

CAMPOS MAGNÉTICOS DE FRECUENCIA INDUSTRIAL

Efectos biológicos y técnicas de mitigación en proyectos

- ▣ Juan Carlos del Pino López. Escuela Universitaria Politécnica, Universidad de Sevilla
- ▣ Pedro Luís Cruz Romero. Escuela Superior de Ingenieros, Universidad de Sevilla
- ▣ Francisco Aguayo González. Escuela Universitaria Politécnica, Universidad de Sevilla



Introducción

En las últimas décadas, el consumo de electricidad y el uso de sistemas y dispositivos electrónicos han pasado a formar parte integrante de la vida cotidiana de cualquier persona. Esto ha provocado que tanto nuestro entorno de trabajo como doméstico se hallen inmersos en un sin fin de señales y radiaciones electromagnéticas originadas en estos equipos e instalaciones. En un principio, la problemática que presentaba la presencia de esta "contaminación electromagnética ambiental" estaba enfocada principalmente a los niveles de interferencias que podían introducir en otros equipos electrónicos, así como las posibles tensiones y corrientes que podrían inducirse en estructuras metálicas cercanas, con el consiguiente riesgo de accidentes por contacto. Sin embargo, desde finales de los años setenta ha ido creciendo la preocupación sobre los posibles efectos que la exposición a estos campos electromagnéticos (CEM) pudieran tener sobre la salud de las personas.

Es ampliamente conocido que, de todo el espectro electromagnético (figura 1), los de mayor frecuencia son capaces de transmitir suficiente energía como para ionizar átomos y afectar al material genético de las células, como por ejemplo los rayos X. A las radiaciones situadas en dicha zona del espectro se las conoce como "ionizantes".



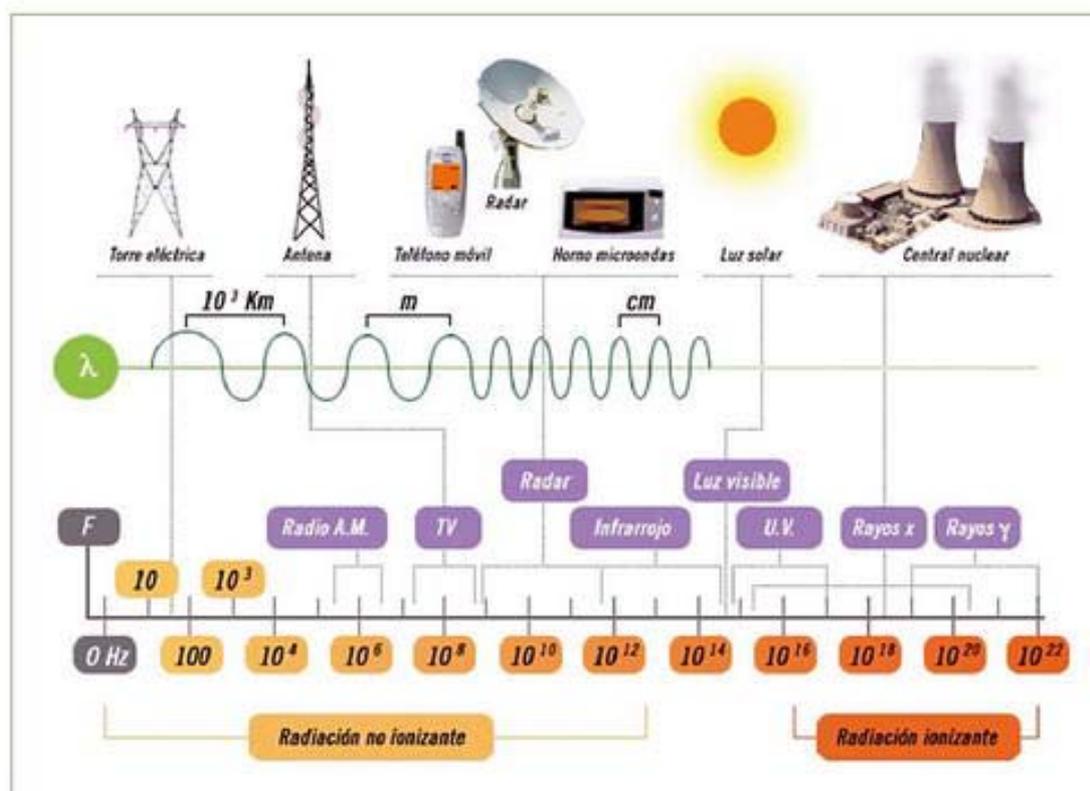


Figura 1. Espectro electromagnético.

Sin embargo, las de menor frecuencia, conocidas como "no ionizantes", transmiten muy poca energía. En esta zona se encuentran, por ejemplo, las radiaciones emitidas por los hornos microondas, que disponen de energía suficiente para generar calor, pero no producen alteración alguna en la materia. Asimismo, entre las radiaciones no ionizantes de menor energía se encuentran los campos generados por los sistemas eléctricos de frecuencia industrial (frecuencia extremadamente baja o FEB), que no producen ionización ni calor, y se encuentran muy alejados de cualquier radiación ionizante en el espectro electromagnético.

No obstante, la inocuidad de estas emisiones no ionizantes no ha quedado todavía totalmente demostrada, por lo que en las últimas décadas se han llevado a cabo numerosos estudios sobre los efectos biológicos de este rango de campos electromagnéticos (más de 25.000 artículos científicos según datos de la Organización Mundial de la Salud), lo que posiblemente les convierte en el agente más estudiado de la historia. En el caso de emisiones de frecuencia industrial, la mayoría de estos estudios se han enfocado en el análisis de campos magnéticos, al ser el campo eléctrico fácil de mitigar. Estos estudios se han desarrollado principalmente en dos

ámbitos: epidemiológico (existencia de algún tipo de asociación entre un determinado agente y una enfermedad) y biofísico (búsqueda del mecanismo biofísico por el que un agente produce efectos nocivos a largo plazo). A lo largo de este artículo se exponen las ideas principales sobre el origen y los efectos de los campos magnéticos de frecuencia industrial generados por instalaciones eléctricas, así como las conclusiones obtenidas en las múltiples investigaciones realizadas hasta la fecha. Asimismo, se expondrá la normativa vigente en cuanto niveles de exposición, pasando finalmente a comentar algunas de las técnicas empleadas para la mitigación de estos campos.

Origen de los campos magnéticos de frecuencia industrial

La existencia de campos eléctricos y magnéticos en nuestro entorno se debe a la presencia de cargas eléctricas estáticas o en movimiento. En concreto, la presencia de cargas estáticas (potencial eléctrico o tensión) es el origen de los campos eléctricos, mientras que el flujo de estas cargas (corriente eléctrica) es el causante de la aparición de los campos magnéticos (figura 2).

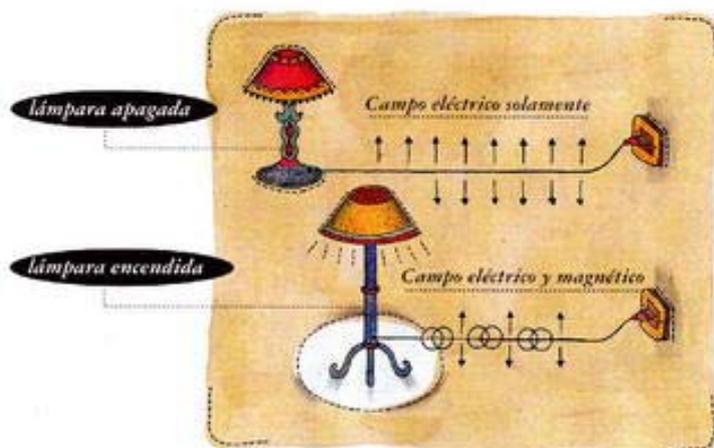


Figura 2. Origen de los campos eléctrico y magnético [1].

