la hora de investigar diferentes límites y las relaciones dosis-respuesta. Se describen a continuación los principales métodos que implican la realización de medidas.

6.3.1 Medidas puntuales (*spot measurements*)

La manera más simple de tomar una medida es a partir de una lectura puntual realizada en un lugar determinado y en un momento en el tiempo. Para captar las variaciones espaciales del campo, algunos estudios han realizado múltiples medidas puntuales en un entorno concreto (zonas de una vivienda específica). En un intento de diferenciación entre los campos provenientes de fuentes externas y fuentes internas a un hogar, algunos estudios han diferenciado medidas puntuales bajo condiciones de “bajo consumo” (todos los dispositivos del hogar apagados) y condiciones de “consumo elevado” (todos los dispositivos del hogar encendidos). Ninguna de las dos opciones representa fielmente las condiciones reales de exposición en un hogar, si bien la condición de “bajo consumo” se acerca más a la condición típica.

El mayor inconveniente de las medidas puntuales es la imposibilidad de captar variaciones temporales del campo en un periodo determinado (considerando exclusivamente el concepto de medida puntual, en un lugar y en un instante de tiempo definidos). Una medida puntual como tal puede valorar la exposición actual (en ese instante de tiempo), pero no puede proporcionar información relativa a un historial de exposición, que es un importante requisito para estudios relacionados con el cáncer. Otro problema adicional de las medidas puntuales es que solamente proporcionan una aproximación del campo que había en un instante determinado, debido a la variación temporal de los campos en períodos de tiempo cortos (*short-term*), y a no ser que éstas se repitan a lo largo del año no podrán ser representativas de variaciones significativas.

Un conjunto de autores han comparado la estabilidad en el tiempo de medidas puntuales en períodos de hasta cinco años, como en [13]. Los coeficientes de correlación obtenidos estuvieron en el rango de 0.7-0.8 (lo que indica una correlación considerable). Sin embargo, otros estudios indican que, a pesar de obtenerse una correlación importante, pueden ocurrir errores de clasificación.

6.3.2 Medidas a largo plazo (*long-term*)

Ya que las medidas puntuales captan las variaciones temporales cortas de manera muy pobre, se han hecho varios estudios en los que se han realizado medidas en uno o

más emplazamientos y durante periodos de tiempo largos, generalmente de 24-48 h, y comúnmente en los dormitorios de niños. Las comparaciones entre las medidas a largo y corto plazo han dado un resultado pobre. Esto se debe principalmente a que los resultados de las medidas a corto plazo aumentan por los campos producidos por dispositivos o cables del interior, que sin embargo no afectan a los valores medios de medidas tomadas durante varias horas [14].

En [36] se intentó calcular la variación temporal a largo plazo a partir de medidas realizadas durante 48 h, modificándose las medidas a partir de datos históricos para los individuos que se encontraban cerca de líneas de alta tensión. En otro estudio en Alemania [15], se identificaron las fuentes generadoras de campos elevados a partir de una toma de varias medidas, y se intentó clasificar estas fuentes como la probabilidad de ser estables a lo largo del tiempo. Antes de realizarse el mayor estudio en USA [16], se llevó a cabo un análisis donde se pretendía estimar cuánto tiempo pasaban niños de varias edades en diferentes partes del hogar. Estas estimaciones se utilizaron para el cálculo de las medidas en las habitaciones, a partir mediciones ponderadas en el tiempo (time-weighted averaged, TWA). Además del análisis comentado anteriormente, se dedujo que los campos magnéticos en las viviendas tienen un mayor peso en la variabilidad de exposición de los niños que aquéllos producidos en las escuelas.

Las Tablas 6.1 y 6.2 muestran los valores medios de exposición a los campos magnéticos en diferentes regiones, para el público en general. Como se observa en las tablas, aproximadamente el 4-5% del público está expuesto a valores por encima de $0.3 \mu\text{T}$, con la excepción del estudio de Corea donde este valor es del 7.8 %. Además, sólo el 1-2 % están expuestos a valores medios por encima de $0.4 \mu\text{T}$.

Tabla 6.1 Media aritmética de intensidad de campo magnético obtenida en estudios de encuestas de investigación y caso-control (modificada de [2])

| Exposición personal, media aritmética del campo magnético | | | | | | | | |
|---|--------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------------------------|------------------|------------------|--------|------|
| País | Autores | Tipo de estudio | Medida | Campo magnético (μT) | | | | N |
| | | | | ≤ 0.1 | $>0.1, \leq 0.2$ | $>0.2, \leq 0.3$ | >0.3 | |
| Bélgica | Decat, Van den Heuven & Mulpas, 2005 | Encuesta* | 24 h personal | 81.9 | 11.5 | 1.6 | 5.1 | 251 |
| Canadá | McBride et al, 1999 | Caso-control | 48 h personal | 59 | 29.2 | 8.5 | 3.3 | 329 |
| Alemania | Michaelis et al, 1998 | Caso-control | 24 h dormitorio | 89.9 | 7.0 | 1.7 | 1.4 | 414 |
| | Brix et al, 2001 | Encuesta | 24 h personal | 73.6 | 17.8 | 4.1 | 4.5 | 1952 |
| | Schüz et al, 2001 | Caso-control | 24 h dormitorio | 93 | 5.6 | 0.9 | 0.5 | 1301 |
| Japón | Kabuto et al, 2006 | Caso-control | 7 días, casa | 89.9 | 6 | 2.5 | 1.6 | 603 |
| Corea | Yang, Ju & Myung, 2004 | Encuesta | 24 h personal | 64 | 24.2 | 4 | 7.8 | 409 |
| Reino Unido | UKCCSI, 1999 | Caso-control | 48 h, hogar | 92.3 | 5.8 | 1.2 | 0.8 | 2226 |
| USA | London et al, 1991 ^a | Caso-control | 24 h dormitorio | 69.2 | 19.6 | 4.2 | 7 | 143 |
| | Linet et al, 1997 | Caso-control | 24 h dormitorio | 65.7 | 23.2 | 6.6 | 4.5 | 620 |
| | Zaffanella & Kalton, 1998 | Encuesta | 24 h personal | 64.2 | 21.1 | 7.8 | 4.2 | 995 |
| | Zaffanella 1993 | Encuesta | 24 h hogar | 72.3 | 17.5 | 5.6 | 4.6 | 987 |

*Encuesta (exposure survey): toma de medidas a partir de una muestra

a) Basado en la distribución del análisis realizado por [17].

b) En las categorías: < 0.1 , $0.1 \leq 0.2$, $0.2 \leq 0.4$, $> 0.4 \mu\text{T}$, se han aplicado los ratios de exposición de las altas categorías basados en [26], parte del proyecto EMF Rapid [3]

Tabla 6.2 Media geométrica de la intensidad de campo magnético obtenida en estudios de encuestas de investigación y caso-control (modificada de [2])

| Exposición personal, media geométrica del campo magnético | | | | | | | | |
|---|--------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------------------------|------------------|------------------|--------|------|
| País | Autores | Tipo de estudio | Medida | Campo magnético (μT) | | | | N |
| | | | | ≤ 0.1 | $>0.1, \leq 0.2$ | $>0.2, \leq 0.3$ | >0.3 | |
| Bélgica | Decat, Van den Heuven & Mulpas, 2005 | Investigación | 24 h personal | 91.9 | 4.1 | 2.8 | 1.2 | 251 |
| Canadá | McBride et al, 1999 | Caso-control | 48 h personal | 70.7 | 17.4 | 8.6 | 3.3 | 304 |
| Alemania | Michaelis et al, 1998 | Caso-control | 24 h dormitorio | 92.9 | 5.1 | 1.5 | 0.5 | 409 |
| Reino Unido | UKCCSI, 1999 | Caso-control | 48 h, hogar | 94.4 | 4.1 | 1.2 | 0.4 | 2224 |
| USA | Zaffanella & Kalton, 1998 | Encuesta | 24 h personal | 72.6 | 17.6 | 7.5 | 2.3 | 995 |
| | Linet et al, 1997 ^a | Caso-control | 24 h dormitorio | 72.8 | 17.9 | 8.3 | 0.9 | 530 |

a) Basado en la distribución del estudio realizado por [18]. N = número de muestras

En España, en el estudio realizado por Panigua [45], se realizaron medidas puntuales y también se analizó la variación temporal de los campos magnéticos en zonas urbanas (concretamente en la ciudad de Cáceres, Extremadura). Se encontró que todas las medidas estaban por debajo de $7.3 \mu\text{T}$, que el 14.4 % de las medidas realizadas sobrepasaban $0.2 \mu\text{T}$ (valor que se suele utilizar en estudios epidemiológicos como la delimitación entre poblaciones expuestas y no expuestas), y que sólo el 1 % de las medidas sobrepasaban $1 \mu\text{T}$. En este estudio también se hizo un mapeo geográfico, haciendo referencia a las medidas en función de la zona donde se habían tomado. Mediante este mapeo se pudo comprobar que la distribución de los niveles de campo magnético no es homogénea, pero que las mayores intensidades de campo se suelen encontrar en las zonas más viejas, donde predominan las líneas de distribución aéreas. Por el contrario, en las zonas residenciales más modernas, y donde las líneas de distribución son subterráneas, los niveles encontrados de campo magnético fueron inferiores.

6.3.3 Monitorización personal de la exposición

La monitorización personal de la exposición de un individuo mediante un medidor acoplado al cuerpo es una opción interesante, ya que de este modo es posible captar la exposición producida por todos los campos de todas las fuentes y en todos los lugares donde el individuo haya estado. Al estar incluidas todas las fuentes, el valor medio de los

campos medidos tiende a ser mayor que aquellos valores medios obtenidos mediante los métodos de medidas puntuales o a largo plazo comentados anteriormente. Sin embargo, la utilización de la exposición monitorizada podría ser problemática en los estudios caso-control, pudiendo provocar errores de clasificación en la estimación de la exposición. No obstante, la monitorización de la exposición personal puede utilizarse como método de validación para otros tipos de medidas. Una opción de medidor portátil, en este sentido, puede ser la propuesta por los autores Nicle et al. [29] (aunque en este caso se utiliza para la medida de posibles corrientes de contacto ELF), o [26], donde se utilizaba un medidor de campo magnético por persona enganchado al cinturón o en el bolsillo.

La **Tabla 6.3** resume los resultados de estudios que han medido la exposición personal de conjuntos representativos (niños, voluntarios...) de individuos en diferentes países. La media geométrica y la desviación geométrica se proporcionan bajo la suposición de distribuciones logarítmico-normal.

Tabla 6.3 Resumen de análisis de exposiciones residenciales (modificada de [2])

| Resumen de medidas de exposiciones personales (a) | | | | | | | |
|---|--------------------------------------|--|---------------------------|---------------------------------------|---------------------------|-----------------------|-------------------------------------|
| Autores | Área | Tipo de muestra | Tipo de medida | Tamaño de la muestra | Cálculos estadísticos (b) | Media geométrica (nT) | Desviación estándar geométrica (nT) |
| Donelly & Agnew, 1991 | Toronto, Canada | Empleados y público general elegido en varios entornos | Aproximadamente 48 h | 31 | Niños en el hogar (D) | 117 | 2.98 |
| | | | | | Adultos, en el hogar (D) | 133 | 2.80 |
| Skotte, 1994 | Dinamarca | De la industria. Hogares cercanos a las líneas de energía excluidos. | Exposición personal, 24 h | 298 (incluidas algunas duplicaciones) | (P) | 50 | 2.08 |
| Brix et al, 2001 | Bavaria, Alemania | Voluntarios para valoración de la exposición | Exposición personal, 24 h | 1952 | (U) | 6.4 | 2.41 |
| Vistnes et al, 1997 | Barrios residenciales, Oslo, Noruega | Niños de escuelas. Sólo para hogares a más de 275 m de líneas de energía | Exposición personal, 24 h | 6 | En el hogar (P, A) | 15 | 2.40 |

Tabla 6.3 Resumen de análisis de exposiciones residenciales (modificada de [2])

| Resumen de medidas de exposiciones personales (a) | | | | | | | |
|---|------------------------|--|---|---------------------|--|-----------------------|-------------------------------------|
| Autores | Área | Tipo de muestra | Tipo de medida | Tamaño de lamuestra | Cálculos estadísticos (b) | Media geométrica (nT) | Desviación estándar geométrica (nT) |
| Merchant, Renew & Swason, 1994 | Inglaterra y Wales, UK | Voluntarios de la industria eléctrica. Líneas de alta tensión excluidas | 3-7 días | 204 | En el hogar (P.F) | 54 | 2.05 |
| Preece et al, 1996 | Avon, UK | Selección aleatoria de madres con niños supervivientes | 24 h | 44 | (A) | 42 | 2.65 |
| Kavet, Silva & Thornton, 1992 | Maine, USA | Selección aleatoria, adultos | 24 h | 15 | En el hogar (D) | 134 | 1.80 |
| Zafanella & Kalton 1998 | USA | Selección aleatoria | 24 h, medida personalizada (dormitorio y hogar) | 994 | (D) | 92 | 1.36 |
| Bracken et al, 1994 | USA | Empleados de EPRI (Electric Power Research Institute), elegidos de forma aleatoria a partir de una selección por wire coding | 24 h | 396 | En el hogar (pero no en el dormitorio) (F) | 111 | 1.88 |
| Kaune et al, 1994 | Washington DC, USA | Niños de voluntarios en guarderías cercanas a líneas de transporte | 24 h | 29 | Residencial (P) | 96 | 2.38 |
| Kaune & Zafanella, 1994 | California, USA | Niños de voluntarios de la industria | 24 h | 31 | (P) | 96 | 2.45 |

a) Fuente: [19] b) A = Estadísticos aritméticos de [19]; P = Estadísticos geométricos de [19]; D = Calculado de los datos proporcionados en [19]; F = Ajuste a los estadísticos dados en [19] utilizando el procedimiento de mínimos cuadrados; U=Cálculos obtenidos de datos no publicados

Tabla 6.4 Datos de exposición personalizada y campos en diferentes entornos (modificada de [2])

| Comparación entre exposición personal y campos en el entorno | | | | | | |
|--|--------------------------------|--|----------------------|--|---|---|
| País | Autores | Tipo de sujeto estudiado | Tamaño de la muestra | Exposición personal: media geométrica (nT) | Media geométrica (medida tomada a largo plazo) del campo en el entorno (nT) | Relación de las medias geométricas: exposición personal/campo del entorno |
| USA | Kavet, Silva & Thornton, 1992 | Adultos, en el hogar | 15 | 134 | 58 | 2.4 |
| | Bracken et al, 1994 | Adultos, en el hogar (no se considero el dormitorio) | 396 | 111 | 74 | 1.5 |
| | Kaune et al, 1994 | Niños, viviendas | 29 | 96 | 99 | 1.0 |
| | Kaune & Zafanella, 1994 | Niños | 31 | 96 | 67 | 1.4 |
| Canadá | Donelly & Agnew, 1991 | Niños, en el hogar | 31 | 117 | 107 | 1.1 |
| | | Adultos, en el hogar | 31 | 133 | -- | 1.2 |
| Reino Unido | Merchant, Renew & Swason, 1994 | Adultos, en el hogar | 204 | 54 | 37 | 1.5 |
| | Preece et al, 1996 | Adultos | 44 | 42 | 29 | 1.5 |

En general, las medidas de exposición personal son mayores que los campos medidos a distancias lejanas de los equipos eléctricos, en gran parte debido a las contribuciones extras de dichos dispositivos, así como otras fuentes dentro del hogar. En la **Tabla 6.4** se comparan siete estudios que incluían tanto medidas de exposición personal como medidas a largo plazo de campos, lejos de dispositivos en hogares específicos. La razón entre los valores medios del valor personal/campo en el entorno varía de 1 a 2.3, con un valor medio de 1.44. Puede existir una cierta tendencia a que el cociente comentado sea menor para los niños que para los adultos, pero dada la limitación de los datos no está justificado afirmar ninguna conclusión. Las referencias de todas las publicaciones utilizadas en las dos tablas anteriores se pueden encontrar en [2].

6.4 Ejemplos de valoración

Aunque ya fue comentado en el **Capítulo 3**, a continuación se muestran las conclusiones de algunos estudios realizados sobre la valoración de los niveles de exposición generados por dispositivos eléctricos, y en entornos específicos como las escuelas y el hogar, y según el tipo de trabajo (actividades ocupacionales). También se muestra el procedimiento de medida indicado en la norma UNE 215001:2004 *“Procedimientos normalizados para la medida de los campos eléctricos y magnéticos de frecuencia industrial producidos por las líneas eléctricas de alta tensión”* [95].

6.4.1 Valoración de la exposición a campos magnéticos generados por dispositivos eléctricos

Poco se conoce acerca de la magnitud y distribución de los campos electromagnéticos generados por electrodomésticos. La contribución a la exposición global depende, entre otras cosas, del tipo de dispositivo, su antigüedad, la distancia entre el mismo y la persona que lo utiliza, y la forma y duración de su uso. La evaluación del uso de dispositivos en estudios epidemiológicos generalmente se ha basado en cuestionarios; dichos cuestionarios permiten averiguar algunos factores, pero no todos. Se desconoce la precisión de los datos obtenidos a partir de los cuestionarios en relación a la exposición real. En ciertos estudios se llegó a la conclusión de que estos cuestionarios tenían un valor limitado en la estimación de la exposición personal a campos magnéticos.

De acuerdo con el estudio [20], los electrodomésticos no son una fuente significativa para la exposición a ELF si consideramos todo el cuerpo de un individuo, pero sí pueden ser una fuente dominante de exposición para ciertas extremidades. Se ha sugerido que los electrodomésticos comunes suponen una exposición equiparable a la recibida debida a las líneas de transporte de energía. Más recientemente, en [21] se determinó que las computadoras contribuían de forma apreciable a la exposición general, mientras que otros dispositivos contribuían en menos del 2 %. La mayoría de las veces, una baja contribución es indicativo de un uso infrecuente y poco duradero del dispositivo en cuestión. Analizando sólo a los individuos que utilizaban ciertos dispositivos, el estudio anterior mostró que las computadoras y los teléfonos móviles podrían contribuir de forma significativa a la exposición diaria de un individuo.

Ya que la exposición a los campos generados por electrodomésticos tiende a ser corta en el tiempo y de forma intermitente, el método apropiado para combinar la valoración de la exposición de diferentes dispositivos con la exposición crónica de otras fuentes será particularmente dependiente de suposiciones realizadas en la toma de medidas de la exposición. Dichos métodos aún están por desarrollar.

6.4.2 Valoración de la exposición en las escuelas

En raras ocasiones, la exposición a los campos magnéticos y eléctricos ELF en las escuelas representa una fracción importante en la exposición total en niños.

En [22] se analizaron 79 escuelas en Canadá, donde se llevaron a cabo un total de 43009 medidas de los campos magnéticos a 60 Hz (entre 141 y 1543 medidas por escuela). Solo el 7.8 % de los campos medidos tenían un valor por encima de $0.2 \mu\text{T}$. Para las escuelas, el valor medio del campo magnético medido fue de $0.08 \mu\text{T}$, con una desviación estándar de $0.06 \mu\text{T}$. Analizando tipos de aulas, sólo las de mecanografía (se suponen por tanto salas de ordenadores o máquinas de escribir electrónicas) alcanzaban valores por encima de los $0.2 \mu\text{T}$. Los vestíbulos y pasillos tenían valores por encima de $0.1 \mu\text{T}$, y las demás salas por debajo de $0.1 \mu\text{T}$. La mayoría de los campos magnéticos que superaban los $0.2 \mu\text{T}$ estaban asociados a cables del suelo o del techo, y con proximidad a salas donde hubiera dispositivos electrónicos o fuentes de campos magnéticos como máquinas de escribir eléctricas, computadoras, y proyectores. Ocho de las 79 escuelas se encontraban emplazadas cerca de líneas de alta tensión. El estudio no mostró una diferencia clara de intensidades de campos magnéticos entre escuelas y entornos domésticos.

En [23] se midieron los campos magnéticos producidos a las frecuencias de 50-60 Hz, en hogares, escuelas y guarderías. Se incluyeron en el estudio diez escuelas públicas, seis escuelas privadas y una guardería. En general, la intensidad de campo magnético medida en las escuelas, así como en las guarderías, fue menor que la obtenida en entornos residenciales. En otra investigación [24], se llevó a cabo un estudio epidemiológico en niños, en los cuales se realizaron mediciones tanto en escuelas como en sus hogares. Sólo tres de 4452 niños con edades comprendidas entre 0 y 14 años recibieron una exposición media por encima de $0.2 \mu\text{T}$ a lo largo de un año, y como resultado de la exposición en las escuelas.

En el estudio español [47], se evaluaron los niveles de exposición de escuelas de primaria en la ciudad de Oviedo y en la provincia de Barcelona. Se encontraron unos valores medios de exposición de $0.017 \mu\text{T}$ en Oviedo, y $0.057 \mu\text{T}$ en Barcelona. En Oviedo, ninguna de las escuelas resultó estar expuesta a un valor superior a $0.3 \mu\text{T}$, sin embargo, en Barcelona, 3 de las 53 que se analizaron superaban dicho límite, además de una cuarta con una exposición de $0.26 \mu\text{T}$. Ninguna de estas cuatro escuelas se encontraba localizada cerca de líneas de transporte de alta tensión, pero sí tenían algunas características particulares, como por ejemplo líneas de distribución subterráneas dentro del área de la escuela.

6.4.3 Valoración de la exposición no ocupacional a los campos magnéticos

Una cuestión crucial en los estudios caso-control en general, y para campos magnéticos y cáncer infantil en particular, es cómo considerar el tiempo como factor de la exposición. Por definición, todas las exposiciones en este tipo de estudios se basan en la toma de registros (historiales). De este modo, las medidas, el método *wire-coding*, y el método de registros, representan modelos de interpretación para la exposición crítica, la cual debe haber ocurrido en un tiempo desconocido en el pasado. La cuestión es entonces, ¿cuál es el mejor modelo para analizar un historial de exposición, el método *wire-coding*, medidas por áreas, o medidas personales?

Cada método tiene sus ventajas e inconvenientes.

- El método *wire-coding* es una forma simple de categorizar situaciones que se suponen estables sobre el tiempo (niveles de exposición según la categoría). Este método permite cuantificar la magnitud del campo magnético sin la necesidad de participación de individuos, reduciendo así la posible influencia de una no-participación y maximizando el tamaño del estudio.
- La medida directa del campo, por otra parte, constituye un método más interesante en el sentido de que se tienen en cuenta todas las fuentes emisoras de campo en un entorno dado, además de requerir pocas suposiciones.
- También, aunque generalmente se considera que las medidas a largo plazo constituyen la mejor forma de estimación de la exposición media a campos magnéticos, el método *wire-coding* puede ser un mejor indicador para diferenciar los registros de altas exposiciones. Esto podría ser especialmente cierto cuando se ha de estimar la exposición ocurrida durante un periodo de varios años, o incluso décadas.
- Los estudios epidemiológicos con medidas personales tienen que ser aún completados. Sin embargo, en estudios tipo de caso-control, las medidas personalizadas podrían dar problemas debidos a factores como la edad, enfermedades o cambios en el comportamiento, y como consecuencia, en la medida de la exposición.

Por regla general, los estudios epidemiológicos que estimaron los historiales de exposición de individuos a campos magnéticos provenientes de líneas de transporte, no publicaron los detalles de los algoritmos de computación empleados. Sin embargo, en la valoración de la exposición realizada en estos estudios, es importante considerar la precisión de los cálculos realizados a la hora de interpretar los datos obtenidos. Por ejemplo, en

el estudio realizado por [11], el error de cálculo (medidas calculadas en comparación con medidas tomadas) es mayor que cualquier posible ventaja que se pudiera obtener estimando una exposición actual a partir de los historiales calculados. Por tanto, en este estudio parece que las medidas puntuales proporcionarían una mejor estimación para establecer un registro de exposiciones.

6.4.4 Valoración de la exposición ocupacional a los campos magnéticos

Continuando el estudio de [12], donde se estableció una asociación entre los campos magnéticos y la leucemia infantil, en [25] se determinó una posible asociación entre el cáncer y algunos trabajos (generalmente denominados “ocupaciones eléctricas”) que intuitivamente estaban relacionados con fuentes próximas generadoras de campos magnéticos y eléctricos. Sin embargo, la clasificación en función del tipo de trabajo se puede considerar bastante imprecisa. Se ha destacado que, por ejemplo, muchos ingenieros eléctricos desempeñan funciones de oficina y que muchos electricistas trabajan generalmente en operaciones con el cableado desconectado (sin que circule corriente alguna).

