

# Selección de pantallas para la mitigación del campo magnético a frecuencia industrial de líneas subterráneas



Juan Carlos del Pino-López\*  
Pedro Cruz-Romero\*\*  
Alfonso Bachiller-Soler\*

Dr. Ingeniero Industrial  
Dr. Ingeniero Industrial  
Dr. Ingeniero Industrial

\* UNIVERSIDAD DE SEVILLA. Dpto. de Ingeniería Eléctrica. C/ Virgen de África, 7 - 41011 Sevilla.  
Tfno: +34 954 552830. absilm@us.es

\*\* UNIVERSIDAD DE SEVILLA. Dpto. de Ingeniería Eléctrica. C/ Camino de los Descubrimientos, s/n -  
41092 Sevilla. Tfno: +34 954 481277. plcruz@us.es

Recibido: 20/04/2012 • Aceptado: 06/06/2012

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/5024>

## SCREEN SELECTION FOR THE POWER FREQUENCY MAGNETIC FIELD SHIELDING OF UNDERGROUND POWER CABLES

### ABSTRACT

• In recent years, there is a social concern about the adverse effects derived from the magnetic field generated by power frequency electrical installations near public areas. A good example are underground power cables.

One of the most used techniques to mitigate the magnetic field generated by underground power cables is screen shielding. However, it is difficult to choose the type of screen to use in a particular situation and its dimensions.

The main objective of this paper is to show the recommended steps to select and design a suitable screen for a particular case, taking into account economical and technical aspects to meet the mitigation requirements in the final placement. The case of a 132 kV underground power line is taken as an example to show how these steps can be applied.

The proposed steps are derived from an in-depth review of the most used screen shapes, and from numerous simulations carried out by means of numerical methods, such as the finite elements method, to solve the coupled electromagnetic-thermal problem.

• **Key Words:** underground cables, magnetic field, magnetic shielding, finite elements method, current rating.

### RESUMEN

En los últimos años, la proximidad de instalaciones eléctricas de cierta potencia a zonas habitadas ha sido objeto de gran controversia. Esto se debe fundamentalmente a los posibles efectos nocivos asociados al campo magnético ocasionado por dichas instalaciones. En particular, las líneas subterráneas son un claro ejemplo de esta situación.

Existen varias técnicas y procedimientos para reducir o mitigar el campo magnético generado por dichas líneas subterráneas. Dentro de estas, la más empleada es la instalación de pantallas metálicas en las proximidades del tendido. Sin embargo, debido a la complejidad de estos sistemas, no resulta trivial la determinación de la pantalla más adecuada a cada situación particular.

Por ello, el principal objetivo de este trabajo es establecer una guía básica en la que se destaquen aquellos aspectos clave, tanto económicos como técnicos, para que, cumpliendo con los requisitos solicitados de mitigación del campo magnético, permita seleccionar el tipo de pantalla y sus características. Para mostrar la aplicación de esta guía, y sin pérdida de generalidad, se ha considerado el caso de una línea subterránea de 132 kV.

Esta guía es el resultado de una exhaustiva revisión bibliográfica junto con numerosos análisis de distintas configuraciones habitualmente empleadas, en los que se han empleado herramientas numéricas basadas en el método de los elementos finitos para mostrar la interacción entre los fenómenos térmicos y electromagnéticos que se producen en estos sistemas.

**Palabras Clave:** líneas subterráneas, campo magnético, apantallado magnético, método de los elementos finitos, capacidad de transporte.

## 1. INTRODUCCIÓN

Desde finales de los años '70 se han venido publicando artículos e informes estudiando los posibles efectos nocivos de los campos magnéticos a frecuencia industrial sobre la salud humana. Dichos campos magnéticos son generados por todo tipo de instalaciones eléctricas (líneas aéreas, subestaciones, centros de transformación, etc.), las cuales, en muchos casos, se encuentran próximas a viviendas y a espacios habitados en general. En algunos sectores sociales esta cercanía es motivo de preocupación, llegando en algunos casos a una oposición frontal a la construcción de nuevas instalaciones en las proximidades de sus viviendas.

