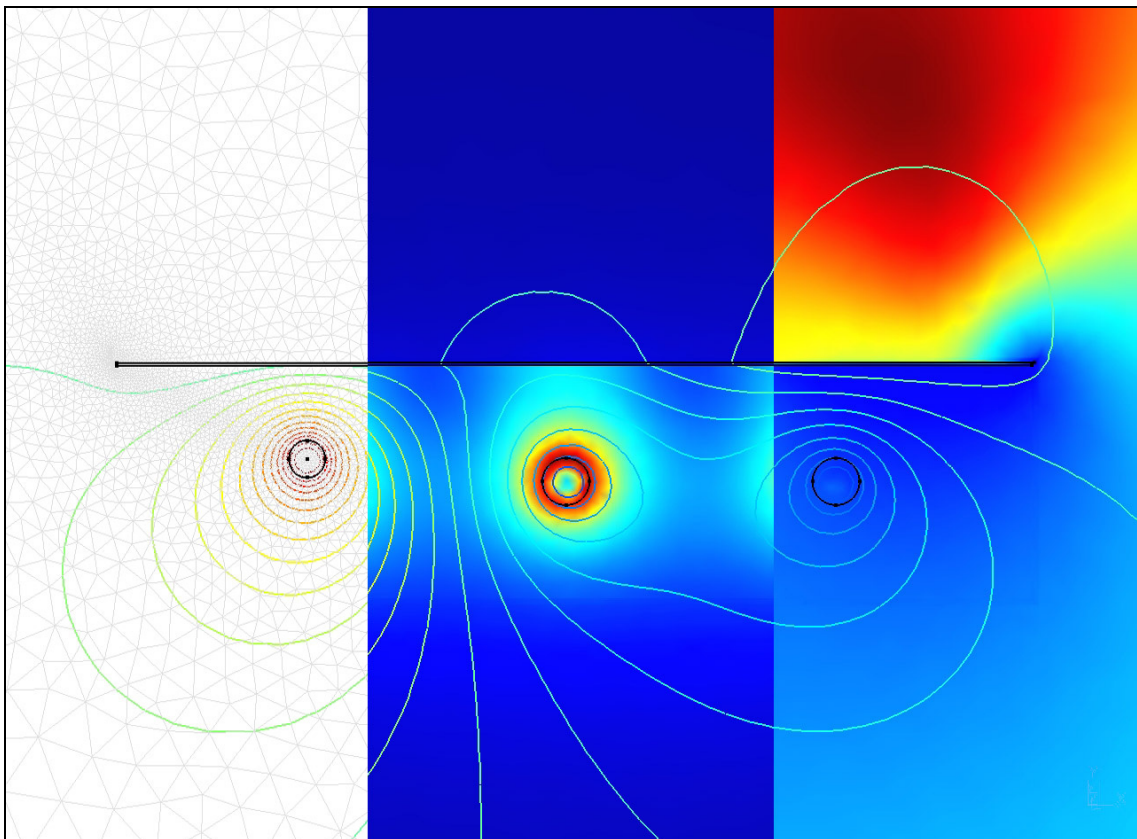


Programa de postgrado de la Escuela Superior de Ingenieros

Máster en Sistemas de Energía Eléctrica

Departamento de Ingeniería Eléctrica
Universidad de Sevilla

Análisis de Sensibilidad Paramétrica en el Diseño de Pantallas de Mitigación del Campo Magnético a Frecuencia Industrial



Autor: **Juan Carlos del Pino López**

Director: Pedro L. Cruz Romero

Sevilla noviembre de 2007

Índice

Capítulo 1. Introducción.

| | |
|--|---|
| 1.1. Problemática de los campos magnéticos y la salud..... | 1 |
| 1.2. Mitigación de campos magnéticos de frecuencia industrial..... | 6 |

Capítulo 2. Apantallado magnético. Estado del arte.

| | |
|--|----|
| 2.1. Introducción al apantallado magnético..... | 16 |
| 2.2. Mecanismo de apantallado..... | 8 |
| 2.3. Análisis de sistemas de apantallado..... | 21 |
| 2.4. Estado del arte..... | 24 |
| 2.4.1. Métodos analíticos..... | 25 |
| 2.4.2. Método semi-analítico..... | 32 |
| 2.4.3. Métodos numéricos..... | 34 |
| 2.4.4. Aplicaciones prácticas..... | 41 |
| 2.4.5. Optimización..... | 42 |
| 2.5. Metodología aplicada al análisis paramétrico..... | 43 |

Capítulo 3. Análisis paramétrico de pantallas abiertas.

| | |
|---|----|
| 3.1. Sistema bajo estudio..... | 44 |
| 3.2. Apantallado mediante placa plana..... | 46 |
| 3.2.1. Pantalla de materiales conductores..... | 46 |
| 3.2.2. Pantalla de materiales ferromagnéticos..... | 49 |
| 3.2.3. Pantalla de materiales mixtos..... | 51 |
| 3.2.4. Sensibilidad a parámetros geométricos..... | 55 |
| 3.3. Apantallado mediante placa en forma de U invertida..... | 58 |
| 3.3.1. Comparativa de pantallas planas y en forma de U..... | 62 |
| 3.4. Influencia de la componente de secuencia cero en pantallas abiertas..... | 66 |
| 3.5. Resumen..... | 67 |

Capítulo 4. Conclusiones y líneas futuras de investigación.

| | |
|---|----|
| 4.1. Resumen y conclusiones..... | 68 |
| 4.2. Propuestas de líneas futuras de investigación..... | 71 |

Referencias

Capítulo 1. Introducción

1.1. Problemática de los campos magnéticos y la salud

El consumo de electricidad y el uso de sistemas y dispositivos electrónicos han pasado a formar parte integrante de la vida cotidiana. Como contrapartida, se crean campos eléctricos y magnéticos en el entorno de estos equipos e instalaciones. En un principio, la problemática que presentaba la aparición de estos campos estaba enfocada principalmente en los niveles de interferencias que podían introducir en otros equipos electrónicos de cierta precisión cercanos al origen del campo, así como las posibles tensiones y corrientes que podrían inducirse en estructuras metálicas cercanas, con el consiguiente riesgo de accidentes por contacto. Pero 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. Se sabe que, de todo el espectro electromagnético, los de mayor frecuencia son capaces de transmitir la suficiente energía como para 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”. Sin embargo, las de menor frecuencia, conocidas como “no ionizantes”, transmiten muy poca energía y desaparecen a corta distancia de la fuente que la genera. En esta zona se encuentran las radiaciones del sistema eléctrico de frecuencia industrial (frecuencia extremadamente baja o FEB). No obstante, no ha quedado todavía demostrada totalmente la inocuidad de estas emisiones no ionizantes, 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) que han contribuido a resolver cuestiones importantes y a focalizar mejor las investigaciones futuras, lo que posiblemente les convierte en el agente más estudiado de la historia. Para el caso concreto de emisiones FEB, la mayoría de estos estudios se han enfocado en el análisis de campos magnéticos, ya que a bajas frecuencias los campos eléctrico y magnético están desacoplados, siendo el campo eléctrico muy sencillo 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).

Debido a esta creciente preocupación, en 1996 la Organización Mundial de la Salud (OMS) puso en marcha el Proyecto Internacional sobre Campos Electromagnéticos [1] con el fin de investigar y determinar claramente los posibles riesgos sanitarios asociados a las tecnologías que crean CEM, además de ayudar a las autoridades nacionales a sopesar los beneficios de la tecnología emisora de CEM frente a sus inconvenientes, si finalmente se demostrara que perjudican a la salud, y a decidir las medidas de protección que pudieran ser necesarias. Este objetivo se presenta complicado, dado que los resultados de las investigaciones actuales son frecuentemente contradictorios, por lo que suelen pasar algunos años hasta que la OMS concluya, evalúe y publique las investigaciones necesarias. Ello aumenta la preocupación y la confusión en general, y el público desconfía de que pueda llegarse a conclusiones justificadas en lo que respecta a su seguridad.

En el año 2001, el Centro Internacional para la Investigación del Cáncer (CIIC) publicó un estudio monográfico [2] en el que los campos magnéticos de FEB se calificaban de “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 el café, cloroformo, gasolina, plomo y los humos de soldadura). "Posible carcinógeno humano" es la denominación más leve de las tres que utiliza el CIIC para clasificar la evidencia científica de una posible carcinogenicidad. Por tanto, esta clasificación valora la solidez de las pruebas científicas, y no el grado de carcinogenicidad o el riesgo de cáncer vinculado al agente. Así pues, la denominación "posible carcinógeno humano" significa que hay escasas pruebas fiables de que la exposición a campos FEB pueda ser causa de cáncer. Aunque los datos de que se dispone no permiten descartar que este tipo de exposición produzca cáncer, serán necesarias investigaciones más especializadas y de alto nivel para dilucidar esta cuestión. 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 magnéticos¹ de frecuencia de red doméstica superior a 0,3 μT - 0,4 μT . 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 acerca de los posibles efectos a largo plazo, la OMS recomienda aplicar el principio de “prevención prudente”, por el cual se insta a aplicar medidas sencillas de coste reducido para evitar la exposición excesiva a los CEM 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 las 100 μT) tiene efectos biológicos a corto plazo, atribuibles a mecanismos biofísicos comúnmente conocidos. Los campos magnéticos externos de FEB originan en el cuerpo humano corrientes y campos

¹ A lo largo de todo el texto se entenderá por campo magnético al campo vectorial de densidad de flujo magnético o inducción magnética B .

eléctricos que, si la intensidad del campo es muy elevada, causan estimulación neural y muscular, así como cambios en la excitabilidad neuronal del sistema nervioso central. 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) [3], organismo no gubernamental vinculado a la Organización Mundial de la Salud OMS y que participa plenamente en el Proyecto internacional CEM. Estas directrices ofrecen una protección adecuada respecto de los efectos sanitarios ya conocidos, y respecto de los que pueden producirse al tocar objetos cargados en un campo eléctrico externo. Esta organización reexamina sus directrices cada vez que el Proyecto CEM haya realizado nuevas evaluaciones de los riesgos para la salud. Actualmente los límites recomendados son de 100 μT para exposiciones domésticas y 500 μT para exposiciones ocupacionales, valores muy por debajo de los que suelen presentarse en ambos ámbitos.

Los límites de exposición a CEM establecidos por la ICNIRP han servido de base principal para establecer los valores y actuaciones recomendados en la reglamentación establecida en numerosos países. Un ejemplo de ello es la Unión Europea, que siguiendo el consejo del Comité Científico Director que asesora a la Comisión Europea en Toxicidad, Ecotoxicología y Medio ambiente, se basó en 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 [4]. 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 [5], 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 CEM 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 [6]. Esto muestra una cierta dejadez por parte del Estado Español en comparación con otros estados miembros de la UE. Por otra parte, tampoco se aprecia una intención de aplicar una política preventiva como recomiendan tanto la OMS como la UE. Hay que destacar que el Ministerio de Sanidad y Consumo convocó en 2001 un Comité de expertos independientes [7] 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 información sobre los conocimientos actuales del riesgo de los CEM a frecuencia industrial
- Fomento de estudios epidemiológicos en poblaciones expuestas por encima de 0,4 μT

- Siguiendo la recomendación de la UE deberían realizarse 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 artículo 25 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.

Dicho informe se actualizó en el año 2003 [8], concluyendo nuevamente que no existen evidencias suficientes para modificar los niveles de exposición y actuaciones propuestos por las Recomendaciones de la UE, aunque debido a la posible influencia en la leucemia infantil, insta a aplicar una política preventiva y de promoción de estudios que ayuden a aclarar la situación. Paradójicamente, en la actualidad el Gobierno Español no sigue dichas recomendaciones.

Queda por tanto clara la posición oficial de la comunidad internacional, en general siguiendo la posición marcada por la OMS. Esto choca frecuentemente con la opinión y percepción de la población, es decir, de los principales afectados por las posibles amenazas que implican la exposición a CEM. Por ello, es frecuente encontrar noticias en las que vecinos de un determinado barrio se unen en plataformas pidiendo el traslado o la no instalación de centros de transformación y subestaciones en las cercanías de sus viviendas. Muchas de estas plataformas apoyan su postura en informes de científicos independientes y valores anormales de mortalidad y enfermedades graves en la población adulta e infantil cercana a la fuente de CEM, consiguiendo en algunos casos llegar a compromisos con las autoridades locales para el traslado de la instalación. Un claro ejemplo en España es el informe elaborado por el Doctor Darío Acuña Castroviejo en el año 2006 [9], empleado con éxito en multitud de demandas interpuestas por dichas plataformas vecinales. En dicho informe se afirma lo siguiente:

"Las ondas electromagnéticas generadas por las corrientes eléctricas y por las microondas (telefonía, telefonía móvil, radiofrecuencias, telefrecuencias, radares civiles y militares, etc.) interfieren y distorsionan el funcionamiento normal del organismo humano. Aunque en la bibliografía científica hay cierta controversia se han publicado con suficiente rigor metodológico diversos efectos nocivos en las personas expuestas. Los principales efectos perjudiciales de la exposición a campos electromagnéticos son los siguientes:

- a) **Trastornos neurológicos** como irritabilidad, cefalea, astenia, hipotonía, síndrome de hiperexcitabilidad, somnolencia, alteraciones sensoriales, temblores y mareos.*
- b) **Trastornos mentales:** alteraciones del humor y del carácter, depresiones y tendenciassuicidas.*
- c) **Trastornos cardiopulmonares:** alteraciones de la frecuencia cardiaca, modificaciones de la tensión arterial y alteraciones vasculares periféricas.*
- d) **Trastornos reproductivos:** alteraciones del ciclo menstrual, abortos, infertilidad y disminución de la libido sexual.*
- e) **Incremento del riesgo de algunos tipos de cáncer** como las leucemias agudas y los tumores del sistema nervioso central en la infancia.*
- f) **Trastornos dermatológicos:** dermatitis inespecíficas y alergias cutáneas.*

*g) **Trastornos hormonales:** alteraciones en el ritmo y niveles de melatonina, substancias neurosecretoras y hormonas sexuales.*

*h) **Trastornos inmunológicos:** alteraciones del sistema de inmunovigilancia antiinfecciosa y antitumoral".*

En el informe se hace especial hincapié en la sensibilidad que presentan los niños frente a los efectos de los CEM, instando a tomar medidas para minimizar la exposición en colegios y guarderías. Asimismo, establece como principal mecanismo de interacción de los CEM con el organismo para el desarrollo de enfermedades a la disrupción endocrina de la melatonina. Para llegar a estas afirmaciones, el Doctor Acuña se basa en numerosos estudios de científicos independientes internacionales.

Para añadir más controversia al asunto y complicar aún más la percepción de la población en cuanto a la peligrosidad o no peligrosidad de los CEM, la Comisión Internacional para la Seguridad Electromagnética (ICEMS) elaboró en septiembre de 2006 la denominada Resolución Benevento [10]. Esta resolución es también empleada en su favor por las plataformas vecinales ya que en ella se hacen las siguientes afirmaciones:

1. *Nuevas evidencias acumuladas indican que **hay efectos adversos para la salud** como resultado de la exposiciones laboral y pública a los campos eléctricos, magnéticos y electromagnéticos, o CEM, en los niveles de exposición actuales. Es necesario, pero todavía no se ha realizado, un examen comprensivo, independiente y transparente de las pruebas puntuales que señalan este riesgo potencial emergente para la salud pública.*
2. *Los **recursos y medios necesarios** para esto son **bastante inadecuados**, a pesar del explosivo crecimiento de las tecnologías de telecomunicaciones así como la inversión enorme en el transporte eléctrico.*
3. *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.*
4. *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.*

Estas afirmaciones ponen de manifiesto, entre otras cosas, la problemática para llevar a cabo investigaciones imparciales y con un procedimiento riguroso para aclarar las posibles lagunas de conocimiento que puedan esclarecer las incongruencias que suelen aparecer en los resultados. Todo esto complica incluso más poder llegar a conclusiones ciertas acerca de la peligrosidad de los CEM.

Por ello, es interesante tener en cuenta la posición de la OMS en su último informe de Junio de 2007 [11, 12]. En él se concluye 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 FEB. 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. 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 recomendaciones:

- En lo que respecta la exposición a corto plazo a CEM de frecuencia elevada, ha quedado científicamente demostrado que ésta tiene efectos adversos para la salud (ICNIRP, 2003). Las instancias normativas deben adoptar directrices internacionales sobre los límites de exposición destinadas a proteger a los trabajadores y al público en general frente a esos efectos adversos. Los programas de protección contra los CEM han de incluir mediciones de exposición correspondientes a fuentes en las que cabe prever que los niveles de exposición excedan los valores límite.
- 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, por lo que no está claro qué beneficios reportaría para la salud una reducción de los niveles de exposición. En vista de todo ello, se hacen las recomendaciones siguientes:
 - Los gobiernos y el sector industrial deben seguir de cerca los avances científicos y promover programas de investigación que reduzcan aún más la incertidumbre de las pruebas científicas relativas a los efectos sanitarios de la exposición a campos de FEB. A lo largo del proceso de evaluación del riesgo de las FEB, se han identificado diversas lagunas de conocimientos, que conforman la base de un nuevo proyecto de investigación.
 - Se alienta a los Estados Miembros a que establezcan con los interesados directos programas de comunicación eficaces y abiertos que faciliten la adopción de decisiones informadas. Esos programas podrían incluir la mejora de los cauces de coordinación y consulta entre la industria, los gobiernos locales y los ciudadanos en el proceso de planificación relacionado con las instalaciones que crean CEM de frecuencia industrial.
 - Al construir nuevas instalaciones y diseñar nuevos dispositivos, por ejemplo electrodomésticos, conviene explorar soluciones de bajo coste para reducir los niveles de exposición. La idoneidad de las medidas de reducción de los niveles de exposición variará de un país a otro. Sin embargo, no se justifica la implantación de políticas basadas en la adopción de límites de exposición arbitrariamente bajos.

1.2. Mitigación de campos magnéticos de frecuencia industrial

Como se comentó en el apartado anterior, la creciente preocupación que presenta la población frente a los posibles efectos nocivos de los CEM, en particular a los generados por líneas de transmisión y distribución de energía eléctrica y centros de

transformación y subestaciones, ha llevado a la OMS a recomendar la aplicación del principio de prevención prudente, incitando a la adopción de medidas para reducir los niveles de exposición en la población. Esto ha llevado al establecimiento, por parte del gobierno de algunos países (Italia, Suiza, etc.), de límites muy restrictivos de exposición mediante la creación de nuevas leyes. En cualquier caso, esto implica adoptar nuevas estrategias a la hora de abordar la remodelación o construcción de nuevas instalaciones. En muchos casos, bastaría con aplicar técnicas basadas en conceptos teóricos ampliamente conocidos en la actualidad para conseguir un cierto grado de reducción del campo magnético generado por la instalación, disminuyendo los posibles niveles de exposición que afectaría a la población. Estas técnicas se basan fundamentalmente en modificar algunos de los parámetros de la geometría de la instalación. Una de las prácticas más extendidas en la actualidad es el soterramiento de líneas aéreas. Ya sea por razones prácticas o urbanísticas, el soterramiento de líneas aéreas es una actuación muy frecuente. La principal ventaja es, además de la visual, que es una configuración más compacta, lo que promueve la cancelación del campo generado por cada fase.

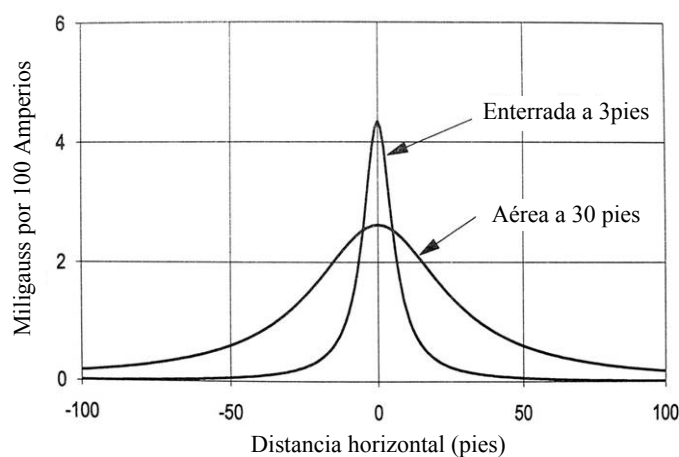


Figura 1.1. Perfil transversal del campo a 1m de altura sobre el terreno.

Como se aprecia en la figura 1.1, tanto en líneas aéreas como subterráneas, para un mismo nivel de corriente, el perfil siempre es en forma de campana, salvo que en el caso de líneas aéreas ésta es más ancha, es decir, tiene una zona de influencia mayor. Por el contrario, en el caso de las subterráneas, aunque el pico de campo máximo puede ser mayor, la zona de influencia es mucho menor al reducirse rápidamente el campo al alejarse del origen del mismo. Esta característica es lo que hace que este tipo de instalaciones sean tan interesantes como método de mitigación del campo magnético, ya que reducen la zona afectada por el mismo. Asimismo, esta actuación parece tener un efecto tranquilizador en la población, ya que al ocultar el origen del campo de la visión directa parece repercutir en el nivel de apreciación de la peligrosidad, aunque como se ve en la figura 1.1, el valor máximo de campo puede llegar a ser incluso mayor que en el caso aéreo, pero en una zona mucho más reducida. Sin embargo, existen más acciones que pueden llevarse a cabo de manera combinada para reducir los niveles de campo. A continuación se comentan algunas de ellas.

- Altura (profundidad) de la línea

Como es bien conocido, el campo magnético disminuye con la distancia al origen del mismo, por lo que es claro que 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 1.2). 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.

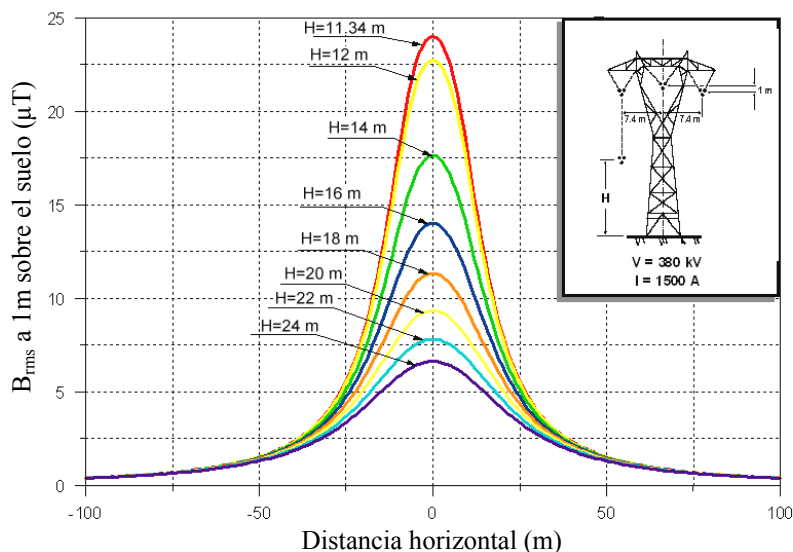


Figura 1.2. Perfil transversal del campo a 1m del suelo para distintas alturas de la línea.

- Configuración geométrica del tendido

Otra acción simple 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 de triángulo, disposición que facilita la cancelación del campo entre las fases, obteniéndose así un campo total más reducido. De esta forma se obtienen perfiles (figura 1.3) en los que la zona de influencia es más estrecha y con menores valores de campo en el caso de tendidos en configuración triangular. La zona de influencia puede reducirse incluso más si es posible reducir la distancia entre conductores, como se indica a continuación.

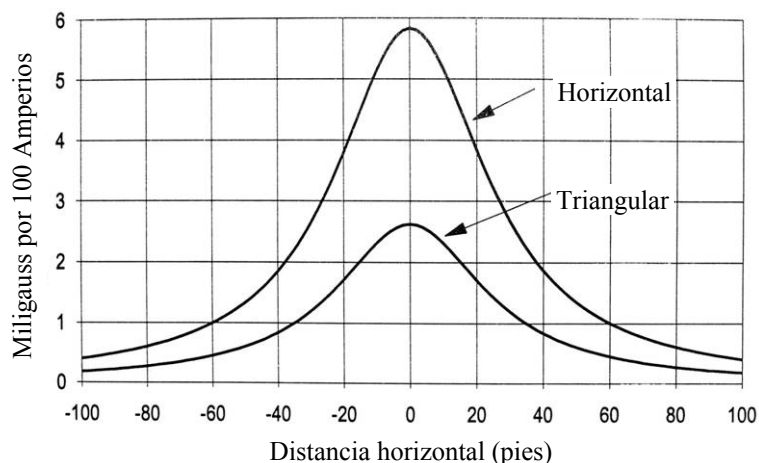


Figura 1.3. Perfil transversal del campo a 1m sobre el suelo para tendido horizontal y triangular.

- Distancia entre conductores

Ya sea en caso de líneas aéreas o subterráneas, la compacidad 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. Como se

aprecia en la figura 1.4, con esta acción se consigue que el campo decaiga más rápidamente con la distancia al origen, reduciendo así la zona de influencia 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.

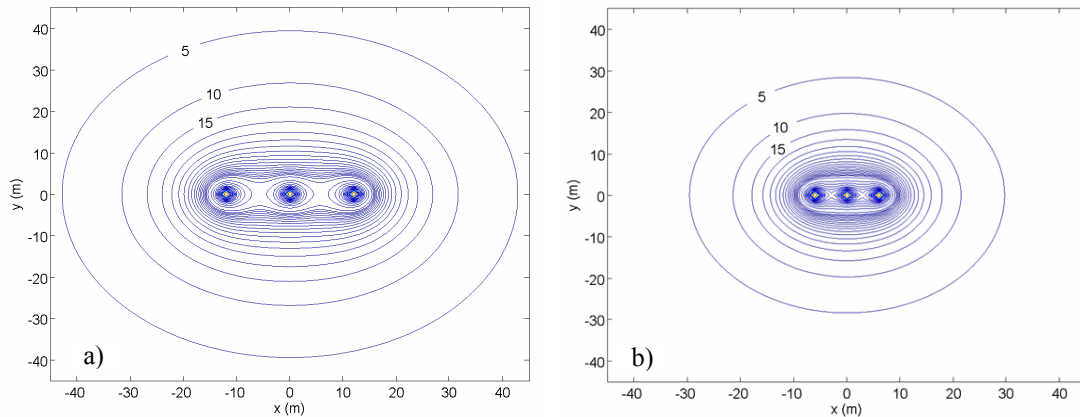


Figura 1.4. Líneas de campo B constante para distinta separación de cables en el tendido.

- División de fases

En otras ocasiones, puede reducirse el campo generado 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, lo que influye notablemente en la reducción del campo (figura 1.5b). 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. De este modo, mediante la combinación adecuada de estos elementos, se puede llegar a configuraciones que se comportan como una línea trifásica (figura 1.6).

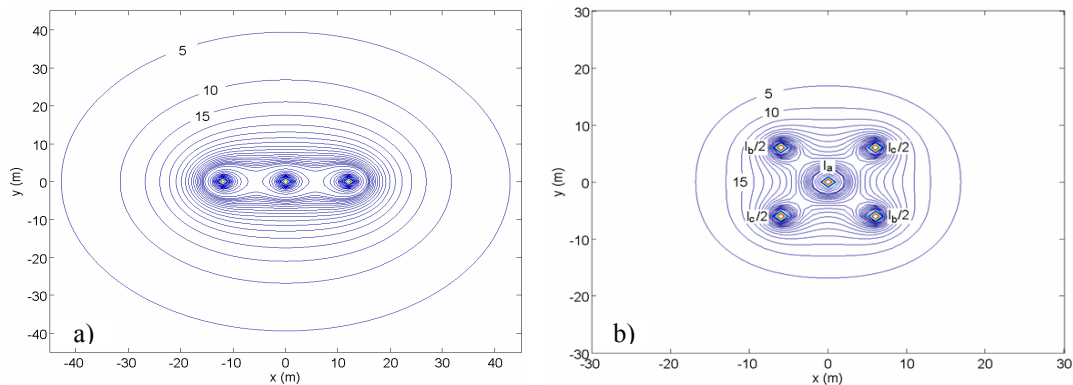


Figura 1.5. Líneas de campo B constante para distintas configuraciones de las fases del tendido.

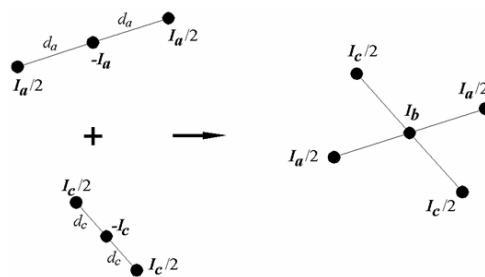


Figura 1.6. Constitución de línea trifásica mediante cuádrupolos.

- 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.

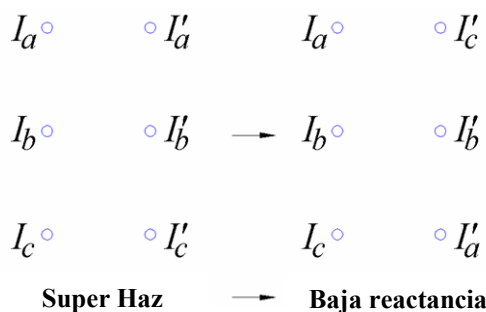


Figura 1.7. Modos de configurar conductores en líneas dobles.

Un caso claro es lo que se muestra en la figura 1.7. 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 como se muestra en la figura 1.8, debido a que esta configuración favorece la cancelación del campo generado por las fases.

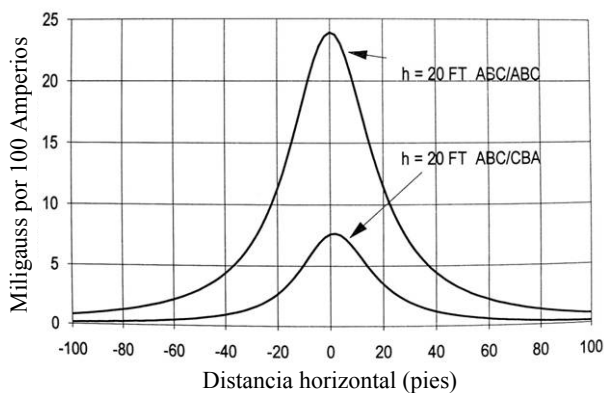


Figura 1.8. Perfil transversal del campo a 1m del suelo para dos configuraciones de conductores.

- Componente de secuencia cero

Además de los parámetros geométricos descritos, es obvia la influencia que tiene la corriente que circula por la línea sobre el campo magnético generado. Esta influencia no solo se debe al nivel de corriente, donde mayor intensidad por los conductores produce mayor campo, sino al equilibrio entre las mismas, en concreto a la posible existencia de componente de secuencia cero en el sistema trifásico. Es decir, un sistema totalmente equilibrado produce un menor campo que un sistema desequilibrado. En la figura 1.9 se muestra un ejemplo de cómo aumenta el campo a medida que lo hace la componente de secuencia cero del sistema. Por tanto, antes de tener en cuenta los parámetros comentados con anterioridad, la primera acción a llevar a cabo en una instalación para reducir el campo magnético que ésta genera es la reducción de corriente de secuencia cero que circula por la línea.