Mucho menos se conoce sobre la exposición de “ocupaciones no eléctricas”. Existen pocos datos disponibles para varios tipos de trabajo, así como entornos en industriales. En los pocos estudios realizados se destacan elevadas exposiciones en los conductores de ferrocarriles y trabajos con máquinas de costura (alrededor de $3 \mu\text{T}$). La mejor información disponible en cuanto a la exposición de los trabajadores se encuentra, según la OMS, en el trabajo llevado a cabo por [26]. El estudio incluyó a 525 trabajadores en una variedad de empleos, tal y como se muestra en la **Tabla 6.5**:

Tabla 6.5 Parámetros del campo magnético por profesiones (modificada de [2])

| Parámetros del campo magnético medio en diferentes profesiones (a) | | | | | |
|---|----------------------|-------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|--|
| Descripción del tipo de profesión | Tamaño de la muestra | Media (μT) | Desviación estándar (μT) | Media geométrica (μT) | Desviación estándar geométrica (μT) |
| Directivos, ocupaciones profesionales especializadas | 204 | 0.164 | 0.282 | 0.099 | 2.47 |
| Ocupaciones técnicas, de ventas y administrativas | 166 | 0.158 | 0.167 | 0.109 | 2.03 |
| (protección, comida, salud, limpieza, y personal) ocupaciones de tipo servicial | 71 | 0.274 | 0.442 | 0.159 | 2.55 |
| Granja, campo, pesca | 19 | 0.091 | 0.141 | 0.045 | 2.97 |
| Producción, operadores, fabricantes, trabajos de reparación | 128 | 0.173 | 0.415 | 0.089 | 2.80 |
| Ocupaciones eléctricas (b) | 16 | 0.215 | 0.162 | 0.161 | 2.25 |

a) Fuente: [26]

b) Tal y como se clasificó en [25] y otras publicaciones del mismo autor: entre ellas se consideran técnicos electrónicos, operadores de radio, electricistas, operadores de líneas de energía y telefonía, reparadores de radio y televisión, trabajadores en estaciones de energía, trabajadores del aluminio, trabajadores de soldadura y corte por llama, ingenieros eléctricos y maquinistas.

El valor máximo de la media geométrica obtenida ($0.161 \mu\text{T}$) para la exposición de campo magnético durante el trabajo se corresponde con las ocupaciones eléctricas. Las ocupaciones relacionadas con la granja, el campo y la pesca tienen los valores más bajos ($0.045 \mu\text{T}$). Las exposiciones en el trabajo han sido en varias ocasiones más altas que en los hogares, y de forma significativa, además de ser también más variables: la gente pasa, por ejemplo, más tiempo expuesta a campos que exceden $1.6 \mu\text{T}$ en el trabajo que en sus hogares. Sin embargo, las exposiciones medias en el trabajo para la población en general son bajas, con sólo un 4% expuestos a campos magnéticos superiores a $0.5 \mu\text{T}$. Las clasificaciones ocupacionales se pueden mejorar a partir de nuevas consideraciones realizadas por expertos, y tomando medidas en grupos ocupacionales.

Un estudio llevado a cabo por [27] supone el primer intento de evaluación ocupacional de la exposición a campos magnéticos en las mujeres. El resultado se muestra en la **Tabla 6.6**, donde se puede ver que las categorías “cocinas grandes” y “tiendas y almacenes” suponen entornos de alta exposición:

Tabla 6.6 Clasificación por ocupaciones a campos magnéticos ELF en mujeres (modificada de [2])

Clasificación por ocupaciones de la exposición a campos magnéticos ELF en mujeres (a)

| Entorno | Tamaño de la muestra | Media aritmética/geométrica (desviación estándar) (μT) | | Proporción de tiempo de exposición | | | |
|-----------------------|----------------------|---|----------------------|------------------------------------|---|---|--------------------------|
| | | WTA (<i>weighted-timeaveraged</i>) | Máximos | ≤ 0.1 μT | $> 0.1,$ ≤ 0.2 μT | $> 0.2,$ ≤ 0.3 μT | > 0.3 μT |
| Asistencia sanitaria | 67 | 0.11/0.10 (0.07) | 2.62/2.10 (1.90) | 66 % | 20 % | 8 % | 7 % |
| Hospitales | 27 | 0.09/0.08 (0.05) | 3.01/2.37 (2.26) | 77 % | 13 % | 6 % | 4 % |
| Otros lugares | 40 | 0.13/0.11 (0.08) | 2.35/1.94 (1.58) | 59 % | 24 % | 9 % | 9 % |
| Escuelas y guarderías | 55 | 0.15/0.12 (0.10) | 5.41/2.12 (16.49) | 62 % | 20 % | 8 % | 10 % |
| Grandes cocinas | 34 | 0.38/0.28 (0.43) | 5.97/4.67 (4.55) | 30 % | 20 % | 15 % | 36 % |
| Oficinas | 127 | 0.16/0.12 (0.13) | 2.41/1.73 (2.32) | 55 % | 25 % | 9 % | 12 % |
| Tiendas y almacenes | 33 | 0.31/0.26 (0.17) | 5.84/2.55 (18.21) | 26 % | 17 % | 17 % | 40 % |

a) Fuente: [27]

A pesar de las mejoras en la evaluación de la exposición, la capacidad de explicar la variabilidad de ésta en entornos ocupacionales complejos sigue siendo pobre. Los títulos de los trabajos explican una pequeña porción de esta variabilidad. Se necesita una mayor definición del entorno en el trabajo, y de las tareas que desempeñen los trabajadores, para así obtener una estimación más precisa de la exposición. En [28] se ha utilizado este enfoque combinando información relacionada con el tipo de trabajo y una serie de registros, no solamente basados en el entorno general, sino también en zonas específicas de estaciones de energía y subestaciones.

Además de la necesidad de una clasificación adecuada de los trabajos, la calidad de la valoración de la exposición ocupacional depende de los detalles del historial de trabajo disponible para los investigadores. Los estudios más primitivos se basan en un solo tipo de trabajo. Esta valoración puede mejorarse, por ejemplo, identificando el tipo de tarea más desempeñada en la mayor parte del tiempo o, incluso mejor, obteniendo un historial completo del trabajo que pudiera permitir el cálculo de la exposición acumulada en la carrera profesional de un individuo, generalmente expresada en μT -año. Ante un nivel de exposición en un entorno de trabajo, es posible estimar, a modo de dosis, la contribución del campo magnético en dicho entorno, a partir de la siguiente ecuación [46]:

$$B_C = \frac{B(t) \cdot h' \cdot d'}{h \cdot d} \quad (6.1)$$

, donde

$B(t)$ → media de la densidad de flujo magnético

h' → número de horas por día de trabajo

d' → número de días de trabajo por año

$h = 24 \text{ h}$

$d = 365 \text{ días}$

La ecuación 6.1 proporciona la contribución del campo magnético en un entorno, expresada en $\mu\text{T}\cdot\text{año}$. De esta forma podría estimarse, para un puesto de trabajo concreto, el nivel de exposición medio.

6.4.5 Aplicación de la norma UNE 215001:2004

Entre los procedimientos normalizados para la medida de campos magnéticos y eléctricos ELF, se encuentra la norma **UNE 215001:2004**, elaborada por el comité técnico AEN/CTN 215 "Equipos y Métodos de Medida Relacionados con los Campos Electromagnéticos en el Entorno Humano" cuya secretaría desempeña AENOR. Su objetivo consiste en establecer un procedimiento uniforme para la medida de determinadas magnitudes representativas de los campos eléctricos y magnéticos a frecuencia industrial producidos por las líneas eléctricas de alta tensión, siendo aplicable a líneas de alta tensión tanto aéreas como subterráneas. Tal y como figura en la norma, el procedimiento para la medida del campo magnético es el siguiente:

- Precauciones y comprobaciones durante las medidas del campo magnético

- o Efectos de proximidad: En el caso de la medida del campo magnético, el operador puede permanecer cerca del medidor. Los objetos que contengan materiales magnéticos o conductores deben estar como mínimo, a una distancia del punto de medida igual al triple de la mayor dimensión del objeto, a fin de medir el valor del campo no perturbado. La distancia entre el medidor y los objetos magnéticos no debe ser inferior a 1 m, a fin de medir con precisión y sin interferencias el campo.

6.4.5.1 Procedimiento de medida del campo magnético de las líneas eléctricas aéreas de alta tensión

El procedimiento se basa en las siguientes pautas:

- La intensidad de campo magnético debajo de las líneas debe medirse a una altura de 1 m sobre el nivel del suelo. Las medidas a otras alturas de interés deben indicarse explícitamente.
- Las medidas deben expresarse en microteslas (μT) y sus submúltiplos.
- Debe medirse el nivel de campo sin perturbar.
- Debe medirse la resultante del campo magnético.
- Deben tomarse medidas durante un periodo de 30 s y debe darse como resultado de la medida el valor promedio y el valor máximo del campo magnético y opcionalmente, si fuera posible, las componentes axiales (X, Y, Z). (Véase el **Apéndice III**).
- Debe identificarse de forma adecuada el punto de medida de la línea eléctrica. Debe intentarse disponer de un plano topográfico del recorrido de la línea.
- Deben respetarse las especificaciones del equipo respecto a las condiciones climáticas para que la medida sea válida.
- En el **Apéndice III** se recogen las características básicas de la línea.

- Perfil longitudinal

La medida del perfil longitudinal debe realizarse siguiendo el eje de la línea eléctrica y de apoyo a apoyo de la misma. Debe dividirse el vano en al menos 5 puntos de medida equidistantes. Uno de los puntos mencionados debe corresponderse con el centro del vano o el punto más bajo de la línea.

Los puntos a medir debajo de la línea deben ser los suficientes para determinar la variación del campo con la distancia. Se recomienda trazar los perfiles del campo para determinar si se ha obtenido un detalle adecuado.

- Perfil transversal

Para la medida del perfil transversal de un vano debe medirse en intervalos seleccionados, cada 5 m, en la dirección normal a la línea, a partir del punto más bajo de ésta, a ambos lados de la misma y a 1 m del nivel del suelo.

Los niveles recomendados deben ser, como mínimo:

0 m – 5 m – 10 m – 15 m – 20 m – 30 m

En la ficha de recogida de datos debe especificarse un cuadro, con signo positivo

y las distancias del lado derecho de la línea y con signo negativo las tomadas a la izquierda de la misma. Debe considerarse izquierda y derecha según el sentido que marque la denominación de la línea.

6.4.5.2 Procedimiento de medida del campo magnético de las líneas eléctricas subterráneas de alta tensión

El procedimiento a seguir debe ser el que a continuación se explica:

- La intensidad de campo magnético por encima de las líneas debe medirse a una altura de 1 m sobre el nivel del suelo. Las medidas a otras alturas de interés deben indicarse explícitamente.
- Las medidas deben expresarse en microteslas (μT) y sus submúltiplos.
- Debe medirse el nivel de campo sin perturbar.
- Debe medirse la resultante del campo magnético.
- Deben tomarse medidas durante un periodo de 30 s y debe darse como resultado de la medida el valor promedio y el valor máximo del campo magnético y opcionalmente, si fuera posible, las componentes axiales (X, Y, Z). (Véase el **Apéndice III**).
- Debe identificarse de forma adecuada el punto de medida de la línea eléctrica. Debe intentarse disponer de un plano topográfico del recorrido de la línea. Si no se dispusiera de dicho plano, debería realizarse un rastreo previo a las medidas para conocer el trazado de la línea subterránea.
- Deben respetarse las especificaciones del equipo respecto a las condiciones climáticas para que la medida sea válida.
- En el **Apéndice III** se recogen las características básicas de la línea.

- Perfil longitudinal

La medida del perfil longitudinal debe realizarse siguiendo el eje de la línea eléctrica. Debe realizarse el número de medidas necesarias para caracterizar la línea en el tramo objeto de interés. Los puntos a medir deben ser los suficientes para determinar la variación del campo con la distancia. Se recomienda trazar los perfiles del campo para determinar si se ha obtenido un detalle adecuado.

- Perfil transversal

Para la medida del perfil transversal de un vano debe medirse en intervalos seleccionados, cada 50 cm hasta 1 m y posteriormente cada 1 m hasta los 5 m como mínimo, en la dirección normal a la línea, a partir del punto de máximo campo encontrado y a ambos lados de la misma y a 1 m del nivel del suelo.

Por tanto, los intervalos mínimos recomendados deben ser:

0 cm – 50 cm – 1 m – 2 m – 3 m – 4 m – 5 m

Los puntos de medida deben referenciarse de manera inequívoca y como se estime oportuno, ya sea mediante un plano, croquis o foto.

6.4.5.3 Informes de las medidas del campo

Debe consignarse la información sobre el entorno, como: condiciones ambientales (por ejemplo, temperatura, humedad, vegetación), parámetros de la línea eléctrica (por ejemplo, tensiones y corrientes de la línea, geometría de los conductores, lugar de medida) e instrumentación utilizada.

En el **Apéndice III** se muestra un ejemplo típico de hoja de datos del entorno para medidas de campos en líneas eléctricas. Dependiendo de los objetivos de la medida puede ser necesaria más o menos información. Se recomienda trazar los gráficos de campos magnéticos y eléctricos (cuando éstos también se midan). También se recomienda una vista plana en planta para aportar más detalles de las condiciones ambientales y los parámetros de la línea.

El informe debe constar como mínimo de los siguientes datos para poder evaluar correctamente los resultados:

- **Línea eléctrica**
 - o Descripción
- **Antecedentes**
 - o Peticionario del informe
 - o Motivo u objeto de la medida
- **Receptores. Entorno**
 - o Localización
 - o Lugares de medida
- **Equipo de medida**
 - o Marca, modelo, tipo, número de serie

- o Última calibración
- o Otros equipos

- Datos de la medida

- o Tablas del registro de las medidas
- o Observaciones, incidencias, etc.

- Valoraciones de referencia/Recomendaciones de exposición

6.5 Valoración de la exposición a los campos eléctricos

La valoración de la exposición a los campos eléctricos es generalmente más compleja y difícil que para los campos magnéticos, además de estar menos desarrollada. Todas las dificultades encontradas en los estudios de exposición a los campos magnéticos, discutidas en apartados anteriores, también se aplican a los campos eléctricos. Además, como ya se ha dicho, los campos eléctricos son perturbados fácilmente por cualquier objeto conductor, incluyendo el cuerpo humano. Aunque la mayoría de los estudios que han evaluado los campos eléctricos han pretendido analizar el “campo eléctrico sin perturbar”, la presencia de objetos en el entorno se traduce en una perturbación y, por tanto, en un análisis de exposición a campos perturbados. Por tanto, ya que el cuerpo humano actúa como una perturbación para los campos eléctricos, el concepto de exposición personal es difícil de definir, y las lecturas que se obtengan por un medidor acoplado al cuerpo serán fácilmente perturbables, incluso en función de la localización del medidor en el cuerpo.

Un número determinado de estudios sobre la exposición de campos magnéticos y eléctricos ha incluido medidas sobre el campo eléctrico en hogares. Algunos de estos estudios han consistido en la inclusión de medidores acoplados al cuerpo durante periodos de 24 y 48 horas, mientras que otros consistieron en mediciones puntuales en determinadas zonas; también se han comparado medidas de viviendas cercanas a líneas de distribución de energía con otras que se encuentran a mayor distancia.

En cada uno de los estudios se presentan datos tanto para controles como para casos. En [30] se realizó una monitorización continua y se obtuvo que la exposición media del campo eléctrico en los hogares para los controles era de 16 V m^{-1} para el 90 % del grupo estudiado.

En estudios anteriores [2], se realizaron medidas puntuales en el centro de salas de control, obteniendo valores medios entre 7.9 V m^{-1} y por debajo de 9 V m^{-1} . En [31] se realizó un estudio a partir de monitorizaciones de la exposición personal en un tiempo de 48 horas, obteniendo unos valores medios de 12.2 V m^{-1} . Sin embargo, no se hizo ninguna distinción sobre si la exposición era en el hogar o en otras zonas. En otros estudios, como

en [32], también se han realizado monitorizaciones en habitaciones específicas dentro del hogar, como salas de estar y dormitorios.

6.6 Evaluación de la exposición: conclusiones

Los campos magnéticos y eléctricos existen en cualquier lugar donde la electricidad se genere, se transporte o se distribuya mediante líneas de transporte o cables, o se utilice por dispositivos. Ya que el uso de la electricidad constituye una parte integral de nuestras vidas, podemos considerar a estos campos como presentes en nuestro entorno.

Los estudios, junto con los métodos de medida empleados, han determinado que la exposición residencial a los campos magnéticos generados a frecuencias de transporte de energía (50 y 60 Hz) no varía de forma drástica (considerando el marco de los países desarrollados y donde se han llevado a cabo los principales estudios), tal y como se comentó en el **Apartado 3.3.2**. En cuanto a la exposición laboral, comentada en el **Apartado 3.3.1**, también se basa en los mismos métodos, donde se encontraron diferencias significativas en función del tipo de profesión. Los métodos de medida expuestos son la base de los estudios realizados sobre los niveles de exposición en puestos de trabajo, en zonas urbanas, y en zonas residenciales; su adecuada aplicación será la que proporcione medidas fiables.

Se han visto métodos que permiten estimar, de forma poco precisa, los niveles de exposición en función de la distancia a la principal fuente generadora (líneas de transporte de energía), y de registros de historiales, como la corriente que circula por la línea más cercana. Otros métodos, a partir de instrumentos de medida adecuados, permiten medir la contribución total de las fuentes generadoras, en un entorno específico, como pueden ser los dispositivos eléctricos en el hogar y el campo magnético presente en el entorno (*background field*), que también engloba al campo generado por cualquier línea de transporte, en dicho entorno.

Una combinación de ambos métodos, junto con el cálculo de estadísticos (media, mediana, media geométrica...) nos permitirá definir el nivel de exposición para cada caso, y establecer de forma clara las contribuciones, a modo de dosis ($\mu\text{T-año}$), del campo magnético presente en distintos entornos, y en distintos momentos, de un trabajador, o de cualquier individuo en diferentes situaciones.

En el siguiente capítulo se muestran algunos conceptos básicos de los instrumentos de medida de campos ELF.

Capítulo 7

Instrumentos de medida

7.1 Introducción

En este capítulo se comentan algunas características, desde un punto de vista general, sobre los instrumentos de medida para campos magnéticos y eléctricos ELF.

Si bien es cierto que existen protocolos para realizar la medición de campos ELF para las líneas de transporte de energía, como el estándar IEEE Std 644-1994: *IEEE Standard Procedures for Measurements of Power Frequency Electric and Magnetic Fields From Ac Power Lines* [39], o la norma UNE 215001:2004 “*Procedimientos normalizados para la medida de los campos eléctricos y magnéticos de frecuencia industrial producidos por las líneas eléctricas de alta tensión*” [94]; no existe un estándar unificado y desarrollado por un organismo internacional, que proporcione un procedimiento específico para la medida y valoración de los niveles límite de exposición de campos ELF que establecen las recomendaciones actuales, aunque, como se ha comentado en otros capítulos, se encuentra en desarrollo el estándar IEEE Std PC95.3.1™, “*Recommended Practice for Measurements and Computation of Electric, Magnetic and Electromagnetic Fields With Respect to Human Exposure to Such Fields, 0 – 100 kHz*” [q], cuyo tiempo de desarrollo finaliza en diciembre de 2008. En esa misma propuesta de desarrollo se hace referencia al estándar IEEE Std 1460-1996: “*IEEE Guide for the measurement of Quasi-Static Magnetic and Electric Fields*” [90], ratificado en junio de 2008, y que, aunque no trata de forma directa la evaluación de los niveles de exposición ELF en los seres humanos, sí establece unas pautas iniciales muy relacionadas, con objetivos y métodos (caracterización de parámetros del campo magnético), que servirán de base para el desarrollo del estándar IEEE Std PC95.3.1™.

Por otra parte, según UNESA, a partir de mediados de 2008 (tiempo en el que se ha realizado el este documento) podría surgir una nueva norma de carácter europeo¹⁹.

¹⁹ Consulta realizada con UNESA

Además, hay que tener en cuenta las posibles ratificaciones por parte de AENOR de normas que irán surgiendo a lo largo del tiempo, referentes a la valoración de campos de baja frecuencia.

Para el calibrado de los equipos de medida puede utilizarse, como por ejemplo se hizo en el estudio realizado por Paniagua [46], la norma ISO 9001:1994 "*Quality Systems (1994) Model for quality assurance in design, development, production, installation and servicing*", actualmente sustituida por la norma ISO 9001:2000 "*Quality Management systems – Requirements*".

Dicho esto, podemos decir que los métodos de medida descritos en el **Capítulo 6**, la instrumentación comentada en este capítulo, junto con un protocolo de medición estandarizado, conformarán el conjunto de elementos necesarios para realizar mediciones fiables y verificar si se cumplen los límites de exposición.

A continuación se explican algunas nociones generales sobre los instrumentos de medida de campos ELF.

7.2 Conceptos generales de medida

Los primeros instrumentos comerciales de medida se diseñaron específicamente para la medición de campos de frecuencias de 50-60 Hz. Actualmente existe una gama más amplia de dispositivos con diferentes características, como son las siguientes [a]²⁰:

- **Número de ejes de detección:** Los sensores no evalúan directamente el campo resultante en una dirección específica en el espacio, sino generalmente una de las componentes. Un medidor puede tener un único sensor y, si dicho sensor está alineado con la dirección del campo máximo, proporcionará la lectura para una única dirección. Si por otro lado, el medidor tiene tres sensores ortogonales entre sí (pensemos en un sistema de coordenadas cartesiano de 3 ejes, donde cada sensor seguiría un eje), el campo resultante (valor resultante) puede obtenerse de las medidas de los tres ejes a partir de la siguiente ecuación:

$$\text{Campo} = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} \quad (7.1)$$

El valor de la ecuación anterior es independiente de la orientación del medidor, simplificando así el uso del mismo.

²⁰ www.emfs.info/what_instruments_detail.asp

- **Parámetros usados para la medida del campo:** Existen varios parámetros de medida, como el valor de pico, media rectificadora, valor cuadrático medio o eficaz (root mean square, rms). Para una única frecuencia, como una onda senoidal pura, a partir de una de las medidas anteriores es posible inferir un valor bastante preciso de las otras (mediante cálculos computacionales); pero cuando las señales no son senoidales, debido a la presencia de armónicos, o porque la forma de onda es diferente, esto no es posible. Por otra parte, la base científica no es suficiente para poder concluir qué parámetro es el más importante. Algunos medidores registran la forma de onda completa, para futuras investigaciones, pudiéndose calcular a partir de la misma varios tipos de parámetros. En el **Apartado 7.3** se discute la caracterización de varios parámetros del campo magnético.
- **Respuesta en frecuencia:** los medidores de campos pueden ser sensibles a sólo ciertas frecuencias, como por ejemplo las frecuencias de transporte de energía (50-60 Hz), o a un rango de frecuencias concreto. Si son sensibles a un rango de frecuencias, la respuesta a éstas puede ser proporcional o plana. Por regla general, una respuesta plana entre 20-30 Hz y unos pocos de kHz suele ser suficiente para varios propósitos de toma de medidas. También, a la hora de tomar medidas en un rango concreto, los medidores utilizan filtros pasa-banda (**Figura 7.1**), para eliminar frecuencias de señales no deseadas (ruido), especialmente para el cálculo del valor eficaz. Esta opción dependerá de la calidad del tipo de medidor.

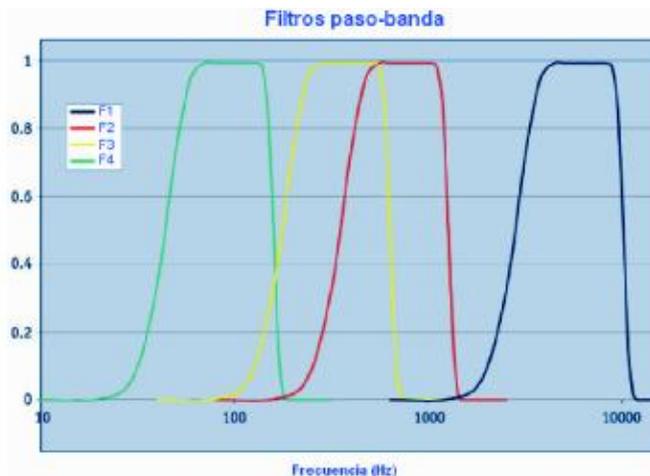


Figura 7.1 Filtros paso-banda (modificada de [t])

- **Tamaño de los sensores:** los sensores pueden ser pequeños (de unos pocos milímetros), y por tanto capaces de analizar las variaciones de los campos en distancias relativamente pequeñas. Sin embargo, en muchas ocasiones puede ser deseable utilizar sensores de mayor tamaño para medir el campo medio en un

área determinada. A modo de ejemplo, la **Figura 7.2** muestra una sonda, en este caso para medición de campos magnéticos.



Figura 7.2 Sonda de medición [t]

- **Lectura y registro:** los medidores pueden tener visualizadores digitales o analógicos. Puede que sólo puedan mostrar un valor en tiempo real, o tengan la capacidad de almacenar los valores con una precisión determinada, además de calcular varios parámetros (medias, valores máximos...). Un ejemplo de visualizador se muestra en la **Figura 7.3**.



Figura 7.3 Pantalla digital de un medidor de campo magnético [t]

Una vez dadas las características generales de un medidor, también existirán diferencias en tamaño, peso, consumo de energía, precisión de la medida, etc... Algunos medidores son adecuados para temas de investigación y estudios detallados, mientras otros más simples serán suficientes para ciertas aplicaciones, como por ejemplo ir acoplados en voluntarios durante un período de tiempo determinado. No existe “el mejor” o “el peor” medidor, sino el más adecuado, lo que dependerá del tipo de aplicación. Se pueden tener medidores de mano, o una estación de medición (**Figura 7.4**); la primera puede ser más útil para realizar medidas puntuales; y la segunda para tomar un registro de los campos ELF a lo largo de un período determinado.