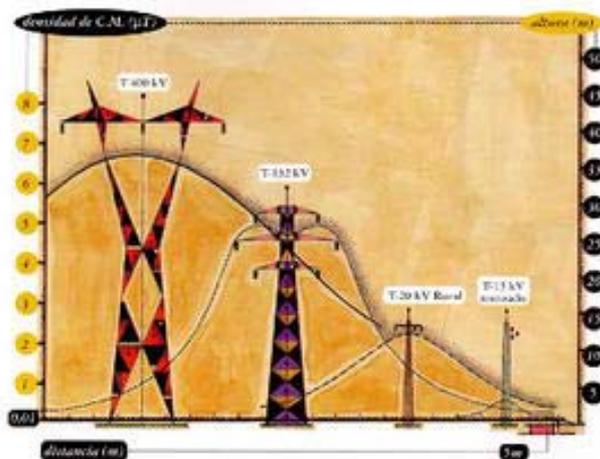


Figura 3. Densidad de campo magnético generada por líneas eléctricas aéreas medida a 1 m del suelo [1].

Asimismo, la intensidad del campo magnético generado depende directamente de la intensidad de corriente que lo genera. Por ejemplo, para el caso de un conductor rectilíneo recorrido por una corriente I , la intensidad del campo (H) a una distancia d del conductor viene dada por la expresión:

$$|\vec{H}| = \frac{I}{2\pi d}$$

Esta expresión pone de manifiesto que a mayor corriente, mayor intensidad tendrá el campo. Por el contrario, se observa cómo la intensidad del mismo decrece rápidamente con la distancia a la fuente que lo genera. Esta disminución puede ser más acentuada dependiendo del tipo y características de la fuente.

Por tanto, las principales instalaciones eléctricas causantes de la presencia de campos magnéticos en nuestro alrededor suelen ser:

- Líneas eléctricas aéreas y subterráneas.
- Subestaciones eléctricas y centros de transformación.
- Electrodomésticos y equipos electrónicos.
- Maquinaria eléctrica en general.

La figura 3 muestra, a modo de ejemplo, los niveles de densidad de flujo magnético (B) generado por varios tipos de líneas aéreas. Dada la rapidez con la que disminuye la densidad del campo con la distancia, los niveles típicos de exposición, tanto en ambientes urbanos como no urbanos, suelen ser inferiores a $1 \mu\text{T}$.

Un comportamiento similar presentan las emisiones producidas por electrodomésticos y maquinarias presentes en ambientes domésticos y laborales. La tabla 1 muestra algunos ejemplos, donde se aprecia cómo el campo se reduce drásticamente a distancias de 1 m.

TABLA 1. CAMPO MAGNÉTICO PRODUCIDO POR DISTINTOS EQUIPOS [1]

| Aparato | Campo magnético de 50 Hz (μT) | |
|-----------------------|--|-------|
| | a 10 cm | a 1 m |
| Frigorífico | 0.06 | 0.02 |
| Cocina Eléctrica | 0.29 | 0.03 |
| Televisor | 1.40 | 0.09 |
| Picadora | 2.84 | 0.04 |
| Lavadora | 10.64 | 0.14 |
| Horno microondas | 30.04 | 0.61 |
| Pantalla de alumbrado | 0.05 | 0.05 |
| Taladro | 0.13 | 0.03 |
| Tomo | 0.56 | 0.04 |
| Compresor | 3.18 | 0.05 |
| Taladro portátil | 34.56 | 0.89 |
| Montacargas | 38.72 | 0.50 |

Con estos datos es difícil estimar los niveles de exposición a los que se ve sometida una persona a lo largo del día (dosis). Algunos estudios dan como niveles típicos de exposición en ambientes domésticos en Europa valores entre $0.01 \mu\text{T}$ y $0.5 \mu\text{T}$, mientras que en ambientes laborales van desde $0.05 \mu\text{T}$ a $2.48 \mu\text{T}$. Asimismo, se desconoce qué aspecto del campo magnético, si es que hay alguno, sería el causante de producir efectos sobre la salud de un individuo (valores de pico, nivel medio de exposición, etc.).



Es ampliamente aprobado que este tipo de radiación no ionizante no actúa como "iniciador" del proceso cancerígeno, pero no se descarta su posible influencia en el sistema inmune de un organismo.

Efectos conocidos de los campos magnéticos sobre el organismo

En el interior y exterior de las células del cuerpo humano existen corrientes eléctricas endógenas, que sirven en gran medida para mantener el cuerpo humano en funcionamiento (latido del corazón, transmisión de señales nerviosas, etc.). Sin embargo, la exposición a campos magnéticos puede inducir nuevas corrientes en el cuerpo. Esto no sólo ocurre con campos variables generados por instalaciones eléctricas, sino por el propio campo magnético estático natural terrestre, de unos $40 \mu\text{T}$ de intensidad, por el simple movimiento de una persona inmersa en dicho campo. No obstante, la densidad de la corriente endógena es muy superior a la densidad de la corriente inducida por cualquier instalación eléctrica. En base a estos datos, los únicos efectos nocivos realmente demostrados hasta la fecha son los provocados a corto plazo por una exposición aguda a campos magnéticos muy elevados, capaces de inducir una densidad de corriente en el cuerpo superior a los 100 mA/m^2 . Como dato indicar que, para inducir en un individuo una densidad de corriente de 10 mA/m^2 , es necesaria una exposición a un campo magnético de intensidad $500 \mu\text{T}$, valor 50 veces superior a la generada por una línea eléctrica de alta tensión.

Pese a todo esto, no están del todo demostrados los posibles efectos a largo plazo que podrían derivarse de la exposición a este tipo de campos a los niveles presentes en nuestro entorno habitual. Sí es ampliamente aprobado que este tipo de radiación no ionizante no actúa como "iniciador" del proceso cancerígeno, pero no se descarta su posible influencia en el sistema inmune de un organismo, así como su efecto sobre la velocidad a la que se producen ciertas reacciones químicas, entre otros aspectos. Esta incertidumbre en los resultados de los estudios provoca en el público una desconfianza en cuanto a la influencia de estos campos en su salud. Por ello es necesario conocer los resultados y conclusiones obtenidos por las principales organizaciones internacionales después de innumerables investigaciones.

Investigaciones y posición de organismos internacionales

Debido a la creciente preocupación acerca de los posibles efectos nocivos de las emisiones electromagnéticas, en 1996 la Organización Mundial de la Salud (OMS) puso en marcha el Proyecto Internacional sobre Campos Electromagnéticos [2] con el fin de investigar y determinar claramente los posibles riesgos sanitarios asociados a las tecnologías que crean estos campos. Por otro lado, en el año 2001, el Centro Internacional para la Investigación del Cáncer (CIIC) publicó un estudio monográfico [3] en el que los campos magnéticos de frecuencia industrial se calificaban de "posiblemente carcinógenos para las personas", añadiendo más incertidumbre aún al público general. En cualquier caso, 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 el café, cloroformo, gasolina, plomo y los humos de soldadura). 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 superior a $0,3 \mu\text{T} - 0,4 \mu\text{T}$. 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 de frecuencia baja y la carcinogénesis. 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 fundamentalmente 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.