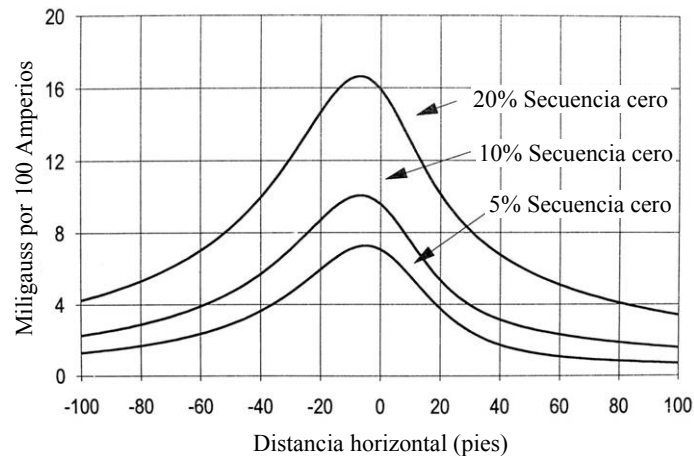


Figura 1.9. Perfil transversal del campo a 1m del suelo para distintos niveles de secuencia cero.

Todas las acciones comentadas con anterioridad producen una reducción en el campo más o menos apreciable. Dichas acciones podrían englobarse como técnicas intrínsecas de mitigación, al tratarse de medidas llevadas a cabo mediante la variación de parámetros propios de la línea. Pero en muchas ocasiones es necesaria una reducción más drástica del campo. En estas ocasiones, aún habiendo aplicado algunos de los conceptos anteriores, es necesario recurrir a nuevas técnicas de mitigación empleando elementos externos a la instalación para conseguirlo. En estos casos, la mitigación se puede llevar a cabo de forma activa o pasiva por parte de los elementos adicionales empleados para la reducción. Los más habituales son:

- 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 1.10a).

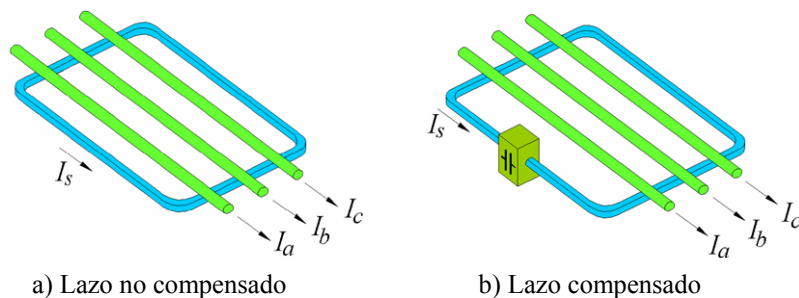


Figura 1.10. Configuración de lazo pasivo compensado y no compensado.

Para incrementar la eficacia del lazo se suele intercalar un condensador para aumentar la corriente de compensación (figura 1.10b), y así aumentar el efecto mitigador. En esta situación se habla de lazo compensado. La figura 1.11a muestra como las líneas de campo se deforman en presencia del lazo, reduciendo el nivel de campo bajo el tendido.

Una mejora que puede aplicarse a este método de mitigación es la instalación de un sistema que se encargue de generar la corriente que sea necesaria en cada instante 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 1.12b).

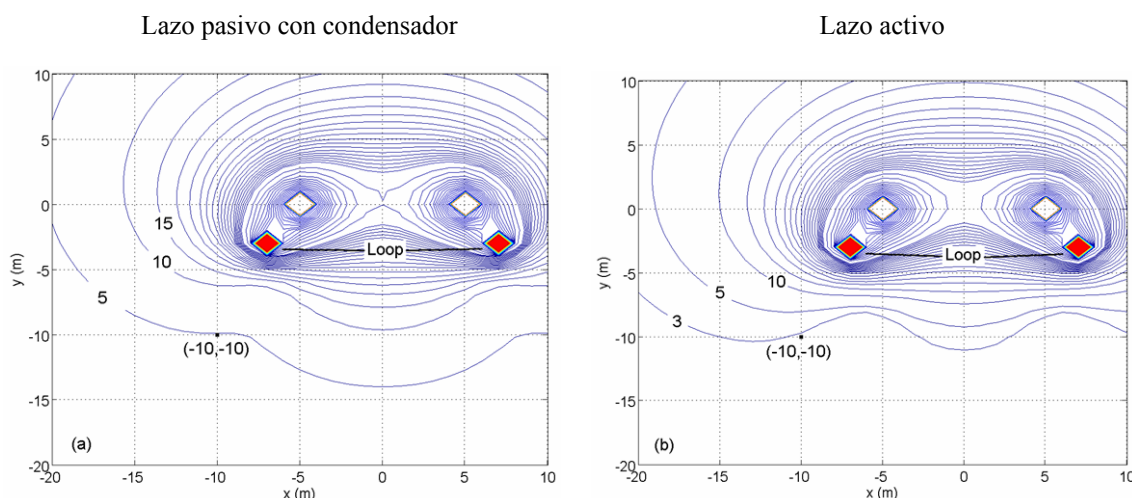


Figura 1.11. Líneas de campo B constante en presencia de lazo pasivo compensado y lazo activo.

Una posible aplicación de este tipo de técnica se muestra en la figura 1.12, en la que se pretende mitigar el campo de una línea aérea sobre una vivienda cercana a la misma.

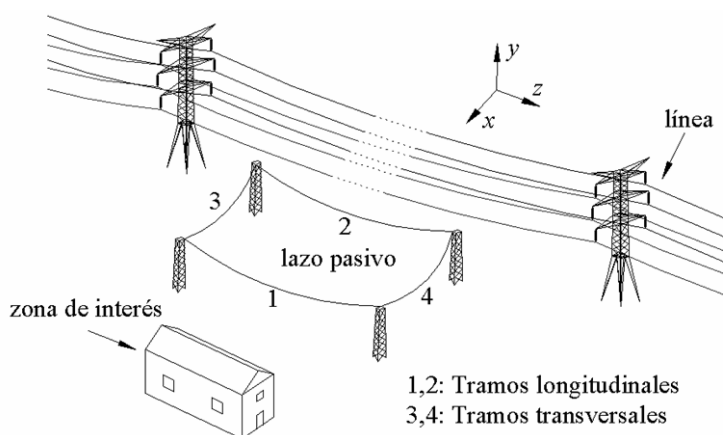


Figura 1.12. Ejemplo de sistema de mitigación del campo magnético mediante lazo pasivo.

- 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 1.13). De esta manera se reduce 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, pero ambos buscan producir la deformación del campo magnético para evitar, en lo posible, que llegue a la zona que se quiere proteger.

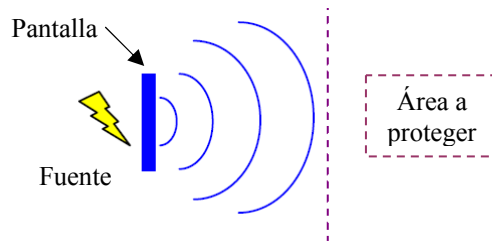


Figura 1.13. Esquema de sistema de mitigación mediante pantalla.

Mientras que los materiales conductores deforman el campo mediante la generación de un campo opuesto originado por la inducción de corrientes parásitas en la chapa (figura 1.14a), 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 (figura 1.14b).

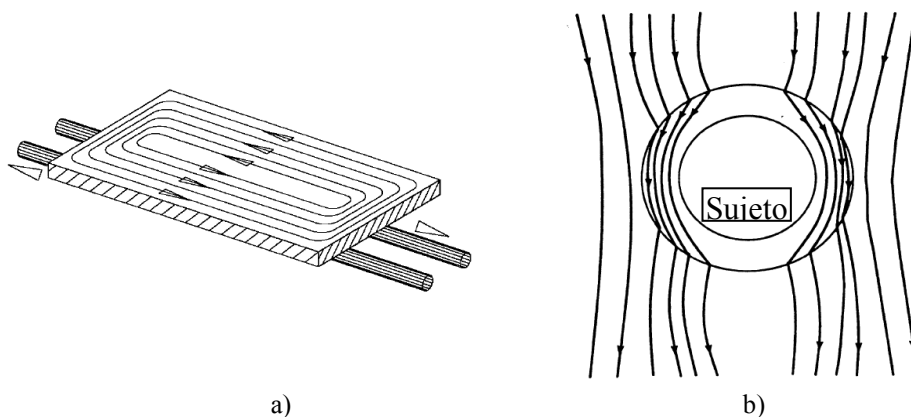


Figura 1.14. Mecanismos de reducción presentes en las pantallas.

De esta forma se obtienen líneas de flujo magnético² como los de la figura 1.15, donde se aprecia como la pantalla conductora “repele” el campo originado por la fuente, mientras que la ferromagnética “atrae” dicho flujo al interior del material. En ambos casos se reduce el número de líneas de flujo que llegan al otro lado de la pantalla.

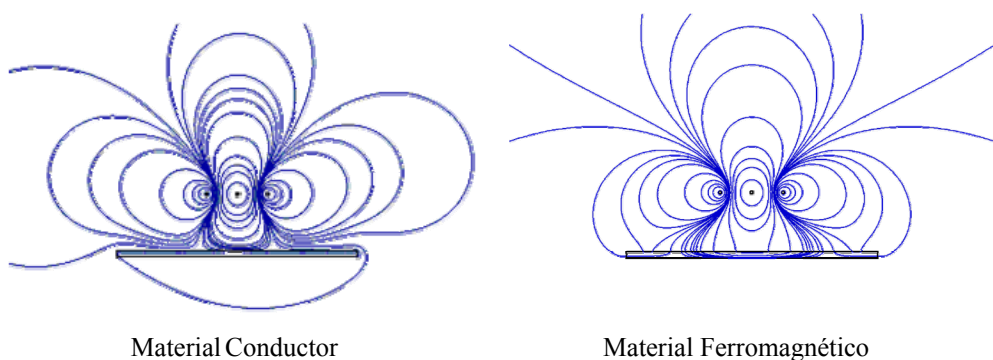


Figura 1.15. Líneas de flujo en presencia de pantallas conductoras y ferromagnéticas.

En capítulos posteriores se desarrollarán los principales aspectos que determinan el funcionamiento de esta técnica. Asimismo, se analizarán distintas configuraciones de pantallas y combinación de materiales para obtener una óptima reducción del campo.

² Líneas de flujo magnético o de fuerza: líneas cuya tangente proporciona la dirección del vector inducción magnética B en ese punto. Son perpendiculares a las líneas de campo constante.

Las técnicas comentadas anteriormente han sido enfocadas 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 proximidad 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 algunas de las técnicas comentadas anteriormente. En el caso particular de los centros de transformación, las principales fuentes de campo son los cables de baja tensión (por los que circula mayor corriente) y el transformador. Por ello, siempre es recomendable alejarlos de la zona de interés a la hora de plantear la organización de los equipos dentro del centro de transformación.

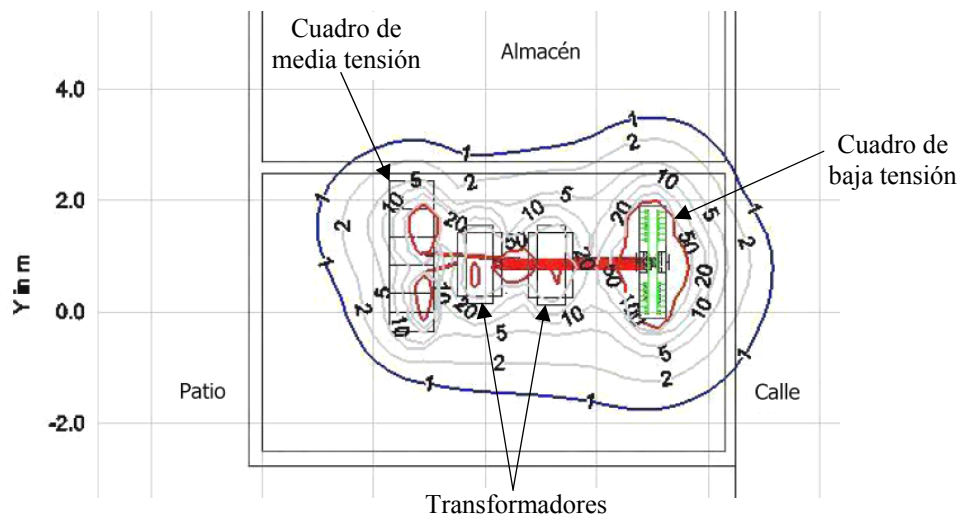


Figura 1.16. Distribución interna de un centro de transformación.

Un claro ejemplo se muestra en la figura 1.16, en la que se presenta la distribución interna de los componentes de un centro de transformación adyacente al patio de un colegio. 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. De este modo, los niveles del campo en el patio se encuentran por de bajo de la curva de $1\mu\text{T}$.

Asimismo, reduciendo la longitud de los conductores de baja tensión también se disminuye el campo generado, y más aún si se reduce la distancia entre conductores (cables trenzados) y se reconfiguran las fases para facilitar la cancelación del campo (figura 1.17), como se comentó anteriormente.

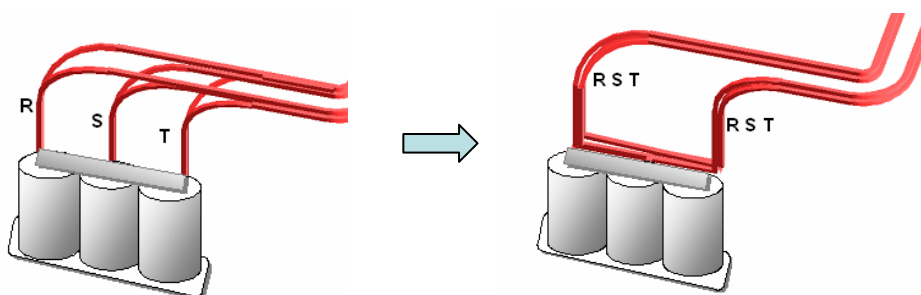


Figura 1.17. Reconfiguración de conexiones en un transformador.

Otro punto a tener en consideración es el uso de equipos de baja emisión de campo en la medida que sea posible, como por ejemplo, transformadores apantallados, cuadros de baja y celdas de media tensión apantalladas o embarrados compactos. En caso de no ser viable esta situación, está la posibilidad de llevar a cabo el apantallado in situ de las zonas más desfavorables mediante chapas de aluminio.

En definitiva, actualmente existen numerosas técnicas para reducir el nivel de emisiones de campo magnéticos en instalaciones que trabajan a frecuencia industrial (como 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 las técnicas mencionadas. Por ello es necesario recabar información específica del emplazamiento, así como realizar un análisis exhaustivo de los principales parámetros que afectan a la eficiencia de la mitigación, 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.

A lo largo de los próximos capítulos se analizará el caso particular de la mitigación de campos magnéticos mediante técnicas de apantallado con materiales conductores y ferromagnéticos, realizando un estudio y análisis exhaustivo de los principales parámetros que intervienen en la eficiencia mitigadora. El interés de esta técnica radica en su aplicabilidad en instalaciones de nueva construcción, así como en la mejora de instalaciones ya existentes que requieran de una mitigación del campo generado. Asimismo, económicamente es una de las opciones más viables entre las mencionadas anteriormente cuando se requiere un cierto grado de mitigación, siguiendo así las recomendaciones de la OMS acerca de la búsqueda de soluciones de bajo coste. Para su estudio se utilizará una fuente genérica formada por un sistema de cables paralelos, los cuales pueden representar embarrados o cableados en centros de transformación, líneas aéreas o subterráneas, etc.

Capítulo 2.

Apantallado Magnético. Estado del Arte.

2.1. Introducción al apantallado magnético

Como se comentó en el capítulo anterior, la reducción del campo magnético generado por un determinado tipo de instalación puede abordarse de diversas formas:

- Técnicas intrínsecas
Consisten en la modificación de alguno de los parámetros geométricos de la instalación para conseguir la reducción del campo emitido, como por ejemplo: disminuir la distancia entre fases, alejar el origen de la fuente de la zona a proteger, disposición óptima de las fases en líneas múltiples para favorecer la cancelación del campo generado entre las fases, etc.
- Técnicas empleando elementos externos adicionales
Se trata de técnicas en las que se dispone de una serie de elementos externos adicionales a la instalación mediante los cuales se reduce la intensidad del campo en las proximidades de la misma. Dentro de esta categoría se puede diferenciar entre técnicas activas o pasivas:
 - Pasivas
Son técnicas que reducen el campo total en el área protegida mediante la disposición de elementos cuyos materiales interactúan con el campo magnético generado por la instalación. Entre ellas destacan:
 - Lazos pasivos
Se trata de conductores en forma de bucle o lazo situados en las proximidades de la instalación, en los que se inducen corrientes por efecto del campo magnético variable que se desea reducir. Estas

corrientes inducidas son tales que generan un nuevo campo que trata de oponerse al principal, de manera que la superposición de ambos da lugar a un campo de menor intensidad.

- Pantallas mediante chapas metálicas
En este caso se interpone entre el origen del campo y la zona a proteger una “barrera” constituida por una o varias chapas de materiales metálicos que hacen de pantalla impidiendo el paso del campo al otro lado de la misma. El efecto reductor se consigue por la interacción del campo con el material metálico. Los mecanismos por los que produce dicha reducción dependen del tipo de material empleado, como se comentará más adelante en este capítulo.

- Activas

Al igual que los métodos pasivos, se trata de elementos externos a través de los cuales se hace pasar una corriente que genera un campo opuesto al principal con el objetivo de reducir su intensidad. Al contrario de las técnicas pasivas en las que dicha corriente era inducida por la propia fuente de campo, en las activas se emplea un equipo o fuente de alimentación externa con la que se impone y controla la corriente que circula en cada momento, controlando así el nivel de reducción que se desea alcanzar. Un caso típico es el de los lazos activos, que no son más que lazos pasivos a los que se les ha dotado de una fuente de corriente controlada.

Los resultados obtenidos con cada una de las técnicas mencionadas dependen en gran medida de las características particulares del origen del campo a mitigar. Por ello, para seleccionar la opción más recomendable para cada caso, es necesario un estudio previo de las características específicas de la instalación y la zona a proteger. Algunas de estas técnicas son más efectivas cuando se usan para proteger zonas de dimensiones reducidas, mientras que otras dan buenos resultados en regiones de grandes dimensiones. Es por esto que antes de proceder a seleccionar un método de mitigación hay que tener claro si se desea realizar una protección o apantallado de la fuente o del sujeto o zona de interés.

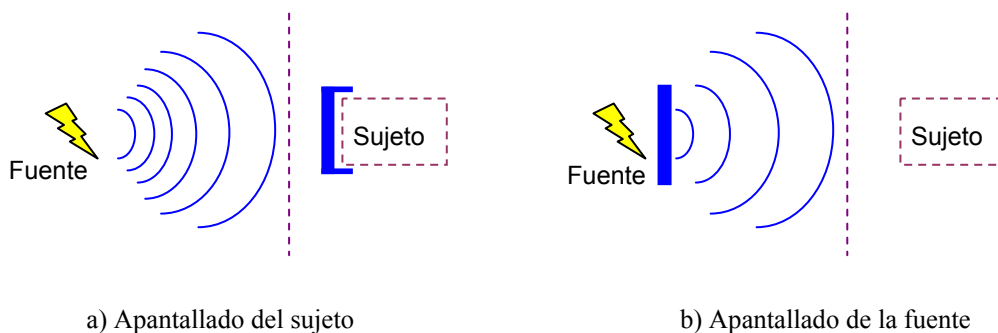


Figura 2.1. Estrategias de apantallado.

Se habla de “apantallar el sujeto” cuando se implementa algún tipo de elemento reductor del campo o pantalla con el fin de proteger una región relativamente pequeña del campo producido por fuentes externas a dicha región (figura 2.1a). Este es el caso habitual de instalaciones o laboratorios en los que existen equipos de precisión sensibles a interferencias. Por otro lado, se habla de “apantallar la fuente” cuando se sitúa algún

tipo de elemento en las proximidades o alrededor de una fuente localizada de campo magnético, a fin de reducir la intensidad del mismo en toda la zona exterior de la fuente (figura 2.1b).

Para cualquiera de las dos situaciones, el uso de chapas metálicas como pantallas produce unos resultados bastante satisfactorios, lo que añadido a su relativa sencillez hace que sea una de las primeras técnicas seleccionadas a la hora de elegir la mejor opción para la mitigación de campos magnéticos, especialmente cuando se trata de campos generados por varios conductores rectilíneos paralelos, los más habituales en líneas aéreas, subterráneas y centros de transformación y subestaciones. Por ello esta técnica es objeto de estudio y análisis en este documento.

2.2. Mecanismos de apantallado

A la hora de reducir el campo magnético generado por algún tipo de instalación, el uso de pantallas metálicas es una de las soluciones más eficientes, ya que ésta puede situarse mediante dos posibles topologías: pantalla abierta situada cerca de la fuente, o pantalla cerrada rodeando la fuente o la región a proteger. Ésta última opción suele ser empleada en instalaciones de nueva construcción, siendo una solución más cara que la primera, la cual suele emplearse con mayor facilidad en la reforma de instalaciones ya existentes.

En cualquier caso, las pantallas pueden estar realizadas con materiales de alta conductividad eléctrica (aluminio, cobre) o con materiales ferromagnéticos (acero, μ -metal). Este aspecto es importante, ya que cada material proporciona un método distinto de reducción, como se indica a continuación:

- Materiales conductores

Cuando se emplean materiales de alta conductividad eléctrica, la reducción del campo se basa en el mecanismo conocido como “cancelación por corrientes parásitas”. En este caso, el campo a mitigar induce corrientes en la pantalla conductora (figura 2.2), generando un campo opuesto al original que es cancelado parcialmente [15].

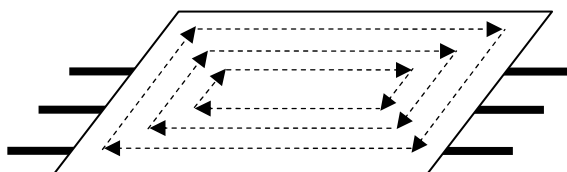


Figura 2.2. Cancelación por corrientes parásitas.

Se podría decir que en este caso la pantalla “repele” o “comprime” el campo bajo la pantalla para evitar que éste pase al otro lado donde se encuentra la zona a proteger. En la figura 2.3 se aprecia como las líneas de flujo se “comprimen” bajo la chapa, alcanzando la región protegida un menor número de ellas.

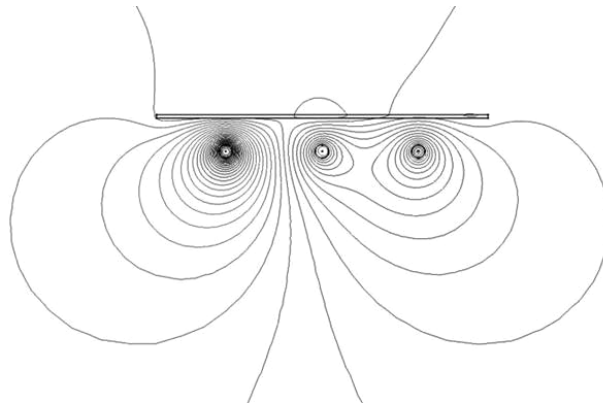


Figura 2.3. Líneas de flujo en presencia de pantalla conductora.

Los materiales habitualmente empleados son el aluminio y el cobre. Ambos materiales presentan ventajas e inconvenientes. Mientras el cobre tiene mayor conductividad eléctrica que el aluminio, éste último es más económico. Asimismo, el cobre es un material muy resistente a la corrosión y es más sencillo de soldar que el aluminio. En cualquier caso el aluminio suele emplearse habitualmente dado su bajo peso específico, lo que permite realizar estructuras con un peso razonable, por lo que es una opción recomendable.

Como se comentará más adelante, las dimensiones de la pantalla influyen notablemente en la eficacia reductora de la misma. En el caso particular de pantallas realizadas mediante materiales de alta conductividad eléctrica, el espesor de la placa es un parámetro fundamental en el rendimiento de la pantalla, ya que es bien conocido que las corrientes inducidas en la chapa decaen exponencialmente en el material hasta una profundidad limitada a lo largo de su espesor [31]. Esta profundidad de penetración viene a indicar la distancia de propagación en la cual las corrientes inducidas se han reducido en un factor de e^{-1} , y depende tanto de la conductividad eléctrica como de la permeabilidad magnética del material, así como de la frecuencia del campo inductor. Su valor se obtiene mediante la expresión:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \approx 12 \text{ mm(Al)}$$

que para el caso particular del aluminio es de unos 12mm para una frecuencia de 50Hz. Este parámetro nos da una idea del espesor que debe tener la pantalla para optimizar su eficiencia mitigadora. Si el espesor es menor que δ , las corrientes inducidas se distribuyen uniformemente en el espesor del material, con lo que pueden obtenerse mejores resultados aumentando el espesor. En caso de ser mayor que δ , aumentar el espesor apenas influye en el nivel de mitigación de la pantalla, ya que no se va a conseguir un mayor nivel de corrientes inducidas. Por tanto este parámetro puede servir a su vez como un indicativo del aprovechamiento que se está realizando del material para reducir el campo.

- Materiales ferromagnéticos

Cuando se utilizan materiales ferromagnéticos para la pantalla, el mecanismo de reducción presente se denomina “flux shunting” o derivación de flujo. En este caso, la pantalla es un camino de menor reluctancia que la que presenta el aire (o tierra en caso de líneas subterráneas), por lo que las líneas de flujo se desvían introduciéndose en el interior del material magnético, alejándose así de la región a proteger [15]. Como se aprecia en la figura 2.4, las líneas de flujo entran en el material magnético de forma casi perpendicular a la superficie, pasando a ser casi paralelas a ella una vez se encuentran dentro.

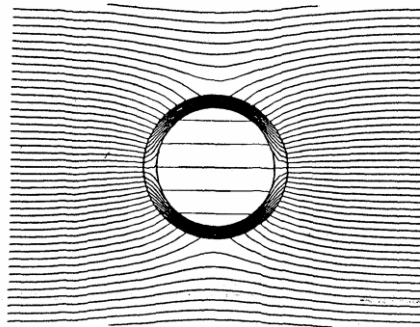


Figura 2.4. Mecanismo de desviación de flujo.

A diferencia de lo que ocurriría con pantallas conductoras, el campo es atrapado por la pantalla impidiendo en parte que las líneas de flujo alcancen el lado contrario donde se encuentra la zona protegida (figura 2.5).

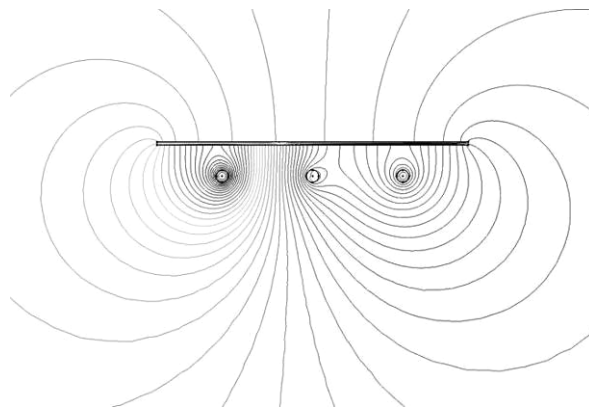


Figura 2.5. Líneas de flujo en presencia de pantalla abierta ferromagnética.

Desde el punto de vista de aplicaciones de mitigación de campos magnéticos, los materiales ferromagnéticos (habitualmente aleaciones) pueden clasificarse como de bajo o elevado coste. Entre los primeros se encuentran el hierro, acero magnético, aleaciones de acero bajo en carbono, acero al silicio (de grano orientado o no orientado), etc. Entre los segundos destacan aleaciones de cobalto, como el permalloy y el μ -metal, y ferritas, los cuales presentan una permeabilidad muy elevada. Estas últimas, debido a su coste elevado, suelen emplearse en aplicaciones muy específicas para proteger regiones, más o menos reducidas, en las que se realicen experiencias y/o medidas que requieran una gran precisión.

Cada uno de los mecanismos mencionados se caracteriza por diferentes condiciones de contorno que deben considerarse para analizar cada configuración. Por ello, no es trivial decidir cuál de los dos métodos es mejor para reducir el campo generado por una determinada instalación, ya que la mitigación alcanzada depende de muchos tipos de parámetros, como el origen y geometría de la fuente, dimensiones y geometría de la pantalla (abierta o cerrada), distancia entre fuente y pantalla, etc. Además, otro hecho a tener en cuenta es que los perfiles de reducción que se obtienen con materiales conductores difieren de los conseguidos con materiales ferromagnéticos. Es decir, como se verá más adelante, estos últimos habitualmente proporcionan grandes reducciones de campo en las cercanías de la fuente, mientras que los conductores lo hacen en zonas alejadas de la misma. Por último, no hay que olvidar el coste más reducido que presentan los materiales conductores frente a los ferromagnéticos.

Debido a todas estas razones, debe realizarse un análisis exhaustivo de todos los parámetros que afectan a la eficiencia mitigadora de la pantalla, con el fin de facilitar la selección de la configuración y material que mejores prestaciones presente para una instalación determinada. Los parámetros más destacados en este sentido son:

- Material utilizado (conductor o ferromagnético).
- Valores de conductividad eléctrica y permeabilidad magnética.
- Espesor de la chapa.
- Geometría de la pantalla (abierta o cerrada).
- Perfil de la chapa (placa plana, U invertida, rectangular cerrada, tubular, placa curvada, etc.).
- Dimensiones de la pantalla.
- Distancia mutua entre pantalla y fuente.
- Número de capas en el caso de pantallas multi-capa.
- Características dimensionales de la fuente.

2.3. Análisis de sistemas de apantallado

En los próximos capítulos se analizarán los resultados obtenidos del estudio de los parámetros anteriormente mencionados en la eficiencia mitigadora de diversos sistemas de apantallado mediante placas metálicas conductoras y ferromagnéticas. Para ello se tomará, en principio, una fuente de campo magnético genérica formada por un sistema trifásico de 3 conductores paralelos (figura 2.5). La reducción del campo generado por dicha fuente se realizará mediante diversos tipos de pantallas, modificando sus dimensiones y características a fin de obtener la influencia de cada aspecto en la eficiencia mitigadora, la cual será analizada mediante el denominado “*Factor de Reducción*”, calculado en [14] como:

$$RF(P) = \frac{B_o(P)}{B_s(P)}$$

donde $B_o(P)$ es el valor eficaz del campo resultante¹ en el punto P cuando no existe pantalla, mientras $B_s(P)$ es el valor eficaz del campo resultante en dicho punto cuando la

¹ Dado que el vector inducción magnética B es variable en el espacio y el tiempo, se define el valor eficaz del campo resultante como $B = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{|B_x|^2 + |B_y|^2 + |B_z|^2}$, siendo B_x , B_y y B_z las componentes fasoriales de B .

pantalla está en su posición. De esta forma se obtiene la relación entre el campo original y mitigado en un determinado punto. Esta definición implica que la reducción alcanzada será mayor mientras más elevado sea el valor de RF .