Figura 7.4 Estación de medición y medidor de mano

7.2.1 Medida de los campos magnéticos

Existen varios tipos de sensores para el campo magnético, entre los que podemos citar:

- Bobinas: los medidores más simples miden el voltaje inducido en una bobina. Para un campo magnético que varíe de forma senoidal, a una frecuencia f , la tensión inducida V viene dada por:

$$V = -2\pi f B_0 A \cos(\omega t) \quad (7.2)$$

, donde

$\omega \rightarrow$ frecuencia angular del campo, definida por $\omega = 2\pi f$

$A \rightarrow$ área transversal de la bobina

$B_0 \rightarrow$ componente del campo magnético perpendicular a la sección transversal de la bobina

$f \rightarrow$ frecuencia del campo magnético

El voltaje inducido por un campo en el interior de la bobina aumenta al haber mayor número de espiras, o con la presencia de un núcleo ferromagnético. Para evitar posibles interferencias, la sonda (sensor) de campo magnético debe apantallarse. Si el medidor se utiliza para medidas de exposición personal, deberán filtrarse frecuencias menores

de 30 Hz para evitar tensiones inducidas en la sonda, debidas al movimiento de la misma respecto al campo geomagnético. Se pueden distinguir los siguientes tipos de sensores:

- **Magnetómetro (*fluxgate magnetometer*):** este tipo de sensor detecta el campo magnético realizando un ciclo de saturación magnética a un material ferromagnético (magnetización, desmagnetización, magnetización inversa, desmagnetización, magnetización). Son sensores que suelen tener una respuesta plana en el rango 0-3 kHz (para el caso ELF) [v].
- **Dispositivos de efecto Hall:** este tipo de sensores se basan, como su nombre indica, en el efecto Hall. Este efecto consiste en la inducción de una tensión (aparición de un campo eléctrico) en un material conductor cuando por éste circula una corriente y además se encuentra en una región donde hay un campo magnético presente. Por tanto, a partir de la tensión inducida es posible determinar el campo magnético.

De acuerdo con [a]²¹, la mayoría de los instrumentos para la medida de campos en frecuencias de transporte de energía utilizan bobinas como sensor, bien una, o tres distribuidas de forma ortogonal. Las bobinas se hacen lo más pequeñas posible, con un núcleo ferromagnético para aumentar la sensibilidad, siendo esto importante en el análisis de exposiciones personales donde el tamaño y el peso son dos características críticas. También pueden ser mayores, para proporcionar mayor sensibilidad y proporcionar valores medios en un espacio determinado. En el estándar IEEE Std 1460-1996TM [90] se comentan características similares, donde se especifica que se han desarrollado medidores de tamaño reducido y con sensores de tres ejes para la realización de estudios de exposición humana. Otro aspecto que se comenta es la posibilidad de realizar medidas de campo magnético manteniendo la sonda de medición cerca del cuerpo humano, sin provocar esto algún efecto por proximidad en la medida.

7.2.2 Medida de los campos eléctricos

Si bien existen medidores de campo eléctrico de tres ejes (**Figura 7.5**), el más común es de un solo eje. Esto se debe a que existe una mayor dificultad para construir medidores de tres ejes para el campo eléctrico que para el campo magnético. Además, las medidas se suelen realizar cerca de tierra o con proximidad a líneas de transporte, donde el campo eléctrico está polarizado linealmente (el vector de campo eléctrico varía en una única dirección) y en una dirección conocida (vertical), por lo que un único sensor es suficiente. No obstante, esto también va a depender del rango de frecuencia del sensor y del fabricante.

²¹ www.emfs.info/what_Instruments.asp



Figura 7.5 Sonda de medidor de campo eléctrico de 3 ejes [u]

Una persona que porte un medidor de campo eléctrico puede perturbarlo [29]. Para medir el campo no perturbado, el medidor se suspende en un trípode no conductor o en alguna plataforma que permita aislarlo de cualquier conducción. La medida se hace a distancia mediante una pantalla adecuada, grabando los datos para futuros análisis, o transmitiéndolos a un dispositivo de lectura por fibra óptica. Esto puede reducir las perturbaciones a niveles aceptables. Sin embargo, dada la facilidad de perturbar a los campos eléctricos, es probable que se realicen medidas erróneas, especialmente cuando se dan las siguientes situaciones:

- Temperaturas extremas en el ambiente.
- Distancia insuficiente entre la sonda y el investigador.
- Inestabilidad de la posición del medidor.
- Algún camino de conducción con el medidor.

Los campos eléctricos también se miden en localizaciones fijas, como por ejemplo bajo líneas de transporte o en cabinas de laboratorio. Una posible forma de calcular el campo eléctrico es mediante la medición de la corriente total inducida en una placa conductora, a nivel de tierra. Para campos senoidales, la densidad de flujo eléctrico se puede calcular a partir del área de la placa (A), la permitividad en el vacío (ϵ_0 , $8.8542 \cdot 10^{-12}$ F/m), la frecuencia (f) y la corriente inducida en la placa (I_{rms}), a partir de la siguiente ecuación:

$$E = \frac{I_{rms}}{2\pi f \epsilon_0 A} \quad (7.3)$$

También existen medidores para la exposición personal del campo eléctrico. Sin embargo, como se ha dicho, el llevar un medidor acoplado al cuerpo perturba el campo eléctrico a medir de formas no predecibles [a]. Normalmente, cuando se ha medido la ex-

posición a los campos eléctricos en un conjunto de individuos, el medidor se ha situado en el antebrazo, o con algún tipo de enganche al cinturón. Las perturbaciones al campo producidas por el cuerpo hacen que no sea posible obtener un valor absoluto, y, como mucho, será posible obtener valores medios que puedan evaluar de forma relativa los niveles de exposición.

7.3 Recomendaciones de la norma IEEE Std 1460-1996™

En la recomendación IEEE Std 1460-1996™ [90] se establecen unas pautas iniciales para valorar la exposición humana desde diferentes puntos de vista, a partir de la caracterización ciertos parámetros del campo magnético, como la intermitencia del campo, polarización, frecuencia, etc... Si se quiere establecer un protocolo de medida, es muy importante determinar desde el principio, de forma clara, los parámetros que se quieren medir y sus características, ya que de ello van a depender los requerimientos de instrumentación del equipo necesario, como son el rango de frecuencias, resolución, etc... Una vez que se han identificado claramente los objetivos, y se ha adquirido la instrumentación adecuada, es recomendable realizar un estudio piloto en la zona de medida de interés, antes de aplicar los métodos definitivos. El protocolo debe indicar de forma explícita las características de la instrumentación empleada, la localización de las medidas realizadas, etc..., de las cuales se hablará más adelante. Una vez hecho esto, debería ser posible poder comparar resultados, de forma fiable, en localizaciones con similares entornos eléctricos (por ejemplo, dos subestaciones eléctricas).

A continuación se muestran posibles objetivos junto con los métodos recomendados por [90], siendo el último de los mostrados la caracterización de la exposición humana a los campos magnéticos.

- Caracterización de los niveles de campo magnético:

Objetivo: Las recomendaciones sobre los niveles de exposición (vistas en el **Capítulo 5**) establecen límites de valores máximos de campo magnético, necesiándose la determinación de conocer los niveles de campo en áreas específicas.

Método: Se deben utilizar medidores de un solo eje para realizar mediciones puntuales del valor máximo del campo, y de tres ejes para medir el campo magnético resultante. La diferencia entre el valor máximo y el resultante (ecuación 7.1) puede ser como mucho del 41% [90]. Existen recomendaciones específicas para la medida cerca de líneas de transporte de energía (IEEE Std 644-1994 [39] o la norma UNE 215001:2004) y para pantallas de visualización de datos (IEEE Std 1140-1994™). Medidas en puntos específicos cerca de líneas de transporte pueden estar relacionadas con las corrientes de carga, y podría ser posible estimar los valores de campo magnético para diferentes valores de corriente. Las corrientes de carga de las aplicaciones son constantes, o describen una

variación cíclica en un tiempo corto, permitiendo la determinación del valor máximo o resultante del campo magnético con la realización de pocas medidas.

Si se requiere la medición del campo magnético en emplazamientos alejados de líneas de transporte o de fuentes específicas, las medidas puntuales ya no caracterizan de forma adecuada los niveles de campo, porque no describen adecuadamente las variaciones temporales. Para estos casos, es recomendable utilizar medidores con capacidad de almacenamiento, realizando las medidas en puntos de interés y durante un periodo de tiempo que se considere suficiente, para capturar la mayoría de las fluctuaciones de campo magnético que se puedan dar. Por ejemplo, en un conjunto de viviendas, se podrían realizar medidas de 24 horas repetidas en las distintas estaciones del año.

- Caracterización de variaciones espaciales:

Objetivo: La distribución espacial del campo magnético en entornos alejados de líneas de transporte de energía o alguna fuente en específico es, generalmente, desconocida. En la mayoría de estos entornos, como por ejemplo puede ser una habitación de una vivienda, los campos magnéticos variantes en el tiempo (como es el caso ELF) no presentan uniformidad en el espacio debido a la dependencia de la distancia respecto a las principales fuentes emisoras.

Método: Las medidas de variaciones espaciales de campo magnético en zonas alejadas de líneas de transporte de energía requieren la medida en función de la posición, proporcionando sus coordenadas. Existen estándares para llevar a cabo tales medidas cerca de las líneas de transporte (IEEE Std 644-1944TM [39] o la norma UNE 215001:2004), o cerca de pantallas de visualización (IEEE Std 1140-1994TM [92]). Mientras que tales medidas se pueden realizar con medidores de mano, una opción aconsejable consiste en utilizar una "rueda medidora de distancias" o algún tipo de vehículo móvil con capacidad de medir distancias, acoplado con el equipo medidor de campos magnéticos. Conforme la rueda rota o el vehículo avanza, se ejecuta una medida a una distancia determinada, almacenando el valor resultante del campo magnético a una altura fija respecto al suelo. Con esta instrumentación y el software apropiado es posible obtener gráficas del campo en función de la distancia, realizar análisis estadísticos de los niveles de campo, etc... En el **Apartado 7.4** se muestra un ejemplo.

Si se considera el caso anterior, las medidas realizadas no capturarán la variación temporal del campo, a no ser que se repitan varias veces.

- Caracterización de variaciones temporales

Objetivo:

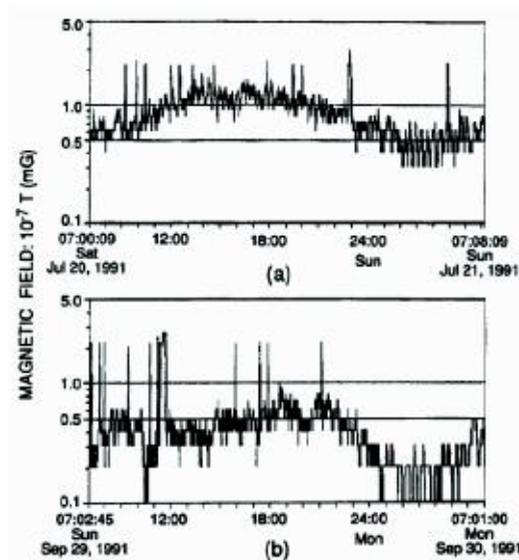
Debido a que los campos magnéticos se producen por la corriente, las variaciones temporales pueden exceder fácilmente el 100 %. Por ejemplo, en la **Figura 7.6** se muestran

las medidas de campo magnético realizadas en dos días diferentes (dos periodos de 24 h), tomadas en el centro de la sala de estar de una vivienda, localizada en un área metropolitana. Durante estos dos días las corrientes de demanda variaron significativamente debido a las condiciones del tiempo y el uso del aire acondicionado en las viviendas y zonas de trabajo cercanas, así como la propia vivienda. Se tomaron las medidas cada 15 s, a una altura de 1 m sobre el suelo, y con una banda pasante adecuada para caracterizar la frecuencia fundamental y los posibles armónicos presentes. La primera gráfica de la **Figura 7.6** muestra la medida obtenida durante un día caluroso y húmedo, donde se presupone el uso de equipos de aire acondicionado. La segunda gráfica muestra las medidas obtenidas de un día más fresco y seco, comprobándose un valor medio de la mitad del observado en el día caluroso y húmedo (ver las líneas de referencia). Estos datos representan un indicativo de lo que puede ocurrir cuando hay variaciones importantes en las corrientes de carga. Además, el movimiento de objetos ferromagnéticos (como pueden ser los automóviles y los camiones) cerca de la zona de medida puede producir variaciones de corta duración del campo magnético.

Método:

Existen medidores de uno y tres ejes con conexiones que permiten el uso combinado con otros dispositivos para almacenar los datos de campo magnético medidos a lo largo del tiempo. También se pueden utilizar medidores de exposición de tres ejes y dispositivos que capturan la forma de onda del campo magnético. Debido a la dependencia del campo magnético con las corrientes de carga (que pueden variar durante el día, semana, o estación), la dificultad se encuentra en determinar el intervalo necesario entre los registros de medida, de forma que se consigan capturar suficientes variaciones de campo, para obtener una descripción estadística válida. Un estudio piloto en el entorno donde se quiere realizar la medida puede ser útil para valorar la elección del tiempo entre muestras.

También, deberían tenerse en cuenta otras consideraciones cuando las medidas se realizan en sistemas de transporte eléctrico, como puede ser un tren, o en áreas donde existan motores de velocidad variable. Por ejemplo, en el metro, el campo magnético puede estar directamente relacionado con la velocidad del vehículo.



(a) Día caluroso y húmedo
(b) Día fresco y seco

Figura 7.6 Medida de campo magnético en un periodo de 24 h [90]

- Caracterización del valor medio ponderado en el tiempo (TWA)

Objetivo:

Varios estudios, tanto ocupacionales como epidemiológicos de cáncer infantil, han examinado la posibilidad de los efectos para la salud de la exposición a los campos ELF producidos por líneas de transporte, y consideran que al valor medio ponderado en el tiempo (TWA) del campo magnético como el parámetro candidato para establecer una "dosis de exposición" o "medida de exposición". En cualquier caso, la determinación de este parámetro se considera un punto relevante.

Método:

Para medir el TWA de forma directa se pueden utilizar medidores de exposición de tres ejes que se puedan acoplar en la vestimenta de una persona, y que calculen la integral del campo magnético a lo largo del tiempo [90]. Otros medidores de exposición que registran el valor de campo magnético de forma periódica también pueden utilizarse para determinar el TWA del campo magnético, a partir de análisis de los datos registrados. Se han realizado también estimaciones del TWA anual de campo magnético en residencias, a partir de mediciones de las corrientes en líneas de transporte y la localización de la residencia respecto a dichas líneas [11]. Sin embargo, este último enfoque no tiene en cuenta las contribuciones de fuentes locales.

- Caracterización de la intermitencia del campo magnético

Objetivo:

Existen estudios que indican que la intermitencia de la exposición a los campos magnéticos de 50/60 Hz puede tener un mayor efecto en la provocación de ciertas respuestas biológicas que los campos estáticos [92]. Estos estudios sugieren que ciertos índices de picos y bajadas de los niveles de campo magnético pueden ser una característica relevante del campo que debería ser cuantificada.

Método:

Para conseguir caracterizar la intermitencia del campo deberían utilizarse aquellos medidores que permiten registrar el campo magnético de forma periódica. Lo que no queda claro es con qué frecuencia deberían tomarse las medidas, o entre qué intervalos de tiempo deben promediarse los valores de campo. Por ejemplo, las medidas tomadas cada 15 s en el ejemplo de la **Figura 7.6** mostrarán, en general, mayores fluctuaciones que si se hubiera realizado una medida por hora. En función de los datos disponibles, pueden calcularse diferentes índices de fluctuaciones, como pueden ser el número de picos, número de bajadas utilizando 1 min entre muestras, utilizando 2 min, etc...

- Caracterización de la incidencia y duración de los niveles de campo que exceden un valor específico

Objetivo:

Generalmente, los modelos que tratan de predecir los efectos biológicos suponen que existe un valor límite de un agente, por debajo del cual, si éste se aplica, no se produce el efecto biológico en estudio. De forma similar se pueden estudiar los posibles efectos de exposición a los campos magnéticos en los seres humanos.

Método:

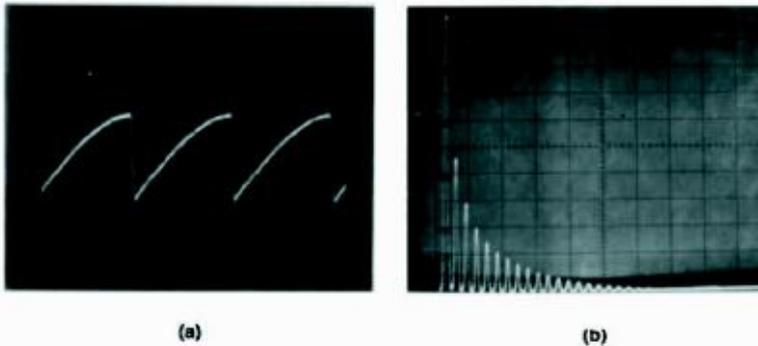
Para este objetivo se pueden utilizar los medidores que registran de forma periódica el campo magnético. La elección de qué nivel de campo se utiliza como valor límite puede requerir la consulta de expertos en la temática de efectos biológicos. Como en el caso anterior, los resultados pueden depender del intervalo de tiempo entre medidas tomadas.

- Caracterización del contenido armónico de un campo magnético:

Objetivo:

Generalmente, los campos magnéticos generados por dispositivos electrónicos contienen armónicos (concepto explicado en el **Capítulo 3**), y los límites de campo mag-

nético se suelen establecer en función de la frecuencia, como por ejemplo los propuestos por las recomendaciones de ICNIRP e IEEE C95.6TM. Por tanto, un análisis en frecuencia puede ser un punto importante a tener en cuenta. Un ejemplo de campo magnético “rico en armónicos” y producido por una aplicación eléctrica común se muestra en la **Figura 7.7:**



- a) Forma de onda del campo magnético generado por una televisión de 26 pulgadas medida a 60 cm de distancia. Valor rms de $0.17 \mu\text{T}$, escala vertical = $0.2 \mu\text{T}/\text{div}$, escala horizontal = $5 \text{ ms}/\text{div}$.
 b) Espectro en frecuencia normalizado de la forma de onda de a), escala horizontal = $200 \text{ ms}/\text{div}$.

Figura 7.7 Campo magnético con armónicos [90]

Método:

En muchas ocasiones, los medidores de campo magnético comerciales de uno y tres ejes, disponen de conexiones de salida que proporcionan la señal capturada por la sonda de forma íntegra. Instrumentación con estas características, en combinación con analizadores de espectro, puede utilizarse para caracterizar los componentes en frecuencia del campo magnético. Como alternativa, la instrumentación que captura la forma de onda también puede disponer de software que permite obtener el espectro en frecuencia de la onda capturada. Es importante destacar que el contenido armónico generado por equipos de velocidad variable puede cambiar en función de la velocidad (un tren, un motor, etc...).

- Caracterización de la polarización del campo magnético:

Objetivo:

Una completa caracterización del campo magnético requiere la determinación de su polarización para una frecuencia dada. La polarización del campo magnético puede ser de interés dentro del contexto de la exposición humana porque, por ejemplo, campos magnéticos con diferente polarización pero igual valor resultante pueden inducir en tejidos biológicos campos eléctricos y corrientes significativamente distintas. En [90] se explica el concepto de polarización y los casos que pueden darse. En la recomendación IEEE Std 1308-1994TM [93] se entra en mayor grado de detalle.

Método:

Pueden utilizarse medidores de uno o tres ejes (en este caso los que proporcionan medidas individuales por eje) junto como equipos con capacidad de capturar la forma de onda. De esta manera es posible medir el valor rms máximo y mínimo del campo magnético (cada uno ocurren en una dirección específica), siendo entonces posible determinar la polarización en un punto específico en el espacio. Hay que destacar que mediante este procedimiento se asume la medición de una sola componente de frecuencia del campo magnético. Considerando la presencia de otras frecuencias, el análisis se vuelve más complejo.

- Caracterización de la exposición humana al campo magnético:

Objetivo:

Este importante objetivo se ha puesto al final para primero describir los parámetros de campo magnético que pueden ser de interés, desde el punto de vista de la exposición humana, y que se han contemplado en los casos anteriores.

Método:

Debe realizarse una clara distinción entre uno o más parámetros del campo magnético y la exposición a estos parámetros. La mejor forma de alcanzar este objetivo es utilizando un pequeño medidor de campo que registre periódicamente el/los parámetros de interés en una parte determinada del cuerpo. La estimación de la exposición humana a un parámetro dado en un área específica puede realizarse a partir de la combinación de medidas de variación temporal y espacial del parámetro, e información sobre la actividad humana realizada en el área en cuestión. Este enfoque no es válido para exposiciones que ocurren fuera del área donde se haya caracterizado el campo.

Pueden utilizarse medidores comerciales de tres ejes que se pueden acoplar fácilmente en la vestimenta de una persona. De esta forma es posible registrar periódicamente el campo magnético resultante, varias veces a lo largo del tiempo, incluso hasta en diferentes días, dependiendo de la frecuencia de muestreo del medidor, la capacidad de almacenamiento, y la duración de la batería. Posteriormente, descargando los datos almacenados a un ordenador, y mediante un software específico, se puede determinar los parámetros descritos en los apartados anteriores.

Se pueden estimar exposiciones pasadas en áreas específicas a partir de las medidas obtenidas en personas que realicen actividades similares. Esta asunción presupone que el nivel de campo magnético presente en una zona estudiada es similar al que había en dicha zona en un tiempo anterior, o que no ha variado de forma significativa.

7.4 Ejemplos de valoración y medidas de exposición

A continuación se muestra un posible “informe tipo” de medición y valoración de niveles de exposición de campos ELF en un entorno determinado, basado en casos de valoración reales realizados por Endesa²². Se comentan desde un punto de vista general los diferentes apartados de los que debe constar un informe de medidas, así como el tipo de mediciones que pueden ser necesarias, según el caso:

- Introducción

Se trata simplemente de clarificar el objeto y la causa de haberse realizado el informe (estudio de una instalación, valores que provoca dicha instalación en un entorno cercano, etc...)

- Equipo empleado

En este apartado se describen las características del equipo empleado para las mediciones. En este caso, un medidor de campo magnético puede ser el de la **Figura 7.8**. En el informe se debe explicar brevemente su funcionamiento, por ejemplo de la siguiente forma:

“Dicho equipo permite la medida continua del campo magnético en sus tres componentes geométricas ortogonales separadas, o bien como la resultante de las mismas, y mediante una selección de frecuencias es posible la medida de armónicos o de la componente fundamental a 50 Hz. El muestreo, programable, almacena las lecturas en una memoria interna para después volcar los datos a un ordenador tipo PC o compatible, el cual mediante el software apropiado puede proporcionar las estadísticas y gráficos oportunos, como análisis descriptivos, geométricos, percentiles y dosimetrías, y gráficas de intensidad de campo frente a tiempo, histogramas, curvas acumulativas, etc., así como conversión de ficheros para uso en otros programas comerciales de bases de datos y hojas de cálculo”.



Figura 7.8 Dos ejemplos de medidores

²² Entrevista concedida por D. Rafael Pacheco Panizo. Dirección de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible de Endesa.

Se deben aportar las características más importantes del equipo, y que también figurarían en el informe. Pueden ser las siguientes:

Tabla 7.1 Características técnicas tipo de un medidor de campos ELF

| Características generales de un medidor de campos | |
|--|---|
| Dimensiones del equipo | En cm |
| Peso (sin batería) | En g o Kg |
| Rango de temperatura de operación | En °C |
| Rango de humedad de operación | En % |
| Alimentación | Tipo de batería utilizada, duración, etc... |
| Rango de Medida | En unidades de Gauss o Tesla (nT, μ T, mG...) |
| Rango de frecuencia | En Hz o kHz, por ejemplo 5 Hz – 100 kHz |
| Modos de operación | Datos almacenados en memoria o datos sólo mostrados en pantalla, etc... |
| Tipos de datos | Datos proporcionados (valor pico, valor rms, armónicos, análisis FFT...) |
| Memoria | Tipos de memorias disponibles (memoria RAM interna, tarjetas SD, etc...) |
| Intervalo de muestreo | Tiempo entre muestras tomadas |
| Sensores | Tres bobinas sensibles al campo magnético orientadas ortogonalmente |
| Resolución A/D | % a escala completa |
| Rechazo de Campos de Baja Frecuencia | Capacidad de rechazo mediante filtros cuando se requiera considerar una banda de frecuencias específica... |
| Distorsión Total de Armónicos | En % |
| Precisión de Medida | Incertidumbre de la medida en % o dB |
| Resolución | En nT o mG generalmente |
| Método de Medida | Forma de medida según el tipo de sensor (Raíz cuadrática media de las componentes ortogonales, medida isotrópica a partir de un solo eje, etc...) |

Lógicamente, dependiendo del equipo se especificarán otras características, como los interfaces y comunicaciones de los que dispone (USB, puerto serie, GPS, GPRS...), sensores integrados (de temperatura, de humedad...).

Estos equipos deben calibrarse cada cierto tiempo, por un organismo oficialmente acreditado, encontrándose ajustado y en perfecto estado de funcionamiento.