Entre tanto se clarifican los resultados de las investigaciones, la OMS recomienda aplicar el principio de



La posición oficial de los organismos internacionales choca frecuentemente con la opinión y percepción de la población. Por ello, es frecuente encontrar noticias en las que agrupaciones de vecinos crean plataformas pidiendo el traslado o la no instalación de cierto tipo de instalaciones eléctricas en las cercanías de sus viviendas

"prevención prudente", por el cual se insta a aplicar medidas sencillas de coste reducido para evitar la exposición excesiva a los campos electromagnéticos y reducir en lo posible el nivel de exposición de las personas. En cuanto a este último aspecto, ha quedado establecido que la exposición aguda a niveles elevados (muy por encima de los 100 μT) tiene efectos biológicos a corto plazo, atribuibles a mecanismos biofísicos comúnmente conocidos. Para prevenir dichos efectos a corto plazo, varias agencias nacionales e internacionales han elaborado normativas de exposición a campos eléctricos y magnéticos. Actualmente la normativa internacional más extendida es la promulgada por la Comisión Internacional para la Protección contra la Radiación No Ionizante (ICNIRP) [4], organismo no gubernamental vinculado a la Organización Mundial de la Salud y que participa plenamente en el Proyecto internacional CEM. Esta organización reexamina sus directrices cada vez que el Proyecto CEM haya realizado nuevas evaluaciones de los riesgos para la salud. Actualmente los límites de exposición a campos magnéticos recomendados son de 100 μT para exposiciones domésticas y 500 μT para exposiciones ocupacionales, valores muy por encima de los que suelen presentarse en ambos ámbitos.

Sin embargo, la posición oficial de estos organismos internacionales choca frecuentemente con la opinión y percepción de la población. Por ello, es frecuente encontrar noticias en las que agrupaciones de vecinos crean plataformas pidiendo el traslado o la no instalación de cierto tipo de instalaciones eléctricas en las cercanías de sus viviendas (líneas aéreas de alta tensión, centros de transformación o subesta-

ciones). Estas plataformas apoyan su postura en valores anormales de mortalidad y enfermedades graves en la población adulta e infantil cercana a la fuente origen del campo, así como en informes de científicos independientes, consiguiendo en algunos casos llegar a compromisos con las autoridades locales para el traslado de la instalación. En el caso particular de España, el informe elaborado por el Doctor Darío Acuña Castroviejo en el año 2006 [5] es ampliamente empleado con éxito en multitud de demandas. En dicho informe se afirma que la exposición a campos electromagnéticos provoca "Trastornos neurológicos, cardiopulmonares, mentales, inmunológicos, hormonales, reproductivos, dermatológicos, así como el incremento del riesgo de algunos tipos de cáncer como las leucemias agudas y los tumores del sistema nervioso central en la infancia". Además se establece a la disrupción endocrina de la melatonina como principal mecanismo de interacción de estos campos con el organismo para el desarrollo de enfermedades.

Asimismo, estas plataformas vecinales emplean en su favor la denominada Resolución Benevento [6], publicada en septiembre de 2006 por un grupo de científicos internacionales independientes que formaron la Comisión Internacional para la Seguridad Electromagnética (ICEMS), y en la que se hacen las siguientes afirmaciones:

1. Nuevas evidencias acumuladas indican que hay efectos adversos para la salud como resultado de la exposición laboral y pública a los campos eléctricos, magnéticos y electromagnéticos, o CEM, en los niveles de exposición actuales.
2. Hay evidencias de que las fuentes actuales de financiación sesgan y desvían los análisis y la interpretación de los resultados de las investigaciones hacia el rechazo de la evidencia de riesgos para la salud pública.
3. Los argumentos según los cuales los campos electromagnéticos (CEM) de intensidad débil no pueden afectar sistemas biológicos no representan el conjunto actual de la opinión científica.

Por ello, es conveniente no perder de vista la posición de la principal organización mundial en temas de salud. La OMS concluye en su último informe de Junio de 2007 [7] que las evidencias relacionadas con la leucemia infantil no son suficientemente sólidas para establecer una relación de causalidad. Aún así, se insta a las instituciones a ahondar en el tema promoviendo la investigación. En dicho informe se recogen además los estudios realizados en una serie



de otros efectos adversos para la salud con miras a establecer una posible correlación con la exposición a campos magnéticos de frecuencia industrial. Los análisis se han centrado en otros 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. De estos análisis, el grupo de trabajo de la OMS ha concluido que las pruebas científicas que respaldan la existencia de una correlación entre la exposición a campos magnéticos de FEB 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.

Debido a esta falta de evidencias concluyentes, la OMS únicamente puede realizar una serie de comentarios y recomendaciones:

- En lo que respecta a la exposición a corto plazo a CEM de frecuencia elevada, ha quedado científicamente demostrado que ésta tiene efectos adversos para la salud, por lo que recomienda reducir los niveles de exposición a los marcados por la ICNIRP.
- En cuanto a los efectos a largo plazo, **no existen evidencias suficientes** para establecer una correlación entre la exposición a campos magnéticos de FEB y la leucemia infantil. No obstante recomienda aplicar el principio de "**prevención prudente**" y explorar soluciones de bajo coste para reducir los niveles de exposición. Esta posición no justifica la implantación de políticas basadas en la adopción de límites de exposición arbitrariamente bajos.

En este sentido, la posición oficial de la comunidad mayoritaria internacional es clara, en general siguiendo la posición marcada por la OMS, aunque existen países como Italia, Suiza y algunos estados americanos que han optado por aplicar el "principio de precaución" y están promulgando leyes que establecen límites de exposición muy por debajo de los recomendados por la ICNIRP.

Normativas de exposición a campos electromagnéticos

La Unión Europea, siguiendo el consejo del Comité Científico Director que asesora a la Comisión Euro-



pea en Toxicidad, Ecotoxicología y Medio ambiente, se basó en los informes del ICNIRP para elaborar la Recomendación del Consejo Europeo relativa a la exposición del público en general a campos electromagnéticos (0 Hz a 300 GHz), 1999/519/CE, publicada en el Diario Oficial de las Comunidades Europeas en julio de 1999 [8]. Su objetivo es principalmente prevenir los efectos agudos (a corto plazo) producidos por la inducción de corrientes eléctricas en el interior del organismo. El contenido de estas recomendaciones ha sido confirmado en marzo de 2007 por el Comité Científico de los Riesgos Sanitarios Emergentes y Recientemente Identificados de la Unión Europea [9], el cual señala que los datos básicos de que se dispone para la evaluación de riesgos, especialmente en lo que respecta a los efectos a largo plazo de la exposición reducida, no son aún suficientes para concluir una relación entre CEM y enfermedad alguna, y es necesario efectuar más estudios a escala nacional y de la UE.

En el caso particular de España no existe una regulación específica para los campos de frecuencia industrial que siga las Recomendaciones de la UE. Sin embargo, sí existe el Real Decreto 1066/2001 para el ámbito de

las radiofrecuencias [10]. Esto muestra un cierto vacío legal por parte del Estado Español en comparación con otros estados miembros de la UE. No obstante, el Ministerio de Sanidad y Consumo convocó en 2001 un Comité de expertos independientes [11] con el fin de despejar dudas acerca de los posibles riesgos inducidos por los CEM, así como valorar y dar respuesta a las Recomendaciones de la UE, aportando una serie de propuestas al Ministerio para adoptar medidas más eficaces de protección sanitaria. Las principales recomendaciones que recoge el informe son:

- Aplicar el principio de prevención prudente.
- Difundir los conocimientos actuales del riesgo de los CEM a frecuencia industrial.
- Fomento de estudios epidemiológicos en poblaciones expuestas por encima de $0,4 \mu\text{T}$.
- Realizar estudios de evaluación del riesgo que permitan identificar las fuentes o prácticas que dan lugar a exposición electromagnética de los individuos.
- Regular la instalación de nuevas líneas de alta tensión con el fin de evitar percepciones del riesgo no justificadas y exposiciones innecesarias.
- Actualización del Reglamento de Líneas de Alta Tensión con el objeto de redefinir unas distancias mínimas de seguridad desde las líneas de alta tensión a edificios, viviendas o instalaciones de uso público o privado.