Por tanto, es necesario calcular de forma exacta el valor del campo magnético generado por la fuente en ambas situaciones, lo que requiere del empleo de las ecuaciones de Maxwell [31]:

$$\begin{aligned} \operatorname{div}\mathbf{B} &= 0 \\ \operatorname{div}\mathbf{D} &= \rho_v && \text{(Ley de Gauss)} \\ \operatorname{curl}\mathbf{H} &= \mathbf{J} + \frac{\partial\mathbf{D}}{\partial t} && \text{(Ley de Ampère)} \\ \operatorname{curl}\mathbf{E} &= -\frac{\partial\mathbf{B}}{\partial t} && \text{(Ley de Faraday)} \end{aligned}$$

donde \mathbf{B} representa la densidad de flujo magnético, \mathbf{H} la intensidad de campo magnético, \mathbf{D} la densidad de flujo eléctrico, \mathbf{J} la densidad de corriente eléctrica, ρ_v la densidad de carga y t el tiempo. Asimismo, los vectores de campo \mathbf{D} y \mathbf{E} , así como \mathbf{B} y \mathbf{H} , están relacionados entre sí por las propiedades de los materiales en cualquier punto de la región mediante las denominadas “*ecuaciones constitutivas*”, dadas por:

$$\begin{aligned} \mathbf{B} &= \mu\mathbf{H} \\ \mathbf{D} &= \varepsilon\mathbf{E} \\ \mathbf{J} &= \sigma\mathbf{E} \end{aligned}$$

donde μ es la permeabilidad magnética, ε la permitividad dieléctrica y σ la conductividad eléctrica.

De estas ecuaciones se observa que la presencia de cargas en movimiento genera simultáneamente campos eléctricos y magnéticos acoplados, con lo cual el problema del cálculo de ambos campos requiere la resolución de ecuaciones diferenciales lineales en derivadas parciales de segundo orden en las coordenadas espaciales y en el tiempo. Una formulación más sencilla se obtiene teniendo en cuenta que la frecuencia de la corriente a frecuencia industrial (50 Hz) es pequeña. En estos casos, en los que la longitud de onda de un campo variable es grande en comparación con las dimensiones físicas del problema, es posible desacoplar los cálculos del campo eléctrico y magnético creados por la fuente, siendo el primero función exclusiva del potencial del conductor, y el segundo de la corriente que circula por el mismo. En estas circunstancias se habla de campos cuasiestáticos, ya que se comportan de forma similar a los campos estáticos. Matemáticamente esto significa desprestigiar el término correspondiente a la corriente de desplazamiento en la ecuación de la ley de Ampère:

$$\frac{\partial\mathbf{D}}{\partial t} = 0$$

Analizando las ecuaciones de Maxwell se derivan importantes conclusiones. De la primera de ellas, la cual describe la naturaleza del campo magnético, se desprende que éste siempre describe trayectorias cerradas. Asimismo, de la ecuación de Gauss, que describe la naturaleza del campo eléctrico, se deduce que este campo describe trayectorias abiertas.

Para terminar la descripción completa del problema electromagnético, es necesario especificar las condiciones de contorno en los límites físicos e interfaz de los materiales. Estas pueden expresarse de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} n_2 \times (\mathbf{E}_1 - \mathbf{E}_2) &= 0 \\ n_2 \times (\mathbf{D}_1 - \mathbf{D}_2) &= \rho_s \\ n_2 \times (\mathbf{H}_1 - \mathbf{H}_2) &= \mathbf{J}_s \\ n_2 \times (\mathbf{B}_1 - \mathbf{B}_2) &= 0 \end{aligned}$$

donde mediante los índices 1 y 2 se indica el medio en el que se encuentra la variable, n_2 es la normal exterior de la interfaz, ρ_s representa la densidad de carga superficial y \mathbf{J}_s representa la densidad de corriente superficial.

En algunas ocasiones es conveniente emplear estas ecuaciones formuladas en función del potencial magnético vector \mathbf{A} , definido como [14]:

$$\mathbf{B} = \text{curl} \mathbf{A}$$

Teniendo en cuenta esta definición en las ecuaciones de Maxwell para el caso de campos cuasiestacionarios, se obtiene la denominada ecuación de difusión del campo magnético, definida como [23]:

$$\nabla^2 \mathbf{A} = j\omega\mu\sigma \mathbf{A} - \mathbf{J}_e$$

En la mayoría de los casos, la geometría del sistema estudiado puede considerarse en 2 dimensiones. En esta situación, el potencial magnético vector \mathbf{A} sólo contiene componente en dirección del eje z , por lo que la ecuación de difusión puede expresarse en coordenadas cartesianas como [14]:

$$-\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) + j\omega\sigma A_z = J_e$$

donde J_e representa la fuente de densidad de corriente eléctrica que origina el campo. A su vez, cambian la forma de establecer las condiciones de contorno del problema. Las más habituales son:

- Condiciones tipo *Dirichlet*, en las que se asigna un valor determinado del potencial \mathbf{A} en un determinado contorno. Por ejemplo $\mathbf{A} = 0$, condición que se suele imponer para establecer que el flujo no atraviese un determinado límite.
- Condiciones tipo *Neuman*, en las que se asigna valor a la derivada de la componente normal del potencial \mathbf{A} . Por ejemplo:

$$\frac{\partial A}{\partial n} = 0$$

con la que se establece que el flujo magnético atraviese de forma perpendicular un determinado contorno.

Desafortunadamente, el estudio analítico de este tipo de problemas es muy complejo debido a la naturaleza de las ecuaciones que gobiernan el sistema, por lo que en la actualidad no existe un método sencillo para analizarlos. En los últimos años se han

probado diversos métodos numéricos que han resultado efectivos para el análisis del apantallado magnético, pero para ello deben realizarse algunas aproximaciones previas. Si se asume que el campo generado por la fuente tiene únicamente dos componentes (la tercera puede despreciarse si los cálculos se realizan en zonas alejadas de los dos extremos de la línea), se puede proceder a un análisis en 2 dimensiones, con lo que la configuración geométrica (figura 2.6) y el campo generado pueden representarse en un plano (figura 2.6). Esto simplifica en gran medida las ecuaciones que gobiernan el comportamiento del sistema, reduciendo el tiempo de cálculo del método numérico empleado. En este sentido, una de las técnicas de resolución más utilizadas en la actualidad es la basada en el método de los elementos finitos, en el cual se fundamentan muchas de las aplicaciones informáticas comerciales orientadas al estudio de sistemas electromagnéticos.

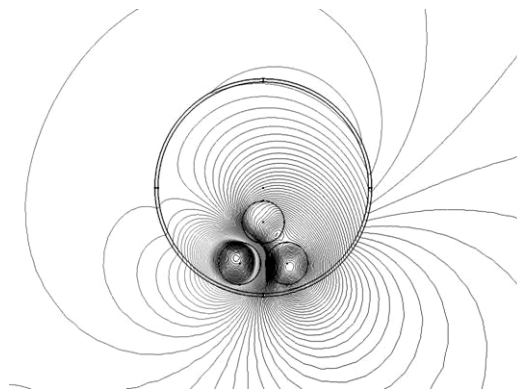


Figura 2.6. Análisis en 2D de un sistema de apantallado.

A continuación se comentan algunas de las vías y soluciones disponibles en la documentación específica, la mayor parte de ellas basadas en hipótesis que alejan el modelo empleado de la realidad, pero que en muchos casos han servido para detallar características y propiedades de sistemas de cables apantallados mediante materiales conductores y ferromagnéticos, que es el objetivo de este trabajo. La utilización de programas basados en elementos finitos es una constante en la documentación, tanto para el análisis de sistemas complejos como para la validación de los resultados obtenidos.

2.4. Estado del arte

La reducción de campos FEB es un problema que se puede resolver mediante la instalación de pantallas magnéticas, cuyo diseño requiere de la solución de problemas realmente complejos, los cuales pueden ser resueltos empleando tanto métodos analíticos, que proporcionan una solución cerrada de las ecuaciones de Maxwell, como por métodos numéricos, que obtienen la solución mediante la subdivisión del problema en otros más simples. Existen numerosas técnicas ampliamente desarrolladas de ambas categorías. Por ejemplo, en la primera de ellas existen dos métodos muy populares: el método de separación de variables (VSM) y el método de transformación conforme o “Conformal Transformation Method” (CTM). Estas técnicas proporcionan soluciones cerradas al problema, pero requieren la introducción de hipótesis acerca de la geometría (VSM) o de los materiales (CTM), además de ser aplicables principalmente en configuraciones sencillas de pantallas (las más comunes: cilindro, esfera, placa plana

infinita). Por el contrario, las aproximaciones numéricas permiten analizar sistemas de configuraciones más complejas, teniendo en cuenta todos los parámetros involucrados en el problema, pero requieren de la utilización de programas complicados y de usuarios expertos. En concreto, existen formulaciones de tipo diferencial como el método de los elementos finitos (FEM) o el método de las diferencias finitas (FDM), que permiten tener en cuenta las dimensiones de la pantalla y las propiedades del material, pero plantean problemas a la hora de manejar el campo en zonas alejadas del sistema. Esto último puede solucionarse empleando métodos integrales, ya que estos requieren de la discretización de las partes activas del sistema, despreciando el ambiente que las rodea. Entre estas técnicas se encuentran el método de elementos de contorno (BEM) y la formulación finita de los campos electromagnéticos (FFEF). Cada uno de estos métodos tienen sus ventajas e inconveniente, por lo que existen métodos numéricos híbridos, como por ejemplo la combinación de FEM-BEM, de tal forma que se aplica cada uno de ellos en una región del dominio de estudio en el que presente menos inconvenientes. Por otro lado, existen técnicas que podrían denominarse semi-analíticas, que modelan la pantalla mediante una serie de conductores paralelos cuyas corrientes se calculan mediante expresiones analíticas (modelo multi-conductor), mediante las cuales se obtiene el campo resultante mediante la aplicación directa de la ley de Biot-Savart. En cualquier caso, las aproximaciones numéricas, junto con experiencias en laboratorio, suelen ser la herramienta perfecta para la validación de las expresiones analíticas desarrolladas para el cálculo del campo mitigado.

A continuación se comentan los resultados obtenidos del estudio y aplicación de las técnicas propuestas por diversos autores en cuanto a soluciones analíticas y numéricas se refiere, destacando las principales conclusiones obtenidas, así como las ventajas e inconvenientes que presentan. Para ello, en todos los casos se ha empleado como fuente de campo magnético un conjunto de 2 o 3 conductores rectilíneos paralelos situados en las proximidades de la pantalla. La configuración de dicha fuente, junto a la geometría del problema, permiten un análisis en 2 dimensiones del sistema, lo que es la principal simplificación común a todos los modelos propuestos.

2.4.1. Métodos analíticos

El estudio analítico del problema busca encontrar expresiones sencillas y cerradas que permitan entender el comportamiento del sistema y la influencia de los principales parámetros del mismo en la efectividad reductora. Debido a la complejidad de los sistemas de apantallado, un reducido número de configuraciones ha sido analizado con éxito a la hora de obtener dichas expresiones analíticas cerradas, aunque siempre con alguna simplificación. Estas configuraciones suelen ser cilindros (figura 2.7a) o esferas sometidos a campos externos o internos, como desarrolla Hasselgren en [14]. En dichas configuraciones se han obtenido expresiones del factor de reducción en función de los principales parámetros del sistema. Estas expresiones han permitido analizar el comportamiento de varios tipos de materiales en estos tipos de pantalla, dando como resultado que, en el caso de pantallas cerradas, los materiales ferromagnéticos dan mejores resultados que los conductores. Por otro lado, existen algunas expresiones para pantallas planas finitas e infinitas sometidas al campo generado por espiras (figura 2.7b). En estos casos los materiales conductores presentan mejor comportamiento.

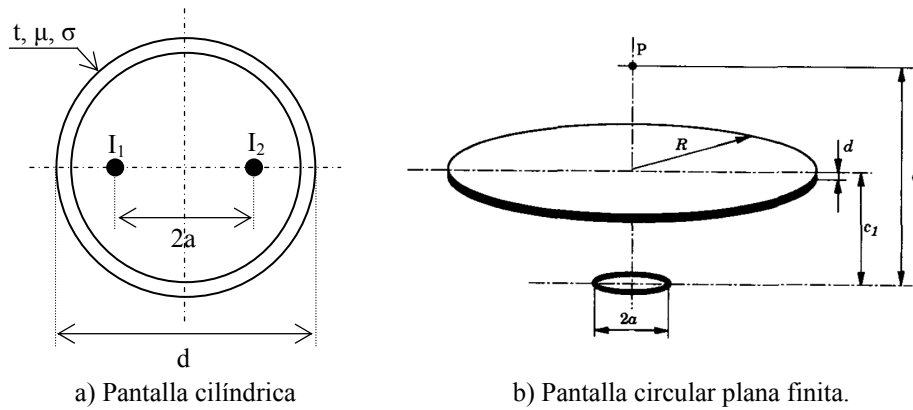


Figura 2.7. Ejemplo de configuraciones de pantalla analizadas.

Por otro lado, Hoburg [15] presenta nuevas expresiones analíticas para el caso de esferas y cilindros (figura 2.7a), pero expresadas más explícitamente en función de la conductividad y permeabilidad del material, con el objeto de analizar la evolución del factor de reducción frente al ratio espesor/diámetro de pantalla en función de σ y μ para materiales que presentan uno o los dos mecanismos de apantallado descritos anteriormente. De estos análisis se deduce que, en estos tipos de pantallas, la mitigación mejora al disminuir el ratio espesor/diámetro de la pantalla en materiales conductores, mientras que en ferromagnéticos los resultados mejoran al aumentar dicho ratio.

A resultados similares llega Y. Du en [16] para el caso de pantallas cilíndricas (figura 2.7a). Para ello obtiene expresiones aproximadas del factor de reducción en función de dos parámetros: $R_1=t/\delta$ y $R_2=\mu_r\delta/r$, siendo t el espesor, δ la profundidad de efecto pelicular y r el radio de pantalla. R_1 representa el efecto pelicular en pantallas conductoras y R_2 el carácter ferromagnético de la misma. Estos dos parámetros representan un nuevo espacio que puede dividirse en cuatro zonas, en cada una de las cuales intervienen los distintos mecanismos de reducción (reducción por corrientes inducidas lineales, por corrientes inducidas no lineales, por derivación de flujo o por ambos mecanismo). En cada una de ellas se llega a obtener una expresión sencilla de la eficiencia de la pantalla en función de las características del sistema. Mediante estas expresiones se analiza la influencia en la eficiencia de reducción de parámetros tales como la conductividad, permeabilidad, espesor y el radio de pantalla. Los resultados obtenidos son extrapolados por Y. Du en [17] al caso de pantallas cerradas cuadradas y rectangulares. Con la ayuda de simulaciones mediante BEM, se concluye que la expresión analítica de la eficiencia de una pantalla cilíndrica puede emplearse para estimar, de forma aceptablemente precisa, la eficiencia de una pantalla cuadrada tomando como radio equivalente $r = 2L/\pi$, siendo L la longitud de un lado de la pantalla cuadrada. Asimismo, se comprueba que la eficiencia de una pantalla rectangular es razonablemente equivalente a la de una pantalla cuadrada de longitud igual al ancho de la pantalla rectangular (figura 2.8). En esta última configuración se comprueba la dependencia de la efectividad de pantalla frente a la orientación de la fuente respecto a la pantalla, concluyendo que se obtiene mejores resultados con materiales conductores cuando el tendido es paralelo a la longitud mayor de la pantalla, mientras que en ferromagnéticos es mejor paralelo a la longitud menor.

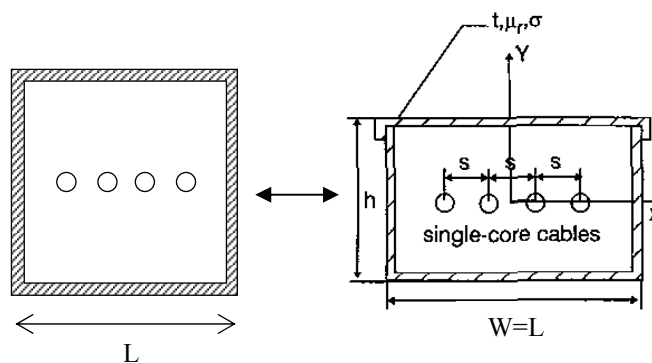


Figura 2.8. Pantallas cuadrada y rectangular.

Otras configuraciones son analizadas por Y. Du en [18], donde resuelve la ecuación de difusión del campo magnético generado por una serie de conductores paralelos, expresado en función del potencial magnético vector, mediante el método de separación de variables, aplicándolo a una pantalla infinita multicapa (figura 2.9). En concreto, analiza el caso de una pantalla de una sola capa y obtiene distintas expresiones aproximadas del factor de reducción en función de diversos parámetros que caracterizan el comportamiento conductor o ferromagnético del material de la pantalla. Para ello calcula analíticamente la penetración del campo por difusión a través de la pantalla obteniendo expresiones simplificadas basadas en las siguientes hipótesis: la pantalla es infinita y el campo es producido por una fuente cercana. La primera hipótesis permite despreciar el flujo de dispersión del campo alrededor de los extremos de la placa (efecto borde), mientras que la segunda permite emplear la impedancia de campo cercano en la expresión exacta. Además, al igual que en [16], el espacio generado por representación gráfica del espesor de la placa frente a la permeabilidad magnética puede partitionarse en distinta regiones en función de los parámetros R_1 y R_2 , regiones que se corresponden con los distintos mecanismos de apantallado que pueden presentarse dependiendo del material empleado. Asimismo se realiza un análisis de sensibilidad del factor de reducción frente a variaciones del espesor, permeabilidad y localización de la pantalla. Con este conjunto de parámetros se pretende proporcionar al ingeniero una herramienta sencilla de selección del material a emplear más adecuado en cada caso para el diseño de pantallas. La principal conclusión es la mejor eficiencia de pantallas planas realizadas con materiales conductores frente a los ferromagnéticos. La aproximación de estos resultados a una pantalla de anchura finita (L) situada a una distancia (h) de una fuente de campo formada por 2 o 3 conductores, solo puede realizarse para situaciones en las que $L/2h \gg 6$, es decir, cuando la fuente está muy próxima a una pantalla de cierta envergadura para poder despreciar el flujo alrededor de los extremos de la pantalla.

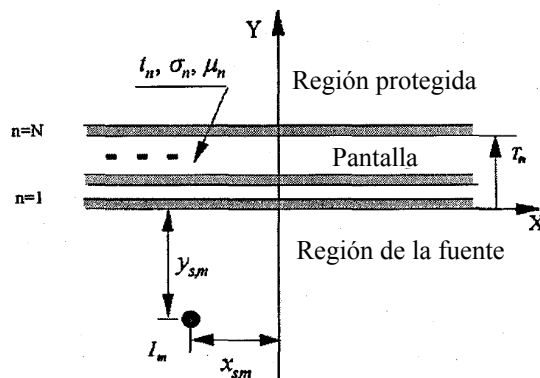


Figura 2.9. Sistema de pantalla infinita de múltiples capas.

Cuando la pantalla plana empleada es de dimensiones finitas, el campo producido al otro lado de la pantalla depende de la penetración del campo a través de la placa, así como del flujo de dispersión que se produce en los extremos de la pantalla, conocido como efecto borde, analizado por Olsen en [19]. En este caso se puede emplear otro método analítico denominado “*Método de transformación conforme*” (CTM), desarrollado por Moreno en [20] y que permite analizar pantallas planas finitas, pero que introduce hipótesis en el espesor (infinitesimal) y propiedades del material. De hecho este procedimiento impone una serie de restricciones que deben cumplirse en la interfaz del aire y el material. La primera condición está asociada a materiales de perfecta conducción eléctrica (PEC), es decir, de conductividad próxima a infinito. En este caso, en la superficie que separa el aire del material, la componente normal de la inducción magnética debe ser nula. De esta forma, el contorno simula una línea de flujo de manera que se representa perfectamente el mecanismo de cancelación por corrientes parásitas. Otra condición se da en el caso de materiales de perfecta conducción magnética (PMC), que disponen de una permeabilidad relativa muy elevada, mientras tienen conductividad eléctrica nula. En este caso, la componente tangencial de la inducción en el contorno debe ser nula. De esta forma el contorno simula una línea equipotencial, representándose así perfectamente el mecanismo de derivación de flujo.

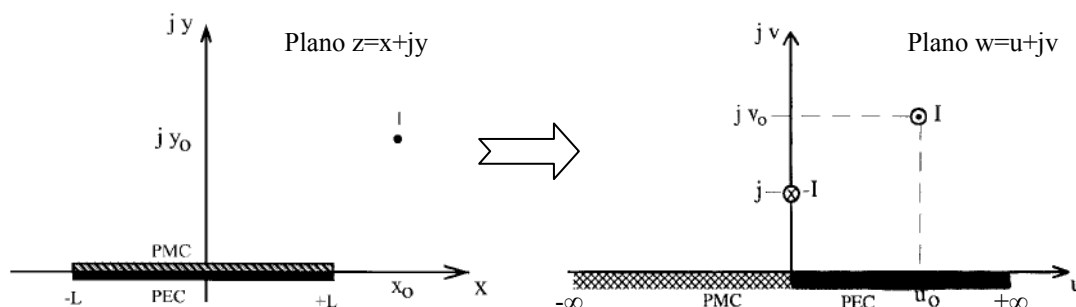


Figura 2.10. Ejemplo de transformación conforme en pantalla doble PEC/PMC.

La aplicación del CTM permite transformar la región exterior a un polígono (placa plana) en un semiplano infinito. De esta forma, un sistema formado por una línea situada sobre una placa finita se transforma en una línea sobre el semiplano infinito inferior idealizado como PEC y/o PMC (figura 2.10). En esta nueva configuración se aplica el conocido método de las imágenes para obtener expresiones más sencillas del campo magnético resultante en el sistema. La aplicación de esta metodología ha proporcionado resultados interesantes. En particular en la dependencia del efecto reductor con la orientación de la fuente respecto la pantalla. Es bien conocido que la eficiencia mitigadora de pantallas infinitas es independiente de la orientación de la fuente (tendido horizontal o vertical) [18]. Sin embargo, se ha demostrado que la efectividad de la pantalla depende fuertemente de la orientación de la fuente y del tipo de material cuando se emplean pantallas finitas planas [19] (pantallas conductoras dan mejores resultados con tendido paralelo a la misma, mientras las ferromagnéticas lo hacen con tendidos perpendiculares a la pantalla). Dado que en general es complicado identificar la configuración de una fuente de ELF, es razonable plantearse el tamaño mínimo y tipo de material a emplear para mitigar el campo de una fuente de orientación desconocida. A través de la aplicación del CTM se concluye que el uso de pantallas finitas de dos capas (PEC/PMC o PMC/PEC) reduce significativamente la dependencia de la eficiencia de la pantalla frente a la orientación de la fuente. Sin embargo esta

técnica tiene una serie de limitaciones. La aproximación de pantalla finita perfecta (PMC o PEC) sólo puede emplearse cuando el efecto de dispersión entorno a los bordes es significativamente mayor que la penetración alcanzada a través de la pantalla. Por ello, este método analítico no permite comparar las propiedades del material (efectos de la variación de σ y μ en el factor de reducción), porque considera materiales perfectos con efecto pelicular próximo a cero. Además, la asunción de material PEC hace que la profundidad de efecto pelicular sea invariable con la frecuencia. Asimismo, la aproximación PMC solo permite analizar el mecanismo de derivación de flujo. Del mismo modo, la aplicación de este método a materiales reales solo puede realizarse en determinadas condiciones. Por ello, inicialmente es necesario establecer qué valores críticos deben tener los parámetros del material y el sistema para poder aproximar la pantalla por PEC o PMC. La primera de ellas puede aplicarse a materiales como el cobre o el aluminio cuando la separación entre la línea y la placa no es excesivamente reducida. De hecho la aproximación mejora a mayores valores de separación. Todo lo contrario ocurre para la aproximación de PMC, que da mejores resultados con valores reducidos de separación para materiales de elevada permeabilidad magnética.

No obstante, existen algunos materiales que no pueden aproximarse por perfectos, con lo que es necesario encontrar el modo de tener en cuenta cualquier tipo de material. Esto únicamente puede plantearse en configuraciones de pantallas planas infinitas, de manera que se tenga la certeza que el campo en la zona a mitigar es el que atraviesa el material, despreciando el efecto borde. Algunas soluciones que emplean integrales infinitas se han usado [18], pero son complicadas de manejar y no proporcionan información interna acerca del mecanismo de reducción. Por ello, Olsen busca en [21] expresiones aproximadas precisas del factor de reducción para pantallas simples y dobles empleando dos métodos: el método de la impedancia de campo cercano y el método de fuente compleja. Con ellos y diversas simplificaciones derivadas de interpretaciones físicas obtiene expresiones con distinto nivel de aproximación que son luego verificadas mediante la solución exacta, determinando que algunas de dichas aproximaciones son más precisas que otras dependiendo del material empleado en la pantalla. Las principales simplificaciones se basan en: 1) el problema es cuasiestático y 2) la mayoría de los materiales son razonablemente conductores.

Sin embargo, no siempre se da la circunstancia que el sistema a analizar pueda aproximarse por una pantalla de dimensiones infinitas. Lo más habitual es que tenga un tamaño razonable, pero que no pueda despreciarse el flujo del campo en torno a los bordes de la pantalla. Por ello, Istenic modela en [22] pantallas finitas de cualquier material basándose en la solución a dos problemas ya analizados anteriormente: reducción por reflexión y absorción del campo mediante pantallas planas infinitas de cualquier material [21], y reducción mediante el uso de pantallas finitas de materiales perfectos (PEC o PMC) [20]. El primer método se encarga de modelar la penetración y reflexión del campo a través de la pantalla, mientras que el segundo lo hace del flujo que bordea los extremos de la pantalla, el cual es modificado por interpolación para poder considerar el efecto borde en pantallas delgadas de materiales no perfectamente conductores. Finalmente, se establece la solución final del campo resultante como un híbrido de ambos problemas añadidos en cuadratura. De esta manera se combinan los dos efectos de difusión del campo con el uso de cualquier tipo de material. La precisión del método es validada a través modelos desarrollados mediante elementos finitos. Destaca por su menor coste computacional, así como por su estructura que lo hace adecuado para plantear problemas de diseño y optimización.

Por otro lado, existen publicaciones en las que se analizan sistemas de mitigación mediante el uso de pantallas magnéticas constituidas por varias capas de material, con el objeto de obtener mejores resultados en el factor de reducción alcanzado. Es el caso de Hoburg en [23], donde se analizan diversas configuraciones de pantallas planas, cilíndricas y esféricas compuestas por varias capas de materiales conductores, ferromagnéticos o de ambos tipos (figura 2.11). Cada caso es analizado para campos magnéticos exteriores o interiores a la pantalla, obteniéndose expresiones analíticas del factor de reducción. Para ello se basa en las relaciones de transferencia existentes entre las distintas capas de la pantalla, del mismo modo en el que unen las impedancias de distintos tramos de líneas de transmisión, para lo que se define un término de impedancia magnética. Mediante este modelo se analiza la variación de la eficiencia de la pantalla en función del número de capas, la composición del material y la existencia de huecos entre las mismas. Como resultados se pone de manifiesto el mejor comportamiento de pantallas formadas por varias capas de materiales conductores y ferromagnéticos alternados frente a las de un único material, para un espesor de pantalla determinado. Asimismo se comprueba la escasa influencia que tiene la existencia de pequeños huecos entre las capas. Por el contrario, este modelo es de difícil aplicación en configuraciones más complejas. Además, los resultados obtenidos se basan en despreciar el efecto de las corrientes parásitas en materiales ferromagnéticos y en despreciar la permeabilidad en los conductores, considerados de menor espesor que la profundidad de penetración del efecto pelicular. En [24], Hoburg comenta los resultados obtenidos de diversas experiencias de laboratorio realizadas para el caso de pantalla cilíndrica expuesta a distintas configuraciones de fuentes de campo externas e internas, con el fin de validar el modelo propuesto de pantalla multicapa, comparando las medidas obtenidas con los resultados proporcionados por el modelo, constatando una precisión suficiente del mismo para simular este tipo de configuraciones.

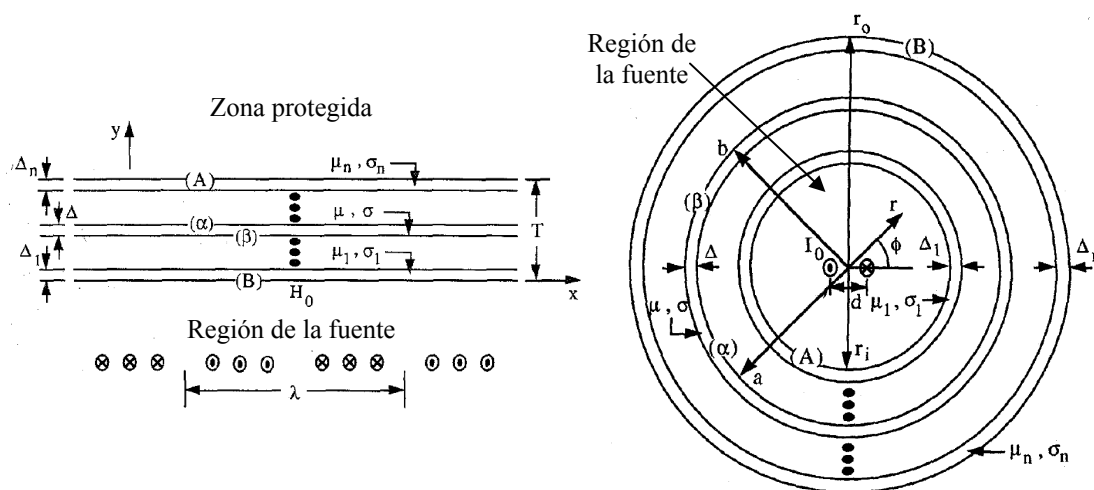


Figura 2.11. Pantalla cilíndrica y plana de varias capas.

Resultados parecidos obtiene Y. Du en [25] para el caso de pantalla cilíndrica de dos capas (figura 2.12). A través de la obtención de una expresión analítica para la eficiencia de pantalla, basada en funciones de Kelvin de primer orden aproximadas por su expansión asintótica, se llega a la conclusión de que se obtiene mejor rendimiento empleando materiales diferentes en cada capa, y obteniendo el espesor óptimo para la

capa conductora para valores próximos a la profundidad de efecto pelicular de la capa ferromagnética. Asimismo, mediante simulación con software basado en el método de elementos de contorno (BEM), comprueba que pantallas cuadradas de dos capas se comportan de manera prácticamente idéntica al caso del cilindro.

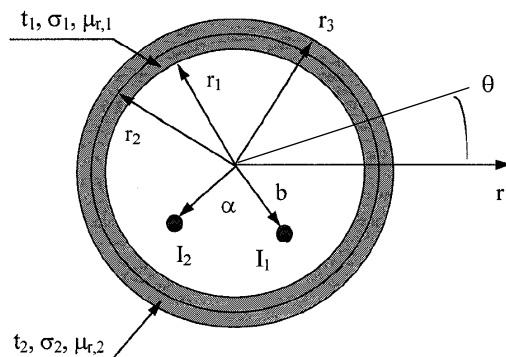


Figura 2.12. Pantalla cilíndrica de dos capas.