En este sentido, la *Organización Mundial de la Salud* (OMS) recomienda aplicar el principio de “*prevención prudente*”, en base a estudios que sugieren una posible relación de los campos magnéticos con la leucemia infantil [1]. Este principio recomienda reducir, siempre que sea posible, la exposición de la población a este tipo de campos, promoviendo la investigación para la búsqueda de soluciones que, con un coste razonable, permitan lograr dicho objetivo.

Por otro lado, organizaciones reconocidas por la OMS y la *Unión Europea*, como la *Asociación Internacional para la Protección contra la Radiación* (IRPA) y la *Comisión Internacional para la Protección frente a Radiaciones No Ionizantes* (ICNIRP), han establecido los niveles máximos por encima de los cuales la exposición puede provocar efectos a corto plazo [2]. En concreto, la ICNIRP actualizó recientemente estos límites [3] estableciendo 1000  $\mu\text{T}$  de exposición laboral y 200  $\mu\text{T}$  para el público en general. No obstante, países como Italia, Suiza o algunos estados americanos han redactado normas aún más restrictivas. Sin embargo, en España no existe una normativa específica sobre límites de exposición a campos de frecuencia industrial, empleándose la recomendación 1999/519 del *Consejo Europeo* [4] basado en los límites no actualizados de la ICNIRP. Además, el *Instituto de Seguridad e Higiene en el Trabajo* del *Ministerio de Trabajo* ha publicado dos *Notas Técnicas de Prevención* (NTP) [5,6] relacionadas con los criterios para la evaluación de la exposición a campos magnéticos basadas en lo establecido en el informe de ICNIRP y la *Directiva 2004/40/CE* [7].

A partir de esta situación, y de la cada vez mayor concienciación de las compañías del sector eléctrico, en los últimos años han surgido un gran número de estudios que plantean diversas soluciones para la reducción del campo magnético de instalaciones eléctricas, fundamentalmente orientadas a centros de transformación, líneas aéreas y subterráneas. Un amplio resumen puede encontrarse en [8], siendo las más destacables las siguientes:

- Aumentar la distancia de separación a la zona a proteger (por ejemplo, aumentar la profundidad de

enterramiento en el caso de líneas subterráneas).

- Modificar la distribución geométrica de los conductores y reducir su separación (por ejemplo, cambiar la configuración de un tendido horizontal a forma de trébol).
- Reordenación de las fases en líneas múltiples. Una correcta ordenación espacial de las distintas fases permite obtener campos magnéticos algo más reducidos a cierta distancia.
- Reducir el desequilibrio de corriente entre las fases (la circulación de corrientes de secuencia cero incrementa los niveles de campo magnético).

La reducción lograda mediante estas técnicas suele ser moderada, pudiendo ser insuficiente para situaciones más restrictivas. Para estas situaciones existen otras técnicas basadas en la instalación de elementos adicionales en las proximidades de la misma. Las más relevantes son:

- *Lazos de compensación* [9].

Se trata de uno o varios conductores en forma de bucle cerrado, en los que el campo magnético a mitigar induce una corriente que, a su vez, genera otro campo que cancela al de la instalación. Su eficiencia mejora al insertar condensadores en serie con el lazo (lazo pasivo compensado) o por la utilización de fuentes controladas de intensidad (lazo activo).

- *Pantallas metálicas* [10].

Consiste en la instalación de pantallas de materiales ferromagnéticos o de alta conductividad eléctrica en las proximidades de la fuente de campo magnético, reduciendo el nivel de campo al otro lado de la pantalla.

De ellas, la utilización de pantallas metálicas tiene una mayor aplicabilidad a centros de transformación y líneas subterráneas como el caso de la Fig. (1), debido principalmente a su facilidad de instalación.