Técnicas de mitigación de campos magnéticos de frecuencia industrial

Como se comentó anteriormente, la OMS recomienda la aplicación del principio de prevención prudente, incitando a la adopción de medidas para reducir los niveles de exposición en la población. Esto implica adoptar nuevas estrategias a la hora de abordar la remodelación o construcción de nuevas instalaciones. En el caso concreto de emisiones FEB generadas por instalaciones eléctricas, los objetivos se han centrado fundamentalmente en la mitigación de los campos magnéticos producidos por dichas instalaciones. Esto se debe a que los campos eléctrico y magnético están desacoplados a bajas frecuencias, lo que posibilita actuar sobre ellos de forma independiente.

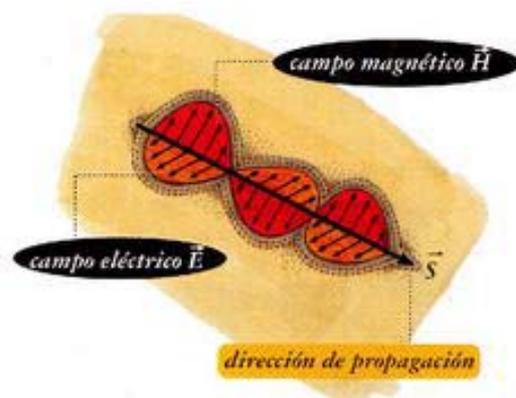


Figura 4. Onda electromagnética [1].

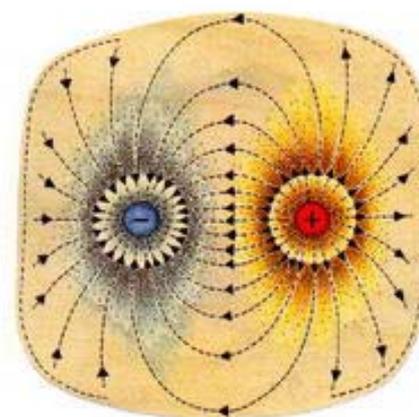


Figura 5. Líneas de fuerza producidas en un campo eléctrico [1].

Además, la propia naturaleza del campo eléctrico, cuyas líneas de fuerza fluyen de un cierto potencial eléctrico a otro de menor valor (figura 5), lo hace sencillo de mitigar mediante la utilización de pantallas o elementos conductores conectados a tierra (potencial cero).

Una primera solución a considerar para mitigar campos magnéticos es alejar la fuente origen del campo de la zona que se quiere proteger (zona de interés). Sin embargo, esto puede ser económicamente inviable para el caso de instalaciones existentes, aunque es un importante factor a tener en cuenta a la hora de considerar posibles ubicaciones para futuras instalaciones.

Otra actuación muy frecuente, ya sea por razones prácticas o urbanísticas, es el soterramiento de líneas aéreas. Además de eliminar el impacto visual,



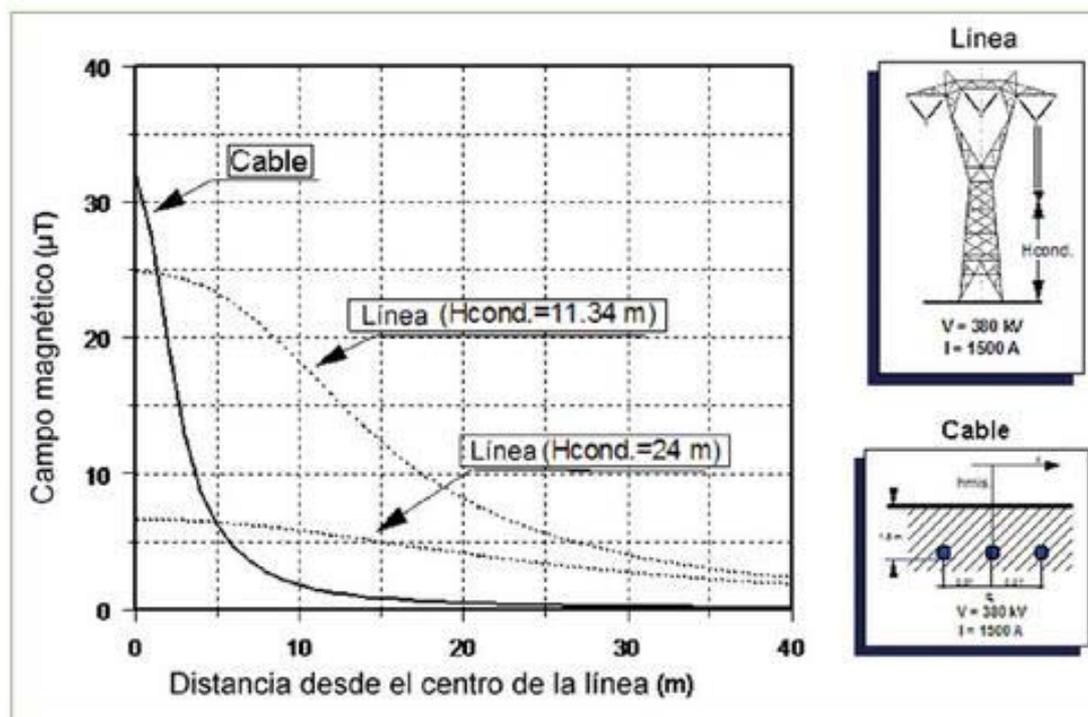


Figura 6. Campo de línea aérea y subterránea a 1m de altura sobre el terreno.

la principal ventaja es su configuración más compacta, lo que promueve la cancelación del campo generado por cada fase.

Como se aprecia en la figura 6, tanto en líneas aéreas como subterráneas el perfil siempre es en forma de campana. Sin embargo, para un mismo nivel de corriente, la zona de influencia es mucho mayor en el caso de líneas aéreas que en el caso de las subterráneas, donde el campo se reduce rápidamente con la distancia. Esta característica es lo que hace que este tipo de instalaciones sean tan interesantes como método de mitigación del campo magnético. Asimismo, esta actuación parece tener un efecto tranquilizador en la población, repercutiendo en el nivel de apreciación de la peligrosidad, aunque como muestra la figura 6, localmente el valor máximo de campo puede llegar a ser incluso mayor que en el caso aéreo. Como contrapartida, el soterramiento de líneas puede tener un coste más elevado, no sólo desde el punto de vista de la instalación inicial del tendido, sino por su mantenimiento, ya que implica un mayor número de operaciones que en el caso de las líneas aéreas (movimiento de terrenos, afectación de otras líneas y servicios, etc.).

En cualquier caso, el objetivo principal es obtener una solución de mitigación con una buena relación coste-efectividad. En muchos casos bastaría con aplicar técnicas basadas en conceptos teóricos ampliamente conocidos en la actualidad para conseguir un cierto

En cualquier caso, el objetivo principal es obtener una solución de mitigación con una buena relación coste-efectividad

grado de reducción. A continuación se enumeran algunas de ellas [12], las cuales pueden dividirse en técnicas intrínsecas (modificación de los parámetros y geometría de la instalación) y extrínsecas, en las que se emplean elementos adicionales para compensar o apantallar el campo. La combinación adecuada de varias de estas acciones puede dar lugar a una reducción considerable del campo en la zona de interés.