Finalmente, Sandrolini propone en [26] una nueva vía para el análisis de pantalla planas multicapa infinitas, basándose en la técnica desarrollada por Hoburg en [23]. Para ello plantea relaciones de transferencia entre las distintas capas, cada una de las cuales se representa por medio de una matriz de transmisión, cuyos elementos dependen de parámetros físicos y geométricos únicamente. A diferencia de [23], las relaciones de transferencia expresan las relaciones entre la transformada espacial de Fourier de la componente tangencial de la intensidad de campo magnético y la componente normal del flujo magnético en las superficies de cada capa. Para realizar la transformada inversa de Fourier de las variables del campo, se proponen dos métodos: aproximar linealmente a trozos la función integrando o mediante la evaluación numérica de la transformada inversa. El primero es más rápido en computación, mientras el segundo muestra resultados más exactos. La precisión de esta técnica ha sido validada por comparación con simulaciones generadas por el método de los elementos finitos (FEM). La principal ventaja de esta técnica es que permite tratar de forma sencilla pantallas multicapa a través del producto de las matrices de transmisión de cada una de ellas (figura 2.13), reduciendo los costes de computación en el cálculo de la eficiencia de reducción en un determinado punto respecto a la simulación en FEM. Asimismo, añadir o eliminar capas equivale a añadir o eliminar una matriz de transmisión. Sin embargo, hasta el momento no es aplicable a configuraciones complejas de pantalla, y requiere grandes esfuerzos de computación cuando desea calcularse el campo en amplias zonas más allá de la pantalla.

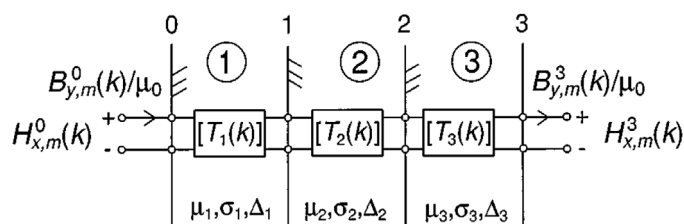


Figura 2.13. Representación de pantalla de tres capas mediante matrices de transmisión en cascada.

La siguiente tabla describe, a modo de resumen, los métodos analíticos desarrollados anteriormente, indicando los casos estudiados en cada caso, así como algunas observaciones de interés.

Tabla 2.1. Tabla resumen de métodos analíticos

| | Método | Autor | Casos analizados | Observaciones |
|-----------------|--|--|---|--|
| Pantalla simple | Analítico | L. Hasselgren J. F. Hoburg Y. Du | Cilindro, esfera, placa infinita Cilindro, esfera Cilindro, pantalla cuadrada | Expresiones aproximadas de casos ideales |
| | VSM | Y. Du | Pantalla plana infinita | Buenos resultados lejos de los extremos |
| | CTM ⁽¹⁾ | P. Moreno | Pantalla plana finita perfecta | Buenos resultados cerca de los extremos |
| | Impedancia de campo cercano y fuente compleja ⁽²⁾ | R. G. Olsen | Pantalla plana infinita de material no perfecto | Expresiones aproximadas en materiales conductores |
| | Híbrido ⁽¹⁺²⁾ | M. Istenic | Pantalla plana finita de material no perfecto | Aplicable a problemas de optimización |
| Multicapa | Matriz transferencia | J. F. Hoburg L. Sandrolini | Cilindro, esfera, placa infinita Placa infinita | Coste computacional No aplicable a sistemas complejos |
| | Funciones Kelvin | Y. Du | Cilindro de 2 capas | Aproximación de pantalla cuadrada por cilindro |

2.4.2. Método semi-analítico

El análisis en 2D de pantallas no ferromagnéticas puede realizarse mediante un método alternativo basado en la asunción de que las corrientes parásitas fluyen a través de la pantalla como si ésta estuviese constituida por un sistema de conductores dispuestos en paralelo. Este modelo de multiconductores desarrollada por Frix en [27], puede emplearse a pantallas de cualquier perfil, no solamente pantallas planas. De acuerdo a este método, la pantalla se divide en un conjunto de conductores elementales en paralelo de igual longitud y conductividad de la pantalla (figura 2.13a); la sección de estos conductores elementales depende del grado de subdivisión deseado.

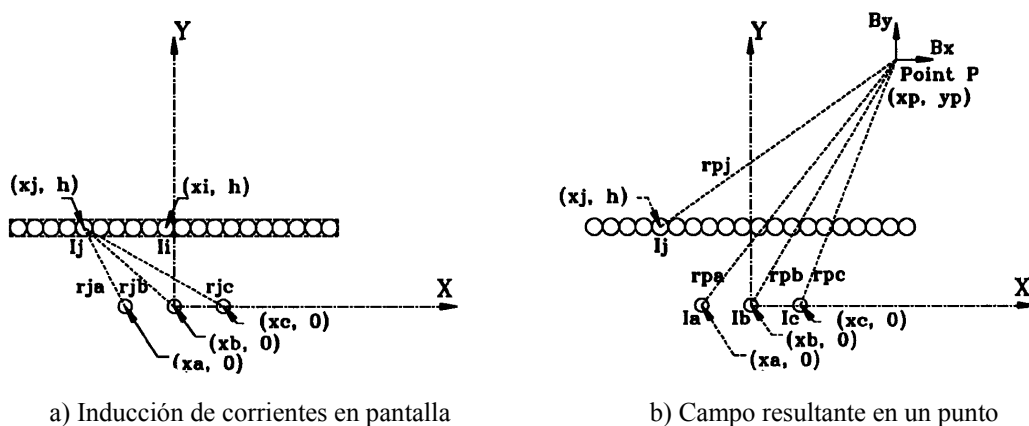


Figura 2.13. Metodología empleada para el análisis de pantallas conductoras.

Cada uno de estos conductores se caracteriza por su resistencia, inductancia y un conjunto de inductancias mutuas frente al resto de conductores. La ventaja de esta técnica es que los conductores que forman la fuente de campo pueden incluirse en el

sistema de ecuaciones. El cálculo de las inductancias propias y mutuas se realiza mediante las fórmulas clásicas [28]. De esta forma se modela la pantalla conductora mediante un circuito equivalente de parámetros distribuidos (figura 2.14) para obtener la corriente que circula por cada uno de los conductores elementales que conforman la pantalla.

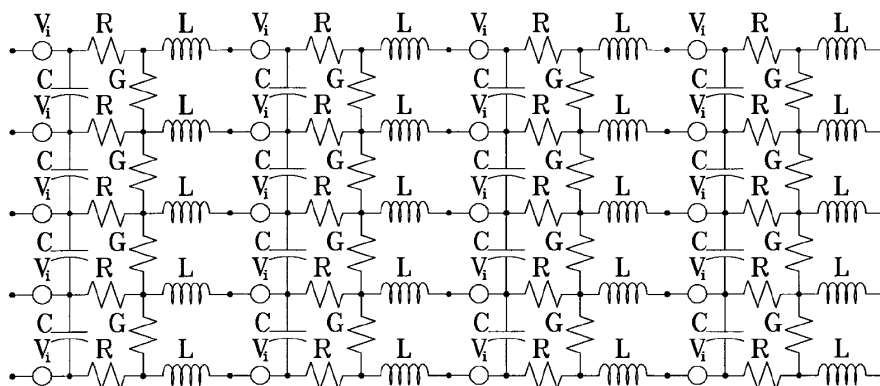


Figura 2.14. Modelo de parámetros distribuidos de una pantalla conductora.

Por tanto, el campo resultante en cualquier punto localizado a una determinada distancia de la pantalla puede ser calculado mediante la aplicación directa de la ley de Biot-Savart, utilizada como superposición del campo generado por los cables de la fuente y cada uno de los conductores elementales que forman la pantalla conductora (figura 2.13b).

Por todo esto, se puede considerar esta técnica como semi-analítica, al evaluar las inductancias y el campo mediante expresiones analíticas mientras introduce una subdivisión del dominio en conductores elementales. Además, esta metodología puede aplicarse para evaluar la influencia de las dimensiones de la pantalla en la eficiencia mitigadora. Asimismo, permite aplicarse en el análisis de pantallas conductoras con perfiles más complejos, como U invertida. Sin embargo, la efectividad de esta técnica depende del grado de subdivisión adoptado, ya que la presencia del efecto pelicular influye en los valores de las resistencias efectivas de cada conductor elemental. Además, un grado de subdivisión reducido provoca la aparición de huecos entre los conductores elementales, de manera que hay parte del material sin modelar. Esto puede corregirse empleando conductores elementales rectangulares (figura 2.15), como propone Canova en [29]. De esta forma se facilita la elección del ancho de cada subdivisión dependiendo del espesor de la placa, el número de capas y la profundidad de efecto pelicular. Finalmente, como se viene indicando, este método sólo es aplicable a pantallas de materiales conductores con permeabilidad magnética reducida.

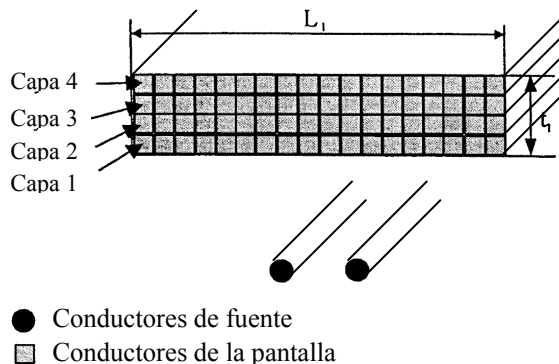


Figura 2.15. Esquema multiconductor para aproximar pantalla conductora.

Algunos autores han comparado las principales técnicas analíticas y semi-analíticas comentadas anteriormente, especialmente las denominadas VSM, CTM y el modelo de multiconductores. En concreto Canova en [30] concluye que el VSM proporciona resultados satisfactorios en áreas alejadas de los extremos de la pantalla. Asimismo, permite incluir tanto propiedades conductoras y magnéticas como configuraciones de múltiples capas. Por otro lado, el CTM mediante pantallas PMC o PEC resulta ser muy preciso a la hora de representar el fenómeno de dispersión del flujo magnético alrededor de los bordes de la pantalla, pero deja de ser tan preciso en las zonas cercanas al eje de la pantalla. Finalmente, el modelo multi-conductor llega a ser el más eficiente en el caso de pantallas en las que se puede despreciar el carácter magnético del material.

Destacar, por otro lado, que la validación de los resultados obtenidos con las expresiones aproximadas obtenidas en muchas de las técnicas analizadas ha sido realizada mediante simulaciones basadas en elementos finitos, BEM e incluso FEM-BEM, así como a través de algunas experiencias en laboratorio.

2.4.3. Métodos numéricos

El campo resultante en la zona a proteger por una pantalla de dimensiones finitas viene determinado por el grado de difusión o penetración del campo a través de la pantalla y del grado de dispersión del campo alrededor de los extremos de la misma. Ambos efectos pueden calcularse de forma analítica en un dominio 2-D bajo hipótesis que son muy restrictivas para muchas configuraciones de pantallas. De hecho, la penetración del campo por difusión puede ser estudiado analíticamente sólo en el caso de pantallas planas infinitas [18], mientras que la dispersión del campo alrededor de los extremos sólo puede obtenerse analíticamente en pantallas finitas compuestas de materiales perfectos (PEC o PMC) [20]. Por el contrario, los métodos numéricos son capaces de calcular de forma precisa el campo teniendo en cuenta ambos mecanismos sin necesidad de dichas simplificaciones acerca de las dimensiones o características del material. Además, proporcionan una herramienta poderosa para el análisis de configuraciones geométricas mucho más complejas.

- Método de los elementos finitos (FEM)

Una de las técnicas numéricas más extendidas para al análisis de sistemas de apantallado es la basada en el método de los elementos finitos o FEM, en la que el problema complejo se resuelve discretizando todo el dominio en pequeños elementos, en cada uno de los cuales se resuelven las ecuaciones por aproximación. Generalmente, el algoritmo se encuentra ya implementado en aplicaciones informáticas de uso comercial, aunque existen otras en las que puede programarse y modificarse el algoritmo según las necesidades del usuario.

Una aplicación de FEM lo presenta Hasselgren en [14], donde se analiza el factor de reducción obtenido mediante pantallas en forma de U invertida (figura 2.16). Asimismo, se analiza la influencia de parámetros como la longitud de pantalla, conductividad, permeabilidad y distancia de la fuente en la reducción alcanzada. Destaca la conclusión que indica la mejora de la reducción con la longitud en pantallas conductoras, mientras ocurre lo contrario en las ferromagnéticas. Por otro lado, destaca la mejora de la

reducción en pantallas ferromagnéticas en forma de U frente a las planas, dado que en las primeras los tramos laterales reducen la distancia entre los extremos de la pantalla, presentando un camino de menor reluctancia por el que cerrarse las líneas de campo comparado con el caso plano.

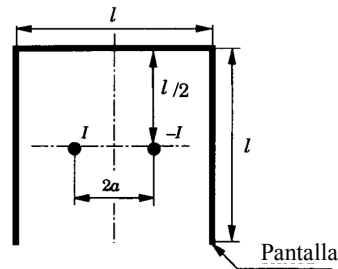


Figura 2.16. Pantalla en forma de U.

Por tanto las pantallas ferromagnéticas mejoran considerablemente a medida que se aproximan a configuraciones más cerradas, mientras que en pantallas conductoras la mejora es reducida. Aún así, las pantallas conductoras abiertas presentan mejor comportamiento que las ferromagnéticas. La eficiencia del modelo propuesto es verificado a través de un montaje en el laboratorio donde se evalúan tres configuraciones de pantalla: plana, U y cerrada rectangular.

Por otro lado, en [32] se compara mediante simulaciones en FEM el funcionamiento de pantallas de materiales conductores y ferromagnéticos en pantallas planas y cilíndricas, considerando también en el primer caso la influencia en la reducción de la orientación de la fuente respecto a la pantalla. Del estudio se concluye que pantallas planas conductoras presentan mejor comportamiento frente a fuentes orientadas paralelamente a la misma, mientras que para fuentes perpendicularmente dispuestas respecto a la pantalla son mitigadas más eficientemente por materiales ferromagnéticos. Asimismo, se comprueba el mejor comportamiento de los ferromagnéticos frente a los conductores en pantallas cerradas cilíndricas.

Otro ejemplo de aplicación a un sistema más complejo lo presenta Hasselgren en [33], donde se analiza la efectividad en la reducción del campo magnético generado por un centro de transformación de 10/0.4 kV. Para ello se realiza un modelo con el que analizar la influencia de la extensión de las pantallas, situadas en techo y paredes, con el fin de obtener la distribución de corrientes parásitas en las mismas, información que sirve de guía para, por ejemplo, decidir el mejor emplazamiento para la colocación de la puerta de entrada al recinto sin interferir demasiado en la eficiencia de las pantallas.

- Ampliación de FEM con condiciones de contorno en red de impedancias (INBC)

Uno de los principales problemas que tiene el uso de FEM es que el tamaño de los elementos que forman la malla de la pantalla debe ser menor que la profundidad de penetración del efecto pelicular (δ) para poder obtener resultados correctos. Teniendo en cuenta que las dimensiones del sistemas son del orden de metros y δ del orden de milímetros, suele ser necesario un mallado de gran número de elementos, con lo que la computación puede alargarse en el tiempo. Por ello se han propuesto distintas variantes que permitan superar estas dificultades, entre las que cabe destacar la desarrollada por Feliziani en [34], que consiste en eliminar la región de la pantalla del dominio computacional de FEM, sustituyéndola por las condiciones de contorno que deben

cumplir las componentes tangenciales del campo eléctrico y magnético en la superficie de la pantalla. Esta nueva condición, denominada condición de contorno en red de impedancias o INBC (Impedance Network Boundary Conditions), establece una relación entre las componentes tangenciales del campo magnético y eléctrico mediante una matriz de admitancias, como si de una red bi-puerta se tratase. El fundamento de esta técnica se basa en modelar la penetración que tienen las componentes tangenciales del campo eléctrico y magnético en la pantalla como un plano de onda propagándose en dirección normal a la misma. Para esta configuración existe solución analítica considerando la pantalla a modo de circuito equivalente de una línea de transmisión. De esta manera, se acoplan las componentes tangenciales a ambos lados de cada superficie por medio de una red bi-puerta que modela la propagación del campo en la pantalla como una línea de transmisión. Con ello se elimina la pantalla del dominio evaluado mediante FEM, eliminando el problema de generar una malla muy pesada (figura 2.17).

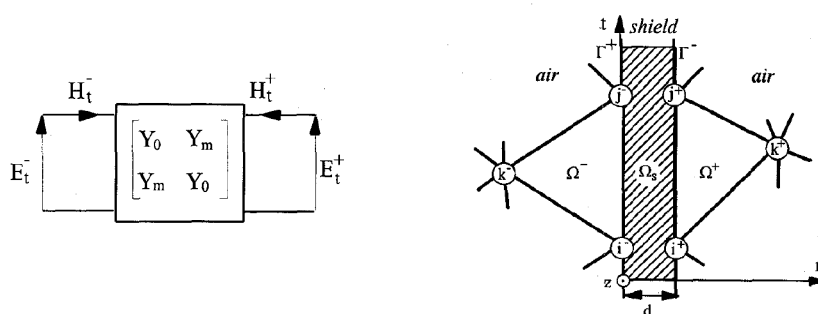


Figura 2.17. Pantalla modelada mediante matriz de transferencia.

En [34], se desarrollan las ecuaciones INBC en función del potencial magnético vector A para su implementación en FEM. Se comprueba su efectividad por comparación con soluciones analíticas conocidas (pantalla plana conductora infinita) y medidas realizadas en laboratorio, y se verifica que reduce drásticamente el coste computacional. Como comprobación de los buenos resultados que proporciona esta nueva aproximación, Caruso muestra en [35] los valores obtenidos mediante FEM y FEM+INBC de un caso particular de pantalla plana sometida al campo generado por un dipolo. Se demuestra que existen diferencias mínimas entre ambos resultados, causadas posiblemente por la diferencia de mallado empleada.

- Método de los elementos de contorno (BEM)

En el análisis de dominios infinitos mediante FEM existe otro problema añadido: dónde y cómo truncar el dominio infinito para poder discretizarlo. Dependiendo de la distancia a la que se realice y la condición de contorno impuesta, influye notablemente en el resultado obtenido del análisis numérico del problema. Una alternativa es utilizar BEM, que supera este problema al considerar únicamente las zonas activas del problema y no el ambiente que las rodea. Por ello, es una de las técnicas numéricas comúnmente empleadas en el análisis de pantallas de configuración más complejas. Un ejemplo de esto lo desarrolla Y. Du en [25], donde analiza los principios de funcionamiento de una pantalla cuadrada de dos capas, comprobando que tiene las mismas prestaciones y comportamiento que una cilíndrica de dos capas. Asimismo, analiza la dependencia de la efectividad de la pantalla en función del espesor y permeabilidad del material. Sin embargo, destaca que la similitud con el caso del cilindro de dos capas se da únicamente

en zonas alejadas de la pantalla, ya que el caso de pantalla cuadrada es una distorsión respecto al cilindro, lo que influye en el campo creado en las cercanías de la pantalla.

De igual forma, Y. Du analiza en [17] la similitud que presentan pantallas cuadradas y rectangulares de una capa respecto al caso del cilindro. Mediante simulaciones basadas en BEM deduce las dimensiones y proporciones que deben tener estos casos para poder emplear las expresiones analíticas de la eficiencia de pantalla obtenidas para el cilindro. Para su validación recurre a experiencias de laboratorio, con cuyas medidas compara los resultados analíticos y de simulación con BEM.

Configuraciones más complejas analiza Farag en [36] mediante simulaciones en BEM, donde muestra distintos mapas de contorno y reducción que ponen de manifiesto el funcionamiento de los distintos mecanismos de mitigación. En concreto analiza pantallas planas de 2 o 3 capas de distintos materiales (figura 2.18) sometidas a dos fuentes de campo magnético, así como pantallas en forma de U invertida.

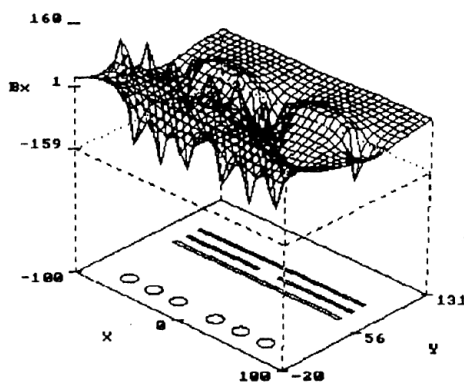


Figura 2.18. Configuración multicapa analizada con BEM.

Sin embargo, este método se hace menos conveniente cuando el dominio de análisis es demasiado delgado o complicado, ya que no proporciona buenos resultados, por lo que suele emplearse con ciertas modificaciones.

- Ampliación de BEM con condiciones de contorno en red de impedancias (INBC)

Al igual que le ocurre a FEM, cuando se trata de modelar dominios con un espesor demasiado reducido los resultados obtenidos mediante BEM no suelen ser muy precisos. Por ello, Igarashi propone en [37] una extensión de BEM mediante la introducción de condiciones de contorno en impedancias (IBC) para el potencial magnético vector A en cada superficie de la pantalla, de manera similar a como se analizó en [34] para emplear con FEM. De esta forma se evita evaluar numéricamente el campo en el interior de la pantalla, empleando BEM para determinar el campo en el exterior de la misma. Esta modificación no tiene limitaciones topológicas del sistema, lo que demuestra su aplicación para el caso de pantallas delgadas en 3D desarrollado en [37]. Tampoco tiene restricciones en cuanto a las características conductoras y magnéticas del material empleado. Sin embargo, esta aproximación presenta algunos errores en la determinación del campo en zonas próximas a los extremos de la pantalla. Asimismo, tampoco es válido en caso de materiales magnéticos no lineales.

- Combinación FEM-BEM

Dado que las técnicas basadas en FEM y BEM tienen ciertas limitaciones, existen autores que proponen métodos híbridos desarrollados para explotar las ventajas de cada uno de ellos. Es el caso de Bottauscio en [38], donde plantea dividir el dominio de estudio en dos: un primer dominio donde se encuentran las partes activas del problema (conductores y pantallas), en el que se aplica FEM, y un segundo dominio que contiene el resto del entorno, donde se aplica BEM (figura 2.19). De esta manera se evita el escollo que supone la aplicación de FEM a dominios infinitos, donde habitualmente se establecía un contorno cercano a la zona a analizar con condiciones adecuadas para simular el infinito, lo que proporcionaba errores que distanciaban el modelo de la realidad. Con la técnica propuesta, ahora es BEM quien determina dicha condición de contorno, ya que este método no requiere de dominios limitados para su aplicación. Como aplicación de la propuesta, en [38] se obtiene el campo magnético generado por un sistema de barras. La validación de esta nueva metodología se realiza en mediante comparación con valores experimentales.

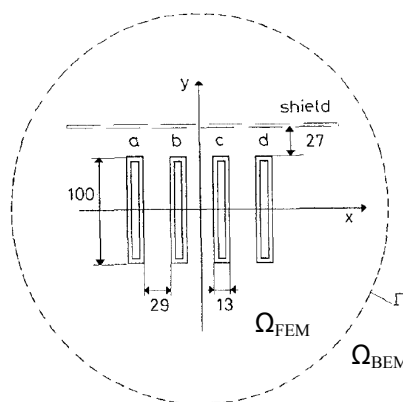


Figura 2.19. Sistema de embarrado analizado con FEM-BEM.

Otra aplicación directa de esta modificación la desarrolla Bottauscio en [39], en la que analiza la eficiencia de diferentes configuraciones de pantallas realizadas con diversos materiales magnéticos de bajo coste, con el objetivo de analizar el comportamiento y propiedades que presentan estos materiales como posibles soluciones competitivas a materiales de muy alta permeabilidad magnética, tales como el μ -metal y Permalloy. En concreto se analizan configuraciones planas de pantalla, en forma de U invertida y cuadrada, empleando en cada caso acero bajo en carbono, acero al silicio de grano orientado y no orientado. Mediante la técnica híbrida FEM-BEM obtiene la densidad de flujo magnético y la eficiencia de pantalla, cuyos resultados son comparados con experiencias llevadas a cabo en laboratorio. Se comprueba que hay una aceptable coincidencia entre ambas mediciones. Como conclusiones principales del estudio destacan la mayor eficiencia reductora del acero de grano orientado, que puede mejorarse añadiendo una placa de aluminio con el fin de proporcionar más reducción mediante corrientes parásitas. Asimismo, se verifica la negativa influencia que sobre la eficiencia de la pantalla tiene la presencia de huecos en las uniones que se producen en las esquinas de las configuraciones en U y cuadrada.

- Ampliación de FEM-BEM con INBC

Dado que el principal problema es habitualmente modelar una pantalla de espesor delgado, es razonable pensar en ampliar la técnica híbrida FEM-BEM mediante la aplicación de condiciones de contorno en red de impedancias para eliminar este escollo. Esto es lo que propone Bottauscio en [40] para el caso de pantallas de varias capas. Esta aproximación se basa esencialmente en la introducción de condiciones de contorno en las superficies más externas de la pantalla, permitiendo reemplazar una estructura en 3D por otra en 2D, lo que permite discretizar la pantalla mediante elementos de superficie y no de volúmenes. De esta forma, se obtienen expresiones que relacionan las distintas magnitudes magnéticas entre las superficies externas del material, las cuales sustituyen a la pantalla en la aplicación de FEM, para lo que la nueva superficie 2D que modela el comportamiento de la pantalla debe ser mallada mediante elementos triangulares. El problema se completa con la aplicación de BEM en la región de aire exterior en el que se sitúan las fuentes. Mediante este nuevo modelo se analiza el comportamiento de pantallas planas y en forma de U sometidas al campo generado por un dipolo, determinando tanto la densidad de flujo magnético como el factor de reducción obtenido. La validez del modelo se realiza mediante la solución exacta del caso de pantalla cilíndrica multicapa, obteniendo una gran precisión. Como principal conclusión establece que el número óptimo de capas suele ser de dos, alternando materiales conductores y ferromagnéticos. Asimismo, destaca que las mayores reducciones se producen situando la capa de material ferromagnético como la más cercana a la fuente. Añadir una capa más no suele mejorar los resultados, salvo en casos en los que la capa próxima a la fuente es conductora.

Otro claro ejemplo de aplicación de esta metodología lo desarrolla Bottauscio en [41], en el que se detalla el estudio de diversas configuraciones de pantallas para la reducción del campo generado por un centro de transformación (figura 2.20). En él, dado el reducido espesor de la pantalla frente a las dimensiones de la instalación, se aplica el método FEM-BEM basado en la formulación de INBC, lo que modela cada pantalla por una superficie plana. De este modo permite trabajar con geometrías complejas en dominios tridimensionales. Los resultados numéricos obtenidos son comprobados con medidas experimentales que dan validez a los resultados.

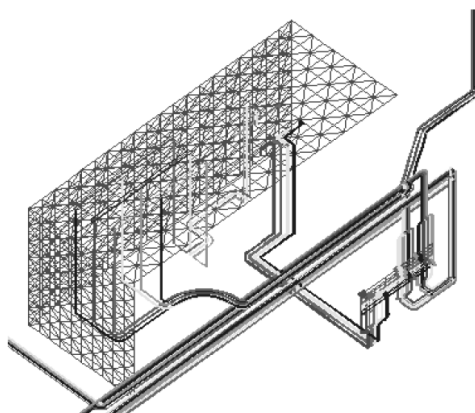


Figura 2.20. Modelado de pantallas en centro de transformación.

- Formulación finita de los campos electromagnéticos (FFEF)

Otra propuesta para modelar pantallas no ferromagnéticas y las corrientes que en ella se inducen la hace Canova en [29], que puede considerarse como un método numérico integral. Está basada conceptualmente en la formulación finita de campos electromagnéticos formulada por Tonti en [42] y especialmente adaptada para el caso de pantallas delgadas. Esta formulación propone expresiones directas de las leyes de Maxwell en términos de variables globales y explotando la dualidad presente en estas ecuaciones. La principal hipótesis de partida de esta propuesta es considerar la densidad de corrientes inducidas uniforme en el espesor de la pantalla, es decir, profundidad de penetración mayor que el espesor. Asimismo, el método es implementado a través de un procedimiento tridimensional basado en Hoburg [43], lo que lo hace adecuado para el análisis y diseño de pantallas muy particulares, como pantallas discontinuas, así como tener en cuenta la longitud de la misma, un parámetro de los más importantes en el caso de sistemas reducidos de apantallado. Para su aplicación divide el dominio de estudio en tres regiones:

- región de conductores generadores del campo, donde se impone la densidad de corriente por un circuito externo;
- región de corrientes inducidas, constituida por un conjunto de laminas conductoras bajo la hipótesis de densidad de corriente uniformemente distribuida en su espesor;
- aire alrededor de las dos zonas anteriores.

La región de conductores es discretizada mediante volúmenes hexaédricos, atravesados cada uno de ellos por una corriente impuesta. Su contribución al campo es calculada por medio de la ley de Biot-Savart. La zona de corrientes inducidas es discretizada superficialmente mediante redes ortogonales duales de cuadriláteros (figura 2.21), despreciando su espesor que es tenido en cuenta en la formulación.

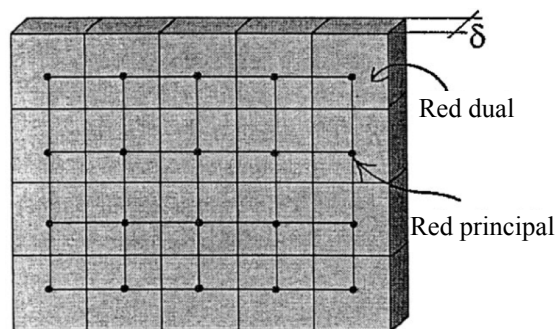


Figura 2.21. Discretización de la pantalla.

Las corrientes inducidas en la placa son determinadas en base a la dualidad existente entre ambas redes, imponiendo como restricciones que las corrientes que circulan en superficies cerradas deben ser nulas, así como el cumplimiento de la ley de Faraday en lazos cerrados. La contribución de estas corrientes junto a la de los conductores principales dan lugar al campo resultante, cuya precisión es verificada por comparación con simulaciones en FEM.

Como comentario final respecto a los métodos enunciados, aclarar que existen en la bibliografía multitud de libros (p.e. [44] y [45]) en los que se detalla en profundidad cada uno de los métodos analíticos y numéricos aquí comentados, así como otros adicionales. Algunos de ellos son de mejor aplicación que otros para el problema del apantallado magnético, por ello en este capítulo se han enumerado los que aparecen habitualmente en las publicaciones especializadas como los más eficaces para este tipo de sistemas, omitiendo otros que no han probado ser aplicables a estos problemas o cuyos resultados no terminan de ser del todo aceptables.