- Realización de las medidas

En este apartado se especifican las características más relevantes existentes durante la realización de las medidas. Entre estas características deben estar necesariamente:

- o Ubicación de la fuente origen de la radiación y del punto de afección donde se realiza el estudio, indicando claramente dirección postal y situación física.

- o Identificación, mediante sus principales características técnicas, del foco que genera la radiación, incluyendo una descripción básica de la instalación.
- o Nivel de carga o parámetros de funcionamiento de la instalación en el momento de la medición.
- o Cualquier otro dato o situación que se estime relevante a efectos del informe, como puede ser la descripción de las actividades humanas durante la exposición, condiciones meteorológicas, etc...

- Medidas del campo magnético

Aquí se especifica el/los procedimientos seguidos para la realización de medidas, como pueden ser la norma UNE 215001:2004 "*Procedimientos normalizados para la medida de los campos eléctricos y magnéticos producidos por las líneas eléctricas de alta tensión*" (comentada en el **Capítulo 6**), o el "protocolo de medida de Campo Magnético" elaborado por UNESA en 1996. Un ejemplo podría ser:

- o *Residential EMF Measurement Protocol. EMF TAC Committee Convenor Residential Measurement Protocol Working Group. Australia.*
- o *Power Frequency Magnetic Fields: A Protocol for conducting spot Measurements in Residential Settings. The National EMF Measurement Protocol Group. Edison Electric Institute. EEUU.*
- o Protocolo de medidas de perturbaciones medioambientales de origen eléctrico generadas por las líneas aéreas de transporte de energía eléctrica. ASINEL. Proyecto PIE: PERMED 132.281-03
- o Protocolo ANSI / IEEE Std. 644

La especificación del método de medida debe quedar reflejada teniendo en cuenta las normas dadas, con un resumen de las principales cuestiones que se tienen en cuenta:

- o Ubicación del sensor para realización de las medidas respecto al suelo, paredes, elementos generadores de radiación, etc...
- o Hora y duración de las medidas realizadas.
- o Identificación clara de los puntos de medida (plano de situación)

Lógicamente, pueden darse otro tipo de casos que involucren otro tipo de medidas. Por ejemplo, la medición de los campos magnéticos generados por líneas de trans-

porte aéreas y subterráneas a lo largo de una vía pública, donde para conocer el nivel de intensidad de campo magnético será necesario realizar varios recorridos a lo largo de las líneas presentes, como puede ser justo debajo de la línea, en las fachadas de las viviendas más cercanas, etc... La pauta a seguir en estos casos sería similar a la anteriormente descrita identificando de forma clara los focos de radiación, y los puntos de toma de medidas.

Realizando un recorrido con el equipo a lo largo de las líneas se podrá obtener la densidad de flujo a lo largo de la distancia (en verdad se hace un recorrido con el medidor acoplado a un equipo móvil a velocidad constante, y la representación respecto al tiempo es equivalente a representar la medida respecto a la distancia). La **Figura 7.9** podría ser el resultado de un recorrido como el comentado anteriormente.

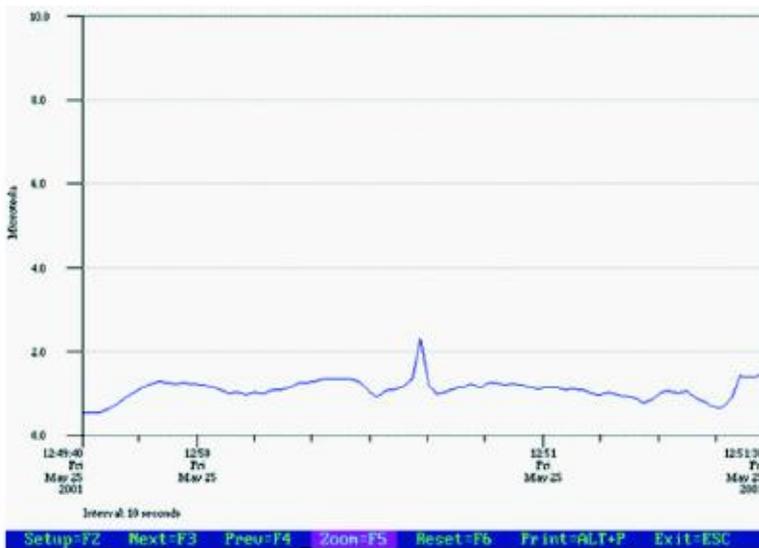


Figura 7.9 Medida realizada a lo largo de una línea de transporte

También se puede dar el caso de realizar la medición en un punto concreto durante 24 h, monitorizando los valores de campo presentes con larga duración, habiéndose elegido este punto bajo un criterio determinado, como puede ser aquél donde se haya detectado la máxima intensidad de campo magnético de un número de medidas puntuales realizadas previamente.

Las **Figuras 7.10** y **7.11** muestran un punto de medida seleccionado con el equipo midiendo, y la gráfica de intensidad de campo magnético respecto al tiempo:



Figura 7.10 Equipo midiendo

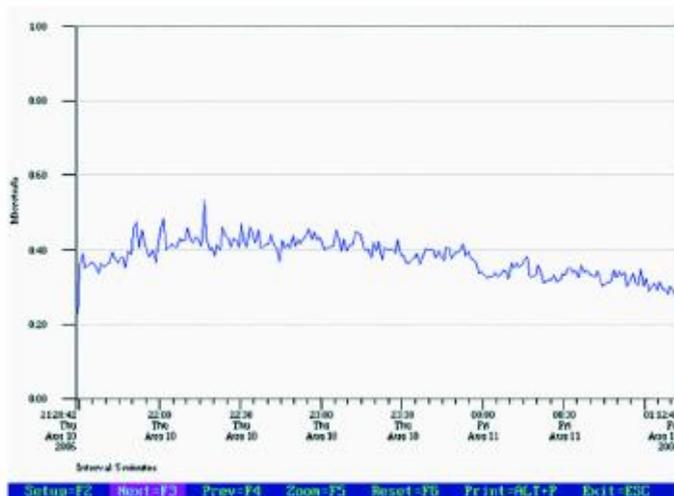


Figura 7.11 Gráfica de intensidad de campo magnético respecto al tiempo

Independientemente del caso, también es conveniente reflejar en el informe más información de las medidas, además de los gráficos y esquemas. Estos datos adicionales pueden ser la hora de comienzo y finalización de las medidas, el número de lecturas realizadas, parámetros como los comentados en el **Apartado 7.3** (valor medio, valor máximo, etc)... La **Tabla 7.2** muestra un ejemplo:

Tabla 7.2 Ejemplo de datos de medición

| Ejemplo de datos de medición | |
|------------------------------|---------------------|
| Comienzo de medidas | 10/08/2006 21:28:42 |
| Finalización de medidas | 11/08/2006 01:12:42 |
| Número de lecturas | 225 |
| Valor Mínimo | 0.23 μT |
| Valor Medio | 0.38 μT |
| Valor Máximo | 0.53 μT |
| Desviación Estándar | 0.05 μT |
| Mediana | 0.39 μT |

- Valores límite recomendados

En este apartado, se contrastan los valores obtenidos con los límites de exposición de la legislación vigente, o en su defecto, de las recomendaciones internacionales (como pueden ser los estándares ICNIRP e IEEE Std C95.6TM ya comentados en el **Capítulo 5**).

- Conclusiones

En base al apartado anterior se extraen una serie de conclusiones para concluir si los niveles de exposición obtenidos pueden provocar efectos perjudiciales para la salud. Las conclusiones deben resaltar, a modo de resumen, las circunstancias principales en que se realiza la medición, los valores alcanzados, y su significación en relación a la normativa de aplicación de los valores límite existentes.

Igualmente, pueden resaltarse las dificultades que hayan existido en la medición y cualquier otra información que se considere relevante.

- Apéndices

En este apartado se agregan los apéndices pertinentes. Uno que suele ser indispensable es el certificado de calibración del equipo de medición utilizado. Además, puede incluirse cualquier información adicional que se considere de interés (características técnicas de los focos de emisión, de equipos de medida, esquemas, normativa de aplicación, etc...)

7.5 Conclusiones

Básicamente, un instrumento de medida de campos magnéticos o eléctricos consta de tres partes básicas: el sensor, los cables y el monitor o algún dispositivo de visualización. Para garantizar unas mediciones adecuadas, se requiere o es conveniente que la instrumentación reúna las siguientes características [40]:

- El sensor no debe producir una perturbación significativa del campo.
- Los cables que unen el sensor con el visualizador (que puede ser un dispositivo con características de cálculo, almacenamiento de registros etc...) no deben perturbar al sensor de forma significativa.
- La respuesta en frecuencia del sensor debe cubrir el intervalo de frecuencias que se necesita medir.
- El instrumento debe, al menos, indicar el valor cuadrático medio (rms) del campo medido. Lógicamente, para estudios detallados, será conveniente poder calcular más parámetros (valores de pico, TWA...)
- La sonda debe responder a todas las componentes del campo. Esto se puede conseguir mediante una sonda de tres ejes, o mediante la rotación física de la sonda en tres direcciones ortogonales.
- Otras características deseables son una buena protección frente a sobrecargas, el funcionamiento con batería, la portabilidad y la construcción robusta.

En la recomendación IEEE Std 1460-1996TM [90] se establecen una serie de métodos para la medición de parámetros que describen el campo magnético. En conjunto, estas pautas pueden ser de bastante utilidad si se quisieran valorar los niveles de exposición tanto en entornos públicos como ocupacionales. La aplicación de esta recomendación, además de las normas para casos específicos (como la norma UNE 215001:2004 o el estándar IEEE Std 1140-1994TM [91]) junto con las normas vistas en el **Capítulo 5** de niveles límite de exposición humana (en especial la propuesta por ICNIRP en la cual se basa la Directiva 2004/40/CE [42]), pueden servir para establecer un protocolo de medida de los campos magnéticos ELF, y seleccionar las características adecuadas de la instrumentación necesaria.

En [s, t, u, v, y²³] se puede encontrar más información sobre equipos de medida de campos ELF y técnicas de aislamiento.

²³ www.enertech.net/html/hardware.html

Capítulo 8

Medidas de prevención y protección

8.1 Introducción

En este capítulo se exponen posibles medidas para la reducción de la exposición a los campos ELF:

- En la primera parte se describen los procedimientos para reducir los campos en el hogar en función de la estructura de la instalación eléctrica.
- A continuación, se tratan las opciones de reducción para los dispositivos eléctricos en los hogares, distinguiendo además las medidas de prevención que podría adoptar el propio usuario.
- En tercer lugar, se estudian las medidas de reducción para las líneas de transporte de energía.
- Finalmente, se comentan algunas técnicas de apantallamiento para equipos generadores de campos magnéticos intensos, como pueden ser los generados por transformadores, y también cualquier máquina con similares características en el ámbito industrial.

Este capítulo se ha basado en las recomendaciones del organismo SAGE (*Stakeholder Advisory Group on ELF EMFs*) [7] y [45], además de algunas propuestas de estudio sobre técnicas de apantallamiento [a, c, d, s, 38]. Cabe además señalar que las medidas que aquí se proponen no son, en ningún caso, de carácter obligatorio. Sí existe legislación para las líneas de alta tensión, como el nuevo RD 223/2008, “Reglamento sobre condiciones técnicas y garantías de seguridad en líneas eléctricas de alta tensión y sus instrucciones técnicas complementarias ITC-LAT 01 a 09”, en el que se establecen, entre otras cosas, restricciones de distancias para las líneas de alta tensión, o el RD 1955/2000 “por el que se re-

gulan las actividades de transporte, distribución, comercialización, suministro y procedimientos de autorización de instalaciones de energía eléctrica”. Por último, se encuentra el RD 1066/2001, ya comentado en capítulos anteriores, por el que se aprueba el Reglamento que establece condiciones de protección del dominio público radioeléctrico, restricciones a las emisiones radioeléctricas y medidas de protección sanitaria frente a emisiones radioeléctricas. En otra legislación existente, como el Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión, se especifican los tipos de protecciones, el mantenimiento de las instalaciones... pero no se consideran los niveles de exposición de campos ELF. La transposición de la Directiva 2008/46/CE [49] al derecho interno sí supondría un conjunto de medidas de carácter obligatorio directamente relacionadas con los campos ELF. Otras recomendaciones de interés son las propuestas por la Organización Internacional del Trabajo en [34]²⁴.

8.2 Medidas de prevención y protección

8.2.1 Instalación eléctrica (cableado)

La instalación eléctrica de cualquier hogar contribuye a los campos eléctricos y magnéticos presentes en el mismo. En la mayoría de los casos, una alimentación monofásica tendrá tres conductores: fase, neutro y tierra (desempeñando este último funciones de seguridad y protección, permitiendo un camino alternativo de circulación de corriente cuando se produce un fallo en el sistema). En cuanto a los campos magnéticos, para que esta contribución sea significativa, se tiene que dar alguna de las siguientes circunstancias:

- Un circuito en el que las corrientes de fase y neutro no vayan dispuestas por el mismo tubo de protección.
- Una conexión accidental entre neutro y tierra, donde pueda circular cierta corriente de neutro a tierra, creando un desequilibrio en el balance de corrientes.
- Lazos de corriente formados cerca de puntos de consumo.
- La existencia del propio contador de electricidad, que podría ser el causante de campos magnéticos intensos.

En cuanto a los campos eléctricos, si la fuente es externa al hogar, la influencia dentro de éste será menos significativa, ya que la propia casa o edificio sirve como pantalla, por lo que la instalación eléctrica es una fuente más significativa para los mismos.

También es cierto que la contribución de los campos en el hogar va a depender de la distribución del cableado en los edificios o viviendas unifamiliares.

²⁴ Capítulo 6 “Campos eléctricos y magnéticos”

A continuación se muestran algunas recomendaciones para la reducción de los campos ELF.

8.2.1.1 Opciones de reducción de la intensidad de campo

En el análisis realizado por el organismo SAGE se han considerado varias opciones de reducción, de manera que éstas cubriesen la mayoría de los aspectos de relevancia, incluyendo:

- Principalmente para la reducción de los campos magnéticos:

- o Insertar secciones de plástico (plastic sections) en las tuberías metálicas, como las de agua y las de gas, que entran en la vivienda. Esta medida pretende evitar posibles circulaciones de corrientes, provenientes desde el exterior a través de dichas tuberías, con el circuito de protección mediante la puesta a tierra de las mismas. En definitiva, lo que se pretende es impedir posibles flujos de corrientes por las tuberías. Un esquema se muestra en la **Figura 8.1**:

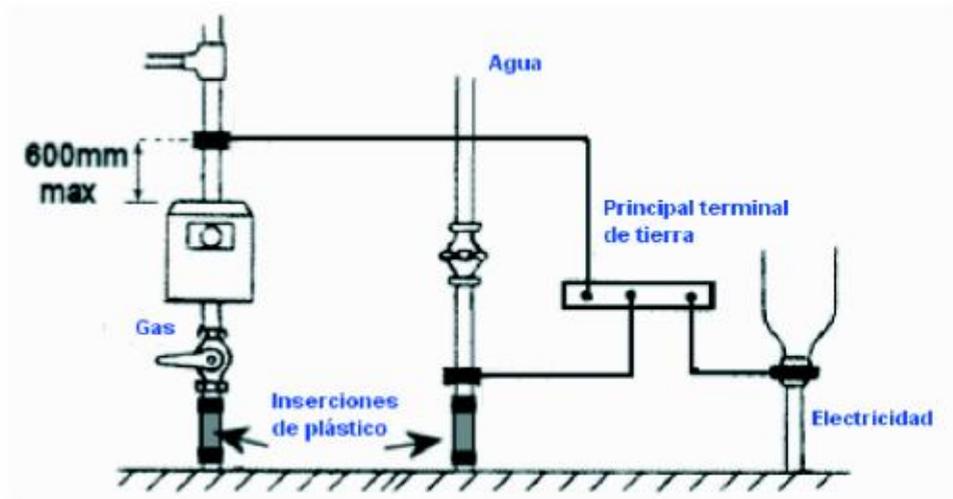


Figura 8.1 Inserciones de plástico para aislar tuberías (modificada de [37])

- o Mantener las corrientes de "ida" (corriente de fase) y de "vuelta" (corriente del neutro) siempre juntas.

- o Utilizar en la instalación un interruptor diferencial.

- Principalmente para la reducción de los campos eléctricos:

- o Colocar todo el cableado dentro de conductos metálicos. En el caso de aplicar esta opción, cada conducto deberá conectarse a tierra.

- o Utilizar cables con apantallamiento.
- o Utilizar cajas de derivación, cuadros eléctricos, y demás accesorios de montaje en instalaciones eléctricas (enchufes, interruptores eléctricos...), con carcasas metálicas. Dichas carcasas deberán estar conectadas a tierra.
- o Utilizar interruptores de demanda (demand switch), que eliminan la tensión en el cableado cuando el circuito no está en uso.
- o Alejar las tomas de corriente (enchufes) de las zonas donde se duerme.

8.2.1.2 Código de buenas prácticas para la reducción de campos

De entre todas las opciones analizadas, el estudio realizado por SAGE concluye que el conjunto de acciones a realizar más apropiado es el siguiente:

- Reducción de los campos magnéticos
 - o Asegurar que las corrientes de “ida” y “retorno” se mantienen físicamente juntas en todo momento, especialmente en sistemas de iluminación y en el diseño de sistemas de calefacción por suelo radiante.
 - o Proteger a toda la instalación mediante un interruptor diferencial.
 - o Utilizar contadores electrónicos en lugar de contadores de disco (rotating disc meters), ya que estos últimos pueden generar campos magnéticos significativos.
- Reducción de los campos eléctricos
 - o Para la instalación eléctrica, utilizar un cable apantallado para tal efecto.

8.2.1.3 Conclusiones

De acuerdo con [7], las medidas de protección se establecen principalmente enfocadas a la reducción de los campos magnéticos, ya que es en ellos donde se ha establecido una posible asociación con la leucemia en niños. En cuanto a los campos eléctricos, sería deseable una mayor investigación. Para la integración de estas medidas, se recomienda:

- El organismo competente, dependiendo del país, debería establecer una guía o nota recomendando mantener las corrientes de “ida” y de “retorno o vuelta” juntas (esta práctica es habitual en España por operatividad, aunque es opcional).

Las recomendaciones comentadas en apartados anteriores deberían considerarse en las regulaciones de cableado propuestas por el organismo competente [r]²⁵.

- En las regulaciones de las instalaciones eléctricas debería requerirse en todo caso dispositivos diferenciales. Para el caso de Reino Unido y otros países, así como de estándares internacionales, esta regulación es la BS 7671. Para el caso de España, las regulaciones relacionadas con el reglamento electrotécnico de baja tensión están transpuestas en el Real Decreto 842/2002, junto con las instrucciones técnicas complementarias (ITC) correspondientes. En [c1]²⁶ se puede encontrar la información relativa a este Real Decreto.
- Deberían instalarse siempre contadores electrónicos, y en lugar de contadores de disco (que generan campos magnéticos).
- El contador y la unidad de consumo (caja de fusibles o cuadro de distribución) no deberían emplazarse en "áreas de elevada ocupación".
- La Agencia de Protección para la Salud [j], en el caso del Reino Unido, (o el organismo competente del país considerado, como puede ser el Ministerio de Sanidad y Consumo [w]²⁷ o el Instituto de Seguridad e Higiene en el Trabajo [c1], para el caso de España, o el Servicio Andaluz de Salud, considerando la región Andalucía) debería elaborar una guía sobre las fuentes generadoras de campo en el hogar, y las formas de reducir su exposición.
- En aquellos hogares donde se hayan detectado campos magnéticos intensos, como resultado de la instalación eléctrica, debería eliminarse la causa.
- Para el conocimiento de los niveles de campo, debería establecerse una inspección periódica de la instalación eléctrica, o un procedimiento sencillo de medida (como por ejemplo la encuesta realizada por ARPANSA [p] en Australia).
- Las medidas propuestas para los hogares también podrían aplicarse a escuelas.
- Para el caso específico de los campos eléctricos, se podría prescindir de su reducción, ya que los estudios realizados vinculan sólo al campo magnético con posibles efectos nocivos para la salud. Las medidas aquí propuestas, referentes al campo eléctrico, podrían estar disponibles para aquéllos que deseen aplicarlas. Para reducir el campo eléctrico se requiere un cable apantallado, cuyo precio es

²⁵ www.theiet.org/factfiles

²⁶ En "búsqueda avanzada" escribir "Real Decreto 223/2008"

²⁷ <http://www.msc.es/ciudadanos/saludAmbLaboral/saludLaboral/home.htm>

bastante mayor que el del cable normalmente empleado. Por tanto, también se recomienda el desarrollo de una versión más barata. Una explicación más detallada de opciones de apantallamiento para los campos eléctricos se encuentra en los estudios específicos (supporting papers) de [7], concretamente en el S12 de [37].

8.2.2 Equipos eléctricos en el hogar. Buenas prácticas

Con “equipo eléctrico” nos referimos a todas las aplicaciones del hogar que utilizan la electricidad, como pueden ser los radios, televisiones, computadores, lavavajillas, fuentes de alimentación, etc... Todos ellos producen campos magnéticos, y en una gran parte éstos se producen por el propio cableado dentro del equipo, si bien la mayor fuente generadora suele ser un motor o un transformador, siendo generalmente los más baratos y pequeños los causantes de los campos más intensos.

En capítulos anteriores se comentó que los equipos eléctricos también producen campos eléctricos. Su intensidad depende de varios factores, pero el más determinante radica en si el equipo tiene un chasis con toma de tierra, o no. Otro factor relevante es el emplazamiento de cualquier interruptor en la instalación, que va a determinar si, aunque un equipo no esté en funcionamiento, el cableado produzca un campo eléctrico al existir tensión (esto se explicó en el **Apartado 3.1.1, Figura 3.1**). Una posible opción de reducción, comentada anteriormente, consiste en utilizar interruptores de demanda.

A continuación se muestran algunas recomendaciones para la reducción de los campos generados por equipos eléctricos. Es relativamente fácil ver como, en principio, se puede reducir la generación de campos en función de:

- Elecciones por parte del fabricante:
 - o Para reducir los campos magnéticos, utilizar transformadores y motores de mayor calidad (y por tanto más caros).
 - o Para reducir los campos eléctricos, utilizar carcasas metálicas con puesta a tierra en lugar de carcasas de plástico (también más caras y con posibles problemas de seguridad).
 - o Para algunos equipos específicos, como televisiones o mantas eléctricas, utilizar las medidas específicas, en el caso de que existan [37].
- Por parte del usuario:
 - o La exposición puede reducirse modificando la forma de utilización del equipo. Por ejemplo, para el caso de la televisión, sentarse a una distancia

“prudente”, o emplazar los equipos eléctricos lejos de la cama (para evitar una exposición prolongada nocturna).

8.2.2.1 Conclusiones

Los equipos eléctricos contribuyen a los campos magnéticos y eléctricos en el hogar, y por tanto parece lógico establecer un criterio que fije unos niveles “tan bajos como razonablemente alcanzables”. Sin embargo, la relación de la evidencia científica y la leucemia en niños está asociada en un posible riesgo con la exposición a largo plazo (*long term*) en un volumen general, por lo que los campos generados por equipos, y utilizados en cortos periodos están menos implicados en esta asociación (*supporting paper S13* de [37]).

El diseño de los equipos eléctricos se basa en estándares europeos e internacionales. De acuerdo con SAGE, no se ha encontrado un mecanismo o modificación realista aplicable a los equipos que sigan estas regulaciones, salvo tomar medidas voluntarias para reducir los campos si el fabricante lo desea; además, no se han valorado las posibles desventajas (aumento de peso del equipo, coste, etc...) que podrían suponer dichas medidas.

Por tanto, a modo general, las recomendaciones son:

- Los fabricantes deberían investigar si es posible reducir los campos generados por los equipos a un bajo coste, y si además ofrecer al consumidor la elección de un equipo con “baja emisión de campos” podría ser una buena estrategia de marketing. Un patrón a seguir podría ser la marca de calidad alemana *Blauer Engel [a1]*, certificado medioambiental para productos y servicios que toman las medidas pertinentes para respetar condiciones medioambientales. Entre los criterios posibles de este certificado, está el RAL-UZ 106 [a1]²⁸, que considera, entre otros aspectos, la reducción de los campos electromagnéticos generados por teléfonos móviles. Algo similar se podría hacer para equipos eléctricos que ofrezcan un bajo nivel de emisión de campos ELF.
- Los organismos pertinentes (como el Servicio Andaluz de Salud en el caso de Andalucía) deberían elaborar guías para los propietarios, sobre las acciones posibles para reducir la exposición a los campos generados por equipos eléctricos.

Por último, los gobiernos deberían considerar las posibles estrategias de reducción de campos magnéticos y eléctricos generados por equipos eléctricos a la hora de elaborar guías internacionales, técnicas, y recomendaciones.

²⁸ http://www.blauer-engel.de/en/products_brands/vergabegrundlage.php?id=89

8.2.3 Reducción de la exposición de líneas de transporte de energía eléctrica

Como ya se ha dicho, las líneas de transporte de energía producen campos magnéticos y eléctricos. Estos campos son más intensos en las cercanías de la línea y disminuyen con la distancia. Los campos magnéticos varían en función de la demanda (a mayor corriente, mayor será el campo magnético), mientras que los campos eléctricos permanecen más o menos constantes.