Por tanto, dada la proximidad de líneas subterráneas y centros de transformación a zonas habitadas (oficinas, comercios, hogares, etc.), es clara la necesidad de conocer en profundidad las técnicas de mitigación que más se adecuan a estas instalaciones, como son la utilización de pantallas metálicas. Así, el objetivo principal de este trabajo es establecer una guía básica que permita seleccionar fácilmente el tipo de pantalla a emplear en cada situación, determinando sus principales características



Fig. 1: Instalación de pantalla de aluminio en zanja [8]

y dimensiones para alcanzar los requisitos de mitigación del campo magnético solicitados. Para ello se tendrán en cuenta criterios técnicos y económicos para alcanzar los objetivos de reducción con el menor coste posible, y todo ello procurando no afectar a la capacidad de transporte de la línea mitigada. El trabajo será enfocado principalmente a líneas subterráneas por su mayor extensión en zonas urbanas, aunque los resultados son extrapolables a centros de transformación, subestaciones, instalaciones en edificios, etc., mostrando la versatilidad de esta técnica para reducir los niveles de campo magnético a los que se ven sometidos tanto trabajadores en sus puestos de trabajo como el público en general.

## 2. MODELOS Y CASO DE ESTUDIO

### 2.1. PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO

El estudio del mecanismo de apantallado de líneas subterráneas conlleva cierta dificultad, ya que no existe una formulación analítica para resolver el problema. Existen dos mecanismos por los cuales se puede alcanzar la reducción del campo en función del tipo de material empleado en la pantalla [10]:

- *Derivación del flujo magnético*: al emplear materiales de origen ferromagnético (de alta permeabilidad magnética), las líneas de flujo magnético tienden a ser atraídas hacia el interior del material, lo que impide que lleguen a la zona a proteger, como se observa en la Fig. (2a).
- *Inducción de corrientes*: si se utiliza un material de alta conductividad eléctrica, el campo magnético de la línea induce la circulación de corrientes en el interior de la pantalla, las cuales generan un campo que se cancela con el de la línea, reduciéndose el campo en el área a proteger, caso de la Fig. (2b).

Esta interacción del campo en función de las características del material de la pantalla, en combinación con la utilización de perfiles complejos en las mismas, hace necesario abordar el estudio de este tipo de apantallado mediante la resolución directa de las ecuaciones de Maxwell [11]. Por otro lado, existe un fuerte acoplamiento entre fenómenos electromagnéticos y térmicos, ya que ambos mecanismos de mitigación traen consigo la inducción de pérdidas en el

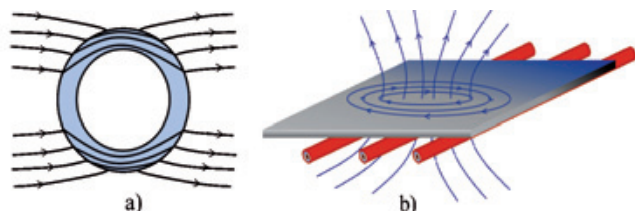


Fig. 2: Mecanismos de mitigación: a) por derivación de flujo magnético, b) por inducción de corrientes

material de las pantallas que pueden ocasionar un aumento en la temperatura de trabajo de los cables, aspecto que puede acortar la vida de los mismos.

Por tanto, la complejidad de la física y la geometría del problema hacen necesaria la utilización de complejas herramientas numéricas para el estudio de este tipo de mitigación, como por ejemplo el método de los elementos finitos (MEF). En este sentido, el presente trabajo se ha desarrollado mediante un software gratuito denominado GetDp [12], que permite resolver de manera acoplada las ecuaciones que gobiernan tanto los fenómenos electromagnéticos como térmicos presentes en estos sistemas. No obstante, siempre es posible realizar algunas simplificaciones en los modelos matemáticos, las cuales, sin pérdida de generalidad, permiten obtener importantes conclusiones con un menor coste computacional. En cualquier caso, cabe destacar que el grado de simplificación a aplicar dependerá de las condiciones particulares del caso bajo estudio. En base a esto, a continuación se detallan las hipótesis realizadas en este trabajo para mostrar, de manera genérica, los principales aspectos a tener en cuenta en la selección y diseño de pantallas.