2.4.4. Aplicaciones prácticas

Existen publicaciones, especialmente en congresos, en las que se comentan algunas aplicaciones prácticas de apantallado en instalaciones reales, detallando los resultados obtenidos y los principales inconvenientes encontrados en su implementación. Es el caso de Cipollone en [46], donde, además de comentar la legislación existente en Italia, analiza tres configuraciones de apantallado de líneas subterráneas: tendido horizontal y en configuración triangular con placa plana de cobre y tendido en configuración triangular en el interior de una pantalla tubular de acero. Para comprobar su eficiencia antes de su implementación, se desarrollan modelos en FEM a fin de obtener el factor de reducción en cada caso. Finalmente se comparan los valores numéricos con los obtenidos en la instalación final, concluyendo que son una buena aproximación. A su vez destaca la mayor reducción que se produce cuando el tendido se realiza en configuración triangular con los cables muy próximos, más aún cuando se emplea una pantalla tubular de acero que en el caso de pantalla plana de cobre, aunque esta configuración reduce la capacidad de carga en la línea. Esta configuración es la adoptada para su implementación en las zonas más críticas, empleado el tendido plano en el resto de la instalación. Por otro lado, menciona la necesidad de una correcta unión entre las distintas placas planas para un funcionamiento óptimo de la pantalla. Asimismo, destaca la dificultad que conlleva la colocación de tramos de tubería cilíndrica cuando el trazado de la línea es complicado. Otra desventaja es la complicación extra que aparece a la hora de realizar las zanjas, y la dificultad que conllevaría realizar reparaciones en un punto de la instalación una vez terminada, al tener que remover la pantalla para poder acceder a los cables. También es necesario considerar las pérdidas que se producen en la línea, mayores cuando se utilizan materiales conductores, por lo que este autor recomienda la pantalla tubular de acero como principal opción (figura 2.22).



Figura 2.22. Pantalla tubular.

Muchos de los informes que analizan la aplicación práctica de apantallados la realizan organización como EPRI o CIGRÉ. En esta última existe un grupo específico de trabajo que analiza las posibles formas de reducir el campo generado por líneas de transmisión aéreas y subterráneas, dando lugar a documentos como [47], donde se analizan otras experiencias en la implementación de diversos tipos de pantallas en tendidos subterráneos de alta tensión, analizando las principales dificultades que se presentan tanto en líneas de nueva construcción como en líneas ya existentes, aspecto que, según la experiencia de los autores, es el principal factor que determina la elección de la mejor estrategia de reducción. Esto se debe a que en el caso de líneas ya existentes es necesario evitar que los trabajos de excavación dañen los cables, por lo que suele ser recomendable limitar el volumen de las operaciones, así como el impacto que las mismas pueden provocar en la vida normal de los ciudadanos. En el caso de líneas de nueva construcción, la solución a adoptar debe ser seleccionada en base a un análisis cuidadoso de costes y beneficios, a fin de equilibrar el nivel de reducción deseado con el coste y viabilidad de las tecnologías disponibles. Por todo esto, los autores consideran las pantallas planas de materiales de alta conductividad como la mejor opción en el apantallado de instalaciones ya construidas. Por el contrario, para nuevas líneas consideran que realizar el tendido en configuración en forma de Trébol es suficiente para la mayoría de situaciones, en lugar de emplear el tradicional tendido horizontal. Sin embargo, en casos en los que sea necesario obtener mayores valores de reducción la mejor solución parece ser empleando pantallas cerradas de materiales ferromagnéticos. En este sentido, analizan el funcionamiento de pantallas cilíndricas y rectangulares (figura 2.23) realizadas con materiales de alta permeabilidad magnética, así como pantallas planas y en forma de U realizadas con materiales de alta conductividad eléctrica.



Figura 2.23. Pantalla rectangular.

Finalmente, comentar que existen otro tipo de publicaciones enfocadas al análisis de herramientas de trabajo con las que diseñar apantallados de instalaciones más complejas, como en [48], donde se analiza la viabilidad del uso de simulaciones generadas mediante FEM para el análisis y diseño de apantallados de transformadores.

2.4.5. Optimización

Para finalizar con la descripción de los trabajos desarrollados hasta el momento en cuestión de apantallado magnéticos, comentar una de las líneas de investigación que actualmente está emergiendo con cierta importancia: la optimización de la pantalla. En este sentido existen dos vías de trabajo principalmente. Una de ellas la propone

Massarini en [49], en la que establece un algoritmo de optimización de la pantalla en cuanto a volumen de material se refiere para alcanzar un determinado valor de reducción. En este caso la aplicación la realiza para el caso de pantallas planas de varias capas construidas mediante dos tipos de materiales (uno de alta conductividad eléctrica y otro de alta permeabilidad magnética). Para realizar esta tarea opta por desarrollar el problema como uno de programación no lineal. Como conclusión destacable, establece que el número óptimo de número de capas suele ser fundamentalmente par, ya que proporcionan mayor reducción que en el caso de números impares de capas.

Otros trabajos relacionados con la optimización de la pantalla se encuentran en [50] y [51], cuyo objetivo consiste en optimizar la forma de la pantalla. Esta tarea la realizan los autores mediante técnicas de optimización basadas en gradiente continuo, obteniendo la forma del perfil que proporciona los mejores resultados de mitigación para una fuente determinada.

2.5. Metodología aplicada al análisis paramétrico

Después de analizar las ventajas e inconvenientes de los métodos comentados en el apartado anterior, se decidió la utilización de programas basados en el método de los elementos finitos (FEM) como herramienta para los estudios que planeaban realizarse. La elección se fundamenta, principalmente, en la posibilidad de analizar sistemas complejos sin necesidad de realizar algún tipo de simplificación en cuanto a dimensiones o material de la pantalla, pudiendo así analizar sistemas con más similitud a situaciones reales. Además, algunos de los programas comerciales y gratuitos que emplean FEM permiten acoplar distintos mecanismos físicos en el mismo modelo, como por ejemplo acoplar un problema electromagnético con un problema térmico, de gran ayuda para evaluar las pérdidas que se producen en sistemas de apantallado y su influencia en la capacidad de transmisión de la línea. Asimismo, dada la potencia de computación de los ordenadores actuales, se considera que los problemas relatados en algunas publicaciones están solventados en gran medida. Por otro lado, estos programas han evolucionado de forma que es relativamente sencillo variar cualquier parámetro del sistema para recalculer su efecto sobre la mitigación, con lo que son una herramienta muy adecuada para al análisis de sensibilidad paramétrica que se pretende.

Por tanto, en el próximo capítulo se procederá al análisis de diversas configuraciones geométricas de pantallas empleadas para reducir el campo de una línea eléctrica, estudiando la influencia de las características del material y de los parámetros geométricos de la pantalla y la línea que afectan al nivel de mitigación alcanzado. Algunas de las configuraciones analizadas se corresponden con las ya descritas en las publicaciones, y los resultados ya conocidos serán comprobados y completados con otros más exhaustivos. Otras configuraciones analizadas no aparecen en la bibliografía mencionada, ya que parten de ideas obtenidas de experiencias realizadas en la instalación de pantallas en instalaciones reales, fundamentalmente para mitigar líneas subterráneas. Dada la geometría de estos problemas, se modelará el sistema en 2 dimensiones. Aún así, con todo esto, los resultados obtenidos son extrapolables a la mitigación del campo generado por cualquier tipo de instalación formada por conductores dispuestos en paralelo, ya que de esta manera se pueden simular distintas fuentes generadoras de campo.

Capítulo 3.

Análisis paramétrico de pantallas abiertas.

3.1. Sistema bajo estudio

Dado que una de las principales aplicaciones de mitigación de campos magnéticos es el apantallado de líneas subterráneas, se ha optado por emplear, para realizar el análisis de estas y otras configuraciones de pantalla, una fuente de campo magnético constituida por 3 conductores enterrados y alimentados por un sistema trifásico equilibrado de corrientes (figura 3.1). La línea se compone de 3 cables de aluminio de 20 mm de radio, separados 25 cm y enterrados a 70 cm de profundidad.

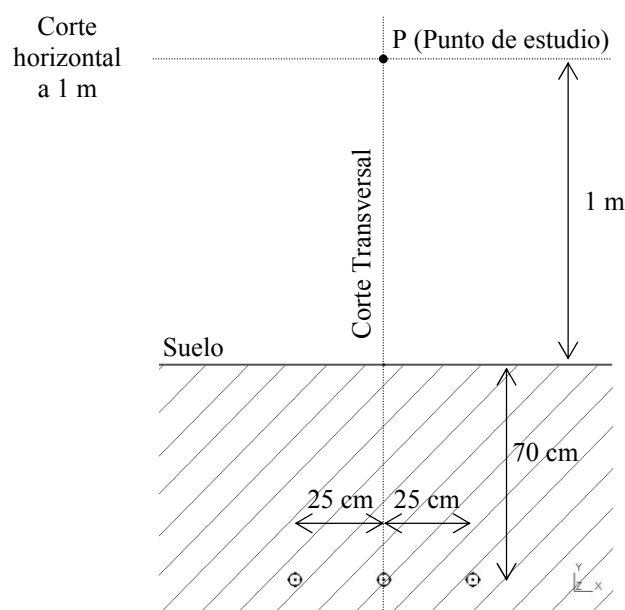


Figura 3.1. Sistema de línea enterrada.

El nivel de intensidad que circula por la línea influye directamente en la magnitud del campo generado, pero dado que en estos capítulos se va a analizar la influencia de ciertos parámetros sobre el factor de reducción, los resultados no se ven afectados por su magnitud, por lo que se ha tomado como valor de intensidad en los conductores un valor de referencia de 100 A. Para este valor de intensidad se tiene que el valor del campo en el punto P de estudio situado a 1m del suelo sobre el eje de simetría de la línea (figura 3.2) es de 3.38 μT . De este modo, todos los valores de campo obtenidos en este punto junto con este valor se emplearán para obtener el factor de reducción, definido como:

$$RF(P) = \frac{B_0(P)}{B_s(P)}$$

De ahí la independencia del valor de intensidad empleado. Esta misma definición se aplicará a los valores de campo obtenidos en los cortes horizontales y transversales mostrados en la figura 3.1 para analizar la evolución del campo y el factor de reducción frente a las distancias horizontal y vertical.

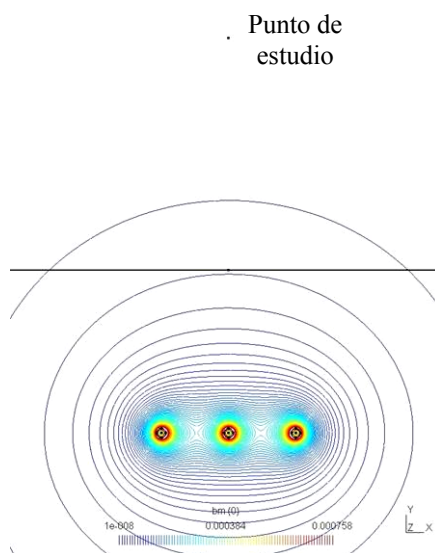


Figura 3.2. Líneas de campo constante B producido por el tendido.

Destacar que, aunque la mayoría de los análisis se han realizado sobre esta configuración (figura 3.1), en algunas ocasiones se comentarán los resultados obtenidos cuando el tendido de la línea se realiza de forma vertical o triangular, así como con otras fuentes constituidas por más de un sistema trifásico de conductores. De esta manera, aunque los estudios se realizan sobre un sistema basado en una línea subterránea, los resultados obtenidos son aplicables a otras situaciones en las que el origen del campo sean varios conductores que discurren de forma paralela, como sistemas de embarrado o cableados de centros de transformación.

A lo largo de este capítulo se analizará el comportamiento de diversas configuraciones de pantallas abiertas aplicadas a este sistema, estudiando la influencia de parámetros geométricos y del material en la eficiencia reductora de la misma.

3.2. Apantallado mediante placa plana

Una de las soluciones de apantallado más sencillas es la utilización de placas planas metálicas en las proximidades de la fuente a mitigar. Esta solución suele ser la más atractiva desde el punto de vista práctico a la hora de reducir el campo generado por un tendido subterráneo ya existente, ya que facilita y simplifica los trabajos de excavación [47]. Asimismo, también es de fácil aplicación cuando se trata de mitigar el campo generado por centros de transformación, ya que pueden colocarse de forma sencilla sobre paredes y techos del recinto [41]. Para analizar su funcionamiento se empleará un sistema de partida constituido por una plancha situada a 10cm sobre la línea, de 1m de anchura y 3mm de espesor (figura 3.3).

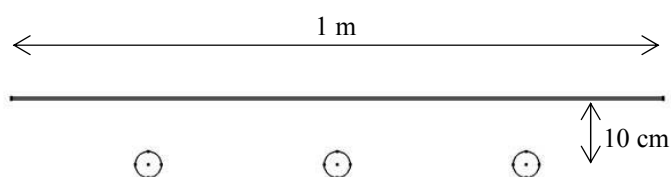


Figura 3.3. Pantalla plana sobre la línea.

La eficiencia de mitigación de este tipo de pantallas dependerá fundamentalmente del material empleado en la misma, así como de los parámetros geométricos de la instalación, como son la distancia de la placa a la línea, espesor y ancho de la misma. A continuación se analizará la influencia de cada uno de dichos parámetros.

3.2.1. Pantalla de materiales conductores

La importancia del material empleado para construir la pantalla proviene del mecanismo por el que cada tipo de material realiza la reducción del campo, como se comentó en el capítulo anterior. En el caso de materiales de alta conductividad eléctrica el mecanismo de reducción se debía al campo generado por las corrientes inducidas en la pantalla, el cual contrarrestaba el campo original. Este mecanismo producía que las líneas de flujo magnético penetrasen en la pantalla de forma tangencial, comprimiéndose bajo la placa como si fuesen repelidas por el campo inducido en la misma (figura 3.4a), impidiendo que pasen a la zona protegida.

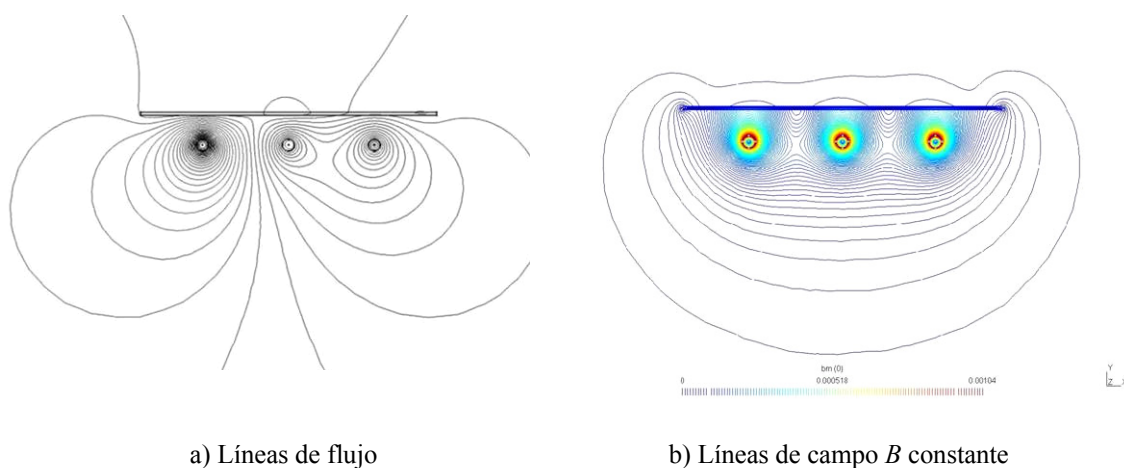


Figura 3.4. Representación del campo en presencia de pantalla plana conductora.

Esto provoca la deformación del campo magnético, dando lugar a unas nuevas líneas de campo constante que aparecen acumuladas bajo el “peso” de la pantalla (figura 3.4b). Por tanto, en este mecanismo de reducción tienen una gran importancia las corrientes inducidas en la pantalla. La magnitud de estas corrientes viene determinada por varios factores:

- Magnitud del campo que las induce.
- Orientación de la fuente respecto a la pantalla.
- Profundidad de penetración δ en el material por efecto pelicular.

La magnitud del campo es un parámetro que puede no tenerse en cuenta, dado que no influye en el factor de reducción. Sin embargo, la orientación de la fuente respecto a la pantalla sí es de gran importancia, ya que la magnitud y orientación de las corrientes inducidas dependen notablemente de la forma en que las líneas de campo la atraviesan [19]. Por ejemplo, las corrientes inducidas en el caso de la figura 3.5a son mucho mayores que las producidas en el caso de la figura 3.5b, dado el modo y cantidad en el que atraviesan la pantalla las líneas de flujo del campo generado por el tendido.

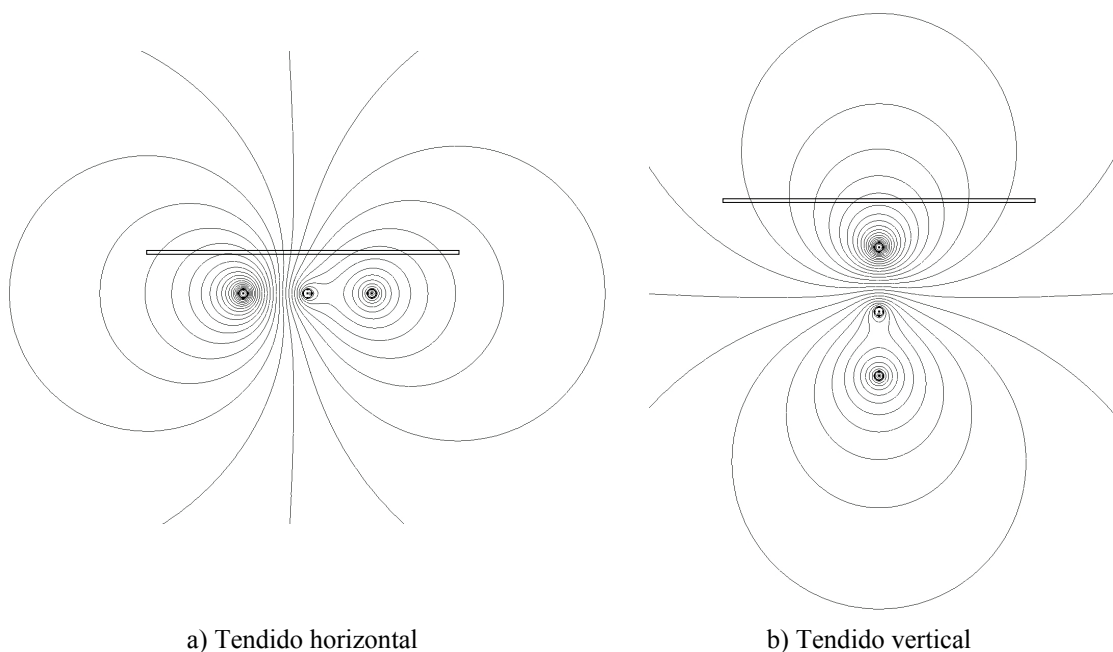


Figura 3.5. Flujo inductor de corrientes en pantalla plana en función de la orientación del tendido.

En el primer caso existe un cierto número de líneas que atraviesan casi perpendicularmente la pantalla, induciendo corrientes que circulan en el plano de la misma generando un campo opuesto que cancela parcialmente el originado por el tendido. Sin embargo, en el segundo caso las líneas de flujo atraviesan de forma entrante y saliente la pantalla, por lo que existen fenómenos de cancelación entre las corrientes inducidas, dando lugar a una densidad de corriente menor que en el caso anterior.

Por otro lado, la magnitud de las corrientes que circulan en el interior de la pantalla depende de la sección que atraviesa esa densidad de corriente inducida. Esta sección

depende en gran medida de la profundidad δ que alcancen las corrientes inducidas por efecto pelicular, definida en el capítulo anterior como:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}}$$

Para el caso de materiales perfectamente conductores, en los que la permeabilidad magnética es reducida ($\mu_r \approx 1$) y en sistemas a frecuencia industrial (50Hz), esta profundidad depende exclusivamente de la conductividad eléctrica del material empleado. En el caso de que el espesor de la pantalla sea menor que la profundidad δ , las corrientes inducidas circulan a lo largo de todo el espesor (figura 3.6). En caso contrario, dichas corrientes quedan concentradas en un espesor igual a δ en la superficie de la pantalla más cercana a la línea, quedando parte del material sin utilizar.

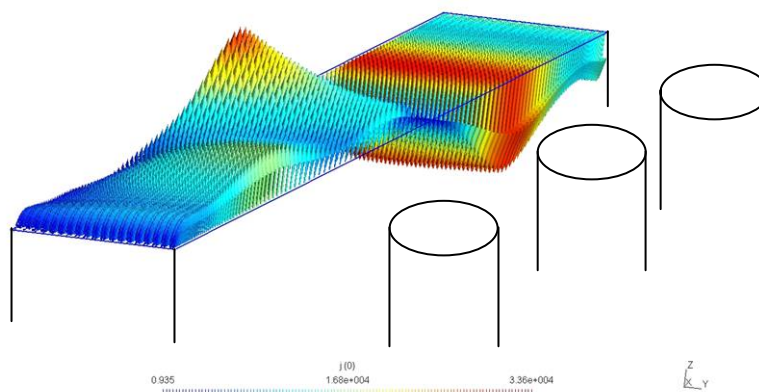


Figura 3.6. Componente real de la densidad de corriente inducida en pantalla plana conductora.

Por tanto, el valor de la conductividad eléctrica del material es uno de los principales parámetros que determina el nivel de reducción alcanzado por la pantalla. La figura 3.7 muestra la evolución del factor de reducción alcanzado en el punto de estudio situado a 1 m del suelo para distintas situaciones.

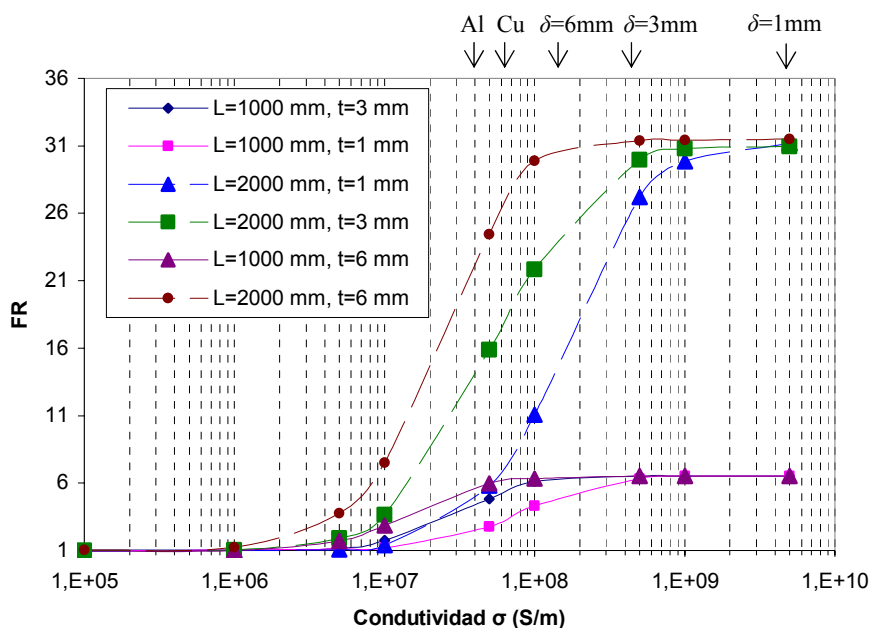


Figura 3.7. Influencia de la conductividad eléctrica en el factor de reducción de pantallas de distinta anchura (L) y espesor (t).

En esta figura se representa la evolución de la reducción alcanzada para dos anchos de pantalla distintos: 1 m y 2 m. En cada caso se analiza la reducción para distintos espesores: 1 mm, 3 mm y 6 mm. De ella se observan tres conclusiones principalmente:

- A mayor conductividad, mayor reducción consigue la pantalla.
- En todos los casos existe un máximo de reducción posible al presentarse un codo de saturación. Tanto para la pantalla de 1m como para la de 2m, el codo se produce en torno a valores de conductividad σ que producen una profundidad de penetración δ del orden del espesor considerado (figura 3.7). Asimismo, el valor de saturación alcanzado parece determinado por el ancho de pantalla empleado.
- Tanto el espesor como el ancho de la pantalla van a ser unos de los principales parámetros geométricos a analizar dada su notable influencia en la reducción alcanzada.

De la observación de la figura 3.7 queda claro que un rango aceptable de conductividad sería entre $5 \cdot 10^{+06}$ y $5 \cdot 10^{+09}$ S/m, ya que mayores valores dan lugar a profundidades de penetración menores de 1mm, por lo que deberían emplearse espesores de material poco prácticos o emplear mayores espesores desaprovechando parte del material. Estos resultados complementan a los obtenidos por Y. Du en [18].

3.2.2. Pantalla de materiales ferromagnéticos

En el caso de que el material empleado tenga elevada permeabilidad magnética y conductividad eléctrica despreciable ($\sigma \approx 0$), la reducción se produce por el mecanismo de atracción o derivación del flujo a través del material de la pantalla. De esta manera, el material ferromagnético deforma el campo generado por la fuente desviando las líneas de flujo hacia su interior (figura 3.8a), penetrando de forma casi perpendicular a la superficie de la pantalla, alejándolas así de la zona a proteger.

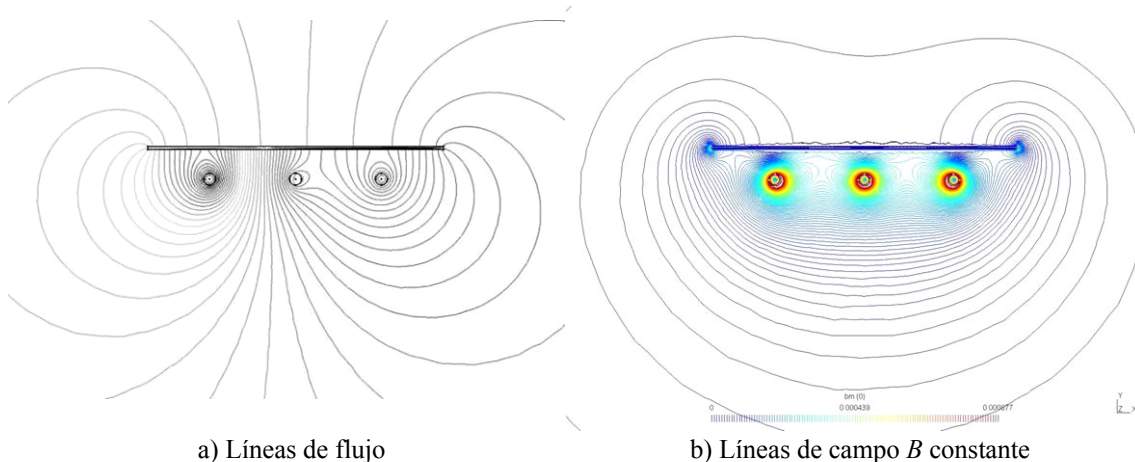


Figura 3.8. Representación del campo en presencia de pantalla plana ferromagnética.

Esta atracción del flujo al interior de la pantalla produce a su vez la distorsión del campo generado por el tendido, de forma que las líneas de campo magnético constante (figura 3.8b) son igualmente atraídas por el material, alejándolas de la zona protegida y produciendo la reducción deseada. En esta situación, dada la conductividad despreciable del material, no se producen efectos de reducción por corrientes parásitas, ya que estas

no llegan a producirse. Por tanto, la capacidad de “atraer” líneas de flujo del material empleado es un parámetro de enorme importancia. Esta capacidad viene determinada por la permeabilidad magnética μ_r . La evolución de la reducción alcanzada en función de la permeabilidad se muestra en la figura 3.8.

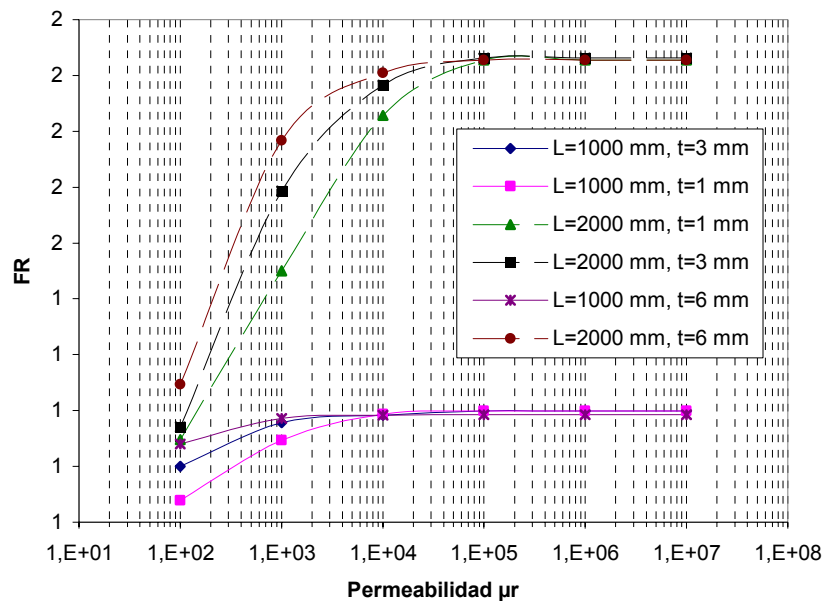


Figura 3.8. Influencia de la permeabilidad magnética en el factor de reducción de pantallas planas de distinta anchura (L) y espesor (t).

En ella, se analizan dos pantallas de 1 m y 2 m con distintos espesores (1 mm, 3 mm y 6 mm). Las principales conclusiones que pueden destacarse son:

- A mayor permeabilidad magnética, mayor reducción alcanzada.
- Para un ancho determinado de pantalla existe un valor máximo de reducción, establecido por el valor de dicho ancho.
- El ancho de pantalla influye significativamente en la reducción, mientras que el espesor apenas produce variaciones en ella.

La razón por la que existe un codo de saturación en la reducción para un determinado ancho de pantalla, podría explicarse por el efecto limitado del mecanismo de derivación de flujo. Es decir, a partir de un cierto valor permeabilidad y para un ancho concreto, la pantalla no es capaz de atraer más líneas de campo hacia su interior que se encuentren suficientemente alejadas. Esto se debe a que, en pantallas abiertas, las líneas de flujo deben cerrarse por el aire buscando caminos de baja reluctancia como la pantalla, pero a partir de cierta distancia la longitud a recorrer para llegar a ser de tal magnitud que presenta mayor reluctancia que cerrándose por el aire.

Como se puede apreciar, el nivel de reducción de pantallas con materiales puramente ferromagnéticos es bastante menor que el alcanzado mediante materiales puramente conductores [18], debido en gran parte a la necesidad del flujo magnético a tener que cerrarse por el aire, limitando la capacidad del mecanismo de reducción de estos materiales. Sin embargo, la utilización de pantallas cerradas mejorará notablemente su funcionamiento al eliminar esta limitación [14]. De todos modos, un valor aceptable de permeabilidad para pantallas abiertas sería de 10000 aproximadamente.

Por otro lado, al igual que en el caso de pantallas conductoras, la orientación de la fuente respecto a la pantalla es determinante en la efectividad reductora de la misma [19]. En este caso se debe a que la configuración de las líneas de flujo magnético las hace más propicias a ser atraídas por el material cuando la fuente se alinea de forma perpendicular a la pantalla. Para este tipo de sistemas se comprueba la mejor efectividad de pantallas ferromagnéticas (figura 3.9a) que conductoras (figura 3.9b), ya que las primeras hacen de barrera que impide el paso del campo a la zona protegida, mientras que las segundas apenas oponen resistencia debido al bajo nivel de corrientes inducidas que se producen con dicha orientación.