Los campos son mayores para líneas de alta tensión. En el caso del Reino Unido, para las líneas de alta tensión, de 200 y 475 kV, el campo magnético está por debajo de $0.4 \mu\text{T}$ a aproximadamente 60 m de la línea (aunque en casos extremos donde la carga es alta, este valor se produce a 150 m de la línea). Para el caso de líneas subterráneas, eliminan la exposición al campo eléctrico y reducen la anchura sobre la cual "se proyecta" el campo magnético, pero también hay que tener en cuenta a qué profundidad se encuentran.

Tomando como ejemplo Reino Unido, existen más de 25000 hogares a menos de 60 m de líneas de transporte de energía, y se están construyendo más actualmente (una explicación más detallada del número de hogares se puede encontrar en el apartado **S15**, y sobre comparaciones internacionales en el **S8**, ambos de [37]). A continuación se muestran las recomendaciones propuestas por SAGE para disminuir la exposición a los campos generados por las líneas de transporte. En este caso, estas recomendaciones son posibles medidas a tomar por parte del gobierno o de organismos específicos. Son las siguientes:

- Restricciones en la proximidad entre edificios y líneas de transporte.
- Restricciones en el uso de los edificios cercanos a líneas.
- Modificar el trazado de las líneas si es necesario.
- Soterrar las líneas eléctricas de tendido aéreo.
- Situar la línea a mayor altura.
- Construir la línea de forma que genere campos menos intensos.
- Modificaciones en las fases de la línea, o un balance en las cargas, de forma que se minimicen los campos generados.
- Apantallamiento del campo donde éste se produce por la línea.
- Apantallamiento del campo en el hogar.
- Cambios más radicales referentes al sistema eléctrico, como la generación local o en transporte en corriente continua.

Similares medidas se proponen en la recopilación realizada por UNESA [45] para la reducción de la exposición. El organismo SAGE analizó cuáles eran las mejores opciones (de las comentadas anteriormente) según los siguientes criterios:

- Efectividad en la reducción de los niveles de campo.
- Seguridad.
- Coste.
- Impacto visual.
- Impacto medioambiental.
- Facilidad de implementación.

Considerando estos factores, se estimaron cuáles son las mejores opciones para las siguientes situaciones:

- Viviendas existentes y nuevas líneas.
- Líneas existentes y nuevas viviendas.
- Nuevas viviendas y nuevas líneas.
- Viviendas y líneas existentes.

A partir de estos criterios, en el siguiente apartado se muestran las opciones recomendadas.

8.2.3.1 Opciones recomendadas

Como resultado del análisis realizado por SAGE, se identificaron dos opciones que deberían implementarse siempre. Sin embargo, éstas no producen una reducción muy significativa en los niveles de exposición, por lo que en el siguiente apartado se analizan otras opciones, que se aplicarían junto con estas dos, pero ya dependiendo de la situación. Las dos opciones a implementar en todo caso son:

- Proporcionar más información al público en general, sobre las acciones que se deberían llevar a cabo en el caso de que deseen reducir su exposición.
- Elección adecuada de la fase relativa de dos circuitos de una línea aérea; este concepto se denomina rotated phasing o transposed phasing (comentado en el

Apartado 3.2.2.1), y puede ayudar a reducir la distancia a la cual el campo magnético empieza a decaer en intensidad. Más información al respecto se puede encontrar en el S14 de [37] y en [c]. Esta opción, además, es aplicable tanto a líneas nuevas como a las ya existentes, que además en ciertos casos puede ser viable con pocas modificaciones.

8.2.3.2 Reducción de la exposición de forma significativa

Además de las dos opciones descritas en el apartado anterior, se han identificado un conjunto de posibilidades respecto a la separación física entre edificios y líneas de energía. De todas ellas, la mejor opción consiste en no construir ninguna edificación para uso residencial (y otros usos, incluyendo las escuelas) dentro de unas distancias específicas (Tabla 8.1) para las líneas de transporte aéreas, además de tampoco construir nuevas líneas dentro de las distancias especificadas para edificaciones del tipo anterior ya existentes.

De esta forma se evita que ocurran futuras exposiciones, pero no se reducen las exposiciones presentes. Por tanto, habrá una diferencia para los casos identificados como “viviendas existentes y nuevas líneas” y “líneas existentes, viviendas nuevas”, pero no para “viviendas existentes, líneas existentes”, necesiándose para este último caso otras alternativas, como un nuevo trazado de la línea, etc...

Considerando el nivel de $0.4 \mu T$, las distancias deberían ser las recogidas en la **Tabla 8.1**:

Tabla 8.1 Distancias mínimas respecto líneas de transporte aéreas (modificada de [7])

| Ejemplo de datos de medición | |
|------------------------------|--|
| Tensión de la línea | Distancia horizontal desde el centro de la línea, a nivel del suelo, a la parte más cercana de una edificación |
| 275 kV y 400 kV | 60 m |
| 66 kV, 110 kV y 132 kV | 30 m |
| 6.6 kV, 11 kV, 22 kV y 33 kV | Sin restricción provisionalmente* |
| 400 V | Sin restricción |

* Este caso será discutido por SAGE en futuros estudios

Lógicamente, también pueden tomarse mayores distancias, que indudablemente proporcionarán una mayor protección para la salud.

Para el caso de líneas subterráneas, habría que calcular la distancia equivalente, menor según [7] que para el caso de las líneas aéreas. No obstante, consideramos que

para esta casuística habría que analizar la profundidad a la que se encuentra la línea, ya que si bien se produce un apantallamiento significativo para el campo eléctrico, no sucede lo mismo para el magnético.

Los edificios que serían afectados por estas medidas serían las viviendas residenciales, escuelas (para niños de hasta 15 años) y guarderías donde los niños pasan un período de tiempo significativo a lo largo de la semana, así como hoteles e instalaciones de ocio. La elección de estas edificaciones se basa principalmente en que se trata de zonas donde las personas pasan largos periodos de tiempo.

El principal beneficio de adoptar estas medidas sería una gran prevención de nuevos casos de individuos expuestos en sus hogares a valores superiores a $0.4 \mu\text{T}$. Ya que las restricciones se han expresado en términos de distancia, pueden existir excepciones de individuos que, residiendo fuera de los límites mínimos (a mayores distancias), estarían expuestos a campos superiores a $0.4 \mu\text{T}$, si bien se ha estimado que estos casos estarían por debajo del 15 %; además, $0.4 \mu\text{T}$ no es un límite preciso.

Cualquier beneficio de esta opción se podría constatar a lo largo de varias décadas, más que de forma inmediata, ya que se prevendrían futuras exposiciones, y no las ya existentes.

8.2.3.3 Conclusiones

De acuerdo con el organismo SAGE, se han identificado dos medidas de precaución (mayor información para el público y elección adecuada de la fase relativa para las líneas aéreas). Estas dos opciones, sin embargo, no tendrían unos efectos significativos en la reducción de la exposición. Por tanto, se ha identificado la mejor opción para obtener una reducción importante de los niveles de exposición, y así evitar futuras exposiciones que de lo contrario ocurrirían; ésta consiste en una restricción entre las **distancias** entre nuevas escuelas y hogares (así como edificaciones con “alta ocupación”) con las líneas de transporte de energía existentes, y entre las nuevas líneas con escuelas y hogares existentes. El principal coste de esta opción afectaría principalmente al precio del terreno y las propiedades cercanas a las líneas de energía.

8.2.4 Medidas de protección industriales y en puestos de trabajo

En la línea de disminuir los niveles de exposición humana a los campos ELF, además de las líneas de distribución y los dispositivos eléctricos, grandes establecimientos o zonas industriales con cargas de elevada potencia requieren grandes transformadores que generan campos ELF de una intensidad considerable, por encima de los niveles de exposición permitidos, como puede ser el transformador de la **Figura 8.2**. Para estos casos, también hay propuestas de apantallamiento para proteger a las personas.



Figura 8.2 Ejemplo de alimentación en alta tensión [38]

Por ejemplo, en [38] se propone un método de apantallamiento para transformadores que se encuentren cerca de zonas de alta ocupación, residenciales o comerciales, para reducir la exposición de los campos ELF generados. La forma más sencilla y evidente es a partir de un distanciamiento de la instalación, pero cuando esto no es posible se proponen métodos de aislamiento magnético a partir de materiales metálicos. En este estudio se propone la utilización de una chapa metálica de aluminio, con unas dimensiones y grosor que minimicen costes y maximicen el aislamiento.

Existen varias opciones de mitigación, que independientemente de la frecuencia, siguen las siguientes estrategias [c]:

- Aumentar la distancia respecto a la fuente generadora: ya que la intensidad de los campos magnéticos decae de forma rápida con la distancia.
- Cancelación "natural" de los campos generados: las configuraciones de cableado pueden cancelar los campos magnéticos generados, como es el caso de la estrategia rotated phasing, comentada en el apartado de líneas de energía.
- Apantallamiento de los campos: existen diferentes estrategias de apantallamiento. Mientras que la mayoría de los materiales de las edificaciones sirven de pantalla para los campos eléctricos, no ocurre lo mismo para los magnéticos. A partir de materiales ya comentados como el *mu-metal*, existen diversas estrategias, además de nuevos desarrollos como la técnica de cancelación de corrientes *eddy*.

En definitiva, existen diferentes propuestas que permiten disminuir los niveles generados por equipos industriales a partir de cabinas de aislamiento, especificaciones del material de apantallamiento, opciones específicas de diseño, etc... Por regla general, la solución básica consistirá en establecer una distancia mínima que asegure unos límites máximos de campo magnético, evitando a menor distancia la presencia de personal. Para otro tipo de soluciones más específicas, se requerirá la consulta de un equipo especializado en la materia. Más información sobre estas técnicas se puede encontrar en [c²⁹, d, s³⁰].

8.2.5 Interferencias causadas por los campos ELF en dispositivos médicos

Los campos ELF intensos pueden ser causa de interferencia electromagnética (IEM) en los marcapasos y otros aparatos electromédicos implantados. Las personas que utilizan estos dispositivos deberían consultar a su médico para determinar en qué medida son susceptibles a esos efectos. La OMS insta a los fabricantes a que sus aparatos tengan una susceptibilidad mucho menor a la IEM.

En las oficinas, los trabajadores podrían percibir desplazamientos de la imagen en el monitor de su ordenador. Si los campos magnéticos ELF son en esos lugares superiores a aproximadamente 1 μT (10 mG), pueden llegar a interferir en los electrones que producen la imagen en la pantalla. Una solución simple a este problema consiste en trasladar el ordenador otro lugar de la habitación en que los campos magnéticos sean inferiores a ese valor. Suele existir este tipo de campos junto a los cables que suministran energía eléctrica a los edificios de oficinas o de apartamentos, o cerca de los transformadores utilizados para el suministro eléctrico de los edificios. La intensidad de los campos producidos por estas fuentes suele estar muy por debajo de los niveles preocupantes para la salud.

Los estándares de emisión y compatibilidad electromagnética no están basados explícitamente en consideraciones relativas a la salud humana, sino en asegurar que un equipo no interfiera en el funcionamiento de otro, en la eficiencia del dispositivo, etc... La principal medida de prevención en este caso es nuevamente mantener una distancia adecuada respecto a los equipos que generen campos magnéticos de intensidad elevada.

²⁹ www.fms-corp.com/mitigation_shielding.php4

³⁰ www.euro-emc.co.uk/magnetic_field_shielding.htm

Capítulo 9

Líneas de investigación recomendadas

9.1 Introducción

En este capítulo se exponen las líneas de investigación recomendadas por la Organización Mundial de la Salud, cuyo objetivo es completar las lagunas existentes en la base científica desarrollada sobre los efectos exposición de los campos ELF en los seres humanos. Tal y como se cita en [2], en el **Apartado 9.2** se muestran las recomendaciones que propone este organismo, clasificadas por áreas de estudio. Por último, en el **Apartado 9.3** se esbozan las medidas que consideramos que deberían potenciarse.

9.2 Líneas de investigación recomendadas por la OMS

9.2.1 Fuentes, mediciones y exposiciones

En este área se requiere un estudio más detallado, por países, de los hogares con exposición elevada a campos de ELF. Se requiere identificar la contribución relativa de las fuentes internas y externas; la influencia de las prácticas de instalación del tendido eléctrico y puesta a tierra, además de otras características del hogar que podrían servir de ayuda para la valoración de estudios epidemiológicos. Un componente importante a tener en cuenta es el mejor entendimiento de la exposición fetal e infantil a campos de ELF, especialmente los procedentes de la exposición residencial a la calefacción por suelo radiante eléctrico en los domicilios, y de los transformadores en los edificios.

Se sospecha que en algunos casos de exposición ocupacional se superan los límites presentados de las recomendaciones sobre los campos ELF. Se necesita más información sobre la exposición (incluso a frecuencias no usuales de consumo eléctrico) relacionada con el trabajo, por ejemplo, el mantenimiento de líneas de distribución y el trabajo dentro o cerca del núcleo central de imanes de los aparatos de IRM (imágenes por resonancia magnética). Asimismo, se necesita un mayor conocimiento de la exposición del

público general que pueda acercarse a los límites establecidos por las recomendaciones, incluyendo fuentes tales como los sistemas de seguridad, los sistemas de desmagnetización de las bibliotecas, las cocinas de inducción y los calentadores de agua.

La exposición a corrientes de contacto se ha propuesto como posible explicación para la asociación de los campos magnéticos ELF con la leucemia en niños. Es necesario realizar investigaciones en países distintos de los Estados Unidos para evaluar la posibilidad de que las prácticas de puesta a tierra, así como las instalaciones de fontanería, puedan dar lugar a corrientes de contacto. Dichos estudios tendrían prioridad en los países con resultados epidemiológicos destacados con respecto a los campos ELF y la leucemia infantil.

9.2.2 Dosimetría

La mayor parte de las investigaciones de laboratorio realizadas en el pasado se basaban en corrientes eléctricas inducidas en el cuerpo como medida básica, de manera que los estudios de dosimetría partían de esa magnitud. Sólo en fechas recientes se ha comenzado a explorar la relación entre la exposición externa y los campos eléctricos inducidos. Para comprender mejor los efectos biológicos, se necesitan más datos sobre los campos eléctricos internos en distintas condiciones de exposición.

Los cálculos deberían realizarse para los campos eléctricos internos debidos a la influencia producida por los campos eléctricos y magnéticos externos, en distintas configuraciones. La suma vectorial de las contribuciones de los campos magnéticos y eléctricos variables en el tiempo y fuera de fase es necesaria para evaluar el cumplimiento de las restricciones básicas.

Son muy pocos los análisis y cálculos que se han realizado sobre modelos avanzados de la mujer embarazada y el feto. Es importante evaluar el posible aumento de la inducción de campos eléctricos en el feto en relación con el tema de la leucemia infantil. En este sentido, son importantes la exposición ocupacional materna y residencial.

Existe la necesidad de seguir perfeccionando los modelos microdosimétricos, con el objetivo de tener en cuenta la estructura celular de las redes neurales y otros sistemas suborgánicos complejos, identificados como más sensibles a los efectos de los campos eléctricos inducidos. En este proceso de modelado también se debe tener presente la influencia en los potenciales eléctricos de la membrana celular y en la liberación de neurotransmisores.

9.2.3 Mecanismos biofísicos

Existen tres áreas principales en las que son evidentes los límites del entendimiento actual de los mecanismos biofísicos biofísicos: el mecanismo de par radical (radi-

cales libres), las partículas magnéticas en el cuerpo y la relación señal-ruido en los sistemas multicelulares, tales como las redes neuronales.

El mecanismo par radical es uno de los mecanismos más verosímiles de interacción de bajo nivel, pero todavía no se ha demostrado que sea capaz de provocar efectos significativos en el metabolismo y la función celular. Es particularmente importante entender el límite inferior de exposición al cual actúa, de manera que se pueda determinar si puede ser o no un mecanismo importante para el cáncer. Teniendo en cuenta los estudios recientes en los que aumentaron las especies de oxígeno reactivo en células inmunitarias expuestas a campos ELF, se recomienda el empleo de células del sistema inmunológico que generan especies de oxígeno reactivo como parte de su respuesta inmunitaria, como modelos celulares para investigar el potencial del mecanismo par radical.

Aunque, de acuerdo con las evidencias actuales, la presencia de partículas magnéticas (cristales de magnetita) en el cerebro humano no parece conferir sensibilidad a los campos magnéticos de ELF del ambiente, se deberían explorar más enfoques teóricos y experimentales para estudiar si tal sensibilidad puede existir bajo determinadas condiciones. Además, se debería buscar cualquier modificación que pueda producir la presencia de magnetita en el mecanismo par radical antes mencionado.

Se debe seguir investigando en qué medida actúan los mecanismos multicelulares en el cerebro, de manera que mejoren las relaciones señal-ruido, a fin de desarrollar un marco teórico para su cuantificación o para determinar sus posibles límites. Se debe realizar investigación adicional del umbral y la respuesta de frecuencia de las redes neuronales en el hipocampo y en otras partes del cerebro utilizando métodos *in vitro*.

9.2.4 Neurocomportamiento

Se recomienda que los estudios de laboratorio basados en voluntarios sobre los posibles efectos en el sueño, y en la realización de tareas que exijan un esfuerzo mental grande, se lleven a cabo utilizando procedimientos metodológicos armonizados. Es necesario identificar las relaciones dosis-respuesta con densidades de flujo magnético superiores a las utilizadas en estudios anteriores, y con una gama amplia de frecuencias (es decir, en el rango de los kHz).

Los estudios realizados en voluntarios adultos y en animales sugieren que pueden producirse efectos cognitivos agudos con exposiciones de corto plazo a campos eléctricos o magnéticos intensos. La caracterización de tales efectos es muy importante para el desarrollo de una guía sobre la exposición, pero se carece de datos específicos relativos a efectos dependientes del campo en niños. Se recomienda la realización de estudios de laboratorio basados en el conocimiento y análisis de los cambios en los electroencefalogramas (EEG) en personas expuestas a campos ELF, incluyendo adultos sujetos habitualmente a exposición ocupacional y niños.

Los estudios de comportamiento con animales inmaduros proporcionan un indicador útil de los posibles efectos cognitivos en los niños. Se deben estudiar los posibles efectos de la exposición prenatal y postnatal a campos magnéticos de ELF en el desarrollo del sistema nervioso y la función cognitiva. Sería útil complementar estos estudios con investigaciones sobre los efectos en el crecimiento de las células nerviosas debidos a la exposición a campos magnéticos ELF y campos eléctricos inducidos.

Es necesario seguir investigando las consecuencias potenciales en la salud sugeridas por los datos experimentales que muestran respuestas opioides y colinérgicas en animales. Se deberían ampliar los estudios en los que se examina la modulación de las respuestas opioides y colinérgicas en animales, y se deberían definir los parámetros de exposición y la base biológica de estas respuestas de comportamiento.

9.2.5 Sistema neuroendocrino

La base de datos existente sobre la respuesta neuroendocrina no indica que la exposición a campos ELF tenga impactos adversos en la salud humana. Por consiguiente, no se formula ninguna recomendación para nuevas investigaciones en esta categoría.

9.2.6 Trastornos neurodegenerativos

En varios estudios se ha observado un aumento del riesgo de esclerosis lateral amiotrófica en las "ocupaciones eléctricas". Se considera importante investigar más sobre esta asociación, a fin de descubrir si los campos magnéticos ELF intervienen como causa de esta rara enfermedad neurodegenerativa. Esta investigación requiere estudios prospectivos de cohortes de gran envergadura, con información sobre la exposición a campos magnéticos ELF, a choques eléctricos, así como exposición a otros posibles factores de riesgo.

Por otra parte, sigue siendo discutible si los campos magnéticos de ELF constituyen un factor de riesgo para la enfermedad de Alzheimer. Los datos disponibles en la actualidad no son suficientes, por lo que habría que estudiar más esta asociación. Tiene particular importancia el uso de datos sobre la morbilidad más que sobre la mortalidad.

9.2.7 Trastornos cardiovasculares

No se considera prioritaria la realización de investigaciones adicionales sobre la asociación entre los campos magnéticos ELF y el riesgo de enfermedades cardiovasculares.

9.2.8 Inmunología y hematología

Los cambios observados en los parámetros inmunológicos y hematológicos en

adultos expuestos a campos magnéticos ELF mostraron inconsistencias, y esencialmente no se dispone de datos de investigación sobre niños. Por consiguiente, se recomienda la realización de estudios sobre los efectos de la exposición a campos ELF en el desarrollo de los sistemas inmunológico y hematopoyético en animales jóvenes.

9.2.9 Reproducción y desarrollo

Existen algunas evidencias de un aumento del riesgo de aborto asociado con la exposición a campos magnéticos ELF. Teniendo en cuenta las repercusiones potencialmente elevadas de dicha asociación para la salud pública, se recomienda la realización de nuevas investigaciones epidemiológicas.

9.2.10 Cáncer

La máxima prioridad de las investigaciones sobre el cáncer corresponde a la solución del conflicto entre los datos epidemiológicos (que muestran una asociación entre la exposición a campos magnéticos ELF y un aumento del riesgo de leucemia infantil), los datos experimentales y los mecanicistas (datos basados en un cierto mecanismo que pueda provocar una enfermedad), que no respaldan esta asociación. Se recomienda la colaboración de epidemiólogos y científicos experimentales en este sentido. Para que los nuevos estudios epidemiológicos sean ilustrativos, éstos se deben concentrar en nuevos aspectos de la exposición, en la interacción potencial con otros factores o en grupos muy expuestos, o bien introducir alguna otra innovación en esta categoría de investigación. Además, se recomienda también la actualización de los análisis combinados existentes, añadiendo datos de estudios recientes y aplicando nuevos conocimientos dentro del análisis.

En los estudios sobre el cáncer cerebral infantil se han obtenido resultados inconsistentes. Al igual que con la leucemia infantil, el análisis de los estudios combinados (*pooled analysis*) sobre el cáncer cerebral infantil sería muy aclaratorio, por lo que se recomienda. Un análisis de este tipo puede proporcionar, sin grandes gastos, mayor y mejor información sobre los datos existentes, y si los estudios son suficientemente homogéneos puede ofrecer una mejor estimación de riesgo.

En el caso del cáncer de mama en adultos, estudios más recientes han mostrado de manera convincente que no existe ninguna asociación con la exposición a campos magnéticos de ELF. Por consiguiente, la investigación adicional sobre esta asociación debe ser objeto de una prioridad muy baja.

En relación con la leucemia y el cáncer cerebral en adultos, se recomienda la actualización de las cohortes de gran envergadura existentes en la exposición laboral de personas. Los estudios ocupacionales, los análisis combinados y los meta-análisis para la

leucemia y el cáncer cerebral han sido inconsistentes y no concluyentes. Sin embargo, posteriormente se han publicado nuevos datos que deberían utilizarse para actualizar estos análisis.

Se ha de conceder prioridad al abordar las evidencias epidemiológicas, mediante el establecimiento de modelos *in vitro* y animales apropiados para las respuestas a campos magnéticos ELF de bajo nivel, que sean ampliamente transferibles entre laboratorios.

Se deben desarrollar modelos de roedores transgénicos para la leucemia infantil, a fin de disponer de modelos de animales experimentales apropiados para estudiar los efectos de la exposición a campos magnéticos ELF. De otra manera, para los estudios existentes en animales, la evidencia encontrada es que no existen efectos carcinogénicos provenientes de los campos magnéticos ELF actuando por sí solos. Por consiguiente, se debe conceder máxima prioridad a los estudios *in vitro* y en animales en los que se evalúen rigurosamente los campos magnéticos ELF como cocarcinógenos.

Con respecto a otros estudios *in vitro*, se deben repetir los experimentos en los que se reportan los efectos genotóxicos de una exposición intermitente a campos magnéticos ELF.

9.2.11 Medidas de protección

Se recomienda la realización de investigaciones sobre la formulación de políticas de protección de la salud y su aplicación en sectores con incertidumbre científica, en concreto sobre el uso del principio de precaución, su interpretación y la evaluación del impacto de las medidas de precaución para campos magnéticos ELF y otros agentes clasificados como “posibles carcinógenos para los seres humanos”. Cuando existen incertidumbres sobre el riesgo potencial para la salud que un agente plantea para la sociedad, se deben tomar medidas de precaución que permitan asegurar la protección adecuada del público y los trabajadores. Son limitadas las investigaciones que se han realizado sobre este tema para campos magnéticos ELF y, debido a su importancia, es necesario seguir investigando. Esto puede ayudar a los países a integrar el principio de precaución en sus políticas de protección de la salud.

Se aconsejan nuevas investigaciones sobre la percepción y comunicación del riesgo, orientadas específicamente a los campos electromagnéticos. Se han investigado ampliamente los factores psicológicos y sociológicos que influyen en la percepción del riesgo en general. Sin embargo, han sido limitadas las investigaciones para analizar la importancia relativa de estos factores en el caso de los campos electromagnéticos, o para identificar otros factores específicos de dichos campos. En estudios recientes se ha sugerido que las medidas de precaución que transmiten mensajes de riesgo implícitos pueden

modificar la percepción del mismo, aumentando o disminuyendo la preocupación. Por consiguiente, está justificada una investigación más profunda sobre este tema.