Técnicas intrínsecas

— Reducción de la corriente

Dado que el origen de los campos magnéticos en las instalaciones eléctricas es la corriente que circula por ellas, una clara solución es reducir la intensidad de corriente que fluye en las mismas. Esto, para el caso concreto de líneas de transporte y distribución, implicaría transportar la misma energía a tensiones

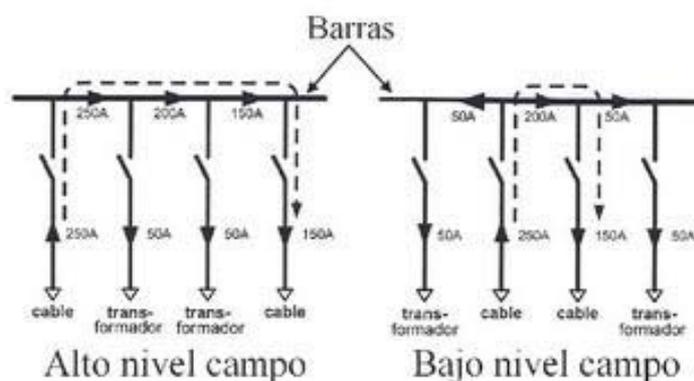


Figura 7. Redistribución de los flujos de corriente.

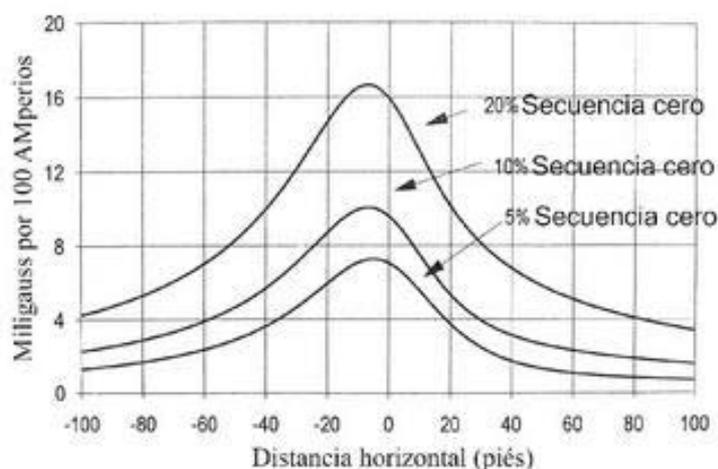


Figura 8. Perfil transversal del campo a 1m del suelo para distintos niveles de secuencia cero.

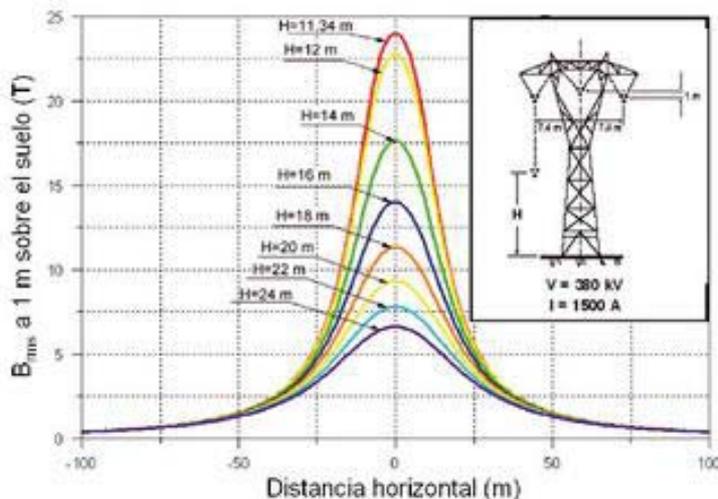


Figura 9. Perfil transversal del campo a 1m del suelo para distintas alturas de la línea.

más elevadas, algo técnicamente posible pero que puede ser costoso en su ejecución. Sin embargo, en otras instalaciones (subestaciones, centros de transformación o cuadros de baja tensión) existe una alternativa más viable, como es redistribuir los flujos de corriente con el objetivo de reducir la intensidad que circula por ciertas partes de la instalación (figura 7). De esta forma se consigue cierto grado de reducción del campo emitido por la instalación.

— Componente de secuencia cero

La presencia de desequilibrios entre las fases de la instalación, en concreto la existencia de componente de secuencia cero en el sistema trifásico, también influye en el nivel de los campos magnéticos. La figura 8 muestra un ejemplo de cómo afecta al campo la presencia de componente de secuencia cero en el sistema. Por tanto, antes de tener en cuenta cualquier otra solución, la primera acción a llevar a cabo en una instalación para reducir el campo magnético que genera es la reducción de los desequilibrios causantes de la aparición de corriente de secuencia cero en el sistema.

— Altura (profundidad) de la línea

Como el campo magnético disminuye con la distancia al origen del mismo, aumentar la altura (profundidad) de la línea aleja la fuente de la zona de interés, consiguiendo así reducir el nivel de exposición en el área a mitigar (figura 9). Este parámetro, aplicable tanto en tendidos aéreos como subterráneos, está siempre sujeto a las condiciones particulares del lugar donde se realiza la instalación, por lo que es necesario determinar la mejor opción para cada caso.

— Compactación

Ya sea en caso de líneas aéreas o subterráneas, la compactación que se consigue al reducir la distancia entre conductores ayuda a la reducción del campo generado, independientemente del tipo de configuración empleada para el tendido (figura 10). Esta acción consigue que el campo decaiga más rápidamente con la distancia al origen, reduciendo así la zona sometida a altos niveles de exposición.

El límite de esta práctica viene impuesto tanto por el nivel de tensión en el que trabajan los cables como por la posible reducción en la capacidad de transmisión de la línea por sobrecalentamiento de los cables, por lo que es necesario llegar a una situación de compromiso para obtener resultados satisfactorios. En este sentido, la utilización de conductores recubiertos, en el caso de líneas aéreas, puede ser una opción a considerar.



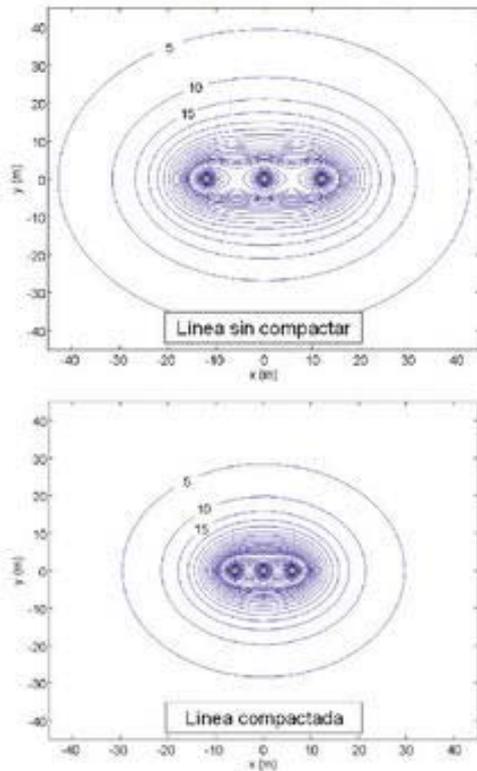


Figura 10. Líneas de campo B (μT) constante para distinta separación de cables en el tendido.

— Configuración geométrica del tendido

Otra acción que ayuda a reducir el campo generado por un tendido es la configuración geométrica del mismo. Es decir, no se obtiene el mismo campo realizando el tendido con configuración plana que en forma triangular, disposición que facilita la cancelación del campo entre las fases, obteniéndose así un campo total más reducido (figura 11). El campo puede reducirse incluso más si se reducen las distancias entre conductores, como se indicó anteriormente. En este sentido, el uso de conductores recubiertos permite realizar tendidos de alta tensión como muestra la figura 12, donde se emplean separadores para mantener la configuración del tendido. Esta opción está apoyada por la reciente incorporación de este tipo de conductores al nuevo reglamento de alta tensión.