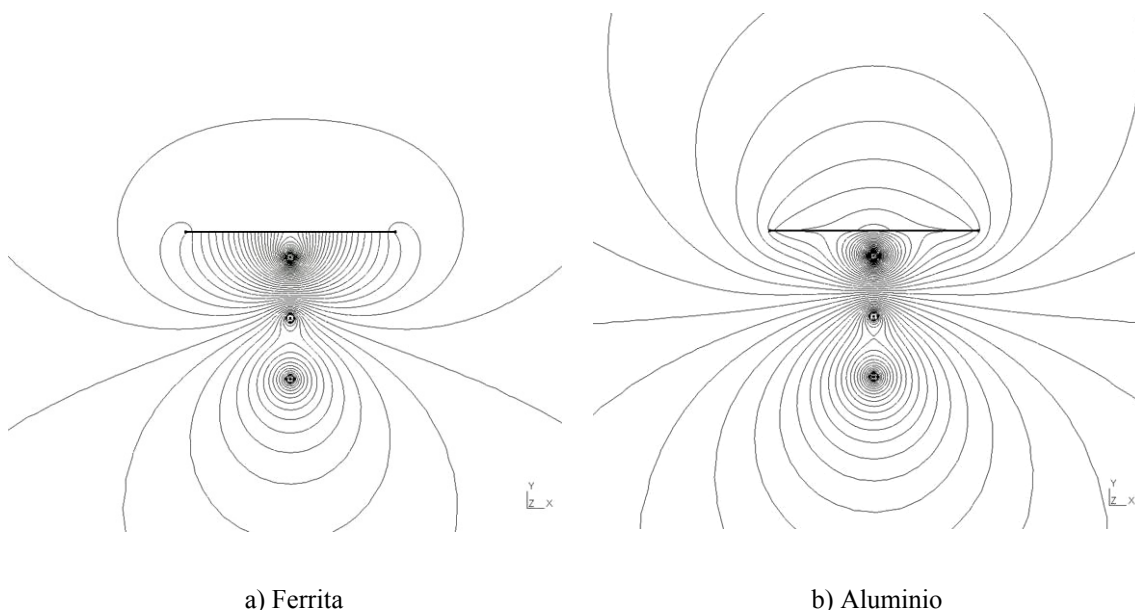


Figura 3.9. Líneas de flujo en presencia de placa ferromagnética y conductora en tendido vertical.

3.2.3. Pantalla de materiales mixtos

Los materiales que habitualmente se pueden encontrar a la hora de diseñar pantallas magnéticas no pertenecen a ninguno de los casos anteriormente desarrollados. En general los materiales presentan características de ambas categorías, ya que normalmente se caracterizan con valores de conductividad eléctrica y permeabilidad magnética no despreciables. Dado que presentan características de los dos casos ideales, es de suponer que tendrán mejores comportamientos que dichos casos, aunque como se verá a continuación, esto no tiene por qué cumplirse siempre. Por tanto, la utilización de estos materiales en pantallas magnéticas implica que la mitigación del campo magnético se dará por acción de los dos mecanismos de reducción analizados. Según la proporción que presenten la conductividad y la permeabilidad en el material, existirá un mecanismo de reducción que predomine sobre el otro. En el caso de que σ o μ_r sea muy superior al otro, entonces nos encontraremos ante materiales que pueden aproximarse por los casos ideales comentados anteriormente, con sus ventajas e inconvenientes.

En el caso de emplear pantallas abiertas planas, los análisis realizados en los apartados anteriores muestran el mejor comportamiento de las pantallas conductoras frente a las ferromagnéticas, siempre que la placa y la fuente estén situadas paralelamente (figura 3.8.). Para este tipo de sistemas las pantallas puramente conductoras parecen ser la

mejor opción. Por ello, es interesante comprobar la influencia del incremento de la permeabilidad sobre este tipo de pantallas, ya que la inclusión de permeabilidad provoca la aparición de un nuevo mecanismo de reducción, derivación de flujo, que junto al de corrientes parásitas hace suponer que la mitigación debe mejorar. En la figura 3.10 se muestra la influencia de la permeabilidad sobre el campo producido a 1m del suelo (figura 3.1) para varias pantallas de distinta conductividad eléctrica con un espesor de 2.5 mm.

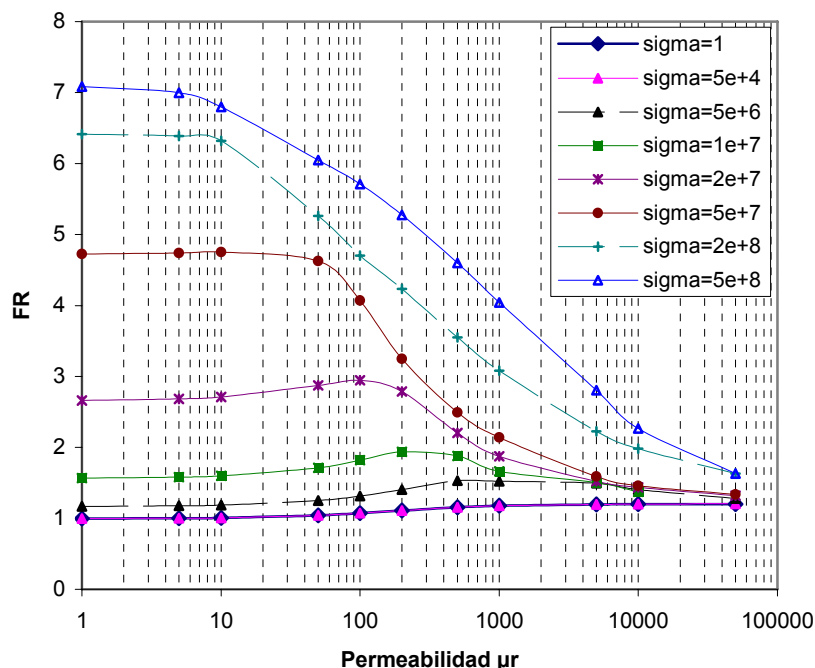


Figura 3.10. Influencia de la permeabilidad magnética en el factor de reducción de pantallas conductoras.

Como se puede comprobar, al contrario de lo que cabía pensar, el incremento de la permeabilidad en pantallas planas abiertas influye negativamente en la reducción alcanzada, salvo en un cierto rango de permeabilidad en el que se aprecia una leve mejora de la efectividad. Este leve incremento en la reducción se debe claramente a la aparición del segundo mecanismo de reducción, llegándose a un máximo cuando los valores de μ_r y σ dan lugar una profundidad de penetración δ del orden del espesor de la placa (2.5 mm). Es a partir de este punto, en el que δ es menor que el espesor, cuando la reducción se ve mermada, lo que podría explicarse por la aparición de dos fenómenos contrapuestos. Por una parte, una alta conductividad daría lugar a un valor elevado de densidad de corriente inducida que reduciría el campo. Sin embargo, el aumento de la permeabilidad reduce drásticamente la penetración de éstas en la placa, por lo que la sección que atraviesan es cada vez más reducida. Esto provoca que el valor total de intensidad de corriente que circula por la placa disminuya con la permeabilidad, quedando concentrada en una película muy fina en la superficie inferior de la pantalla. Por tanto, el incremento de μ_r reduce la efectividad del mecanismo de reducción por corrientes parásitas. Esto, junto a la capacidad limitada de mitigación del mecanismo de derivación de flujo magnético, da lugar a que el factor de reducción tienda a valores semejantes al caso de pantallas puramente ferromagnéticas a medida que se incrementa la permeabilidad, como se muestra en la figura 3.10.

Por tanto, a la hora de emplear materiales con características magnéticas y conductoras en pantallas planas sobre un tendido horizontal (figura 3.3), hay que destacar las siguientes conclusiones:

- Para obtener valores razonables de reducción, es importante que los valores de μ_r y σ provoquen que el espesor de la placa sea del orden de la profundidad de penetración de las corrientes inducidas. De esta manera, el material de la pantalla es aprovechado de forma efectiva por ambos mecanismos de reducción.
- Para el caso de pantallas abiertas planas, se consiguen los mejores resultados de mitigación cuando se emplean materiales de alta conductividad eléctrica y permeabilidad magnética muy reducida.
- Emplear materiales de elevada conductividad eléctrica y permeabilidad magnética produce niveles de mitigación equivalentes a materiales puramente ferromagnéticos, que para pantallas planas da lugar a reducciones pobres.

A fin de comparar los resultados que proporcionan distintos materiales con características conductoras y ferromagnéticas, se han seleccionado 4 materiales que presentan dichas particularidades. En concreto se han tomado 2 materiales que pueden considerarse como pertenecientes a los casos ideales comentados con anterioridad: Aluminio, que por su elevada conductividad y despreciable permeabilidad puede considerarse como puramente conductor, y Ferrita, que dada su baja conductividad y elevada permeabilidad se puede considerar puramente ferromagnético. Por otro lado, se han seleccionado otros 2 materiales (Acero y μ -metal) que pueden considerarse mixtos, al disponer de valores apreciables tanto de conductividad como permeabilidad. Las características de cada uno de ellos se muestran en la tabla 3.1.

Tabla 3.1.

| Material | σ (S/m) | μ_r | δ (mm) |
|-----------------|-------------------|---------|---------------|
| Aluminio | 35380696 | 1 | 12 |
| Acero | 10^7 | 500 | 1 |
| μ -metal | $1.64 \cdot 10^6$ | 15120 | 0.45 |
| Ferrita tipo 76 | 2 | 10000 | 500 |

Como se observa en dicha tabla, a cada material le corresponde una determinada profundidad de penetración de las corrientes que puedan inducirse sobre la placa. En algunos casos dichas corrientes se distribuirán uniformemente a lo largo del espesor de la pantalla (figura 3.6), mientras que en otros quedarán alojadas en una película situada en la superficie próxima a la fuente (figura 3.11).

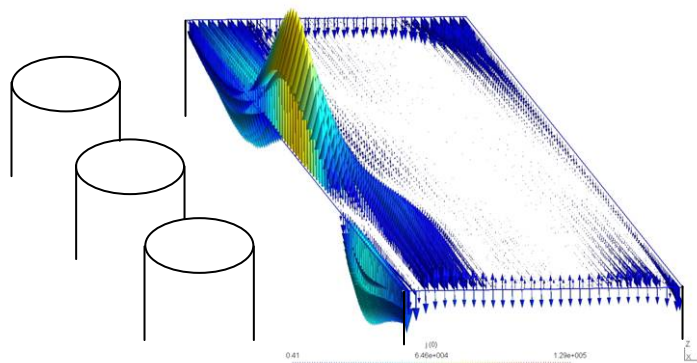


Figura 3.11. Componente real de la densidad de corriente inducida en pantalla plana mixta.

Para el sistema de la figura 3.1 (placa plana sobre tendido horizontal), el resultado de aplicar una pantalla para cada uno de los materiales que se muestran en la tabla 3.1 proporciona distintos perfiles de campo a 1 m sobre el suelo (figura 3.12a).

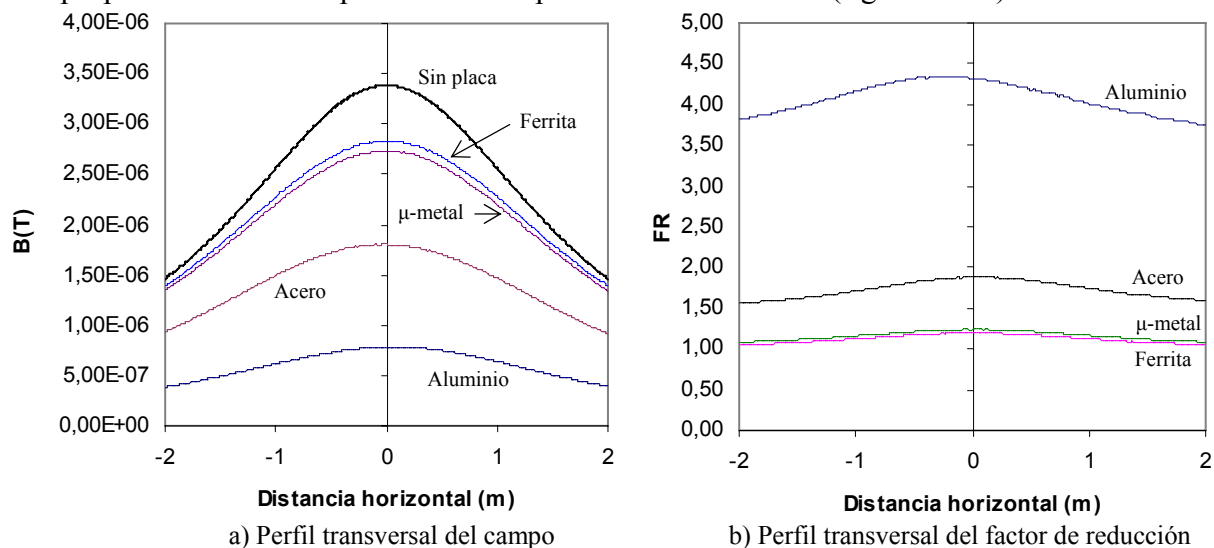


Figura 3.12. Campo resultante y reducción alcanzada a 1 m sobre el suelo mediante distintos materiales.

Como puede observarse de las curvas del factor de reducción (figura 3.12b), la mayor mitigación de campo se consigue con el aluminio, seguido del acero y los materiales ferromagnéticos. Esto corrobora lo mencionado previamente acerca de las mejores prestaciones de materiales conductores en este tipo de sistemas, quedando el acero en una zona intermedia al disponer características mixtas [32]. Dado que el μ -metal se comporta de forma prácticamente igual a la ferrita, en lo que sigue se omitirá su análisis salvo en los casos en los que sus prestaciones sean relevantes.

Por otro lado, es interesante analizar como se produce, de manera global, la reducción que cada material es capaz de realizar en el área próxima a la pantalla. En la figura 3.13

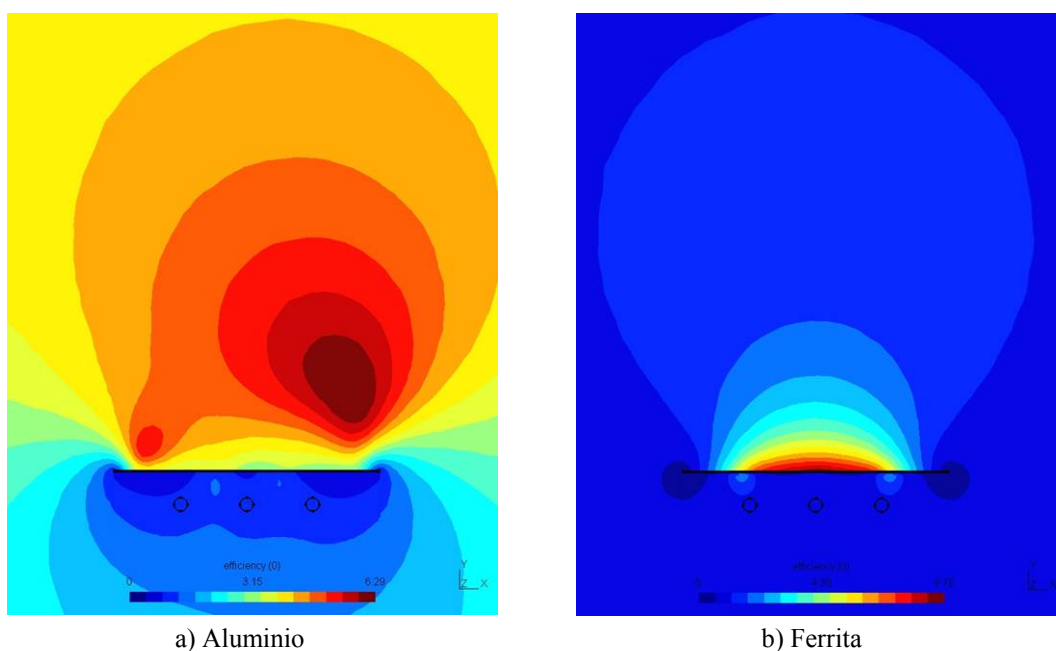


Figura 3.13. Mapas de factor de reducción en presencia de pantalla plana de aluminio y ferrita.

se muestran los mapas de reducción correspondientes al aluminio y la ferrita. Como se puede observar, el aluminio reduce el campo eficientemente en zonas alejadas de la pantalla (figura 3.13a). Sin embargo, los materiales ferromagnéticos alcanzan valores mucho mayores de reducción en zonas próximas a la pantalla (figura 3.13b), decayendo rápidamente la mitigación con la distancia. Esta conclusión es de gran importancia, ya que puede condicionar la elección del material en función de lo alejada que se encuentre la zona a proteger. Por otro lado, se observa la mayor uniformidad en la reducción producida por el aluminio en zonas alejadas de la fuente, lo que se comprueba fácilmente en la figura 3.14, que muestra los perfiles de reducción a lo largo de la línea de simetría vertical del sistema analizado. En ella se observa claramente como la curva de reducción del aluminio es prácticamente horizontal por encima de la pantalla, mientras las del acero y la ferrita decaen rápidamente [14], [18]. Esta figura también muestra el alto nivel de reducción que proporciona el acero en la zona cercana a la placa, mejor incluso que la ferrita.

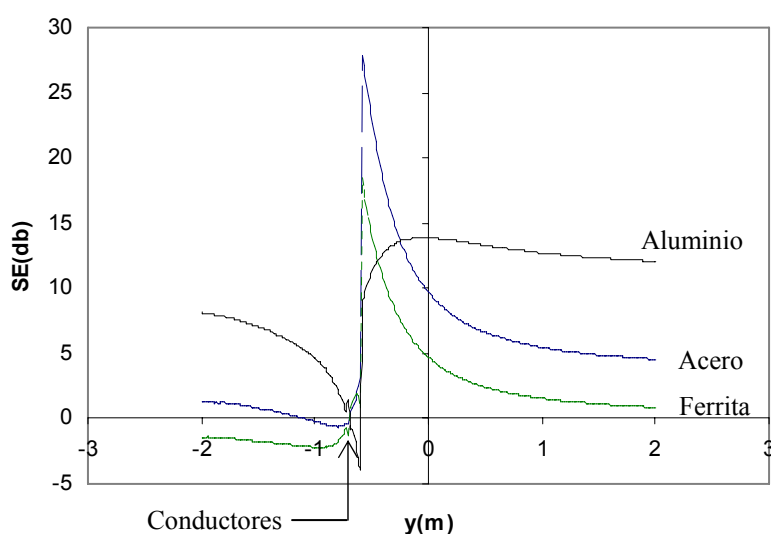


Figura 3.14. Evolución de la eficiencia de apantallado con la distancia a la fuente.

Destacar que en la figura 3.14 se he representado el factor de reducción en una escala de decibelios, a fin de mostrar más claramente las diferentes curvas. El valor en esta nueva escala se define mediante la expresión:

$$SE(P) = 20 \cdot \text{Log} \left(\frac{B_0(P)}{B_s(P)} \right)$$

Este nuevo factor se denomina “Eficiencia de apantallado” (Shielding Effectiveness o SE), y será empleado cuando los niveles del factor de reducción sean muy elevados o cuando sea necesario diferenciar varias curvas para su mejor comprensión.

3.2.4. Sensibilidad a parámetros geométricos

En los análisis realizados en los apartados anteriores se observó la importancia que presentaban algunos parámetros de la geometría de la placa en la reducción alcanzada. Por tanto, una vez determinada la influencia de las características del material en la reducción del campo, es lógico realizar un análisis sobre la influencia de los parámetros geométricos de la pantalla y el tendido sobre el factor de reducción. Para realizar esta

tarea se utilizarán pantallas de los materiales mencionados en el apartado anterior (excepto el μ -metal que se comporta como la ferrita) para un sistema como el de la figura 3.1.

Anteriormente, se observó la influencia del espesor y anchura de la pantalla en la reducción del campo. En la figura 3.15 se muestra la evolución del factor de reducción en función de estos parámetros.

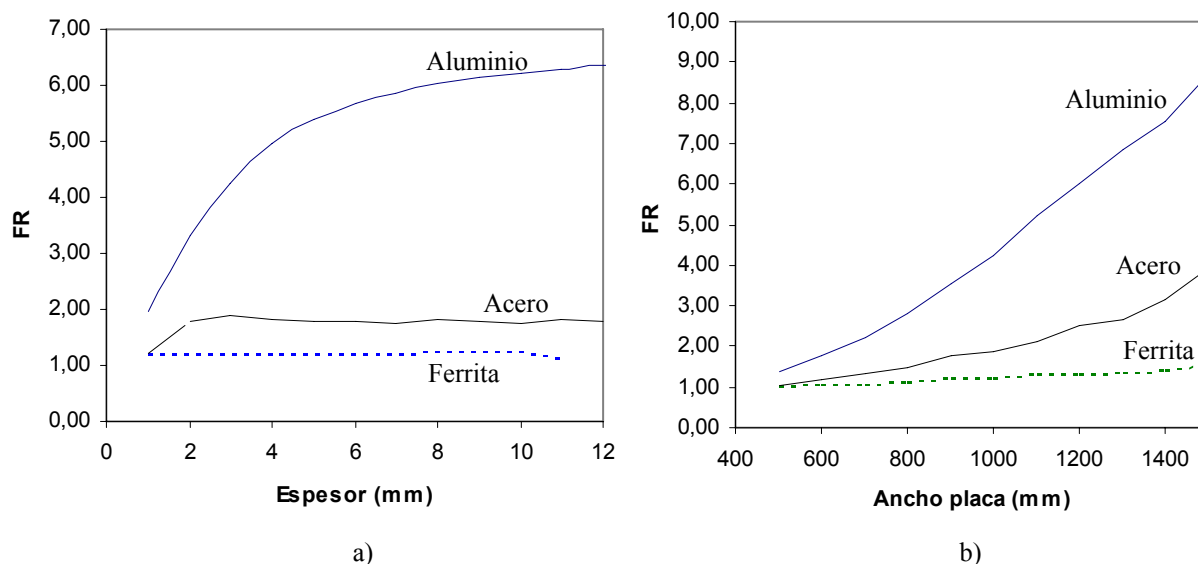


Figura 3.15. Influencia del espesor y el ancho de pantalla en el factor de reducción.

Como se puede apreciar, el incremento del espesor de la pantalla influye principalmente en materiales con cierta conductividad eléctrica, como en el aluminio y el acero [18]. En ambos casos, se observa una mejoría en el factor de reducción mientras el espesor empleado es menor que la profundidad de penetración δ de las corrientes inducidas. Cuando el espesor es del mismo orden de δ , la mejora tiende a estabilizarse en un valor constante. Esto se debe a que las corrientes inducidas ocupan un espesor del orden de δ , quedando parte del material sin utilizar para la conducción de dichas corrientes, por lo que a partir de ese instante la magnitud de las intensidades que circulan por la pantalla queda fijadas por el valor del campo y de δ , limitando así el efecto reductor de las mismas. Sin embargo, destaca el incremento de la reducción del aluminio frente al acero, ya que este último se comporta de manera similar a la ferrita debido a los valores de permeabilidad y conductividad que lo caracterizan.

Por otro lado, queda claro que, sea cual sea el material empleado, aumentar la anchura de la pantalla incide en un incremento en la mitigación (figura 3.15b), produciéndose la mejora de forma más notable en materiales conductores (aluminio), mientras que en los ferromagnéticos la incidencia es más reducida (ferrita) [14]. La principal razón de esto es el modo de trabajo de cada uno de los mecanismos de reducción que actúan en cada material, siendo el más eficaz para este tipo de configuración el realizado mediante corrientes inducidas, como ya se comentó con anterioridad. No obstante, esta longitud puede verse limitada a la hora de realizar la instalación real, debido a las dimensiones del lugar de colocación y los trabajos necesarios para ello (p.e. dimensiones de la zanja).

Otro parámetro importante a tener en cuenta, sobre todo a la hora del diseño, es la distancia que separa la pantalla de la línea. Es lógico suponer que a mayor proximidad entre la pantalla y el tendido, mayor serán las corrientes inducidas y mayor el flujo

derivado a través de la pantalla, mejorando en ambos casos la mitigación. Sin embargo, como se puede apreciar en la figura 3.16a, la influencia de este parámetro en materiales ferromagnéticos es escasa, siendo de mayor importancia en el caso de materiales muy conductores. Asimismo, reducir en exceso esta separación puede provocar problemas de calentamiento en la línea, por lo que deberá llegarse a una solución de compromiso de ambos aspectos.

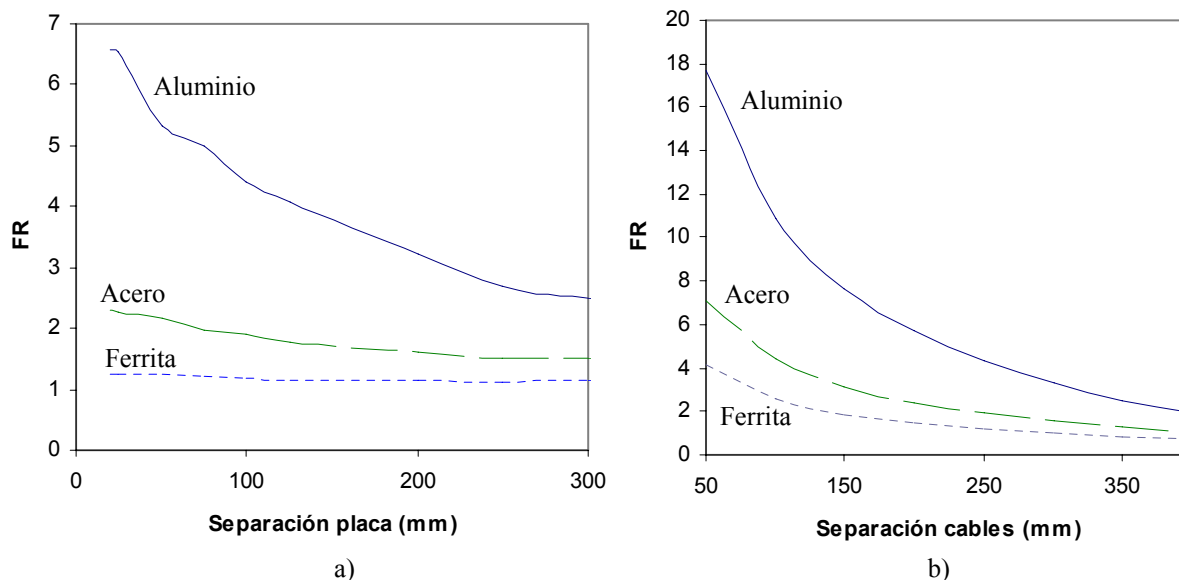


Figura 3.16. Influencia en el factor de reducción de la separación placa-fuente y entre las fases.

Hasta este punto, los parámetros analizados pertenecen a la geometría y situación de la pantalla en la instalación, aunque también pueden considerarse parámetros geométricos relacionados con el tendido. Por ejemplo, la profundidad del mismo, que como se comentó en el primer capítulo, reduce los niveles de campo al alejar la fuente de la zona a proteger. Asimismo, la distancia entre conductores también afecta a la reducción, principalmente debido a que el acercamiento entre las fases produce de por sí un campo resultante de menor intensidad, lo que unido a la instalación de una pantalla ofrece grandes niveles de reducción (figura 3.16b).

Como aclaración a los análisis realizados, recalcar que éstos se han realizado sobre un sistema de línea enterrada en configuración plana horizontal (figura 3.1). A lo largo de los apartados anteriores se constata la mejor efectividad de pantallas planas conductoras frente a las ferromagnéticas para este tipo de configuración. Sin embargo, en algunos puntos se destaca el mejor rendimiento de pantallas abiertas ferromagnéticas cuando el tendido se realiza de manera vertical (figura 3.9). En esta nueva situación, cabría un nuevo análisis de sensibilidad paramétrica como el realizado para la configuración plana. Sin embargo, los resultados que se obtienen son duales a los ya obtenidos, es decir, la evolución del factor de reducción que muestran cada una de las curvas anteriores se conserva, con la salvedad de que, en configuración vertical del tendido, las curvas que correspondían al aluminio pertenecen ahora a la ferrita y viceversa, quedando el acero siempre en una zona intermedia. Por tanto, para este tipo de configuración pueden aplicarse todos los resultados obtenidos para el aluminio pero aplicados a la ferrita. No obstante, aunque la evolución de las curvas sea similar en ambos casos, los niveles de reducción alcanzados cuando se emplea una pantalla ferromagnética con un tendido vertical son menores que en el caso desarrollado para el tendido horizontal con pantalla conductora.

3.3. Apantallado mediante placa en forma de U invertida

Como se ha comentado en el apartado anterior, uno de los principales parámetros a tener en cuenta en el diseño de una pantalla es la anchura de la misma, ya que la reducción alcanzada mejora con el incremento de este parámetro, independientemente del material empleado. Sin embargo, pueden existir ocasiones en las que las dimensiones del lugar de instalación limiten el ancho de la pantalla. Una posible solución a este problema puede ser la utilización de pantallas en forma de U invertida, ya que de esta manera se incrementa la cantidad de material empleado en la pantalla. La configuración básica sobre la que se analizará la efectividad reductora de este perfil de pantalla se muestra en la figura 3.17.

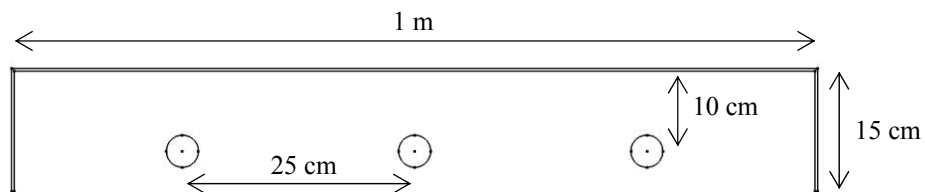


Figura 3.17. Pantalla en forma de U invertida sobre el tendido.

Al igual que en el caso de pantallas planas, la reducción que produce este tipo de pantallas cuando se emplean materiales de alta conductividad se basa en el mecanismo de reducción por corrientes inducidas. En esta nueva configuración, las líneas de flujo son deformadas por los tres tramos que constituyen la pantalla, que hacen de barrera que las impide pasar a la zona protegida (figura 3.18a). De esta manera, el campo generado por la línea queda comprimido bajo el “peso” de la pantalla (figura 3.18b).

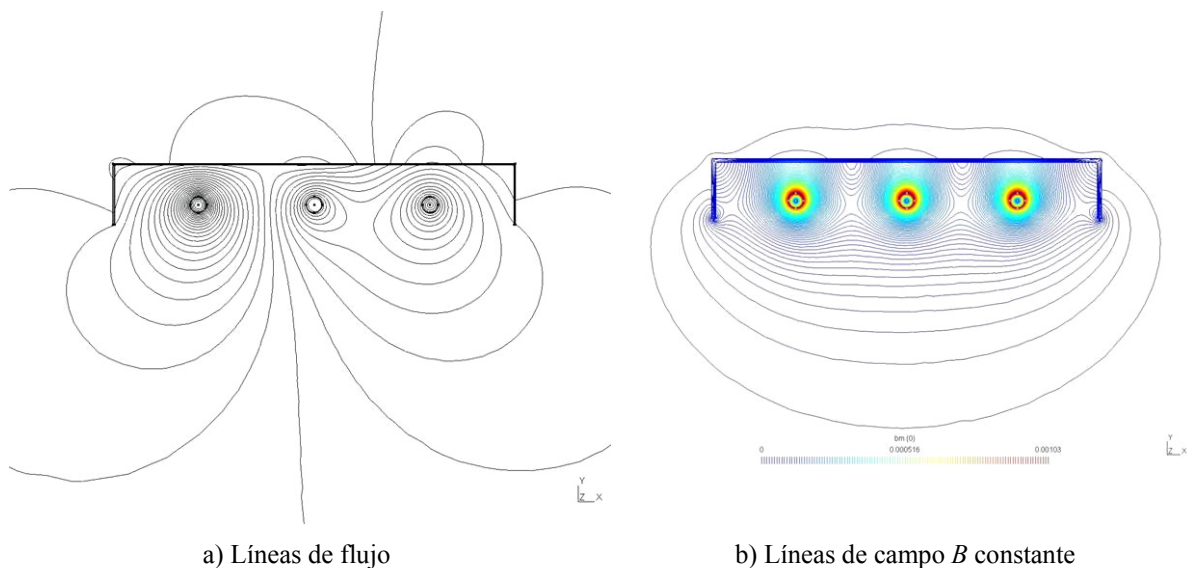


Figura 3.18. Representación del campo en presencia de pantalla conductora en forma de U invertida.