Se debe realizar la investigación sobre el desarrollo de un análisis de coste-beneficio/coste-efectividad para la mitigación de los campos magnéticos de ELF. El empleo de dicho análisis para evaluar si una opción en materia de políticas es beneficiosa para la sociedad se ha investigado en muchos sectores de las políticas públicas. Es necesario formular un marco que permita identificar qué parámetros son necesarios, a fin de realizar este análisis para campos magnéticos ELF. Debido a las incertidumbres en la evaluación, se necesitará incorporar parámetros cuantificables y no cuantificables.

En la **Tabla 9.1** siguiente se resumen las recomendaciones formuladas por la OMS.

Tabla 9.1 Recomendaciones para futuras investigaciones formuladas por la OMS

| Fuentes, medidas y exposiciones | Prioridad |
|--|------------------|
| Caracterización de los hogares con exposición elevada a campos magnéticos de ELF | Media |
| Identificar las lagunas de conocimientos en la exposición ocupacional a campos ELF, como en IRM (imágenes por resonancia magnética) | Alta |
| Valorar la capacidad de las instalaciones residenciales para inducir corrientes de contacto en los niños (análisis en instalaciones fuera de Estados Unidos) | Media |
| Dosimetría | Prioridad |
| Dosimetría computacional que relacione los campos eléctricos y magnéticos externos con los campos eléctricos internos, particularmente con respecto a la exposición a campos eléctricos y magnéticos combinados en distintas orientaciones | Media |
| Cálculo de los campos eléctricos y corrientes inducidas en las mujeres embarazadas y en el feto | Media |
| Mayor perfeccionamiento de los modelos microdosimétricos, teniendo en cuenta la estructura celular de las redes neuronales y otros sistemas suborgánicos complejos | Media |
| Mecanismos biofísicos | Prioridad |
| Mayor estudio de los mecanismos par radical en las células inmunitarias que generan especies de oxígeno reactivo como parte de su función fenotípica. | Media |
| Nuevos estudios teóricos y experimentales de la posible función de la magnetita en la sensibilidad a campos magnéticos ELF | Baja |
| Determinación de las respuestas umbral a campos eléctricos internos inducidos por campos ELF en sistemas multicelulares, tales como las redes neuronales, utilizando enfoques teóricos e in Vitro | Alta |

Tabla 9.1 Recomendaciones para futuras investigaciones formuladas por la OMS

| Neurocomportamiento | Prioridad |
|--|------------------|
| Estudios de la función cognitiva, el sueño y el electroencefalograma (EEG) en voluntarios, con inclusión de niños y personas ocupacionalmente expuestas, utilizando un amplio rango de frecuencias de campos de ELF con densidades de flujo elevadas | Media |
| Estudios de la exposición prenatal y postnatal en la función cognitiva en animales | Media |
| Nuevos estudios de las respuestas opioides y colinérgicas en animales | Baja |
| Trastornos neurodegenerativos | Prioridad |
| Estudios adicionales del riesgo de esclerosis lateral amiotrófica en ocupaciones eléctricas, y en relación con la exposición a campos magnéticos ELF y de la enfermedad de Alzheimer | Alta |
| Inmunología y hematología | Prioridad |
| Estudios de las consecuencias de la exposición a campos magnéticos ELF sobre el desarrollo del sistema inmunitario y hematopoyético en animales jóvenes | Baja |
| Reproducción y desarrollo | Prioridad |
| Estudio adicional de la posible vinculación entre el aborto y la exposición a campos magnéticos ELF | Baja |
| Cáncer | Prioridad |
| Actualización de los análisis existentes de la leucemia infantil con nueva información | Alta |
| Análisis de los estudios existentes sobre los tumores cerebrales infantiles | Alta |
| Actualización de los meta análisis existentes de los estudios sobre la leucemia y los tumores cerebrales en adultos y de las cohortes de personas expuestas ocupacionalmente | Media |
| Desarrollo de modelos de leucemia infantil en roedores transgénicos para su utilización en estudios sobre los campos ELF | Alta |
| Evaluación de los efectos cocarcinógenos utilizando estudios in vitro y en animales | Alta |
| Intento de reproducción de estudios de genotoxicidad in vitro | Baja |
| Medidas de protección | Prioridad |
| Investigación sobre la formulación de políticas de protección de la salud, y su aplicación en sectores donde existe falta de información científica | Media |

Tabla 9.1 Recomendaciones para futuras investigaciones formuladas por la OMS

| Medidas de protección | Prioridad |
|---|-----------|
| Nuevas investigaciones sobre la percepción y la comunicación del riesgo orientadas a los campos electromagnéticos | Media |
| Desarrollo de un análisis coste-beneficio/coste efectividad para la mitigación de los campos ELF | Media |

9.3 Resumen de recomendaciones

En función del estado actual de conocimiento de los campos ELF y sus efectos en la salud humana, consideramos que se deberían tener en cuenta los siguientes puntos:

- Analizar los niveles de exposición en zonas residenciales cercanas a líneas de distribución, o elementos que puedan generar campos magnéticos por encima de niveles para los cuales existe aún una cierta incertidumbre de producir efectos perjudiciales para la salud ante exposiciones continuadas.
- En el ámbito ocupacional: caracterizar y tipificar los ambientes de trabajo en función de mayor, media o mínima exposición, y en base a ello elaborar una guía de buenas prácticas para disminuir la exposición en la medida de lo posible, además de las ya existentes, orientadas a evitar otros tipos de riesgos laborales.
- Intentar, en la medida de lo posible, que en todas las nuevas instalaciones del cableado doméstico se consideren medidas de reducción de la exposición a los campos magnéticos, como las propuestas por SAGE (**Capítulo 8**).
- Difundir información útil sobre el manejo de dispositivos eléctricos o formas preventivas de actuación (como evitar situaciones permanentes en la cercanía de dispositivos que puedan generar campos magnéticos significativos), tanto a nivel general como ocupacional, de manera que no suponga un fenómeno de alarma o preocupación.
- Ahondar en la investigación de los efectos a largo plazo de la exposición a los campos ELF, de modo que sea posible proporcionar un conjunto de resultados que determinen qué parámetros de exposición (duración, intensidad, exposición constante o a intervalos...) son los que realmente pueden servir como referencia para los efectos perjudiciales para la salud humana.
- Realizar más estudios sobre la leucemia en niños, pretendiendo limitar la incertidumbre sobre si una exposición continuada a un campo magnético de 0.3-0.4 μT supone verdaderamente un riesgo para la salud humana.

- Establecer un protocolo específicamente diseñado para la valoración de los niveles de exposición humana, como puede ser el estándar IEEE PC95.3.1TM, *“Recommended Practice for Measurements and Computation of Electric, Magnetic and Electromagnetic Fields With Respect to Human Exposure to Such Fields, 0 – 100 kHz”* [q] (en desarrollo), sin que ello signifique que dejen de considerarse los procedimientos ya existentes para la medida de campos magnéticos y eléctricos a frecuencia industrial, como la norma UNE 215001:2004, y otras pautas ya comentadas en el apartado de normativa del **Capítulo 5**.
- Una vez conseguidos los puntos anteriores, tratar de armonizar los niveles de exposición y llegar a un consenso de las recomendaciones de los organismos más importantes, como la recomendación de la Comisión Internacional de Protección contra Radiaciones No Ionizantes y el estándar IEEE C95.6TM.

Capítulo 10

Conclusiones generales

10.1 Conclusiones

El propósito de este capítulo consiste en dar un resumen final de todo lo que se ha visto a lo largo del documento. Si bien ya se han ido resumiendo algunas ideas, ahora se pretende dar una visión, si cabe, más general. A modo de resumen, respecto a las principales áreas tratadas, podemos decir:

- Fuentes

Desde finales de los años setenta se han planteado interrogantes sobre si la exposición a los campos magnéticos ELF tiene consecuencias adversas para la salud. Son conocidas las fuentes generadoras de campos, tanto naturales como artificiales, siendo la exposición de las personas a los campos ELF proveniente, en su mayor parte, de la generación, transporte, y utilización de la energía eléctrica. Los niveles de exposición que se pueden llegar a alcanzar, según datos de la propia OMS, son:

- **En los núcleos de población:** La energía eléctrica se distribuye desde las estaciones generadoras hasta los núcleos urbanos mediante líneas de transporte de alto voltaje. Para dar conexión a las líneas de distribución de las viviendas, el voltaje se ha de reducir mediante transformadores. Bajo las líneas de transporte de energía, los campos eléctricos y magnéticos pueden llegar a alcanzar los 12 kV/m y los 30 μ T, respectivamente. En las inmediaciones de las estaciones y subestaciones generadoras, estos valores pueden llegar a ser de 16 kV/m y 270 μ T.
- **En las viviendas:** La exposición residencial a campos magnéticos a la frecuencias de alimentación eléctrica, 50-60 Hz, no registra grandes variaciones en todo el mundo (considerando zonas urbanizadas de países desarrollados). La media ge-

ométrica del campo magnético en los hogares oscila entre 0.025 y 0.07 μT en Europa, y entre 0.055 y 0.11 μT en los Estados Unidos. Los valores medios de los campos eléctricos en el hogar son del orden de varias decenas de voltios por metro. En las proximidades de determinados aparatos eléctricos, los valores instantáneos del campo magnético pueden llegar a ser de unos pocos cientos de microteslas. Cerca de las líneas de energía, los campos magnéticos llegan a ser de alrededor de 20 μT y los campos eléctricos de varios miles de voltios por metro. En cuanto a la exposición infantil, son pocos los niños que tienen una exposición residencial promedio en el tiempo a campos magnéticos de 50 ó 60 Hz superior a los niveles asociados con un aumento de la incidencia de la leucemia infantil. Entre el 1% y el 4% tienen una exposición media superior a 0.3 μT y sólo del 1% al 2% tienen una exposición media que supera los 0.4 μT .

- **En el lugar de trabajo:** La exposición laboral, aunque predominantemente debida a los campos que se generan a las frecuencias de consumo, 50-60 Hz, también puede incluir otras frecuencias. Se ha encontrado que el promedio de la exposición a campos magnéticos para las ocupaciones relacionadas con la electricidad es superior al de otras tareas, tales como las de oficina, con valores que oscilan entre 0.4–0.6 μT para los electricistas y los ingenieros eléctricos, y alrededor de 1.0 μT en los trabajadores de líneas de transporte de energía, siendo máxima la exposición de los soldadores, los maquinistas de ferrocarril y los operadores de máquinas de coser (por encima de 3 μT). Las exposiciones máximas a campos magnéticos en el lugar de trabajo pueden llegar a ser de alrededor de 10 mT, en casos extremos, y están asociadas de manera directa con la presencia de conductores portadores de corrientes altas. En la industria de suministro de energía eléctrica, los trabajadores pueden estar expuestos a campos eléctricos de hasta 30 kV m^{-1} . Cerca de los hornos por inducción y de las baterías electrolíticas de uso industrial, los campos magnéticos pueden superar los 50 mT.

- Efectos sobre la salud

Se han resumido los efectos a corto plazo que provoca la exposición a los campos ELF, cuya base científica es bien conocida y que están determinados para valores por encima de los 100 μT . Sin embargo, no ocurre lo mismo para los efectos a largo plazo; actualmente se desconoce un mecanismo biofísico que pueda servir de base para establecer una asociación entre la exposición a los campos ELF como causa de enfermedades. No obstante, la Agencia Internacional de Investigaciones sobre el Cáncer determinó en 2002 una leve asociación entre la leucemia infantil y los campos magnéticos ELF, calificándose éstos como “posibles carcinógenos para las personas”, para exposiciones superiores a 0.3-0.4 μT , y es por ello que numerosos estudios se están centrando en este tema. En cuanto a otro tipo de enfermedades (neurodegenerativas, cardiovasculares...) todos los resulta-

dos son “inconsistentes o inadecuados”, de modo que no se ha podido establecer una asociación causa-enfermedad.

Sí es también de interés que los campos ELF pueden ser causa de interferencia electromagnética en marcapasos y otros aparatos médicos implantados, por lo que las personas que utilizan estos dispositivos deberían consultar a su médico para determinar en qué medida son susceptibles a esos efectos.

Los tipos de estudios se centran ahora en determinar posibles asociaciones entre la exposición a campos ELF (especialmente los campos magnéticos) y los efectos a largo plazo, principalmente con el cáncer. El resultado global de estos estudios podría modificar los estándares de exposición, como el IEEE C95.6TM [4] o el estándar ICNIRP [5], cuyos límites de exposición están centrados en los efectos a corto plazo.

- Normativa y estandarización

Las divergencias de los valores límite entre los dos estándares comentados ponen de manifiesto que, a día de hoy, no existe un consenso en cuanto a niveles de exposición. La comunidad de expertos pretende llegar a una armonización donde queden definidos de forma internacional los límites de exposición; y es por ello por lo que, como se ha dicho anteriormente, los estudios se están centrando en determinar la principal laguna científica, que son los efectos a largo plazo. Esta es una de las posibles razones por lo que se ha pospuesto la entrada en vigor de la directiva 2004/40/CE. Otras causas de interés son las posibles incidencias que podrían provocar la aplicación de la directiva anterior en la utilización de procedimientos médicos que se basan en la imagen médica (Resonancias Magnéticas) y en determinadas actividades industriales. Por tanto, en España los aspectos del trabajo relativos a la exposición de los campos ELF se rigen ahora mismo por recomendaciones, puesto que la directiva no está transpuesta al derecho interno español.

Los métodos de medida, bien de forma directa, a partir de instrumentos de medición; o indirecta, a partir de estimaciones de los campos generados por las líneas de transmisión de energía, a partir de su estructura (número de fases, balance de corrientes...) y registros de datos de carga, también juegan un papel importante en la armonización de la normativa. Estos métodos, junto con la instrumentación adecuada, y un protocolo de medición estandarizado, conforman el conjunto de elementos necesarios para realizar mediciones fiables y verificar si se cumplen los límites de exposición. No se ha encontrado un estándar específico para la medición y evaluación de límites de exposición de los campos ELF respecto a los seres humanos; sin embargo, sí se encuentra en desarrollo el estándar IEEE PC95.3.1TM: “*Recommended practice for Measurements and Computation of Electric, Magnetic and Electromagnetic Fields With Respect to Human Exposure to Such Fields, 0-100 kHz*” [q], elaborado específicamente para determinar el cumplimiento de los

niveles de exposición de campos ELF. En esa misma propuesta de desarrollo [q] se hace referencia al estándar IEEE Std 1460-1996: *"IEEE Guide for the measurement of Quasi-Static Magnetic and Electric Fields"* [90], ratificado en junio de 2008, y que, aunque no trata de forma directa la evaluación de los niveles de exposición ELF en los seres humanos, sí establece unas pautas iniciales muy relacionadas, con objetivos y métodos (caracterización de parámetros del campo magnético).

También existen recomendaciones para la medida de los campos magnéticos y eléctricos en líneas de transporte de energía, como el estándar IEEE Std 644-1944: *IEEE Standard Procedures for Measurements of Power Frequency Electric and Magnetic Fields From Ac Power Lines* [39], o la norma UNE 215001:2004 *"Procedimientos normalizados para la medida de los campos eléctricos y magnéticos de frecuencia industrial producidos por las líneas eléctricas de alta tensión"*.

- Medidas de prevención y protección

Se han expuesto posibles medidas para la reducción de la exposición a los campos ELF, como pueden ser las formas de reducción de los campos en el hogar en función de la estructura de la instalación eléctrica, las opciones de reducción para los dispositivos eléctricos en los hogares, y medidas de reducción en las líneas de transporte de energía. Como resultado de las opciones estudiadas, el organismo SAGE (*Stakeholder Advisory Group on ELF EMFs*) [7] determina que la opción que verdaderamente puede tener un mayor impacto en la reducción de la exposición a los campos ELF es la más evidente, y es la restricción entre la distancia entre edificios de "alta ocupación" (escuelas, hogares, centros comerciales...) con las líneas de transporte de energía, pretendiéndose evitar una exposición mayor de $0.4 \mu\text{T}$. Además, entre otras opciones, se recomienda la elaboración de una guía que ponga en conocimiento todos los aspectos de reducción de campos en el hogar sobre las acciones posibles para reducir la exposición a los campos generados por equipos eléctricos.

Por otra parte, la OMS indica que no son necesarias medidas de protección específicas para el conjunto de la población, dado que, hoy por hoy, la información científica es sólo vagamente concluyente y no establece que la exposición a campos ELF, a los niveles habituales en nuestro medio, puedan causar efectos perjudiciales para la salud. En los lugares donde haya fuentes de exposición a campos ELF, el acceso del público se deberá restringir mediante cercas o vallas, de modo que no serán necesarias medidas de protección adicionales.

Para el ámbito laboral también se han comentado algunas medidas de apantallamiento, que pueden ser útiles en ciertos tipos de trabajo (y en casos residenciales donde haya equipos generadores de campos intensos, como puede ser un transformador de

gran potencia cerca de una zona residencial). Frente a los campos eléctricos de 50/60 Hz puede conseguirse protección con relativa facilidad interponiendo materiales aislantes, siendo esta medida solamente necesaria para quienes trabajan en lugares en que los campos son muy intensos. En este tipo de campos, lo más habitual es que el acceso del personal esté restringido. En cuanto a los campos magnéticos ELF, según la OMS, no existe ninguna solución práctica y económica para protegerse. Cuando éstos son muy intensos, el único método de protección viable consiste en limitar la presencia del personal.

- Recomendaciones

La recopilación más extensa y reciente realizada hasta ahora es la elaborada por la Organización Mundial de la Salud, en el proyecto *International EMF Project*, en la monografía 238 [2], y es por ello por lo que se han mostrado sus recomendaciones para las futuras líneas de investigación. La línea básica que se pretende reforzar es el estudio entre la asociación de la leucemia infantil y los campos magnéticos ELF.

Por nuestra parte, creemos conveniente potenciar la difusión del conocimiento de los efectos producidos por los campos ELF, promover la investigación de los aspectos sobre los cuales hay una cierta incertidumbre, relacionada con posibles efectos perjudiciales en la salud a largo plazo, ante la exposición de ciertos niveles de campo magnético. También consideramos adecuado que se tomen las medidas necesarias de prevención y protección de forma justificada, sin tener por ello que implantar políticas basadas en la adopción de límites arbitrariamente bajos.

Bibliografía

Bibliografía consultada

- [1] ELF Working Group of the Federal-Provincial-Territorial Radiation Protection Committee. PDF *"Health Effects and Exposure Guidelines Related to Extremely Low Frequency Electric and Magnetic Fields - An Overview"* Canada, Enero 2005.
- [2] World Health Organization. *"Environmental Health Criteria 238. Extremely Low Frequency Fields"*. 2007. ISBN: 978 92 4 157238 5.
- [3] National Institute of Environmental Health Sciences and National Institute of Health. EMF Rapid Program. *"EMF Electric and Magnetic Fields Associated with the Use of Electric Power, Questions & Answers"*. Junio 2002.
- [4] IEEE Std C95.6TM. *"IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Electromagnetic Fields, 0-3 kHz"*. Octubre 2002. ISBN 0-7381-3389-2.
- [5] ICNIRP. *"Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz)"*. 1998. Health Physics 74 (4): 494-522.
- [6] Organización Mundial de la Salud. *"Estableciendo un diálogo sobre los riesgos de los campos electromagnéticos"*. 2005. ISBN: 92 4 354571X.
- [7] Stakeholder Advisory Group on ELF EMFs (SAGE). *"Precautionary approaches to ELF EMFs"*. Abril 2007.
- [8] J. Patrick Reilly. *"An analysis of differences in the low-frequency electric and magnetic field exposure standards of ICES and ICNIRP"*. 2005. Health Physics 89(1): 71-80.

- [9] ICNIRP. *"Response to questions and comments on the guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electro-magnetic fields (up to 300 GHz)"*. 1998. Health Physics 75(4): 438-439.
- [10] ICNIRP. *"Guidelines on Limits on Exposure to Static Magnetic Fields"*. 1994. Health Physics 66(1): 100-106.
- [11] Feychting M, Ahlbom A. *"Magnetic fields and cancer in children residing near Swedish high-voltage power lines"*. 1993. American Journal of Epidemiology 138(7):467-481.
- [12] Wertheimer N, Leeper E. *"Electrical wiring configurations and childhood cancer"*. 1979. American Journal of Epidemiology, 109(3):273-284.
- [13] Kheifets L et al. *"Occupational electric and magnetic field exposure and leukemia. A meta-analysis"*. 1997. Journal of Occupational and Environmental Medicine, 39(11):1074-1091.
- [14] Schüz J et al. *"Extremely low-frequency magnetic fields in residences in Germany. Distribution of measurements, comparison of two methods for assessing exposure, and predictors for the occurrence of magnetic fields above background level"*. Radiation Environmental Biophysics. 2000. 39(4):233-240.
- [15] Schüz J et al. *"Residential magnetic fields as a risk factor for childhood acute leukaemia:Results from a German population-based case-control study"*. 2001. International Journal of Cancer, 91(5):728-735.
- [16] Linet MS et al. *"Residential exposure to magnetic fields and acute lymphoblastic leukemia in children"*. 1997. New England Journal of Medicine, 337:1-7.
- [17] Greenland S et al. *"A pooled analysis of magnetic fields, wire codes, and childhood leukemia"*. 2000. Epidemiology, 11(6):624-634.
- [18] Ahlbom A et al. *"A pooled analysis of magnetic fields and childhood leukemia"*. 2000. British Journal of Cancer, 83(5):692-698.
- [19] Swanson J, Kaune WT. *"Comparison of residential power-frequency magnetic fields away from appliances in different countries"*. 1999. Bioelectromagnetics, 20(4):244-254.
- [20] Mader DL, Peralta SB. *"Residential exposure to 60-Hz magnetic-fields from appliances"*. 1992. Bioelectromagnetics, 13(4):287-301.

- [21] Mezei G et al. "Household appliance use and residential exposure to 60 Hz magnetic fields". 2001. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, 11(1):41-49.
- [22] Sun WQ et al. "Characterization of the 60-Hz magnetic fields in schools of the Carleton Board of Education". 1995. *AIHA Journal*, 56:12-15.
- [23] Kaune WT et al. "Development of a protocol for assessing time-weighted-average exposures of young children to power-frequency magnetic fields". 1994. *Bioelectromagnetics*, 15(1):33-51.
- [24] UKCCSI - UK Childhood Cancer Study Investigators. "Exposure to power-frequency magnetic fields and the risk of childhood cancer". 1999. *Lancet*, 354(9194):1925-1931.
- [25] Milham S. "Mortality in workers exposed to electromagnetic fields. 1985. *Environmental Health Perspectives*". 1985. 62:297-300.
- [26] Zaffanella L, Kalton GW. "Survey of personal magnetic field exposure". Phase II: 1000-person survey. EMF RAPID Program Engineering Project No.6. Oak Ridge, TN, Lockheed MartinEnergy Systems, 1998.
- [27] Forssén UM et al. "Occupational magnetic field exposure among women in Stockholm. County, Sweden". 2004. *Occupational and Environmental Medicine*, 61(7):594-602.
- [28] Harrington JM et al. "Leukemia mortality in relation to magnetic field exposure: findings from a study of United Kingdom electricity generation and transmission workers, 1973-97". 2001. *Occupational and Environmental Medicine* 58:307-314.
- [29] J.C. Niple, J.P. Daigle, L.E. Zaffanella, T. Sullivan, R. Chalet. "A portable meter for measuring low frequency currents in the human body". 2004. *Bioelectromagnetics*. 25(5), 369 – 373.
- [30] Green LM et al. "Childhood leukemia and personal monitoring of residential exposures to electric and magnetic fields in Ontario, Canada". 1999. *Cancer Causes Control*, 10:233-243.
- [31] McBride ML et al. "Power-frequency electric and magnetic fields and risk of childhood leukemia in Canada". 1999. *American Journal of Epidemiology*, 149(9):831-842.

- [32] Skinner J et al. "Exposure to power frequency electric fields and the risk of childhood cancer in the UK". 2002. British Journal of Cancer, 87(11):1257-1266.
- [33] Maslanyj MP et al. "Investigation of the sources of residential power frequency magnetic field exposure in the UK Childhood Cancer Study". 2007. Journal of Radiological Protection, 27(1):41-58.
- [34] Organización Internacional del Trabajo. "Factores ambientales en el lugar de trabajo". 2001. ISBN 92-2-311628-7.
- [35] Savitz DA et al. "Case-control study of childhood cancer and exposure to 60-Hz magnetic fields". 1988. American Journal of Epidemiology, 128(1):21-38.
- [36] UKCCSI - UK Childhood Cancer Study Investigators. "Exposure to power-frequency magnetic fields and the risk of childhood cancer". 1999. Lancet, 353(9194):1925-1931.
- [37] Stakeholder Advisory Group on ELF EMFs (SAGE). "Precautionary approaches to ELF EMFs. Supporting Papers to the First Interim Assessment: Power Lines & Property, Wiring in Homes and Electrical Equipment in Homes". Abril 2007.
- [38] Oren Hartal, Moshe Merzer, Moshe Netzer. "Shielding from ELF fields Emanating from Power Plants in Large Facilities". 2005. The environmentalist, 25,209-214.
- [39] IEEE Std 644-1994. Transmission and Distribution Committee. "IEEE Standard Procedures for Measurements of Power Frequency Electric and Magnetic Fields From Ac Power Lines". Diciembre 1994. ISBN 1-55937-499-3.
- [40] Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales, Organización Internacional del Trabajo. "Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo. Riesgos generales". Radiaciones No Ionizantes, Capítulo 49.
- [41] IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. Non-ionizing Radiation. "Volume 80. Part 1: Static and Extremely Low Frequency (ELF) electric and magnetic fields". Marzo 2002.
- [42] Directiva 2004/40/CE del Parlamento Europeo y del Consejo. "Sobre disposiciones mínimas de seguridad y de salud relativas a la exposición de los trabajadores a los riesgos derivados de los agentes físicos (campos electromagnéticos) (decimotava Directiva específica con arreglo al apartado 1 el artículo 16 de la directiva 89/391/CE)". 29 de abril de 2004.