### 2.2. MODELO ELECTROMAGNÉTICO

La magnitud comúnmente denominada como campo magnético hace referencia al valor eficaz o valor RMS del vector densidad de flujo magnético  $\vec{B}$ . Esta es la magnitud que será evaluada en la zona donde se quiere realizar la mitigación, antes y después del apantallado de la línea. Para su determinación se han realizado las siguientes hipótesis:

- Los conductores de la línea son de longitud infinita, y por tanto el modelo puede analizarse en 2 dimensiones.
- Las propiedades eléctricas de los materiales son constantes, excepto la conductividad eléctrica de la pantalla y de los conductores, la cual depende de la temperatura según la Ec. (1).

$$\sigma(\theta) = \frac{\sigma_0}{1 + \alpha(\theta - 20)} \quad (1)$$

donde  $\theta$  es la temperatura desconocida del material (en  $^{\circ}\text{C}$ ),  $\sigma_0$  su conductividad eléctrica a  $20^{\circ}\text{C}$  (en  $\text{S/m}$ ) y  $\alpha$  el coeficiente de variación con la temperatura (en  $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ).

- La conductividad eléctrica del terreno se considera despreciable.
- Las pérdidas consideradas en el sistema serán las generadas en las resistencias internas de pantallas y conductores, las cuales constituyen los datos de entrada para el modelo térmico acoplado.

El nivel de mitigación obtenido por la pantalla se suele evaluar en términos del denominado factor de reducción (FR), definido según la Ec. (2).

$$FR(x,y)=\frac{\left|\vec{B}_o(x,y)\right|}{\left|\vec{B}_f(x,y)\right|} \tag{2}$$

donde  $\vec{B}_o$  es el valor eficaz de la densidad de flujo magnético en el punto de interés antes de la mitigación, y  $\vec{B}_f$  es el valor en dicho punto después de colocar la pantalla. De esta forma, cuanto mayor sea el valor del FR mayor es el grado de mitigación alcanzado.

2.3. MODELO TÉRMICO

El modelo térmico del sistema apantallado se realiza en base a la teoría de transferencia de calor [13], y se resuelve de manera acoplada con el modelo electromagnético mediante MEF. En este caso se han supuesto las siguientes hipótesis y condiciones de contorno:

- El problema de transferencia de calor puede considerarse en 2 dimensiones.
- Las propiedades térmicas de todos los materiales son constantes.
- La resistividad térmica del terreno se supondrá constante al no considerarse la desecación del terreno.
- La superficie de contacto entre el suelo y el aire exterior se considera como una isoterma a la temperatura del terreno (hipótesis de Kennelly), de acuerdo con la norma UNE 21144 [14] (equivalente a la norma CEI 60287).

En el caso de conductores directamente enterrados en el terreno, la transferencia de calor se da fundamentalmente mediante el mecanismo de conducción, caracterizado por la Ec. (3)

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{1}{\rho}\frac{\partial \theta}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{1}{\rho}\frac{\partial \theta}{\partial y}\right)=-q \tag{3}$$

donde  $\theta$  es la temperatura del material (en K),  $\rho$  la resistividad térmica del mismo (en K·m/W) y  $q$  el flujo de calor por unidad de volumen.

2.4. CASO DE ESTUDIO

Para facilitar la comprensión de este mecanismo de apantallado, la mayor parte de los resultados presentados en este trabajo estarán referidos a un único caso de estudio, tomado simplemente a modo de ejemplo, en el que se considera

un tendido de 132 kV compuesto por tres conductores de cobre de 630 mm² enterrados a 1.25 m de profundidad. La zanja tiene 1 m de ancho y 1.5 m de profundidad. Los cables están dispuestos en configuración horizontal y separados entre sí una distancia de 25 cm, como muestra la Fig. (3). Los valores de los parámetros térmicos, eléctricos y geométricos de los cables se muestran en la Tabla 1.