Debido al nuevo perfil de la pantalla, las corrientes inducidas se distribuyen de forma diferente al caso de pantalla plana. En esta ocasión, en los tramos laterales también se inducen dichas corrientes. La acción de estas corrientes adicionales, junto con las generadas en el tramo horizontal, provocan una mejoría en la efectividad de la pantalla.

En la figura 3.19 se muestra la distribución de la componente real de la densidad de corriente presente en la pantalla para el caso de materiales muy conductores.

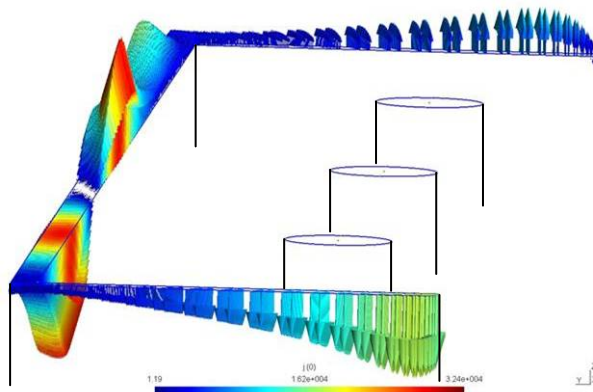


Figura 3.19. Componente real de la densidad de corriente inducida en pantalla en forma de U invertida.

Como se puede observar, en los tramos verticales se inducen corrientes que circulan en sentidos opuestos, mientras que en el tramo horizontal las corrientes circulan del mismo modo que en el caso de pantalla plana. Por ello, se puede decir que los laterales de la pantalla se comportan de forma similar a un lazo de compensación, como se comentó en el primer capítulo, apoyando así el efecto reductor de la pantalla plana constituida por el tramo horizontal. Sin embargo, para que este nuevo efecto tenga lugar, es necesaria una buena continuidad eléctrica entre las sucesivas secciones verticales que formarían la pantalla en la instalación final, debiendo existir en los extremos inicial y final de la pantalla instalada algún tipo de conexión que permita cerrar el lazo formado por ambos laterales (figura 3.20).

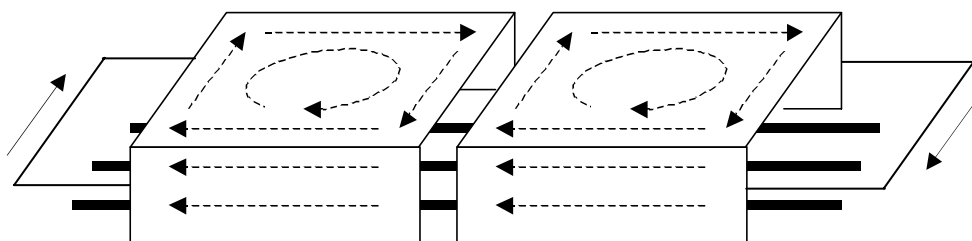


Figura 3.20. Circulación de corrientes inducidas en sistema de apantallado en forma de U.

Por el contrario, no es necesario el mismo nivel de continuidad entre los sucesivos tramos horizontales, ya que las corrientes inducidas ya tienen su retorno en el mismo plano de la pantalla, lo que puede conseguirse por simple solape de las placas entre sí. Sin embargo, esta técnica puede no ser suficiente para asegurar la continuidad entre los laterales de la pantalla.

En el caso de emplear materiales ferromagnéticos, dado que la reducción se produce por la derivación del flujo hacia el interior de la pantalla, esta continuidad eléctrica no es necesaria. No obstante, esto requiere de la existencia de una buena conductividad magnética entre los tramos verticales y el horizontal, lo que puede conseguirse fácilmente si la pantalla se obtiene del plegado de una única plancha. En caso de construir la pantalla mediante 3 tramos independientes, la existencia de huecos de aire en las uniones del tramo horizontal con los verticales perjudica seriamente las

prestaciones de la pantalla, ya que representan “cortes” en el camino de baja reluctancia que se les ha presentado. Con todo esto, el comportamiento de este perfil de pantalla sigue siendo similar al caso plano, salvo que la existencia de los tramos laterales reducen la distancia que deben recorrer las líneas de flujo por el aire (figura 3.21a), al encerrar parcialmente la fuente del campo, por lo que la pantalla es capaz de atraer más cantidad de flujo hacia su interior que en el caso de pantalla plana. De este modo, el campo queda deformado en la zona protegida de manera más pronunciada que en el caso de pantalla plana (figura 3.21b).

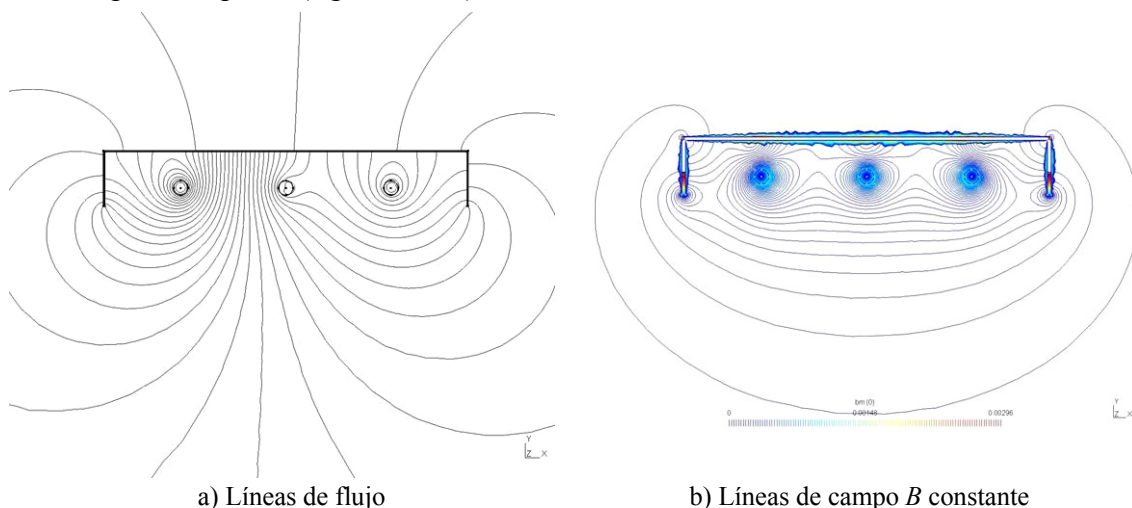


Figura 3.21. Representación del campo en presencia de pantalla ferromagnética en forma de U.

Por tanto, la utilización de materiales con valores destacables de conductividad y permeabilidad en este tipo de pantallas pueden proporcionar buenos niveles de mitigación, ya que la aparición del efecto lazo, junto con el mejor comportamiento del mecanismo de derivación de flujo, incrementa la eficiencia respecto al caso de pantalla plana. De esta manera, es de gran interés analizar la influencia de estos parámetros en el factor de reducción de la pantalla (figura 3.22).

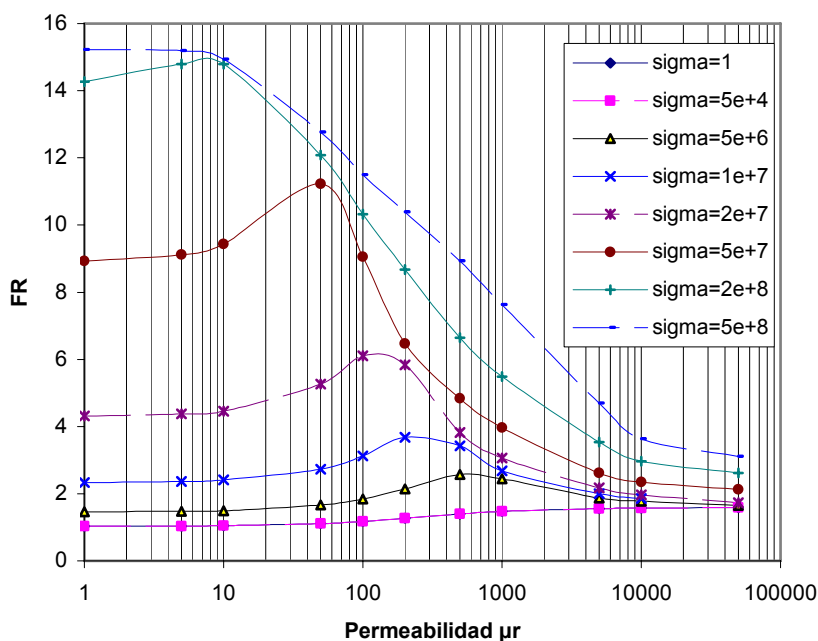


Figura 3.22. Influencia de la permeabilidad magnética en pantallas conductoras en forma de U.

Como se observa, el comportamiento sigue siendo similar al caso de pantallas planas (figura 3.10), excepto en los niveles de reducción alcanzados, que son mayores en el caso de pantalla en forma de U, proporcionando en algunos casos casi el doble de la mitigación dada por pantallas planas. Asimismo, al igual que en el caso plano, el incremento de la permeabilidad tiene inicialmente un efecto beneficioso en la reducción, aunque de manera más pronunciada que en aquel caso, obteniendo un máximo entorno a los valores de μ_r que proporcionan una profundidad de penetración δ del orden del espesor empleado (3 mm). Superado ese punto, se comprueba como en este caso también la reducción decae con la permeabilidad, tendiendo a un valor constante independiente del valor de conductividad empleado, proporcionando en ese momento niveles de reducción más elevados que en el caso plano. Por tanto, al contrario del caso de pantallas planas, los materiales mixtos comienzan a ser interesantes como opción para el apantallado magnético, sobretodo cuando se requieran niveles de reducción moderados. Sin embargo, para restricciones más exigentes, los materiales de alta conductividad siguen prestando los mejores servicios de reducción. Esto se puede apreciar en la figura 3.23a, donde se muestran los perfiles del campo a 1 m sobre el suelo empleando distintos materiales en una pantalla en forma de U. En ella se observa como esta configuración mejora la reducción proporcionada por la pantalla plana de aluminio cuando ambas tienen 1m de anchura, además de comprobar como el acero se acerca a los niveles de reducción de este material de alta conductividad. Por otro lado, se comprueba como esta mejoría se presenta igualmente con la distancia a la fuente (figura 3.23b, proporcionando mejores resultados que el aluminio en las proximidades de la placa, como ocurre en el caso de pantalla plana [14]. De esta forma, salvo por los niveles de reducción alcanzados, las pantallas en forma de U invertida producen mapas de reducción como los del caso plano (figura 3.13), en los que la mitigación dada por el aluminio es mayor en zonas alejadas de la fuente, además de ser más uniforme en la distancia que la proporcionada por los materiales ferromagnéticos, los cuales tienen excelentes reducción en la zona cercana a la pantalla.

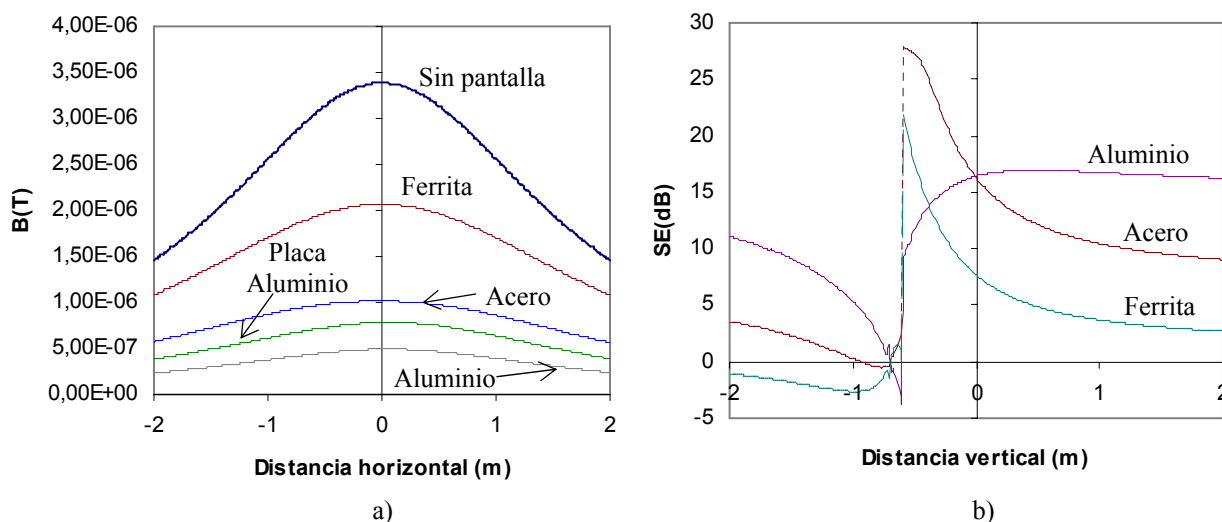


Figura 3.23. Perfil transversal del campo a 1 m del suelo y evolución de la eficiencia reductora con la distancia a la fuente en distintas pantallas en forma de U.

Asimismo, la influencia que tienen algunos parámetros geométricos de la pantalla sobre el nivel de reducción presentan comportamientos similares a los analizados del caso plano. En concreto, la evolución de la reducción con el espesor y anchura de la pantalla presentan curvas muy similares a las de las figuras 3.15a y 3.15b, salvo que la evolución del aluminio con el espesor es algo más lineal, así como por los niveles de mitigación

alcanzados. Igualmente, la reducción de la separación entre los cables del tendido da lugar a comportamientos como los de la curva 3.16b del caso plano, ya que de esta manera el campo generado por la línea es más reducido. Sin embargo, la forma de la pantalla en U provoca que la evolución de la mitigación en función de la separación entre pantalla y fuente se diferencie del caso plano. Como se aprecia en la figura 3.24a, el aluminio ve mermada su eficiencia al separarse de la línea en menor cuantía que en el caso plano. Por el contrario, la reducción de los materiales ferromagnéticos evoluciona de forma inversa, es decir, llegan a mejorar levemente la mitigación al separar la pantalla de la fuente. Parece entonces que, al incrementar esta separación, los materiales ferromagnéticos son capaces de atraer más flujo a su interior, incrementando su eficiencia, mientras que en los conductores se reduce el nivel de corrientes inducidas en el tramo horizontal de la pantalla, por lo que disminuye su efecto reductor.

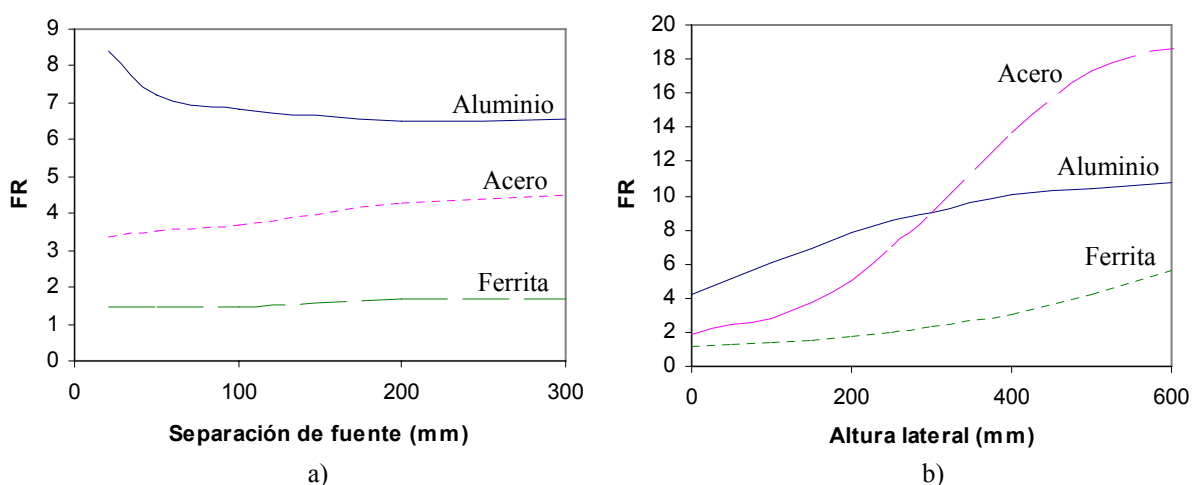


Figura 3.24. Influencia en el factor de reducción de la separación pantalla-fuente y de altura de pantalla.

Por otro lado, la existencia de los tramos verticales laterales proporciona un nuevo parámetro a tener en cuenta, su longitud. En la figura 3.24b se muestra como se ve afectada la reducción con dicha longitud en el punto de estudio a 1m sobre el suelo, mientras el ancho de la pantalla se mantiene constante. De dicha figura se destacan dos conclusiones. Por un lado que, independientemente del material, el incremento de los laterales de la pantalla mejoran la mitigación del campo en dicho punto de estudio. Por otro lado, que dicha mejora es mayor en el acero que en el resto de materiales, el cual llega a superar las prestaciones del aluminio a partir de una cierta longitud de los tramos verticales. Esto puede deberse a que, junto con el efecto lazo que se ve incrementado por la longitud de dichos tramos, a partir de dicho punto el mecanismo de derivación de flujo que se presenta en los paneles laterales comienza a ser de importancia, sobretodo por estar orientados perpendicularmente al tendido, lo que ayuda a desviar las líneas de flujo a través de ellos de igual modo a como se analizó en la figura 3.9a. Dado que este último mecanismo no se presenta en el aluminio, es lógico pensar que esta sea la causa por la que el acero mejora notablemente frente al aluminio, en el que solo mejora el efecto lazo.

3.3.1. Comparativa de pantallas planas y en forma de U

Hasta ahora se ha analizado el comportamiento de las pantallas en U invertida y la influencia de sus parámetros geométricos en la reducción del campo. Sin embargo, es necesario analizar en qué situaciones y configuraciones puede ser más interesante emplear un tipo de pantalla u otro y de qué material realizarla. En la figura 3.23a ya se

comprobó como una pantalla de aluminio en forma de U producía mejores resultado que una pantalla plana de aluminio de la misma anchura. Esto puede verificarse que ocurre, en mayor o menor medida, para cualquiera de los materiales analizados. En la figura 3.25 se muestran los factores de reducción alcanzados en una línea a 1 m sobre el suelo para distintos materiales empleando ambos tipos de pantallas de 1m de anchura, siendo la longitud del tramo vertical en la pantalla en U de 150 mm.

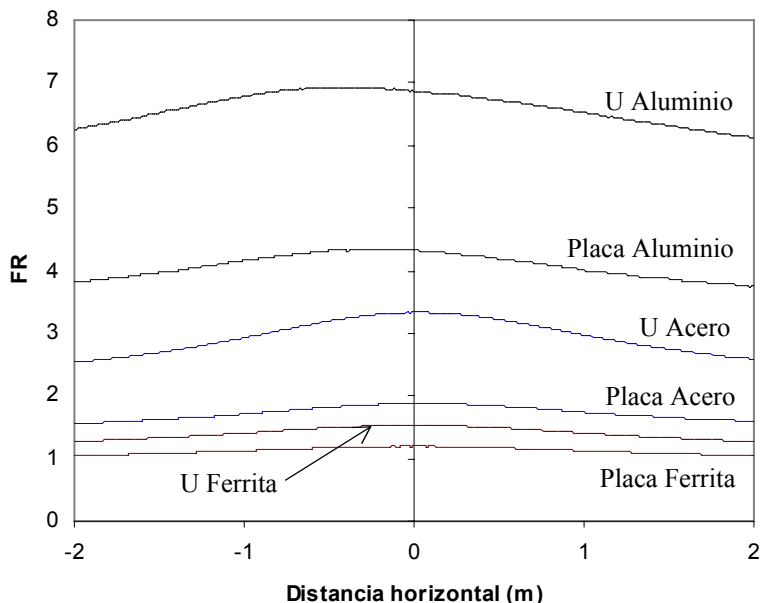


Figura 3.25. Perfil transversal de reducción a 1m sobre el suelo de pantallas con misma anchura.

Como se observa, todos los materiales empleados mejoran su rendimiento al transformar la pantalla horizontal plana en U invertida, añadiendo los tramos verticales de 150 mm. Esta mejoría es más destacada en el aluminio y acero, mientras que es leve en la ferrita. Sin embargo, al realizarse esta comparativa para una anchura fija, puede entenderse que esta mejoría se debe al incremento de longitud sufrido al añadir los tramos verticales. Por ello, es interesante comparar la reducción alcanzada con la misma cantidad de material.

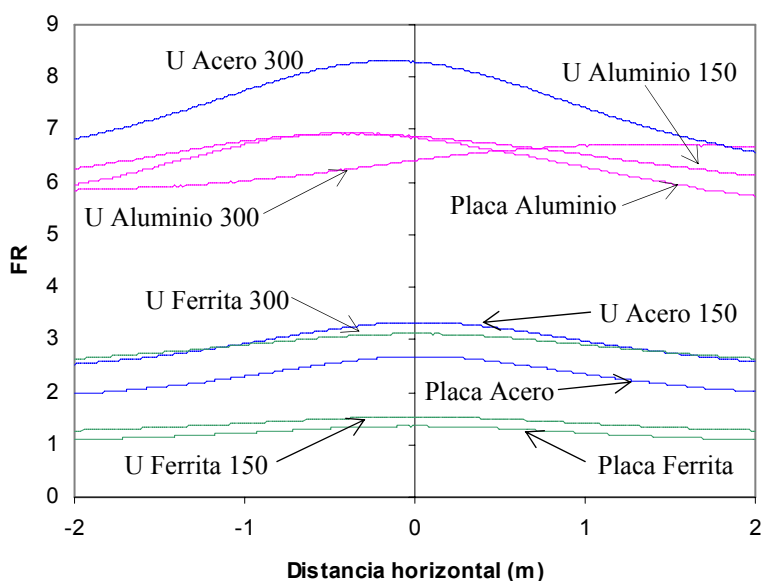


Figura 3.26. Perfil transversal de reducción a 1m del suelo en pantallas con idéntica cantidad de material.

En la figura 3.26 se muestran los factores de reducción alcanzados a 1 m sobre el suelo empleando 3 configuraciones distintas de pantalla, cada una de ellas con una longitud total de 1300 mm y 3 mm de espesor. Podría decirse que cada configuración empleada es el resultado de diferentes formas de plegar una pantalla plana horizontal de 1300 mm de longitud (figura 3.27). La anchura mínima alcanzada será de 700 mm, limitada por el espacio ocupado por los cables, separados 250 mm entre sí.

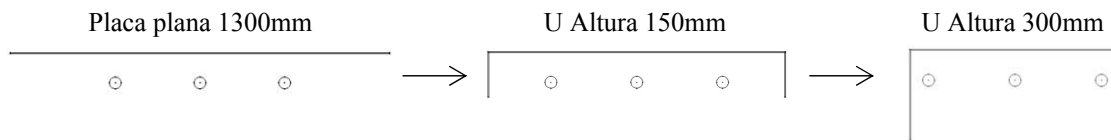


Figura 3.27. Distintas configuraciones de pantalla con idéntica cantidad de material.

De la observación de los resultados presentados en la figura 3.26, queda claro que la mejoría que presentaba la pantalla de aluminio en forma de U de la figura 3.25 se debía al incremento de longitud de la pantalla, como se había supuesto anteriormente, ya que en esta nueva figura se muestra como el aluminio da resultados casi idénticos para las 3 configuraciones empleadas de igual longitud total. Sin embargo, también se comprueba como el acero incrementa sus prestaciones a medida que se va plegando la placa, llegando a producir mejores resultados que el aluminio cuando se emplea en pantallas en U con 300 mm de altura lateral. Por tanto, cabe concluir que emplear pantallas planas de materiales de alta conductividad no siempre es la mejor solución, ya que una buena combinación de material mixto y forma del perfil puede llegar a producir mejores reducciones del campo.

Esta conclusión presenta un nuevo punto de vista con el que seleccionar la mejor opción a la hora de realizar una pantalla. Es decir, dado un material en concreto para construir una pantalla abierta, determinar cual es el perfil óptimo que produce mejores resultados de mitigación. Por ejemplo, como se acaba de comprobar, las prestaciones de una pantalla plana de aluminio apenas mejoran si se transforma su perfil en otros en forma de U invertida. Sin embargo, en materiales mixtos y ferromagnéticos la eficiencia de la pantalla puede llegar a incrementarse de manera notable por la variación del perfil empleado, principalmente por la longitud de los tramos verticales de la pantalla. Esto evidencia la existencia de algún tipo de factor de forma que determina el perfil que mejores niveles de reducción proporciona cuando se emplean este tipo de materiales. Dado que, como se acaba de comprobar, parece que dicha mejoría se debe a alguna relación entre la longitud de los tramos verticales con la del tramo horizontal, se puede definir el siguiente ratio como factor de forma:

$$\text{Ratio} = \frac{\text{Longitud tramo vertical}}{\text{Longitud tramo horizontal}}$$

Este ratio tendrá valores entre 0 y 1, valores que se corresponden a los casos de pantalla plana y pantalla en forma de U cuadrada. Para analizar la evolución de la reducción del campo con dicho factor de forma se han tomado 4 valores de longitud total de plancha de acero (1000 mm, 1300 mm, 1500 mm y 2000 mm) de 3 mm de espesor, los cuales se han ido plegando en sucesivas configuraciones en forma de U, incrementando la longitud de los tramos verticales del modo mostrado en la figura 3.27, manteniendo constante la distancia de la línea al tramo horizontal. En la figura 3.28 se muestra la evolución del factor de reducción en el punto de estudio situado a 1m sobre el suelo para distintas formas y longitudes del acero.

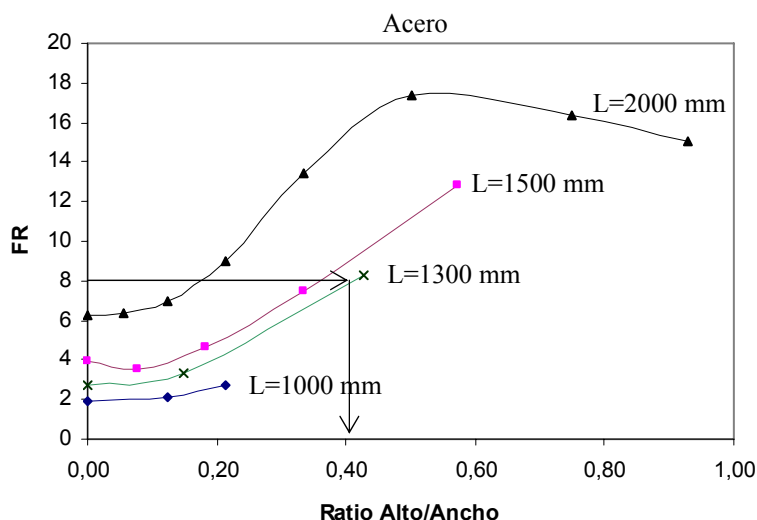


Figura 3.28. Influencia del factor de forma en la reducción para distintas longitudes de acero.

En esta figura se comprueba como, para materiales mixtos como el acero, los mejores resultados de mitigación se producen cuanto más cuadrada es la forma de la pantalla, es decir, cuanto más próximo es el perfil de la pantalla a uno cerrado. Sin embargo, para una longitud de 2000 mm, los niveles de reducción más elevados se alcanzan cuando el factor de forma ronda el 0.5, es decir, cuando el ancho de la pantalla es del orden del doble de su altura. A partir de este punto la mitigación disminuye, lo que puede deberse a que la longitud del tramo horizontal comienza a reducirse en tal medida que el nivel de corrientes inducidas se ve perjudicado, descendiendo el efecto reductor de las mismas. Pero por otro lado, también se observa como no es necesario emplear siempre longitudes elevadas para conseguir niveles de reducción destacados. Por ejemplo, si en la zona a proteger es necesario obtener un factor de reducción en torno a 8, se observa en la figura 3.28 como esto puede conseguirse empleando pantallas de 2000 mm, 1500 mm y 1300 mm con distinto factor de forma. Sin embargo, si se quieren abaratar costes, lo más habitual es emplear la menor cantidad de material posible, por lo que es claro que la mejor opción es utilizar 1300 mm de acero con un factor de forma entorno a 0.4, por ejemplo con una pantalla de 700 mm de ancho y 300 mm de alto.

Este mismo comportamiento lo presenta también la ferrita (figura 3.29), aunque de forma más acentuada debido a la gran similitud entre la reducción dada por las distintas longitudes. Sin embargo, la mitigación alcanzada es muy inferior al caso anterior.

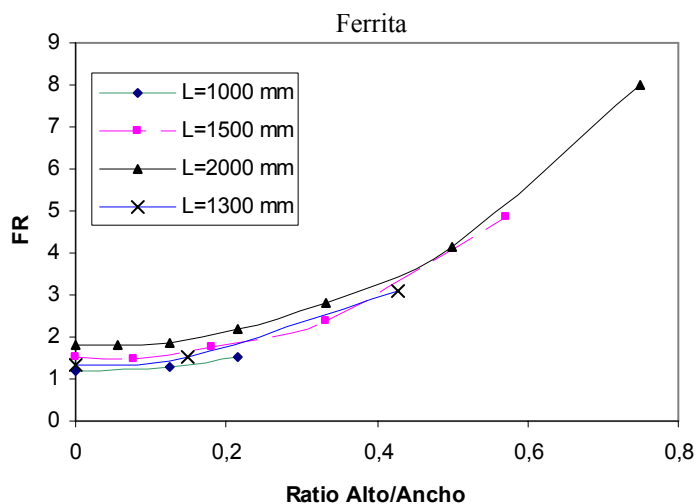


Figura 3.29. Influencia del factor de forma en la reducción para distintas longitudes de ferrita.

3.4. Influencia de la componente de secuencia cero en pantallas abiertas

Como se comentó en el primer capítulo, la existencia de desequilibrios en las corrientes que generan el campo repercute negativamente en el nivel de exposición en las zonas cercanas a la línea, ya que incrementa el nivel del campo generado por la instalación al deformarse por la aparición de esta anomalía (figura 3.30).

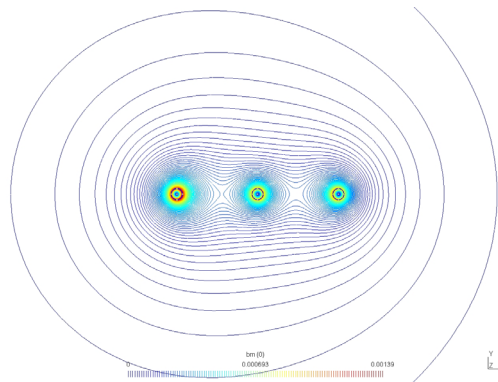


Figura 3.30. Deformación de las líneas de campo B constante en presencia de componente de secuencia cero en la línea.