— División de fases

En otras ocasiones puede reducirse el campo mediante la división de las fases, de forma que se obtienen configuraciones más compactas y con corrientes más reducidas por cada uno de los conductores,

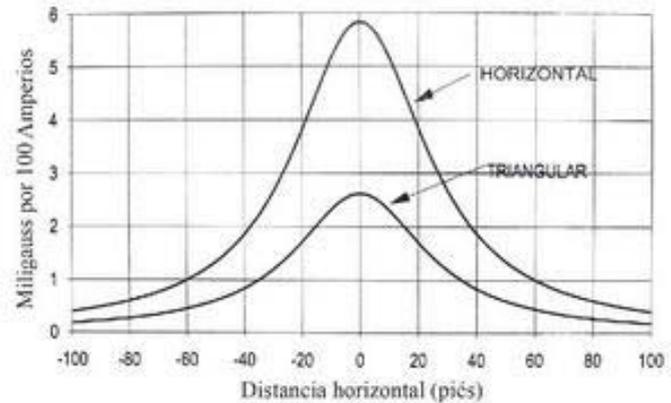


Figura 11. Perfil transversal del campo a 1m sobre el suelo para distintas configuraciones.



Figura 12. Configuración compacta triangular en línea de 66 kV.

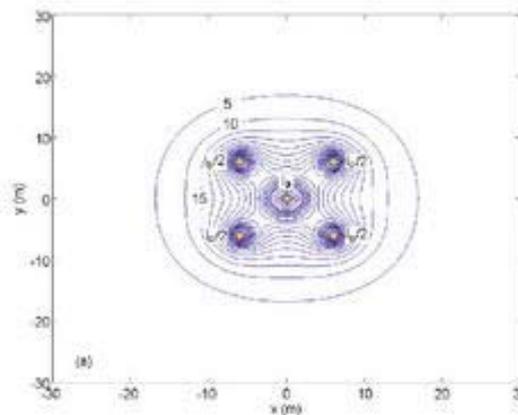


Figura 13. Líneas de campo B constante por división de las fases b y c.

lo que influye notablemente en la reducción del campo. Esto puede observarse en la figura 13, donde se muestra el campo resultante tras dividir las fases b y c del caso mostrado en la figura 10.

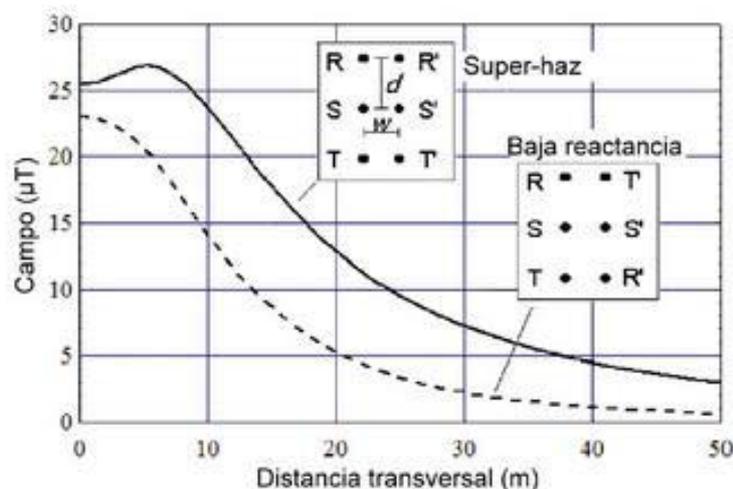


Figura 14. Perfil transversal del campo a 1m del suelo para dos configuraciones de conductores.

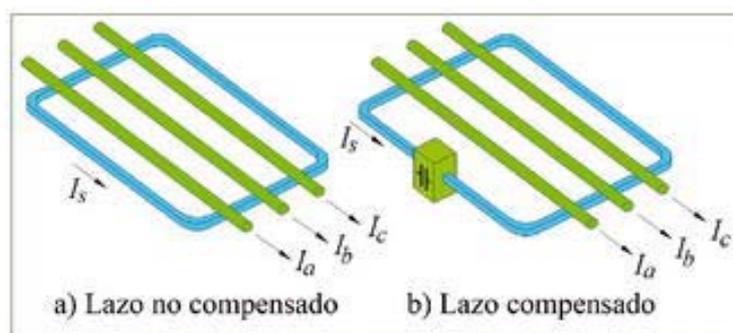


Figura 15. Configuración de lazo pasivo compensado y no compensado.

Esta técnica se basa en la modificación de la configuración de los conductores de la línea mediante la utilización de cuádrupolos, los cuales generan un campo magnético más compacto que se reduce cúbicamente con la distancia.

— Cancelación de fases

En líneas de transmisión y distribución es muy frecuente el uso de líneas dobles, en las que se disponen dos tendidos de forma paralela a una distancia fija. En estos casos, existen diversas formas de situar las fases de cada línea respecto a la otra, no siendo todas ellas las más eficientes en cuanto a generación de campo magnético se refiere. Un caso claro es lo que se muestra en la figura 14. En la configuración "Super Haz", se sitúan las fases de forma idéntica en ambos tendidos, mientras que en la configuración "Baja Reactancia" se permutan dos

fases en uno de los tendidos. Este simple cambio lleva consigo una importante reducción del campo, debido a que esta configuración favorece la cancelación del campo generado por las fases.

Estas técnicas intrínsecas producen una reducción en el campo más o menos apreciable, algunas de ellas con un coste económico reducido. Sin embargo, en ocasiones es necesaria una reducción más drástica del campo. En estas situaciones, aún habiendo aplicado algunos de los conceptos anteriores, es necesario recurrir a nuevas técnicas de mitigación empleando elementos externos a la instalación para alcanzar los niveles deseados de reducción. Estos nuevos elementos adicionales empleados para la mitigación pueden actuar de forma activa o pasiva para compensar o apantallar el campo magnético. Sin embargo, la inclusión de estos elementos incide directamente sobre los costes de la instalación. A continuación se indican las más destacadas.

Técnicas extrínsecas

— Lazos de compensación

Este sistema se basa en situar uno o varios conductores en forma de lazo en las proximidades de la zona de interés a mitigar. En este lazo, debido a la variación temporal del flujo magnético generado por la fuente, se induce una corriente que a su vez genera un nuevo campo magnético opuesto al anterior, de forma que el balance global de campo en la zona de interés es menor que en la situación sin lazo. Este caso es denominado "Lazo Pasivo", ya que no existe ninguna fuente externa que genera la corriente por el lazo compensador (figura 15a).

Para incrementar la eficacia del lazo se suele intercalar un condensador para compensar la impedancia inductiva del lazo, aumentando la corriente de compensación (figura 15b) e incrementándose así el efecto mitigador. En esta situación se habla de "Lazo Pasivo Compensado". No obstante, una nueva mejora que puede aplicarse a este método de mitigación es la instalación de un sistema de alimentación externo que se encargue de generar en cada instante la corriente que sea necesaria sobre el lazo, de forma que se optimice la reducción del campo. En este caso se habla de "Lazo Activo", siendo su eficiencia mayor que en el caso pasivo (figura 16).

Una posible aplicación de esta técnica se muestra en la figura 17, en la que se pretende mitigar el campo de una línea aérea sobre una vivienda cercana a la misma.

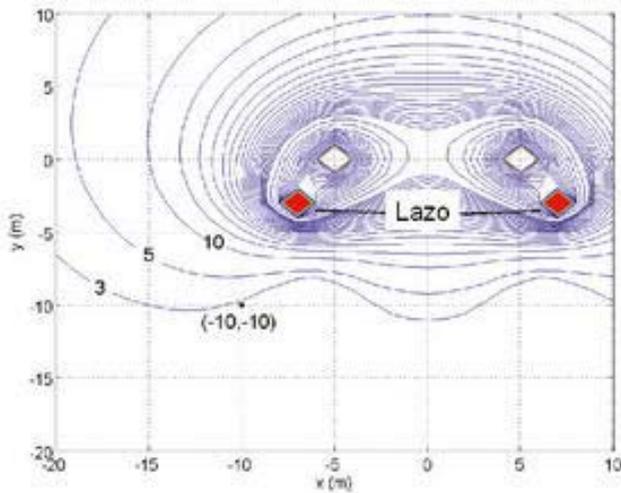


Figura 16. Líneas de campo B constante en presencia de lazo activo.