- [43] Propuesta de Directiva del Parlamento Europeo y del Consejo. *"Por la que se modifica la Directiva 2004/40/CE sobre las disposiciones mínimas de seguridad relativas a la exposición de los trabajadores a los riesgos derivados de los agentes físicos (campos electromagnéticos) (decimoctava Directiva específica con arreglo al apartado 1 del artículo 16 de la directiva 89/391/CE)".* 26 de octubre de 2007.
- [44] Jesús M. Paniagua, Antonio Jiménez, Montaña Rufo, Alicia Antolín. *"Exposure Assesment of ELF Magnetic Fields in Urban Environments in Extremadura (Spain)".* 2004. *Bioelectromagnetics*, 25:58-62.
- [45] Grupo Pandora S.A. *"Campos magnéticos y eléctricos de 50 Hz".* 2001. ISBN 84-9320590-7. Publicación realizada con la colaboración de Endesa y UNESA.
- [46] Jesús M. Panigua et al. *"Exposure to extremely low frequency magnetic fields in an urban area".* 2007. *Radiation and Environmental Biophysics*, 46:69-76.
- [47] A. Tardón et al. *"Exposure to extremely low frequency magnetic fields among primary school children in Spain".* 2002. *Journal of Epidemiology and Community Health*, 56:432-433.
- [48] García, A. M., Sisternas, A., Pérez-Hoyos, S. *"Occupational exposure to extremely low frequency electric and magnetic fields and Alzheimer disease: A meta-analysis".* 2008. *International Journal of Epidemiology*, 37, 2, 329-340.
- [49] Directiva 2008/46/CE del Parlamento Europeo y del Consejo. *"Por la que se modifica 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 los agentes físicos (campos electromagnéticos) (decimoctava Directiva específica con arreglo al apartado 1 el artículo 16 de la directiva 89/391/CE)".* 23 de abril de 2008.
- [50] NRC. National Research Council. *"Possible health effects of exposure to residential electric and magnetic fields".* 1997. Washington, DC, National Academy Press.
- [51] Recomendación del Consejo 1999/519/CE *"relativa a la exposición de público en general a campos electromagnéticos (0 Hz a 300 GHz)".* 12 de julio de 1999.
- [52] NIEHS. National Institute of Environmental Health Sciences. *"Assesment of health effects from exposure to power-line frequency electric and magnetic fields. National Intitute of Environmental Health Sciences Working Group Report".* 1998. Publicación NIH: No 98-3981.
- [53] ICNIRP. *"Exposure to static and low frequency electromagnetic fields, biological ef-*

- fects and health consequences (0-100 kHz)". 2003. Bernhardt JH et al., eds. Oberschleissheim.
- [54] McKinlay AF et al. *"Review of the scientific evidence for limiting exposure to electromagnetic fields (0-300 GHz)"*. Chilton, Didcot, National Radiological Protection Board. 2004. NRPB, Vol 15, No 3.
- [55] AGNIR. Advisory Group on Non-Ionising Radiation. *"Power Frequency Electromagnetic Fields, Melatonin and the Risk of Breast Cancer"*. Health Protection Agency. 2006 (Documentos de Health Protection Agency, Series B: Radiaton, Chemical and Environmental Hazards, RCE-1).
- [56] Stevens RG. *"Electric power use and breast cancer: a hypothesis"*. 1987. American Journal of Epidemiology, 125(4).
- [57] Savitz et al. *"Magnetic field exposure and neurodegenerative disease mortality among electric utility workers"*. 1998. Epidemiology, 9(4 de Julio):398-404.
- [58] Savitz DA, Loomis DP, Tse CK. *"Electrical ocupations and neurodegenerative diseases: analysis of US mortality data"*. 1998. Arch Environ Health, 53(1):71-74.
- [59] Felician O, Sandson TA. *"The neurobiology and pharmacotherapy of Alzheimer's disease"*. 1999. J Neuropsychiatry Clin Neurosci, 11(1):19-31.
- [60] Coyle JT, Puttfarcken P (1993). *"Oxidative stress, glutamate and neurodegenerative disorders"*. 1993. Science, 262(5134):689-695.
- [61] Haynal A, Regli F. *"Amyotrophic lateral sclerosis associated with accumulated electric injury"*. 1964. Confin Neurol, 24:189-198.
- [62] AGNIR. Advisory Group on Non-Ionising Radiation. *"ELF electromagnetic fields and neurodegenerative disease"*. 2001. Chilton, National Radiological Protection Board. (Documentos de NRPB, Vol.12, No.4).
- [63] Lacy-Hulbert A, Metcalfe JC, Hesketh R. *"Biological responses to electromagnetic fields"*.1998. FASED J, 12(6):395-420.
- [64] Asanova TP, Rakov AI. *"The state of health of persons working in the electric field of outdoor 400 and 500 kV swithyards"*. 1966. Gig Tr Prof Zabol, 10:50-52.
- [65] Rubtsova NB et al. *"Study on commercial frequency electromagnetic side effects on human health and their hygienic rating criteria"* 1998. Proceeding of an international meeting, Moscow, 18-22 May. Geneva, World Health Organization.

- [66] Hocking B. *"Non ionising electromagnetic radiation"*. 1994. Aust Fam Physician, 23(7):1388-1389.
- [67] Knave B et al. *"Long term exposure to electric fields. A cross-sectional epidemiologic investigation on occupationally exposed high voltage substation workers"*. 1979. Scand J Environ Health, 5:115-125.
- [68] Dasdag S et al. *"Effects on extremely low frequency electromagnetic fields on hematologic and immunologic parameters in welders"*. 2002. Arch Med Res, 33(1):29-32.
- [69] Thun-Battersby et al. *"Exposure of Sprague-Dawley rats to a 50 Hz, 100 microTesla magnetic field for 27 weeks facilitates mammary tumorigenesis in the 7,12-dimethylbenz[a]-anthracene model of breast cancer"*. 1999. Cancer Res, 59(15):3627-3633.
- [70] Ikeda et al. *"No effects of extremely low frequency magnetic fields found on cytotoxic activities and cytokine production of human peripheral blood mononuclear cells in vitro"*. 2003. Bioelectromagnetics, 24(1):21-31.
- [71] AGNIR. *"Health effects related to the use of Visual Display Units"*. 1994. Chilton (Documento de NRPB, Vol.12, No.4).
- [72] Brent RL et al. *"Reproductive teratologic effects of low-frequency electromagnetic fields: A review of in vivo and in vitro studies using animals models"*. 1999. Teratology, 59(4):261-286.
- [73] Husskonen H et al. *"Teratogenic and reproductive effects of low-frequency magnetic fields"*. 1988. Mutat Res, 410(2):167-183.
- [74] Ahlbom A, Feychting M. *"Current thinking about risks from currents"*. 2001. Lancet, 357:1143-1144.
- [75] Kabuto M et al. *"Childhood leukaemia and magnetic fields in Japan: a case control study of childhood leukaemia and residential power-frequency magnetic fields in Japan"*. 2006. Int J Cancer, 119(3):643-650.
- [76] Draper G et al. *"Childhood cancer in relation to distance from high voltage power lines in England and Wales: a case-control study"*. 2005. Br Med J, 330(7503):1290.
- [77] Kabat GC et al. *"Electric blanket use and breast cancer on Long Island"*. 2003. Epidemiology, 14(5):514-520.

- [78] Schoenfeld ER et al. *"Electromagnetic fields and breast cancer on Long Island: a case control study"*. 2003. Am J Epidemiol, 158(1):47-58.
- [79] Tynes T, Haldorsen T. *"Electromagnetic fields and occupational exposure to 50 Hz magnetic fields and malignant melanoma: a population based study"*. 2003. Occup Environ Med, 60(5):343-347.
- [80] Kleinerman RA et al. *"Self-reported electrical appliance use and risk of adult brain tumors"*. 2005. Am J Epidemiol, 161(2):136-146.
- [81] Boorman GA et al. *"Magnetic fields and mammary cancer in rodents: a critical review and evaluation of published literature"*. 2000. Radiat Res, 153(5 Pt 2):617:626.
- [82] Boorman GA et al. *"Leukemia and lymphoma incidence in rodents exposed to low-frequency magnetic fields"*. 2000. Radiat Res, 153(5 Pt 2):627:636.
- [83] McCann J et al. *"Assesing the potential carcinogenic activity of magnetic fields using animal models"*. 2000. Environ Health Perspect, 108(Suppl 1):79-100.
- [84] Stronati L et al. *"Absence of genotoxicity in human blood cells exposed to 50 Hz magnetic fields as assessed by comet essay, chromosome aberration, micronucleus, and sister chromatid exchange analyses"*. 2004. Bioelectromagnetics, 25(1):41-48.
- [85] Testa A et al. *"Evaluation of genotoxic effect of low level 50 Hz magnetic fields on human blood cells using different cytogenetic assays"*. 2004 Bioelectromagnetics, 25(8):613-619.
- [86] Del Re et al. *"Various effects on transposition activity and survival of Escherichia coli cells due to different ELF-MF signals"*. 2004. Radiat Environ Biophys, 43(4):265-270.
- [87] Wolf FI et al. *"50 Hz extremely low frequency electromagnetic fields enhance cell proliferation and DNA damage: possible involvement of a redox mechanism"*. 2005. Biochim Biophys Acta, 1743(1-2):120-129.
- [88] Darío San Martín Ferrer. *"Campos electromagnéticos debidos a líneas de alta tensión y centrales de transformación"*. 2001. XII Congreso Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo.
- [89] Subdirección General de Sanidad y Salud Laboral, Dirección General de Salud Pública y Consumo, Ministerio de Sanidad y Consumo. *"Campos electromagnéticos y salud pública, informe técnico elaborado por el comité de expertos"*. 2001.

- [90] IEEE Std 1460-1996™. *"IEEE Guide for the measurement of Quasi-Static Magnetic and Electric Fields"*. Diciembre 1996.
- [91] IEEE Std 1140-1994™. *"IEEE Standard Procedures for the Measurement of Electric and Magnetic Fields from Video Display Terminals (VDTs) From 5 Hz to 400 kHz"*. Marzo 1994.
- [92] Cook et al. *"A replication study of human exposure to 60 Hz fields"*. 1992. *Bioelectromagnetics*, vol 13, pp. 261-285.
- [93] IEEE Std 1308-1994™. *"IEEE Recommended Practice for Instrumentation: Specifications for Magnetic Flux Density and Electric Field Strength Meters- 10 Hz to 3 kHz"*. Diciembre 1994.
- [94] Real Decreto 1066/2001, de 28 de septiembre, *"por el que se aprueba el Reglamento que establece condiciones de protección del dominio público radioeléctrico, restricciones a las emisiones radioeléctricas y medidas de protección sanitaria frente a emisiones radioeléctricas"*. BOE nº 234 29-8-2001.
- [95] AENOR. Norma UNE 215001:2004 *"Procedimientos normalizados para la medida de los campos eléctricos y magnéticos producidos por las líneas eléctricas de alta tensión"*. Diciembre 2004.
- [96] Juan Manuel Oliveras Sevilla. *"Prevención de riesgos producidos por electrosmog"*. *Revista Técnica Industrial*, Julio-Agosto 2008, n. 276, p. 46-52.
- [97] U. Valladolid, UNESA, CSIC y Red Eléctrica de España. *"Cinco años de investigación sobre los efectos biológicos de los campos electromagnéticos de frecuencia industrial en los seres vivos"*. Editado marzo 2001.
- [98] Lai H, Singh NP. *"Magnetic-field-induced DNA strand breaks in brain cells of the rat"*. 2004. *Environ Health Perspect*, 112(6):687694.
- [99] Svedenstål B-M et al. *"DNA damage, cell kinetics and ODC activities studied in CBA mice exposed to electromagnetic fields generated by transmission lines"*. 1999. *In Vivo*, 13:507-514.

Referencias electrónicas

[a] **www.emfs.info**

Página web con extensa información sobre los campos magnéticos y eléctricos, resúmenes de estudios realizados, descripción de las fuentes generadoras, conclusiones elaboradas por diferentes grupos de expertos y enlaces categorizados sobre normativas y proyectos. Fecha de consulta: noviembre 2008.

[b] **www.who.int/peh-emf/project/en/**

Página web del *EMF Project*, uno de los proyectos más importantes sobre los campos magnéticos y eléctricos ELF. Fecha de consulta: junio 2008.

[c] **www.fms-corp.com**

Empresa especializada en técnicas de apantallamiento de campos electromagnéticos. Fecha de consulta: abril 2008.

[d] **www.emc-consultants.co.uk**

Consultora de técnicas de apantallamiento y compatibilidad electromagnética. Fecha de consulta: abril 2008.

[e] **tlacaelel.igeofcu.unam.mx/~GeoD/geod2000/magnet/magneta.html**

Algunos conceptos sobre el campo geomagnético. Fecha de consulta: mayo 2008

[f] **www.mumetal.com**

Página web con información sobre el material mu-metal. Fecha de consulta: febrero 2008.

[g] **www.nationalgrid.com/uk/electricity**

Información sobre el transporte de energía y las líneas de alta tensión del Reino Unido, datos de demanda, etc... Fecha de consulta: noviembre 2008.

[h] **www.icnirp.org**

Página web oficial de la Comisión Internacional de Protección contra Radiaciones No Ionizantes. Fecha de consulta: febrero 2008.

[i] www.cdc.gov/niosh

Página web del Instituto Nacional de Seguridad y Salud Ocupacional.
Fecha de consulta: febrero 2008.

[j] www.hpa.org.uk

Página web de la Agencia de Protección de la Salud. En ella se puede encontrar la sección perteneciente a la exposición a radiaciones (National Radiological Protection Board). Fecha de consulta: mayo 2008.

[k] www.niehs.nih.gov

Página web del Instituto Nacional de Ciencias de Salud Ambiental.
Fecha de consulta: abril 2008.

[l] www.mtas.es/insht/ntp/ntp_698.htm

NTP 698. Norma técnica preventiva para valorar los niveles de exposición laboral. Se comentan los Reales Decretos y Directivas relacionadas con la exposición a los campos electromagnéticos. Fecha de consulta: abril 2008.

[m] www.bccdc.org

Agencia relacionada el control de enfermedades, perteneciente a las autoridades de servicios de la salud provinciales, situada en Vancouver (Canadá). Fecha de consulta: marzo 2008.

[n] www.who.int/peh-emf/research/database/studychart

Extensa base de datos del EMF Project, incluyendo una clasificación por rangos de frecuencia y tipos y subtipos de estudios. En ella se pueden encontrar las principales líneas de estudios actuales. Fecha de consulta: junio 2008.

[o] www.iarc.fr

Página web oficial del Centro Internacional de Investigaciones sobre el Cáncer.
Fecha de consulta: julio 2008.

[p] www.arpansa.gov.au

Página web oficial de la Agencia federal australiana para la seguridad nuclear y protección contra radiaciones. En ella se pueden encontrar diversas encuestas de exposición y datos de mediciones relacionadas con la exposición a los campos ELF. Fecha de consulta: octubre 2008.

[q] **standards.ieee.org/announcements/pr_pc9531.html**

Propuesta del estándar IEEE PC95.3.1™, "*Recommended Practice for Measurements and Computation of Electric, Magnetic and Electromagnetic Fields With Respect to Human Exposure to Such Fields, 0 - 100 kHz*". Fecha de consulta: mayo 2008.

[r] **www.theiet.org**

Página web oficial del Instituto de Ingeniería y Tecnología, un organismo británico profesional con más de 153000 miembros. Fecha de consulta: junio 2008.

[s] **www.euro-emc.co.uk**

Empresa especializada en soluciones de aislamiento para campos electromagnéticos. Fecha de consulta: agosto 2008.

[t] **www.lakeshore.com**

Empresa especializada en tecnologías de medida, entre ellos, instrumentos de medida de campos magnéticos ELF. Fecha de consulta: septiembre 2008.

[u] **www.ets-lindgren.com**

Empresa que ofrece equipos de medida, dispositivos de aislamiento, analizadores acústicos, etc... Fecha de consulta: agosto 2008.

[v] **www.servivencia.es**

Empresa española especializada en equipos de medición. Fecha de consulta: mayo 2008.

[w] **www.msc.es**

Ministerio de Sanidad y Consumo del gobierno de España. Se puede encontrar información relacionada con la salud ambiental y laboral en diversos temas, entre ellos, los campos ELF. Fecha de consulta: octubre 2008.

[x] **www.unesa.es**

Página web oficial de la Asociación Española de la Industria Eléctrica. Contiene información interesante relacionada con métodos de trabajo, estudios sobre exposición a campos ELF, etc... Fecha de consulta: septiembre 2008.

[y] **www.enertech.net**

Empresa americana especializada en medición de campos electromagnéticos. Fecha de consulta: septiembre 2008.

[z] eur-lex.europa.eu/es/index.htm

Enlace donde se puede consultar la legislación vigente Comunitaria de la Unión Europea. Fecha de consulta: noviembre 2008.

[a1] www.blauer-engel.de

Página web oficial de la certificación alemana *Blauer Engel*. Se trata de un certificado medioambiental para productos y servicios que toman las medidas pertinentes para respetar al medio ambiente. Entre los criterios posibles para esta marca de calidad, está el RAL-UZ 106, que considera, entre otros aspectos, la reducción de los campos electromagnéticos generados por teléfonos móviles. Fecha de consulta: noviembre 2008.

[b1] www.elektrosmog.com

Página web alemana que proporciona información sobre la exposición a los campos magnéticos y eléctricos, generados por diferentes dispositivos eléctricos (electrosmog), y los posibles efectos y patologías en la salud humana. Fecha de consulta: noviembre 2008.

[c1] www.insht.es

Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. Órgano Científico-Técnico especializado de la Administración General del Estado que tiene como misión el análisis y estudio de las Condiciones de Seguridad y Salud en el Trabajo, así como la promoción y apoyo a la mejora de las mismas. Fecha de consulta: junio 2008.

Apéndices

Apéndice I

Glosario

Definiciones de otros términos se pueden encontrar en [2, 4, a³¹].

Campo del entorno: Campo magnético o eléctrico externo al cuerpo y medido sin la presencia de dicho cuerpo.

Campo perturbado: Campo cuya magnitud o dirección, o ambas, han cambiado debido a la introducción de un objeto, con respecto a los valores que mantendrían si no estuviese tal objeto.

El campo eléctrico en la superficie del objeto es, en general, fuertemente perturbado por su presencia. A frecuencia industrial, el campo magnético no es, en general, fuertemente perturbado por la presencia de objetos que no contienen materiales magnéticos. Son excepciones a lo anterior las regiones próximas a la superficie de conductores eléctricos gruesos, en las que las corrientes inducidas alteran los campos magnéticos variables en el tiempo.

Campos pulsantes: De acuerdo con la bibliografía consultada, podemos definir campos pulsantes a un subconjunto de aquellos cuya forma de onda es no sinusoidal.

Carcinogénesis: Proceso por el cual las células normales se transforman en células cancerígenas.

Carga eléctrica: Propiedad eléctrica de la materia responsable de la creación de los campos eléctricos.

³¹ www.emfs.info/glossary.asp

Conductividad: Propiedad de los materiales que determina la magnitud de la densidad de corriente eléctrica cuando se aplica un campo eléctrico en el material, expresada en unidades de siemens por metro (S/m). Su valor es inverso al de la resistividad.

Corriente de contacto: Corriente que pasa a un medio biológico por medio del contacto con cualquier fuente de corriente.

Curva intensidad-duración: relación funcional entre el límite de excitación y la duración de un estímulo.

Curva intensidad-frecuencia: relación funcional entre el límite de excitación y la frecuencia de un estímulo.

Densidad de corriente: Vector tal que su integral a lo largo de una superficie es igual a la corriente que circula por dicha superficie; la densidad de corriente media en un conductor lineal es igual a la corriente dividida el área transversal de la sección de dicho conductor. Las unidades son el amperio por metro cuadrado ($A\ m^{-2}$)

Distribución logarítmico-normal: Distribución estadística en la cual el logaritmo de la variable estadística está distribuido normalmente.

Dosis de exposición: Cantidad de exposición de un agente que produce un efecto biológico. En el caso de los campos electromagnéticos no está claro este concepto, porque no se sabe qué medir. Para un producto químico normalmente es la cantidad del producto que entra en el cuerpo.

Duración de fase (t_p): Tiempo entre los pasos por cero de una forma de onda con valor medio nulo. Para el caso de una forma de onda sinusoidal de frecuencia f , $t_p = 1/2 f$.

Para una forma de onda exponencial, t_p se interpreta como la duración medida desde su pico hasta el punto donde decae $0.37 \cdot e^{-1}$ de su valor .

Efecto adverso: efecto perjudicial para la salud de un individuo debido a la exposición de campos magnéticos o eléctricos, o a una corriente de contacto.

Efectos indirectos: efectos derivados de la interacción con un objeto cargado con un potencial distinto al del cuerpo (por ejemplo, tocar un objeto metálico cargado por encontrarse éste dentro de un campo eléctrico).

Efectos magnetohidrodinámicos: Fuerza o potencial en un volumen de fluido provocado por su movimiento ante la presencia de un campo magnético.

Efectos sinápticos: Alteraciones en las funciones de transmisión entre neuronas.

Epidemiología: Ciencia encargada del estudio de los aspectos ecológicos que condicionan los fenómenos de salud y enfermedad en los grupos humanos. Usa datos y procedimientos estadísticos en su análisis.

Estudios caso-control (*case-control*): Tipo de estudio epidemiológico en el que los sujetos se seleccionan en función de que tengan (caso) o no (control) una determinada enfermedad o, en general, un determinado efecto. Una vez seleccionados los individuos en cada grupo, se investiga si estuvieron expuestos o no a una característica de interés, y se compara la proporción de expuestos en el grupo de casos frente al grupo de controles.

Estudio de doble ciego: Estudio en el cual el sujeto estudiado y el experimentador desconocen si la exposición producida ha sido del agente en estudio (en este caso los campos ELF) o de un agente neutro, para evitar prejuicios subjetivos.

Estudios de cohortes: tipo de estudio epidemiológico donde un grupo de individuos (la cohorte) son examinados durante un periodo de tiempo para comprobar quiénes desarrollan la enfermedad bajo estudio.

Excitación cardíaca: Estimulación eléctrica para una contracción cardíaca.

Exposición: Se produce al entrar en contacto con un agente externo.

Ferromagnético: Material con permeabilidad magnética muy elevada.

Fosfenos: Fenómeno caracterizado por la visión de manchas luminosas, causada por la estimulación mecánica, eléctrica o magnética de la retina o corteza visual.

Intensidad de campo: La magnitud del campo eléctrico o magnético, usándose generalmente el valor eficaz.

Intervalo de confianza (IC): Se trata de un intervalo calculado cuando se realizan inferencias de un parámetro desconocido. Por ejemplo, para un IC del 90 % de un parámetro, si se repitiera el estudio, el resultado de dicho parámetro estaría dentro del intervalo de confianza especificado en el 90% de las ocasiones.

In situ: dentro de los tejidos biológicos.

In vitro: experimento científico llevado a cabo en laboratorio con material procedente de seres vivos (células aisladas, tejidos...).

Leucemia: Con este nombre, se describen varios tipos de cáncer que se originan en la médula ósea. Puede ser aguda o crónica.

Límite (*threshold*): Nivel de un estímulo que marca el límite entre respuesta y no respuesta.

Líneas de distribución: Líneas que distribuyen la electricidad en una zona. Funcionan entre 1000 y 30000 voltios.

Líneas de transporte: Líneas eléctricas utilizadas para llevar grandes cantidades de energía eléctrica a alta tensión. En términos generales, se consideran las líneas de transporte a las comprendidas entre 30000 y 400000 voltios.

Media ponderada en el tiempo (*Time-weighted-average, TWA*): Se trata de una forma de medida tomada en un período de tiempo, considerando los intervalos entre mediciones realizadas. En el caso de que las medidas se registraran con una tasa de muestreo constante, la medida TWA es equivalente a la media aritmética de las medidas.

Modelo animal: Especie estudiada para entender fenómenos biológicos particulares, y establecer comparaciones entre resultados, y cómo funcionarían en otros organismos (como puede ser el ser humano).

Mu-metal: Aleación utilizada para guiar el campo magnético.

Pantalla: Barrera mecánica que proporciona protección. Por ejemplo, una pantalla magnética proporciona un aislamiento ante los campos magnéticos.

Permeabilidad magnética: Es la relación entre la densidad de flujo magnético (B) y la intensidad de campo magnético (H). En la mayoría de los materiales, es igual a la permeabilidad en el vacío, en estos casos se puede usar B y H indistintamente.

Polarización celular: potencial eléctrico formado en una membrana celular.