Por tanto, es lógico pensar en seleccionar una configuración de pantalla que proporcione mayores niveles de reducción que en el caso de que no existiese tal desequilibrio, a fin de hacer contrarrestar los efectos perjudiciales de la aparición de este fenómeno. Sin embargo, la deformación que sufre el campo por dicho desequilibrio afecta a la efectividad mitigadora de las pantallas, independientemente del material y de su perfil, ya que influye en el funcionamiento de los distintos mecanismos de reducción. En la figura 3.31 se observa cómo trabajan en esta situación pantallas planas de aluminio y ferrita ante un desequilibrio del 10%, las cuales no consiguen corregir la deformación del campo, que incluso puede llegar a incrementarse.

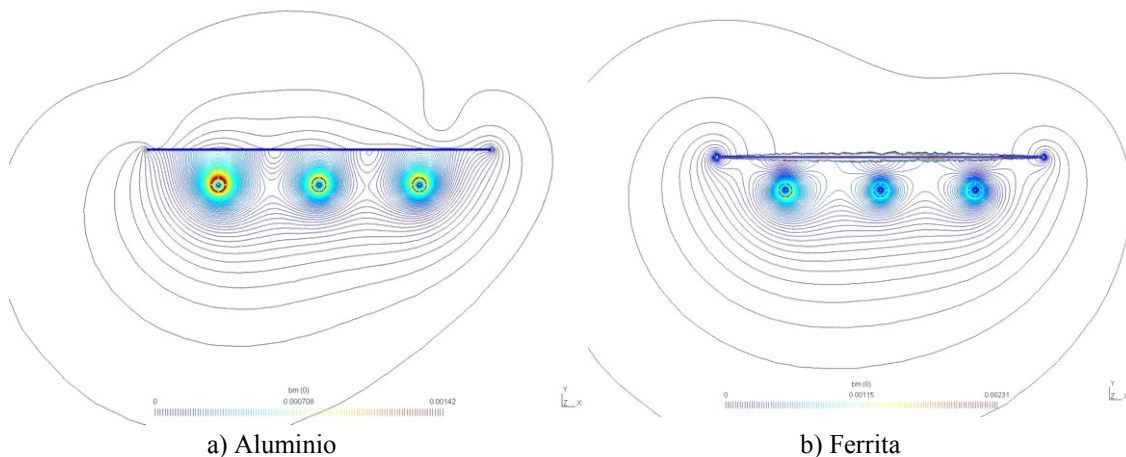


Figura 3.31. Influencia de secuencia cero en líneas de campo B constante para distintas pantallas.

Todo esto provoca que el nivel de factor de reducción que alcanzan las pantallas se vea mermado respecto al caso equilibrado. En la figura 3.32a se puede observar, para el caso del aluminio, los distintos niveles de reducción a 1m sobre el suelo para distintos porcentajes de componente de secuencia cero (0% o equilibrado, 3.3%, 5% y 10%), comprobándose cómo el nivel de mitigación puede llegar incluso a reducirse a la mitad que el alcanzado en situaciones de equilibrio de la línea.

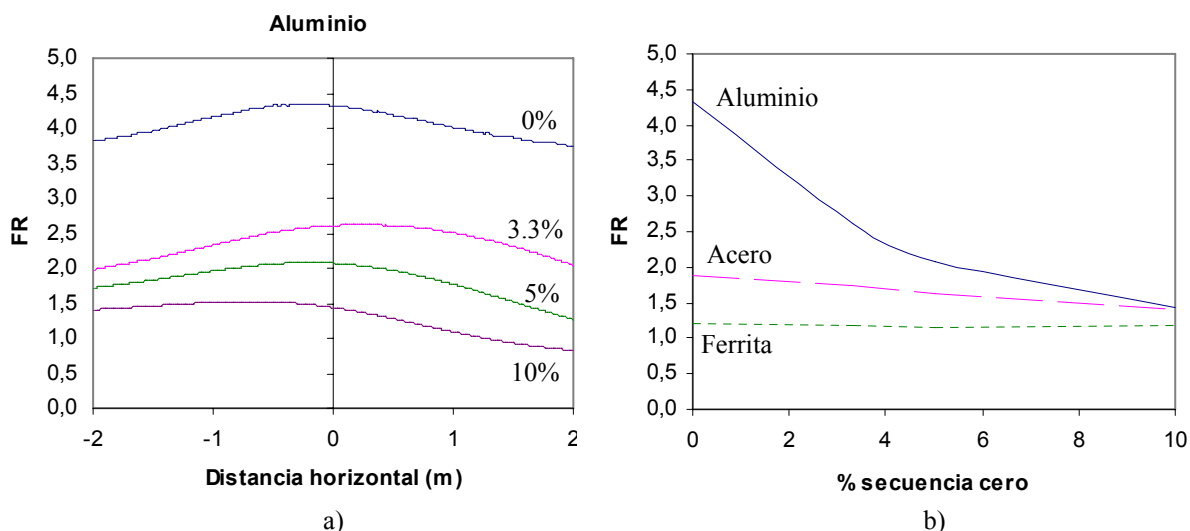


Figura 3.32. Influencia del porcentaje de secuencia de cero en el factor reducción.

Aunque esta anomalía afecta a cualquier tipo de material, es lógico suponer que afecta en mayor medida a materiales de cierta conductividad que realicen la mitigación mediante corrientes inducidas. Esto se observa claramente en la figura 3.32b, en la que se muestra la evolución de la reducción para el aluminio, acero y ferrita en función del porcentaje de componente de secuencia cero de la instalación. Destaca la mayor influencia del desequilibrio en el aluminio, siendo más pronunciado entorno a valores reducidos de componente de secuencia cero. Para mayores porcentajes la mitigación se ve afectada en menor medida, aunque en esa situación los niveles de reducción ya han decaído considerablemente. Asimismo, las prestaciones del acero se ven disminuidas por la aparición del desequilibrio, aunque en menor cuantía que el aluminio. Sin embargo, la ferrita, al producir la reducción por otro mecanismo distinto, apenas ve afectada su efectividad.

Resultados completamente similares se encuentran cuando se emplean pantallas en forma de U invertida. La evolución que presenta el factor de reducción de los distintos materiales es similar al de la figura 3.32b, salvo que inicialmente la caída es más pronunciada al ser los niveles de mitigación en caso equilibrado mayores que los proporcionados por la pantalla plana, llegando a disminuir la efectividad hasta 5 veces respecto a la situación equilibrada. Por tanto, se puede concluir que este tipo de desequilibrio perjudica en mayor medida a las pantallas en forma de U invertida.

3.5. Resumen

A lo largo de este capítulo se han analizado dos configuraciones típicas de pantallas abiertas. Ambas son habitualmente empleadas en instalaciones de apantallado, como en líneas subterráneas y centros de transformación. Se han comentado los distintos mecanismos de reducción por los que puede mitigarse el campo magnético en función de las características del material empleado, así como la influencia que distintos parámetros geométricos de la pantalla y la línea tienen sobre la eficiencia de la pantalla. Asimismo, se han comprobado las condiciones en las que es más efectivo emplear un determinado tipo de pantalla o material, con objeto de seleccionar la mejor opción para el aprovechamiento del material y alcanzar los requisitos de mitigación deseados.

Capítulo 4.

Conclusiones y líneas futuras de investigación.

4.1. Resumen y conclusiones

En el presente trabajo se ha abordado la problemática acerca de los posibles efectos nocivos de los campos electromagnéticos sobre la salud de las personas, dado que diferentes organismos nacionales e internacionales han determinado la existencia de leves indicios que indicarían una posible relación entre los campos electromagnéticos y algunas enfermedades de tipo cancerígeno. Siguiendo las recomendaciones de organismos como la OMS, se han analizado diferentes soluciones para reducir los niveles de exposición a dichos campos en el caso particular de instalaciones de distribución de energía eléctrica. Algunas de las técnicas comentadas se basan en la modificación de algunos aspectos geométricos de la instalación, de manera que los niveles del campo resultante en la zona a proteger sean más reducidos. Entre estas técnicas destacan la variación de la altura o profundidad del tendido, la división de las fases, su configuración geométrica o el método de cancelación de fases. Sin embargo, en muchas otras ocasiones los niveles de reducción requeridos no pueden obtenerse con estas técnicas, por lo que se han analizado distintas soluciones en base a la utilización de lazos de compensación y pantallas de materiales conductores y ferromagnéticos para su mitigación. Esta última técnica ha sido el objeto de estudio principal de este trabajo, describiendo los diversos mecanismos físicos por los que se realiza la reducción en función del material empleado (reducción por corrientes inducidas en el caso de materiales de alta conductividad eléctrica y reducción por derivación del flujo magnético en el caso de materiales de alta permeabilidad magnética). Asimismo, se ha analizado la complejidad matemática para la resolución de este tipo de sistemas, derivada principalmente de la naturaleza de las ecuaciones de Maxwell que lo gobiernan. En este sentido, se ha realizado un estudio preliminar del estado del arte para

determinar las herramientas analíticas y numéricas disponibles en la actualidad para afrontar la resolución de este tipo de problemas. En el caso de soluciones analíticas destacan las siguientes conclusiones:

- Únicamente en el caso de geometrías sencillas, tales como esferas o cilindros, existen expresiones analíticas cerradas del campo magnético resultante y del factor de reducción en zonas alejadas de la pantalla.
- Expresiones analíticas con distinto grado de aproximación se han obtenido para el caso de pantallas planas finitas e infinitas de una o varias capas.
- En muchos de los casos analizados se aplican hipótesis respecto a la geometría de la pantalla (longitud) o al material empleado (perfectamente magnético o conductor) que distancian el modelo de la realidad. Algunos de los autores determinan las condiciones en el que estas aproximaciones pueden emplearse para sistemas más realistas.
- La mayoría de las expresiones obtenidas permiten obtener el campo o el factor de reducción en la zona protegida por la pantalla, pero no consideran la determinación de otras variables tanto en la región donde se sitúa la fuente como en el interior de la pantalla, por lo que no permiten abordar temas de gran importancia como el estudio de las pérdidas que se producen en estos sistemas.

Por otro lado, en cuanto a las herramientas numéricas destacan las siguientes conclusiones:

- Son ampliamente empleadas para la validación de muchos de los modelos analíticos propuestos junto con la validación experimental en laboratorio.
- Permiten el análisis de configuraciones más complejas, tales como pantallas cerradas de una o varias capas y sistemas de apantallado en centros de transformación. Asimismo, proporcionan una gran herramienta para el estudio de otras magnitudes de importancia implicadas en el problema, como son el análisis de pérdidas en el mismo.
- Por su naturaleza suelen tener un alto coste computacional, debido principalmente al modelado de la pantalla y el truncamiento del dominio a estudiar. Esto ha propiciado la creación de diversos métodos híbridos que conjugan las principales ventajas de cada una de las técnicas.

A fin de completar la visión sobre la aplicación e instalación de sistemas de apantallado, se han comentado las conclusiones obtenidas de diversas experiencias realizadas en Italia en el apantallado de líneas subterráneas.

De los trabajos analizados, en pocos casos se ha realizado un estudio de la influencia de algunos parámetros en la eficiencia mitigadora de una pantalla. Por ello, en este trabajo se ha llevado a cabo un exhaustivo análisis de sensibilidad paramétrica para dos configuraciones típicas de pantallas abiertas: placa plana y pantalla en forma de U invertida. Para realizar dicho análisis se ha utilizado un programa informático de cálculo basado en el método de los elementos finitos (FEM) denominado GetDP [52], dada la

versatilidad y prestaciones que las técnicas basadas en FEM han demostrado en el estudio del arte realizado previamente. Asimismo, para la representación gráfica y mallado del sistema, así como de las soluciones generadas por GetDP, se ha empleado la interfaz gráfica proporcionada por el programa Gmsh [53].

En dicho estudio, se han analizado los distintos mecanismos de reducción por los que puede mitigarse el campo magnético en función de las características del material empleado, así como la influencia que distintos parámetros geométricos de la pantalla y la línea tienen sobre la eficiencia de la pantalla. Asimismo, se han comprobado las condiciones en las que es más efectivo emplear un determinado perfil de pantalla o material, con objeto de determinar la mejor opción para alcanzar los requisitos de mitigación y aprovechamiento del material. De estos análisis se pueden concluir las siguientes ideas:

- En el caso de emplear pantallas planas horizontales paralelas a la línea, las mejores prestaciones las proporcionan los materiales de alta conductividad. Se puede mejorar el rendimiento de esta pantalla incrementando el ancho todo lo posible, así como reduciendo la separación entre la pantalla y la fuente. Asimismo, incrementar el espesor hasta valores en torno a la profundidad de penetración de las corrientes inducidas mejora notablemente el factor de reducción.
- Para pantallas planas orientadas perpendicularmente al tendido, los mejores resultados los ofrecen los materiales ferromagnéticos, aunque no alcanzan los niveles de reducción de la situación anterior.
- El incremento de la permeabilidad magnética en materiales de alta conductividad eléctrica tiende a empeorar las prestaciones de la pantalla plana.
- La utilización de pantallas con perfil en U invertida mejora la reducción alcanzada. En esta configuración el incremento de la permeabilidad magnética puede ayudar a mejorar apreciablemente los niveles de mitigación.
- En ambos tipos de pantalla, los materiales de alta conductividad proporcionan mejores y más homogéneos resultados en zonas alejadas de la fuente, mientras que los ferromagnéticos lo realizan en la zona más cercana.
- En el caso de pantallas en U con materiales conductores, es muy importante la continuidad eléctrica entre las secciones laterales de los distintos tramos que componen la pantalla. Entre las secciones horizontales dicha continuidad no es tan necesaria. En caso de emplearse materiales ferromagnéticos, la continuidad magnética entre las secciones verticales y horizontales de cada tramo es de vital importancia para mantener el camino de baja reluctancia para desviar el flujo del campo.
- Los niveles de reducción alcanzados utilizando una determinada cantidad de aluminio son muy similares e independientes del tipo de perfil que se decida construir con dicho material (pantallas planas o en forma de U). Por el contrario, en materiales mixtos o ferromagnéticos, se alcanzan mejores resultados cuanto más se aproxime el perfil a una pantalla cerrada.

- La aparición de componente de secuencia cero en la línea a mitigar perjudica seriamente la efectividad de ambas configuraciones de pantallas abiertas, siendo más severa la reducción en el caso de pantallas en forma de U invertida.

4.2. Propuestas de líneas futuras de investigación

Como consecuencia del trabajo desarrollado en este documento, se ha visto la posibilidad de seguir investigando alrededor de la problemática de la reducción del campo generado por instalaciones de distribución de energía eléctrica. En este sentido, algunas propuestas sobre futuras líneas de investigación se presentan a continuación:

- Dada las prestaciones y versatilidad del software empleado, continuar el análisis de sensibilidad paramétrica en otras configuraciones de pantalla, tanto abierta como cerrada (figura 4.1). En este sentido, ya se han realizado algunos análisis para configuraciones cerradas rectangulares y cilíndricas, verificando los resultados obtenidos en [14-17].

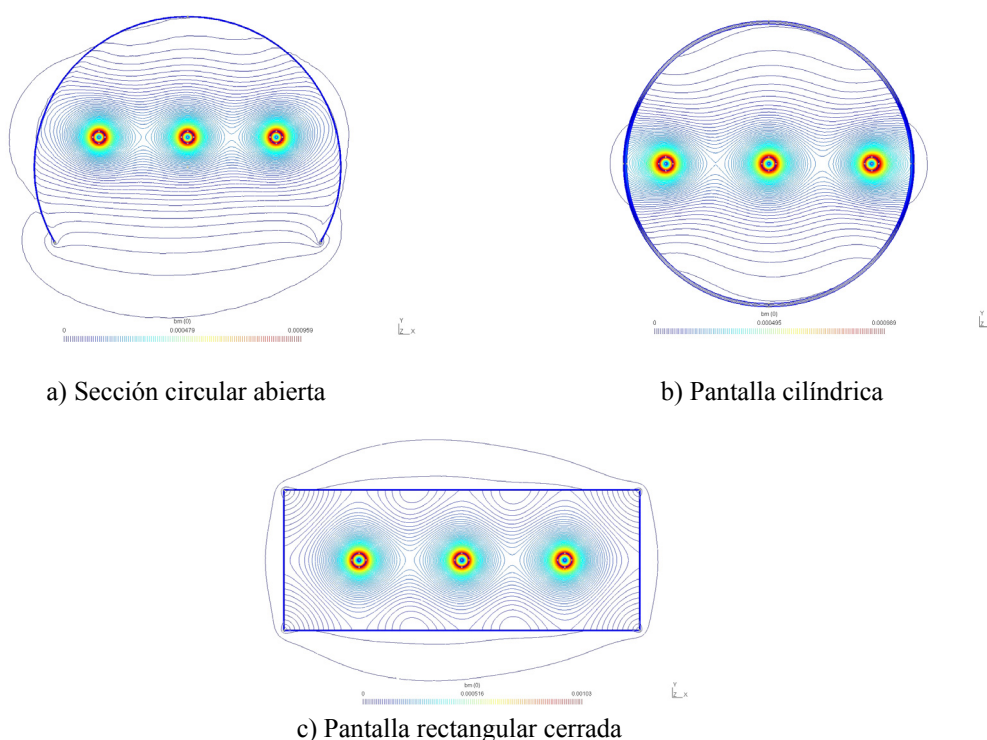


Figura 4.1. Distintas configuraciones de pantallas abiertas y cerradas.

Asimismo, el estudio podría ampliarse teniendo en cuenta diferentes configuraciones de la fuente, como por ejemplo, tendido en forma de trébol o considerar más de una fuente con distinta orientación respecto a la pantalla (figura 4.2). De esta forma se pueden simular fuentes más complejas de campo como las existentes en centros de transformación.

Finalmente, es de gran interés completar el estudio con un análisis más profundo en cuanto a la calidad del contacto eléctrico y magnético en pantallas constituidas por varias secciones de material, como en pantallas en forma de U invertida, rectangular o en forma de H.

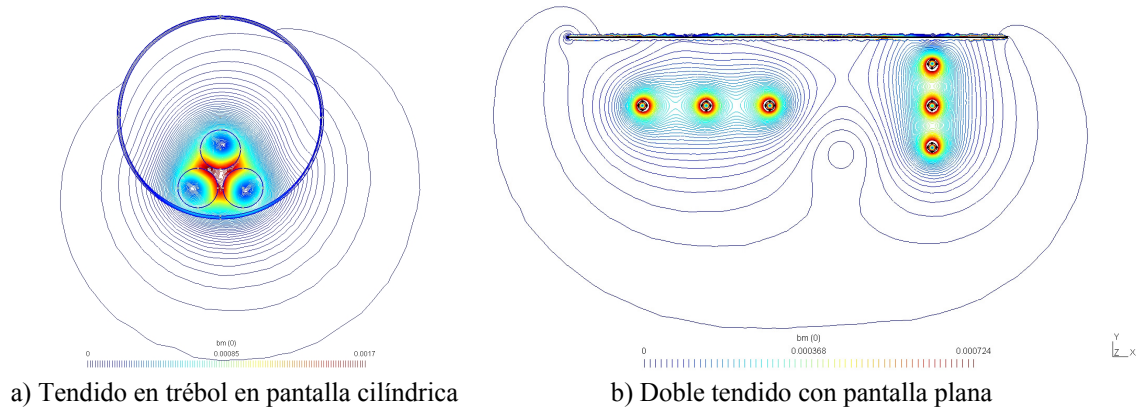


Figura 4.2. Distintas configuraciones del tendido.

- Un aspecto de gran importancia, sobretodo en el diseño del apantallado de líneas subterráneas, es la influencia de las pérdidas generadas en el sistema en la capacidad de transporte de la línea. Por tanto, añadir una nueva restricción de temperatura al problema para considerar este fenómeno en el sistema permitiría modelar de forma mucho más realista este tipo de instalaciones. De este modo, podrían determinarse tablas de factores de corrección que permitiesen tener en cuenta el calentamiento del tendido por la presencia de una pantalla en sus proximidades a la hora de realizar el cálculo de instalaciones subterráneas.
- El coste del apantallado de un determinado sistema puede ser en algunas situaciones excesivamente elevado. Por ello, es de gran interés emplear el perfil más adecuado de pantalla y la mínima cantidad de material para alcanzar los requerimientos de reducción deseados. Por tanto, el estudio de la optimización de la forma de una pantalla para una determinada fuente de campo magnético, empleando para ello la mínima cantidad de material, es una nueva vía de investigación que permitiría el diseño de sistemas de apantallado de coste más reducido.

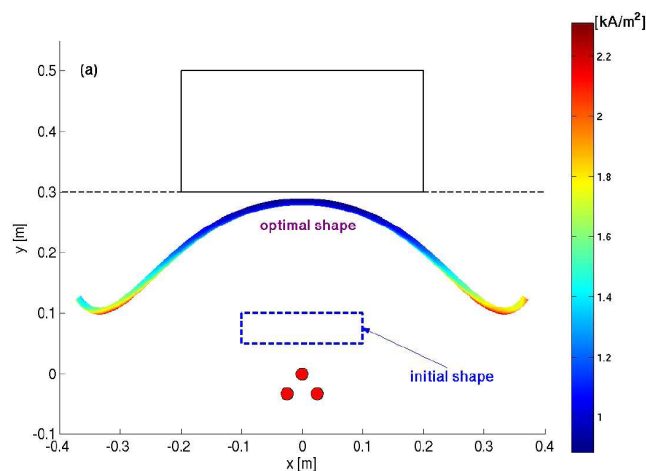


Figura 4.3. Perfil óptimo de pantalla para una fuente de campo magnético.

Referencias

- [1] Proyecto Internacional CEM de la Organización Mundial de la Salud:
<http://www.who.int/peh-emf/project/es/>
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] REAL DECRETO 1066/2001 de 28 de septiembre de 2001. BOE núm. 234.
- [7] 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.
- [8] Comité de expertos independientes convocados por el Ministerio de Sanidad y Consumo. *Evaluación actualizada de los Campos Electromagnéticos en relación con la salud pública y consumo*. Dirección General de Salud Pública y Consumo, Septiembre 2003. Ministerio de Sanidad y Consumo.

- [9] Dr. Darío 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.
- [10] 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. http://www.icems.eu/benevento_resolution.htm
- [11] Organización Mundial de la Salud. *Campos Electromagnéticos y Salud pública. Exposición a campos de frecuencia extremadamente baja*. Nota descriptiva N° 322. Junio 2007. <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs322/es/index.html>
- [12] World Health Organization (WHO). *Environmental Health Criteria 238. Extremely low frequency fields*. Geneva: WHO; 2007. http://www.who.int/pehemf/research/health_risk_assess/en/index2.html.
- [13] William F. Horton, Saul Goldberg. *Power Frequency Magnetic Fields and Public Health*. CRC Press. 1995.
- [14] L. Hasselgren and J. Luomi, “*Geometrical aspects of magnetic shielding at extremely low frequencies*”, IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility, Vol. 37, No. 3, Aug. 1995.
- [15] J. F. Hoburg, “*Principles of quasistatic magnetic shielding with cylindrical and spherical shields*”, IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility, Vol. 37, No. 4, Nov. 1995.
- [16] Y. Du and J. Burnett, “*Magnetic shielding principles of linear cylindrical shield at power frequency*”, Proceedings IEEE 1996 International Symposium on EMC, Santa Clara, CA, USA, August 1996.
- [17] Y. Du and J. Burnett, “*Power-frequency magnetic shielding of heavy-current conductors by rectangular shields*”, IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., Vol. 146, No. 3, May 1999.
- [18] Y. Du, T. C. Cheng and A. S. Farag, “*Principles of power frequency magnetic field shielding with flat sheets in a source of long conductors*”, IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility, Vol. 38, No. 3, Aug. 1996.
- [19] R. G. Olsen and P. Moreno, “*Some observations about shielding extremely low-frequency magnetic fields by finite width shields*”, IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility, Vol. 38, No. 3, Aug. 1996.
- [20] P. Moreno and R. G. Olsen , “*A simple theory for optimizing finite width ELF magnetic field shields for minimum dependence on source orientation*”, IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility, Vol. 39, No. 4, Aug. 1997.

-
- [21] R. G. Olsen, M. Istenic and P. Zunko, “*On simple methods for calculating ELF shielding of infinite planar shields*”, IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility, Vol. 45, No. 3, August 2003.
- [22] M. Istenic and R. G. Olsen, “*A simple hybrid method for ELF shielding by imperfect finite planar shields*”, IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility, Vol. 46, No. 2, May 2004.
- [23] J. F. Hoburg, “*A computational methodology and results for quasistatic multilayered magnetic shielding*”, IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility, Vol. 38, No. 1, February 1996.
- [24] J. F. Hoburg, B. A. Clairmont, D. W. Fugate, R. J. Lordan, “*Comparisons of measured and calculated power frequency magnetic shielding by multilayered cylinders*”, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 12, No. 4, October 1997.
- [25] Y. Du and J. Burnett, “*Optimal magnetic shielding of double-layer shields at power frequency*”, IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 1997.
- [26] L. Sandrolini, A. Massarini, U. Reggiani, “*Transform method for calculating low-frequency shielding effectiveness of planar linear multilayered shields*”, IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 36, No. 6, November 2000.
- [27] W. M. Frix and G. G. Karady, “*A circuital approach to estimate the magnetic field reduction of nonferrous metal shields*”, IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility, Vol. 39, No. 1, February 1997.
- [28] F. W. Grover, *Inductance Calculation: Working Formulas and Tables*, D. Van Nostrand Company, Inc., New York, 1947.
- [29] A. Canova, G. Gruosso and M. Repetto, “*Integral methods for analysis and design of low-frequency conductive shields*”, IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 39, No. 4, July 2003.
- [30] A. Canova, A. Manzin, M. Tartaglia, “*Evaluation of different analytical and semi-analytical methods for the design of ELF magnetic field shields*”, IEEE Trans. On Industry Applications, Vol. 38, No. 3, May/June 2002.
- [31] Martin A. Plonus, *Applied Electromagnetics*, International Student Edition, McGraw-Hill Kogakusha, Ltd., 1978.
- [32] M. D’Amore, E. Menghi and M. S. Sarto, “*Shielding techniques of the low-frequency magnetic field from cable power lines*”, IEEE International Symposium on EMC, August 18-22, 2003, boston.
- [33] L. Hasselgren, E. Möller and Y. Hamnerius, “*Calculation of magnetic shielding of a substation at power frequency using FEM*”, IEEE Transc. on Power Delivery, Vol. 9, No. 3, July 1994.

- [34] M. Feliziani, F. Maradei, “*Fast computation of quasi-static magnetic fields around nonperfectly conductive shields*”, IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 34, No. 5, September 1998.
- [35] C. Caruso, M. Feliziani, F. Maradei, “*Validation of analytical and numerical techniques to predict the magnetic shielding effectiveness of finite extension shields*”, IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility 2000, Vol. 2, pp 861-886, August 2000.
- [36] A. S. Farag, M. M. Dawoud and I. O. Habiballah, “*Implementation of shielding principles for magnetic field management of power cables*”, Electric Power System Research, 48 (1999) 193-209.
- [37] H. Igarashi, A. Kost, T. Honma, “*A three dimensional analysis of magnetic fields around a thin magnetic conductive layer using vector potential*”, IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 34, No. 5, September 1998.
- [38] O. Bottauscio, E. Carpaneto, M. Chiampi, D. Chiarabaglio, I. Panaitescu, “*Numerical and experimental evaluation of magnetic field generated by power busbar systems*”, IEE Proc. Gener. Transm. Distrib. Vol. 143, No. 5, September 1996.
- [39] O. Bottauscio, M. Chiampi, D. Chiarabaglio, F. Fiorillo, L. Rocchino, M. Zucca, “*Role of magnetic materials in power frequency shielding: numerical analysis and experiments*”, IEE Proc. Gener. Transm. Distrib. Vol. 148, No. 2, March 2001.
- [40] O. Bottauscio, M. Chiampi, A. Manzin, “*Numerical analysis of magnetic shielding efficiency of multilayered screens*”, IEEE Trans. on Magnetics Vol. 40, No. 2, March 2004.
- [41] O. Bottauscio, M. Chiampi, G. Crotti, A. Manzin, P. Ribaldone and M. Zucca, “*Design of magnetic shield in MV/LV substations by three dimensional modelling and experimental analysis*”, Proceedings of EMC Europe 2002 - International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Vol. I, pp. 359-364, Sorrento (Italy), September 2002.
- [42] E. Tonti, “*Finite formulation of electromagnetic field*”, IEEE Trans. on Magnetics Vol. 38, No. 2, March 2002.
- [43] K. C. Lim, J. F. Hoburg, D. W. Fugate, R. J. Lordan, “*Integral law descriptions of quasistatic magnetic field shielding by thin conductive plates*”, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 12, No. 4, October 1997.
- [44] K. J. Binns, P. J. Lawrenson, C. W. Trowbridge, “*The analytical and numerical solution of electric and magnetic fields*”, John Wiley & Sons Ltd., 1994.
- [45] S. Ratnajeevan, H. Hoole, “*Computer-aided analysis and design of electromagnetic devices*”, Elsevier Science Publishig Co., Inc. 1989.

-
- [46] A. Cipollone, Al. Fabbri and E. Zendri, “*Techniques for shielding underground power lines to minimize the exposure to ELF magnetic field in residential areas*”, EMC Europe 2002 - Sept 9-13, 2002 Sorrento.
- [47] R. Conti, F. Donáis, P. Maioli, R. Rendina and E. A. Sena, “*Some Italian experiences in the utilization of HV underground cable systems to solve local problems due to magnetic field and other environmental issues*”, 2006 CIGRÉ conference, paper C4-303.
- [48] A. J. Casura, T. P. Heuscher, J. Bader and L. Kueng, “*Simulation of shieldings and mitigation methods for the electromagnetic field of a transformer*”, 2006 CIGRE Conference, paper C4-305.
- [49] A. Massarini, U. Reggiani and L. Sandrolini, “*Optimization of magnetic multilayered shields*”, IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility EMC, 2001.
- [50] E. Salinas, Y. Q. Liu, P. Souza, J. Atalaya, P. Cruz, J. Daalder, “*Design and validation of power frequency magnetic field conductor shielding for underground cables*”, CIREN 18th International Conference on Electricity Distribution, Turin, 6-9 June 2005.
- [51] Y. Liu, P. Sousa, E. Salinas, P. Cruz and J. Daalder, “*Continuum gradient-based shape optimization of conducting shields for power frequency magnetic field mitigation*”, IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 42, No. 4, April, 2006.
- [52] GetDP: A General Environment for the Treatment of Discrete Problems. Patrick Dular & Christophe Geuzaine. Ver. 1.2, March 2006. <http://www.geuz.org/getdp/>
- [53] Gmsh: A Three-Dimensional Finite Element Mesh Generator with Built-in Pre- and Post-Processing Facilities. Christophe Geuzaine & Jean-François Remacle. Ver. 2.0.7, April 2007. <http://www.geuz.org/gmsh/>