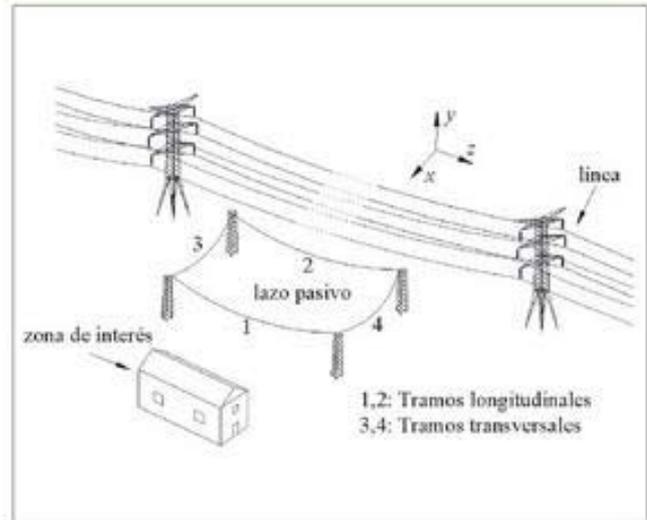


Figura 17. Ejemplo de sistema de mitigación del campo magnético mediante lazo pasivo.

— Apantallado mediante materiales conductores y ferromagnéticos

Se trata de la colocación de pantallas intercaladas entre la fuente origen del campo y la zona que se quiere proteger del mismo, de manera que dicha pantalla haga de barrera que impida el paso de las líneas de campo a la zona a proteger (figura 18), reduciéndose el nivel de exposición en el área de interés. Para ello se suelen emplear dos tipos de materiales: de alta conductividad eléctrica (conductores) o de alta permeabilidad magnética (ferromagnéticos). Cada uno de ellos provoca la reducción del campo mediante mecanismos muy diferentes. Mientras los materiales conductores deforman el campo mediante la generación de un campo opuesto originado por la inducción de corrientes parásitas en la chapa, en los ferromagnéticos la deformación se produce por atracción de las líneas de campo hacia el interior del material, ya que presenta un camino de menor reluctancia para el campo. En cierto sentido la pantalla conductora "repele" el campo originado por la fuente, mientras que la ferromagnética lo "atrae" hacia el interior del material.

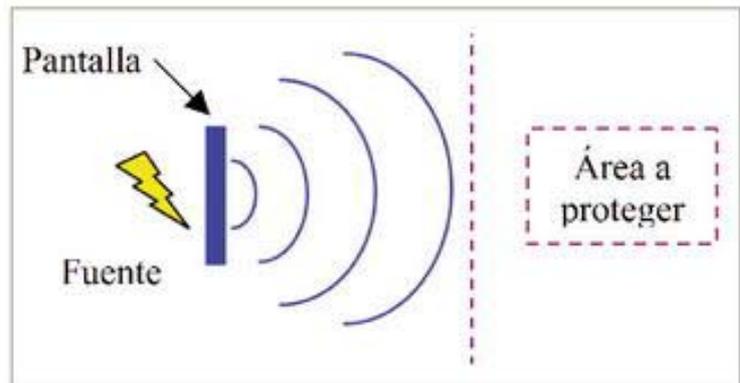


Figura 18. Esquema de sistema de mitigación mediante pantalla.

Esta técnica es de aplicación habitual en centros de transformación y líneas subterráneas, y su efectividad depende principalmente de las características del sistema a mitigar y de la pantalla empleada. En ambos casos, la opción más económica suele ser emplear planchas de aluminio de un cierto grosor (figura 19).



Figura 19. Colocación de pantallas de aluminio en tendido subterráneo [12].

Por norma general, los materiales conductores, como el cobre o el aluminio, son la mejor elección cuando se emplean pantallas abiertas (placa plana o

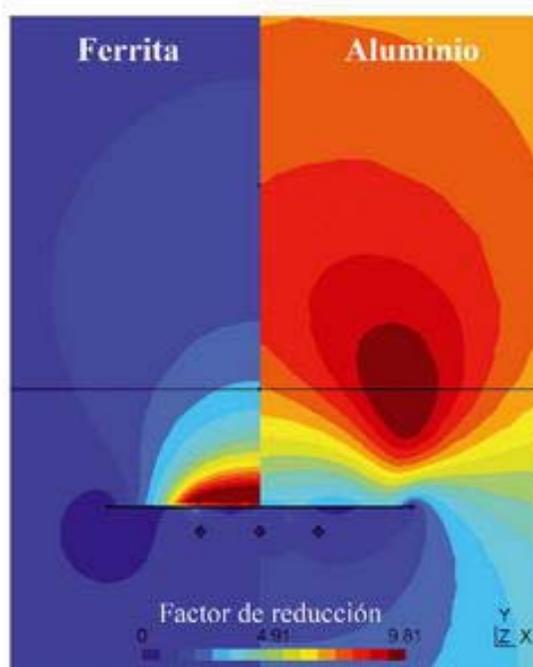


Figura 20. Niveles de reducción de pantalla plana de ferrita y aluminio.

Las principales fuentes de campo en un centro de transformación son las barras y cables de baja tensión (por los que circula mayor corriente) y el transformador. Por ello, siempre es recomendable, como primera acción, alejarlos de la zona de interés a la hora de plantear la organización de los equipos en el interior del centro de transformación

doblada en perfil en U invertida), proporcionando mejores niveles de reducción que los materiales ferromagnéticos (figura 20).

La selección de cobre o aluminio para estas pantallas viene condicionada por el coste económico, pero también por la resistencia a la corrosión de cada material, por lo que es necesario estudiar cada caso particular para encontrar la opción más adecuada.



Figura 21. Pantalla rectangular cerrada de acero galvanizado de alta permeabilidad [12].

Sin embargo, en ocasiones pueden obtenerse mejores resultados de mitigación empleando pantallas cerradas en forma rectangular o de tubo. En estos casos, los materiales ferromagnéticos, habitualmente el acero, presentan un mejor comportamiento en cuanto a la reducción (figura 21).

Por el contrario, el uso de pantallas cerradas en líneas subterráneas puede implicar mayores esfuerzos técnicos y económicos a la hora de realizar reparaciones o labores de mantenimiento que en el caso de pantallas abiertas. Por ello, en la actualidad se están buscando soluciones prácticas de pantallas cerradas con tapa desmontable para tales operaciones, como el caso de la figura 21.

Centros de transformación

Las técnicas comentadas anteriormente han sido enfocadas principalmente a la problemática de los campos generados por líneas aéreas o subterráneas. Sin embargo, uno de los principales orígenes de controversia respecto al efecto de los campos en la población se debe a la existencia de centros de transformación o subestaciones en las proximidades de zonas residenciales. En estas situaciones existen también una serie de actuaciones que ayudan a reducir el campo generado por este tipo de instalaciones, algunas de ellas basadas en las técnicas comentadas anteriormente.

Las principales fuentes de campo en un centro de transformación son las barras y cables de baja tensión (por los que circula mayor corriente) y el transformador. Por ello, siempre es recomendable, como primera acción, alejarlos de la zona de interés a la hora de plantear la organización de los equipos en el interior del centro de transformación.