Radiación no ionizante: Radiación que no tiene suficiente energía para romper enlaces o arrancar electrones. Las de frecuencia extremadamente baja, de 50-60 Hz, se conocen más como "campos" que como radiaciones.

Restricciones básicas: Limitaciones basadas en las fuerzas eléctricas "*in situ*" para evitar efectos adversos, con un factor de seguridad aceptable.

Rheobase: La mínima intensidad límite en una relación intensidad-duración (aplicable a un estímulo de duración largo en comparación con la constante de tiempo intensidad-duración). También aplicable a la estabilización mínima en una relación intensidad-frecuencia.

Apéndice II

Principales organismos de supervisión

| | | |
|------|--|-----|
| II.1 | INTRODUCCIÓN | 200 |
| II.2 | PRINCIPALES ORGANISMOS DE SUPERVISIÓN | 200 |
| | II.2.1 Organización Mundial de la Salud (OMS, 2007) | 200 |
| | II.2.2 Comité científico de la comisión europea en riesgos nuevos y emergentes identificados para la salud (2007) | 200 |
| | II.2.3 Consejo Nacional de Protección Radiológica (NRPB, 2001-2004) | 201 |
| | II.2.4 Departamento de Servicios de Salud de California (2002) | 202 |
| | II.2.5 Comisión Internacional de Protección contra Radiaciones No Ionizantes (ICNIRP, 2002) | 203 |
| | II.2.6 Agencia Internacional de Investigaciones sobre el Cáncer (IARC, 2001)..... | 204 |
| | II.2.7 Instituto Nacional de Ciencias de la Salud Ambiental (NIEHS, 1999) | 206 |
| | II.2.8 Academia Nacional de Ciencias (NAS, 1997) | 206 |

II.1 Introducción

En este apéndice se resumen las principales revisiones sobre los campos ELF y los efectos en la salud humana. Se muestran en orden cronológico, comenzando por la más reciente. En [a]³² se pueden consultar las 129 revisiones más importantes, realizadas desde 1977.

II.2 Principales organismos de supervisión

II.2.1 Organización Mundial de la Salud (OMS, 2007)

Las recomendaciones realizadas por este organismo se han expuesto en el **Capítulo 9** del presente documento. Por otra parte, en el **Capítulo 4** se han mostrado los resultados relativos a los estudios de enfermedades en seres humanos. En resumen, el estudio realizado por este organismo ha obtenido como conclusiones que, para enfermedades asociadas con el sistema neuroendocrino, enfermedades neurodegenerativas, cardiovasculares, relacionadas con la inmunología y hematología, y la reproducción y el desarrollo, no es posible establecer una asociación entre las mismas y la exposición a los campos ELF.

Sin embargo, se mantiene la clasificación de los campos magnéticos ELF como “posible carcinogénico para los seres humanos”, para el desarrollo de la leucemia en niños, especialmente ante exposiciones crónicas de baja intensidad, entre 0.3-0.4 μ T. Para otros tipos de cáncer, los resultados son inconsistentes o inadecuados.

Como conclusión, la evidencia científica que apoya una asociación entre los campos magnéticos y otro tipo de enfermedades es mucho más débil para cualquier tipo de enfermedad que para el desarrollo de la leucemia en niños. Además, en algunos casos, como en el cáncer de pecho o el desarrollo de enfermedades cardiovasculares, la evidencia encontrada es suficiente para asegurar que los campos ELF no son los causantes de tales patologías.

II.2.2 Comité científico de la comisión europea en riesgos nuevos y emergentes identificados para la salud (2007)

La conclusión de este comité, que especialmente ha analizado las frecuencias de 50-60 Hz, es:

³² www.emfs.info/expert_ScienceReviews.asp

“La conclusión previa de que los campos ELF son posibles carcinógenos, principalmente basada en estudios sobre la leucemia infantil en niños, es aún válida. Sin embargo, no se conoce un mecanismo que explique cómo la exposición a los campos ELF puede provocar dicha enfermedad. Los resultados obtenidos no se han repetido en estudios con animales. Además, para el cáncer de pecho y enfermedades cardiovasculares, estudios recientes indican que cualquier tipo de asociación es poco probable. En cuanto a enfermedades neurodegenerativas y tumores de cerebro, la relación con los campos ELF permanece como incógnita. Tampoco se ha demostrado una asociación entre los campos ELF y la hipersensibilidad eléctrica”.

II.2.3 Consejo Nacional de Protección Radiológica (NRPB, 2001-2004)

Las principales conclusiones obtenidas por este organismo son:

La evidencia epidemiológica de que la exposición media ponderada en el tiempo (*time-weighted average*) a los campos magnéticos, por encima de $0.4 \mu\text{T}$, está asociada a un pequeño riesgo con la leucemia en niños es, por ahora, una observación para la cual no se ha encontrado una explicación científica. No existe una evidencia clara de los efectos carcinógenos que puedan producirse por la exposición a los campos ELF en adultos, ni tampoco una explicación biológica plausible de la asociación que pueda obtenerse de experimentos celulares, moleculares, o con animales. Sí son posibles explicaciones alternativas para esta asociación epidemiológica: por ejemplo, posibles sesgos o tendencias en la selección de niños con leucemia en ciertos estudios, un número muy pequeño de niños afectados que podría ser una casualidad, etc... Todas estas explicaciones incrementan la incertidumbre de si sería posible establecer una asociación causal, o cuestionan la posible certeza de dicha asociación.

Estudios relacionados con la exposición ocupacional no han proporcionado una evidencia consistente de asociaciones con enfermedades neurodegenerativas. La única posible excepción, está relacionada con personas relacionadas con ocupaciones eléctricas, en las cuales parece incrementarse el riesgo de esclerosis lateral amiotrófica. Sin embargo, esto puede ser debido a efectos provocados por descargas eléctricas, más que a cualquier efecto relacionado con exposiciones crónicas de los campos *per se*.

Estudios relacionados con el suicidio y enfermedades depresivas han dado resultados inconsistentes en relación con la exposición ELF, y la evidencia con enfermedades cardiovasculares es débil.

De forma global, la evidencia de estudios relacionados con la exposición materna a campos ELF, en los puestos de trabajo, no indica ninguna asociación relacionada con

efectos en el embarazo, mientras que estudios de exposición materna en el hogar son difíciles de interpretar.

Los resultados de estudios relacionados con la fertilidad masculina, la tasa de natalidad, y el cáncer infantil en relación con la exposición de la ocupación paterna, han mostrado resultados inconsistentes.

El Consejo Nacional de Protección Radiológica concluye que los resultados en estudios epidemiológicos, llevados de forma individual o colectiva, no pueden utilizarse como base para restringir la exposición a los campos ELF.

II.2.4 Departamento de Servicios de Salud de California (2002)

La revisión realizada por este departamento se llevó a cabo por tres estudios científicos. Las conclusiones obtenidas fueron:

- En mayor o menor grado, en los tres estudios concluyó que los campos electromagnéticos pueden producir un aumento del riesgo de leucemia infantil, cáncer de cerebro en adultos, la enfermedad de *Lou Gehrig* (esclerosis lateral amiotrófica), y el aborto.
- La exposición a los campos ELF no es causa de malformaciones de nacimiento ni de bajo peso en el mismo.
- También se cree que los campos ELF no son carcinógenos universales, ya que existe un conjunto de tipos de cáncer que no están asociados con la exposición a éstos.
- En mayor o menor grado, en los tres estudios se concluyó que la exposición a los campos ELF no causa un incremento en el riesgo de cáncer de pecho, enfermedades del corazón, Alzheimer, depresión, o síntomas atribuibles a una sensibilidad relacionada con la exposición. Sin embargo,
- En los estudios se concluyó que prevalece como incógnita si la exposición a los campos ELF puede crear un incremento en el riesgo de suicidio.
- Para el caso de leucemia en adultos, dos de los estudios se mantienen en una posición similar al punto anterior, y uno de ellos se inclina más a afirmar que la exposición a los campos ELF provoca un incremento del riesgo de esta enfermedad.

Estas conclusiones han recibido numerosas críticas por parte de varios científicos, destacando su inconsistencia.

II.2.5 Comisión Internacional de Protección contra Radiaciones No Ionizantes (ICNIRP, 2002)

En este caso se realizó una revisión sobre la literatura epidemiológica disponible sobre los campos ELF, y la salud en humanos. El resumen de esta revisión es el siguiente:

La exposición a los campos magnéticos y eléctricos ELF, procedentes de la generación, transporte, y uso de la electricidad, forma parte integrante del estilo de vida actual (se entiende, de un país desarrollado). En cuanto a efectos potenciales adversos contra la salud humana, inicialmente se le dio una importancia a un estudio realizado hace dos décadas en Denver, sobre cáncer en niños. ICNIRP ha revisado toda la literatura actual sobre estudios epidemiológicos de la exposición ELF, y el desarrollo de enfermedades crónicas, con las siguientes conclusiones:

- La calidad de los estudios epidemiológicos en este tema ha ido mejorando a lo largo del tiempo, en términos de tamaño del estudio y rigor en la metodología empleada.
- La valoración de la exposición es una dificultad añadida en un estudio epidemiológico, en varios aspectos:
 - o La exposición es imperceptible, ubicua, de múltiples fuentes, y puede variar de forma significativa en función del tiempo, y en distancias cortas.
 - o Existe un periodo de exposición relevante, anterior a la fecha a la cual se pueden obtener los niveles de exposición, y cuya duración es desconocida.
 - o Se desconoce qué parámetro es el más apropiado para la valoración de la exposición, y no hay datos biológicos que puedan relacionar ninguno en particular.
 - o Ante la ausencia de una evidencia experimental, y dadas las incertidumbres metodológicas en la literatura epidemiológica, no hay una enfermedad crónica para la cual se pueda establecer una relación etiológica con la exposición a los campos ELF.
 - o Existen datos de calidad y fiables relativos al cáncer infantil, y también para leucemia en adultos y formación de tumores de cerebro, en relación con la exposición ocupacional. Entre todos los resultados evaluados en los estudios epidemiológicos sobre ELF, la leucemia infantil en relación con exposiciones después del nacimiento, por encima de $0.4 \mu\text{T}$, es el caso con el que se establece una asociación más fuerte. Se ha estimado un riesgo relativo de 2.0 (rango con un 95% de confianza: 1.27-3.13) en varios análisis combinados

(*pooled analysis*). Es poco probable que esto se deba al azar, pero podría ser, en parte, a sesgos o prejuicios en la muestra utilizada para el estudio. Esta asociación es difícil interpretar, ante la ausencia de un mecanismo conocido, o experimentos reproducibles que la apoyen. En el mayor estudio combinado, sólo el 0.8 % de los niños estaban expuestos a valores superiores a 0.4 μ T. Se hace necesario realizar nuevos estudios para comprobar hipótesis específicas, así como aspectos relacionados con tendencias en la selección o exposición. En base a los resultados obtenidos a los estudios epidemiológicos, la evidencia encontrada muestra una asociación con la esclerosis lateral amiotrófica en exposiciones ocupacionales, aunque las variables de confusión (*confounding*) podrían ser una posible explicación. Asociaciones con el cáncer de pecho, enfermedades cardiovasculares, suicido y depresión, permanecen sin resolver.

II.2.6 Agencia Internacional de Investigaciones sobre el Cáncer (IARC, 2001)

Este organismo es una agencia de la Organización Mundial de la Salud. Su unidad de Evaluación e Identificación de Carcinógenos ha publicado, desde 1972, monografías que valoran la evidencia de que varios agentes sean carcinógenos, clasificando éstos adecuadamente. En junio de 2001, se consideraron los campos ELF, y la decisión final fue clasificar a este agente como “posible carcinógeno”. Los resultados completos se han publicado en la monografía 80 (información más detallada se puede encontrar en [a]).

La clasificación como “posible carcinógeno” para los **campos magnéticos** ELF se basó en:

- Evidencia “limitada” en los humanos, y leucemia infantil.
- Evidencia “inadecuada” entre los humanos y otros tipos de cáncer.
- Evidencia “inadecuada” en animales.

, definiéndose:

- Evidencia “limitada”: cuando se restringe a un solo estudio o cuando existen cuestiones no resueltas relativas al diseño, realización o interpretación de un número determinado de estudios.
- Evidencia “inadecuada”: cuando los estudios realizados no muestran ni la presencia o ausencia de un efecto, debido a limitaciones cualitativas y cuantitativas, o por ausencia de datos.

Esta clasificación alude a que hay una cierta evidencia de que los campos ELF puedan causar cáncer en los seres humanos, pero no es lo suficientemente fuerte para extraer conclusiones.

En cuanto a los campos eléctricos, se consideraron como “no clasificables”, en base a una evidencia inadecuada, tanto en humanos como en animales. Los resultados obtenidos por IARC están de acuerdo con las conclusiones obtenidas por el Consejo Nacional de Protección Radiológica. Como clarificación, se muestran los grupos que establece la IARC para clasificar el potencial cancerígeno de un agente mediante los siguientes grupos [45]:

- Grupo 1: El agente es cancerígeno para el ser humano. Ejemplos: benceno, radón, rayos X, alcohol, tabaco, etc.
- Grupo 2: se divide en dos categorías
 - o Grupo 2A: El agente es probablemente cancerígeno para el ser humano. Ejemplos: benzopirenos, radiación ultravioleta (A, B y C), trabajar en refinerías de petróleo, etc.
 - o Grupo 2B: El agente es posiblemente cancerígeno para el ser humano. Ejemplos: café, cloroformo, gasolina, trabajar en tintorerías, carpinterías o en la industria textil, los **campos magnéticos ELF**, etc.
- Grupo 3: El agente no se puede clasificar en cuanto a su poder cancerígeno para los seres humanos. Ejemplos: té, sacarina, luz fluorescente, paracetamol, tintes de pelo, los **campos eléctricos ELF**, etc.
- Grupo 4: El agente probablemente no es cancerígeno para el ser humano.

En la **Tabla II.1** se muestra las posibles categorías de clasificación y las correspondencias con los campos **ELF**:

Tabla II.1 Categorías de clasificación de la IARC

| Categorías de clasificación | | | |
|---|---|---|---|
| | Evidencia en humanos | Evidencia en animales | Clasificación global |
| Categorías | Suficiente | Suficiente | 1 (carcinógeno) |
| | Limitada | Limitada | 2A (Probablemente carcinógeno) |
| | Inadecuada | Inadecuada | 2B (posiblemente carcinógeno) |
| | Sugiere que no es un agente carcinógeno | Sugiere que no es un agente carcinógeno | 3 (no clasificable) 4 (probablemente no carcinógeno) |
| Clasificación realizada por la IARC en la monografía 80 | | | |
| Campos magnéticos estáticos | Inadecuada | Inadecuada | 3 (no clasificable) |
| Campos eléctricos estáticos | Inadecuada | Inadecuada | 3 (no clasificable) |
| Campos magnéticos ELF | Leucemia en niños: limitada | Inadecuada | 2B (posiblemente carcinógeno) |
| | Otros tipos de cáncer: inadecuada | | |
| Campos eléctricos ELF | Inadecuada | Inadecuada | 3 (no clasificable) |

II.2.7 Instituto Nacional de Ciencias de la Salud Ambiental (NIEHS, 1999)

NIEHS concluye que la exposición a los campos ELF no puede establecerse como completamente segura, debido a una débil evidencia científica encontrada, de que dicha exposición pueda suponer un riesgo para el desarrollo de la leucemia. Sin embargo, el grado de asociación encontrado es insuficiente para justificar acciones de carácter restrictivo. No obstante, cualquier persona utiliza la electricidad en la vida cotidiana, y por tanto está constantemente expuesta a campos ELF, por lo que una acción reguladora de carácter pasivo sí está justificada, como puede ser la educación al público para reducir sus niveles de exposición. En lo que a otros tipos de cáncer se refiere, u otros tipos de enfermedades, los resultados obtenidos hacen que NIEHS no crea que puedan suponer un riesgo preocupante, en relación con la exposición a los campos ELF.

II.2.8 Academia Nacional de Ciencias (NAS, 1997)

En base a una evaluación de estudios publicados en relación a los efectos producidos por los campos magnéticos y eléctricos ELF en tejidos, células y organismos (inclu-

yendo los seres humanos), la conclusión de este comité es que la evidencia actual encontrada no muestra que la exposición a estos campos presente un riesgo para la salud humana. De forma específica, no se han encontrado evidencias consistentes y que demuestren que la exposición residencial a los campos ELF produzca cáncer, efectos adversos en el neurocomportamiento, o en la reproducción y el desarrollo. Una asociación entre la configuración del cableado en zonas residenciales y la leucemia infantil persiste en múltiples estudios, aunque el factor causante responsable para esa asociación estadística no ha sido identificado. Además, no hay ninguna evidencia que relacione las medidas instantáneas de los niveles de campo magnético con la leucemia infantil.

Apéndice III

Tablas de registros. Norma UNE-215001:2004

III.1 Introducción

En este apéndice se muestran las tablas de información de datos propuestas en la norma UNE-215001:2004 *“Procedimientos normalizados para la medida de los campos eléctricos y magnéticos producidos por las líneas eléctricas de alta tensión”* para las medidas de campos de líneas eléctricas.

Tabla III.1 Registro del campo eléctrico y magnético en líneas de alta tensión

| Fecha: | | Procedimiento: | | Página: | | | |
|---|-----|----------------|-----------------------|-----------------------------------|--------------------|-------------------|-----------------------|
| DATOS GENERALES DE LA MEDIDA | | | | | | | |
| FECHA: | | | | | | | PÁGINA N°: |
| DENOMINACIÓN ZONA MEDIDA: | | | | | | | |
| NÚMERO DE ZONA: | | | | | | | |
| INICIO: | | | | FIN: | | | |
| Hora(hh:mm) | | | | Hora(hh:mm) | | | |
| Temperatura (°C) | | | | | | | |
| Humedad (%): | | | | | | | |
| EMPLAZAMIENTO, SITUACIÓN Y TRAZADO | | | | RESPONSABLE DE LA MEDIDA | | | |
| Línea: | | | | Nombre y apellidos: | | | |
| Localidad: | | | | Firma: | | | |
| CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DE LA LÍNEA | | | | | | | |
| Vano | | | | Tipo de apoyo | | | |
| Apoyo 1-N°: | | Apoyo 2-N°: | | Apoyo N°: | | | Apoyo N°: |
| | N° | Izq/Der | N° conductor por fase | Tipo de conductor* | Diámetro* | Tipo de aislador* | Tensión nominal línea |
| CIRCUITOS | 1 | | | | | | |
| | 2 | | | | | | |
| | 3 | | | | | | |
| | 4 | | | | | | |
| TIERRAS | 1 | | | | | | |
| | 2 | | | | | | |
| Distancia a otras líneas: | | | | | | | |
| En línea subterránea, profundidad de la línea*: | | | | | | | |
| Distancia al lugar habitado más cercano: | | | | | | | |
| CONDICIONES ELÉCTRICAS DE LA LÍNEA | | | | | | | |
| Sentido de la corriente (caso que haya más de 1 circuito)*: | | | | Altura fase más cercana al suelo: | | | |
| | N°* | Izq/Der* | Hora* | Tensión real circuito (estimada) | Carga de la línea: | | |
| CIRCUITOS* | 1 | | | | | | |
| | 2 | | | | | | |
| | 3 | | | | | | |
| | 4 | | | | | | |

* Opcional

Tabla III.3 Líneas de alta tensión subterráneas

| Fecha: | | Procedimiento: | | | Página: |
|----------------------------|--|--|----------------|----------------|----------------|
| Perfil longitudinal | | INTENSIDAD DE CAMPO MAGNÉTICO/ UNIDAD (μT) | | | |
| Punto/distancia | B medio | B máx. | B eje X | B eje Y | B eje Z |
| 1/ | | | | | |
| 2/ | | | | | |
| 3/ | | | | | |
| 4/ | | | | | |
| 5/ | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| Perfil transversal | | INTENSIDAD DE CAMPO MAGNÉTICO/ UNIDAD (μT) | | | |
| DERECHA | B medio | B máx. | B eje X | B eje Y | B eje Z |
| Distancia (m) | | | | | |
| Mayor Campo | | | | | |
| +0.5 | | | | | |
| +1 | | | | | |
| +2 | | | | | |
| +3 | | | | | |
| +4 | | | | | |
| +5 | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| IZQUIERDA | INTENSIDAD DE CAMPO MAGNÉTICO/ UNIDAD (μT) | | | | |
| Distancia (m) | | | | | |
| Mayor Campo | | | | | |
| - 0.5 | | | | | |
| - 1 | | | | | |
| - 2 | | | | | |
| - 3 | | | | | |
| - 4 | | | | | |
| - 5 | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |

Tabla III.4 Descripción gráfica y observaciones

| Fecha: | Procedimiento: | Página: |
|---|----------------|---------|
| Croquis | | |
| | | |
| Disposición geométrica de la línea | | |
| | | |
| Observaciones | | |
| Tipo de torre (metálica, de madera, otras...): | | |
| | | |

Apéndice IV

Acrónimos

| | |
|----------------|--|
| AC | Corriente alterna (<i>alternating current</i>) |
| ADN | Ácido desoxirribonucleico |
| AENOR | Asociación Española de Normalización y Certificación |
| AGNIR | Grupo de Consulta sobre la Radiación No Ionizante (<i>Advisory Group on Non-Ionising Radiation</i>) |
| AM | Media aritmética (<i>Arithmetic Mean</i>) |
| ARPANSA | Agencia Australiana de Seguridad Nuclear y Protección Radiológica (<i>Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency</i>) |
| BCCDC | Centro de Control de Enfermedades British Columbia (<i>British Columbia Centre for Disease Control</i>) |
| BR | Restricción Básica (<i>Basic Restriction</i>) |
| CDHS | Departamento de Servicios de Salud de California (<i>California Department of Health Services</i>) |
| CEM | Campos electromagnéticos (<i>electromagnetic fields, EMF</i>) |
| CENELEC | Comité Europeo de Normalización Electrotécnica |
| CNNT | Centro Nacional de Nuevas Tecnologías |
| CSIC | Consejo Superior de Investigaciones Científicas |
| EEG | Electroencefalograma |

| | |
|---------------|--|
| ELA | Esclerosis Lateral Amiotrófica |
| ELF | Muy baja frecuencia (<i>extremely low frequency</i>) |
| FFT | Transformada rápida de Fourier (<i>fast Fourier transformation</i>) |
| GM | Media geométrica (<i>Geometric Mean</i>) |
| GPRS | Servicio General de Paquetes vía Radio (<i>General Packet Radio Service</i>) |
| GPS | Sistema de Posicionamiento Global (<i>Global Positioning System</i>) |
| GSD | Desviación estándar geométrica (<i>Geometric Standard Deviation</i>) |
| HPA | Agencia de Protección de la Salud (<i>Health Protection Agency</i>) |
| IARC | Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (<i>International Agency for Research on Cancer</i>) |
| ICES | Comité Internacional en Seguridad Electromagnética (<i>International Committee on Electromagnetic Safety</i>) |
| ICNIRP | Comisión Internacional de Protección contra Radiaciones no Ionizantes (<i>International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection</i>) |
| IEEE | Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i>) |
| IEM | Interferencia electromagnética |
| INSHT | Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo |
| IRM | Imaginología por Resonancia Magnética |
| ISO | Organización Internacional para la Estandarización (<i>International Organization for Standardization</i>) |
| ITC | Instrucción Técnica Complementaria |
| MPE | Exposición Máxima Permisible (<i>Maximum permissible Exposure</i>) |
| MTAS | Ministerio de Trabajo e Inmigración |
| NAS | Academia Nacional de Ciencias (<i>National Academy of Sciences</i>) |
| NIEHS | Instituto Nacional de las Ciencias de Salud Ambiental (<i>National Institute of Environmental Health Sciences</i>) |

| | |
|----------------|---|
| NIOSH | Instituto Nacional de Seguridad y Salud Ocupacional (<i>National Institute for Occupational Safety and Health</i>) |
| NRPB | Consejo Nacional de Protección Radiológica (<i>National Radiological Protection Board</i>) |
| NTP | Nota Técnica de Prevención |
| OIT | Organización Internacional del Trabajo |
| OMS | Organización Mundial de la Salud (<i>World Health Organization, WHO</i>) |
| RL | Nivel de Referencia (<i>Reference Level</i>) |
| SAGE | Grupo Asesor sobre campos electromagnéticos ELF (<i>Stakeholder Advisory Group on ELF EMFs</i>) |
| SCENIHR | Comisión Europea de los Riesgos Sanitarios y Recientemente Identificados (<i>European Commission Scientific Committee on Emerging and Newly identified Health Risks</i>). |
| SD | Desviación estándar (<i>Standard Deviation</i>) |
| SNC | Sistema Nervioso Central |
| THEIET | Institución de Ingeniería y Tecnología (<i>The Institution of Engineering and Technology</i>) |
| TWA | Media ponderada en el tiempo (<i>Time-Weighted Average</i>) |
| UKCCSI | Investigaciones sobre el Estudio de Cáncer Infantil en el Reino Unido (<i>United Kingdom Childhood Cancer Study Investigators</i>) |
| UNE | Una Norma Española |
| UNESA | Asociación Española de la Industria Eléctrica |
| UV | Ultravioleta |
| VDTs | Pantallas de visualización (<i>Video Display Terminals</i>) |