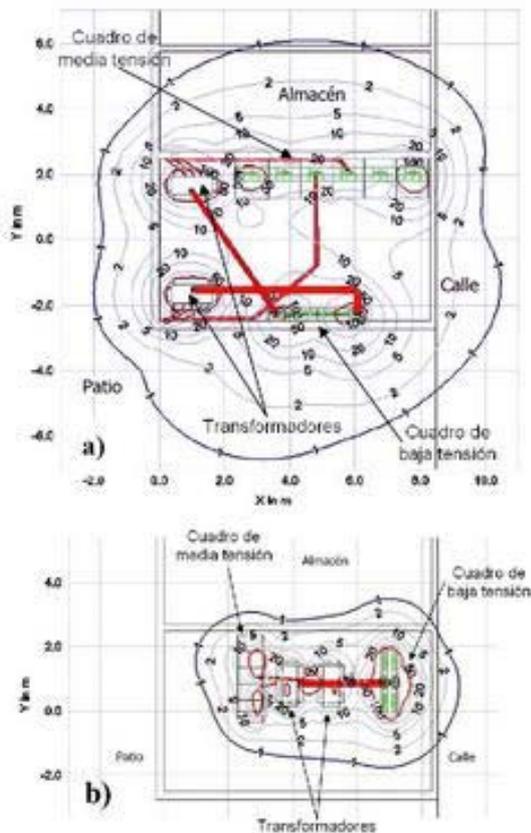


Figura 22. Distribución interna de un centro de transformación.

Un claro ejemplo se muestra en la figura 22, en la que se presenta la distribución interna de los componentes de un centro de transformación adyacente al patio de un colegio antes (a) y después (b) de la reorganización de los equipos. Para reducir el nivel de exposición en la zona de interés (patio), se han distanciado en todo lo posible los elementos de mayor emisión de campo, como son el cuadro de baja tensión y los dos transformadores. Asimismo, la nueva situación de los equipos se ha realizado minimizando la longitud de las barras y conductores de baja tensión, lo que disminuye aún más el campo generado (figura 23). En este sentido, la utilización de cables trenzados incide en una mayor mitigación.

Por otro lado, y siguiendo algunas de las recomendaciones citadas con anterioridad, también puede ser interesante reconfigurar la colocación y trayectoria de las fases, con el objetivo de facilitar la cancelación del campo generado por cada fase (figura 24).



Figura 23. Reducción de longitud en conductores de baja tensión [12].

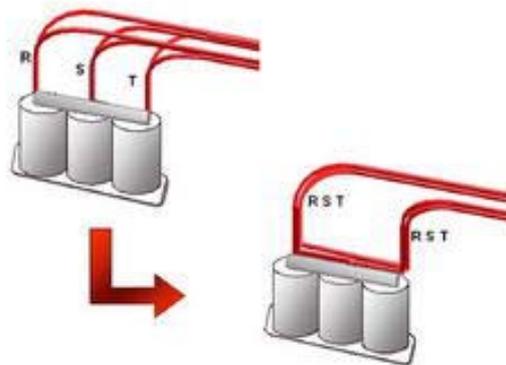


Figura 24. Reconfiguración de conexiones en un transformador.

En caso de que los requisitos de mitigación sean elevados, otra acción posible es el uso de equipos de baja emisión de campo, como son, transformadores, cuadros de baja y celdas de media tensión apantalladas, así como emplear embarrados más compactos. El coste de estos equipos, sin embargo, puede ser elevado, por lo que existe la posibilidad de llevar a cabo el apantallado "in situ" de las zonas más desfavorables mediante chapas de aluminio.

Por tanto, la utilización conjunta de varias de las acciones citadas puede dar lugar a niveles de mitigación del campo magnético considerables, como en el caso de la figura 22. En ella se observa como de la situación inicial, en la que el patio está expuesto a valores superiores a $1\mu\text{T}$, se ha pasado a un nuevo estado en el que los niveles de campo en el patio se encuentran muy por debajo de la curva de $1\mu\text{T}$.

Conclusiones

La problemática sobre los posibles efectos nocivos en la salud por la exposición frecuente a campos electromagnéticos está lejos de aclararse. Mientras que los efectos a corto plazo, causados por una exposición aguda a campos magnéticos están totalmente comprobados, los efectos a largo plazo que podrían causar los actuales niveles de exposición en la población no están del todo aclarados. Por ello, las principales organizaciones internacionales recomiendan aplicar el principio de "prevención prudente", a la espera de clarificar los resultados de las investigaciones. En este sentido, abogan por aplicar medidas de bajo coste para limitar los actuales niveles de exposición en ambientes domésticos y laborales. Estas recomendaciones han servido de base para el desarrollo de legislaciones específicas, como en el caso de la Unión Europea. Sin embargo, hay una gran disparidad de criterios entre los propios países miembros de la Unión. Mientras países como Suiza o Italia abogan por establecer límites muy restricti-

vos en los niveles de exposición, otros como España no tienen una legislación que regule las emisiones a campos de frecuencia industrial, aunque sí dispone de ellas para las radiofrecuencias.

Actualmente existen numerosas técnicas para reducir el nivel de emisiones de campos magnéticos en instalaciones que trabajan a frecuencia industrial (tendidos eléctricos, centros de transformación y subestaciones), teniendo cada una de ellas sus ventajas e inconvenientes, entre las que suele destacar el aspecto económico. Lo habitual es la utilización conjunta de algunas de estas técnicas, de manera que en conjunto se logre una reducción notablemente mayor. Por ello es necesario recabar información específica de la instalación y su emplazamiento, así como realizar un análisis exhaustivo de los principales parámetros que afectan a la eficiencia de la mitigación en cada caso, con el fin de determinar la mejor opción dependiendo de las características de la fuente origen del campo, el área a proteger y los requerimientos de mitigación. 

REFERENCIAS

- [1] Campos eléctricos y magnéticos de 50 Hz. Análisis del estado actual de conocimientos 2001. Red Eléctrica de España. Unesa.
- [2] Proyecto Internacional CEM de la Organización Mundial de la Salud.
- [3] IARC (International Agency for Research on Cancer). *Monographs of the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans*. 2002. Non-ionizing radiation, part 1: Static and extremely low-frequency (ELF) electric and magnetic. Volume 80, 19–26. France: IARC Press, 150 Cours Albert Thomas, F-69372 Lyon Cedex 08.
- [4] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) *Recomendaciones para limitar la exposición a campos eléctricos, magnéticos y electromagnéticos (hasta 300 GHz)*. Health Physics 74:494-522, 1998.
- [5] Dr. Dario Acuña Castroviejo. *Informe científico sobre el efecto de los Campos Electromagnéticos en el Sistema Endocrino humano y Patologías asociadas*. Instituto de Biotecnología. Universidad de Granada.
- [6] Comisión Internacional para la Seguridad Electromagnética (ICEMS). *Aproximación al Principio de Precaución y los Campos Electromagnéticos: Racionalidad, legislación y puesta en práctica*. Benevento, Italia, Febrero de 2006.
- [7] World Health Organization (WHO). *Environmental Health Criteria 238. Extremely low frequency fields*. Geneva: WHO; 2007.
- [8] Consejo de la Unión Europea. *Recomendación del Consejo relativa a la exposición del público en general a campos electromagnéticos (0 Hz a 300 GHz) (1999/519/CE)*. Diario Oficial de las Comunidades Europeas L199/59, 1999.
- [9] Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks (SCENIHR). *Possible effects of Electromagnetic Fields (EMF) on Human Health*. Scientific Committees. European Commission. 21 March 2007.
- [10] REAL DECRETO 1066/2001 de 28 de septiembre de 2001. BOE núm. 234.
- [11] Comité de expertos independientes convocados por el Ministerio de Sanidad y Consumo. *Campos electromagnéticos y salud pública*. Dirección General de Salud Pública y Consumo, 2001. Ministerio de Sanidad y Consumo.
- [12] Task Force C4.204. CIGRÉ. *Guidelines for mitigation techniques of power-frequency magnetic fields originated from electric power systems*. 