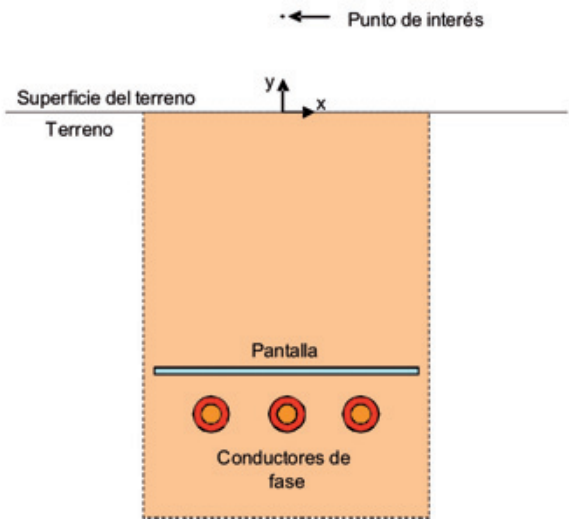


Fig. 3: Configuración del caso de estudio

Por otro lado, la resistividad térmica del terreno y su temperatura son de 1 K·m/W y 20 °C, respectivamente. En esta situación, imponiendo además como restricción una temperatura máxima en el aislamiento de 90 °C, la intensidad máxima que soporta la línea en régimen permanente es determinada por GetDp mediante un proceso iterativo que tiene en cuenta las hipótesis realizadas tanto en el modelo térmico como electromagnético, dando como resultado un valor de 961 A, en concordancia con los cálculos basados en la norma UNE 21144.

3. PROCESO DE SELECCIÓN DE LA PANTALLA

A la hora de seleccionar una pantalla para una determinada instalación es necesario tener en cuenta una serie de aspectos, algunos de los cuales dependen fuertemente de las características de la fuente a mitigar. Por ello, a continuación se detallan algunos de los pasos a tener en cuenta durante el proceso de selección y diseño de la pantalla.

|                                                                   |         |                                                |                    |
|-------------------------------------------------------------------|---------|------------------------------------------------|--------------------|
| Diámetro del conductor de cobre (mm)                              | 30,2    | Conductividad eléctrica del cobre (20°C) (S/m) | 58·10 <sup>6</sup> |
| Diámetro externo del cable (mm)                                   | 74      | Resistividad térmica del cobre (K·m/W)         | 0,0025             |
| Espesor del aislamiento XLPE (mm)                                 | 18,25   | Resistividad térmica del aislamiento (K·m/W)   | 3,5                |
| Espesor de la pantalla de cobre (mm)                              | 0,45    | Sección de la pantalla de cobre (mm²)          | 95                 |
| Espesor de la cubierta de PVC (mm)                                | 3,2     | Resistividad térmica de la cubierta (K·m/W)    | 6                  |
| Coeficiente de temperatura del cobre $\alpha$ (°C <sup>-1</sup> ) | 0,00393 |                                                |                    |

Tabla 1: Parámetros de los cables

3.1. PERFIL CERRADO O ABIERTO DE LA PANTALLA

La configuración del tendido y su posición respecto a la pantalla condicionan tanto el tipo de perfil como el material a emplear en la pantalla, ya que el modo en que interactúan el campo y la pantalla en cada caso puede ser más propicio para el empleo de uno u otro mecanismo de mitigación (derivación del flujo magnético o inducción de corrientes) [10]. En este sentido, para configuraciones en forma de trébol las pantallas abiertas de material conductor dan pobres resultados [Fig. (4a)], debido fundamentalmente al bajo nivel de corrientes que el campo generado por esta configuración induce en la pantalla. Sin embargo, las pantallas cerradas de materiales ferromagnéticos (como el acero) “atrapan” las líneas de flujo magnético hacia el interior de la pantalla, como se observa en la Fig. (4b), obteniéndose resultados notablemente mejores.

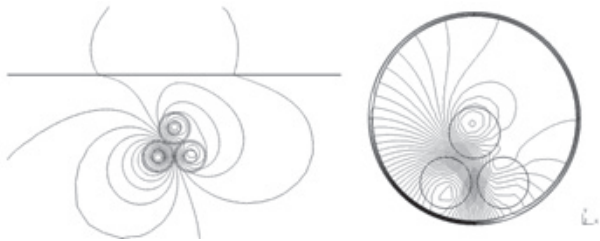


Fig. 4: Líneas de flujo magnético en presencia de pantalla plana conductora (a) y pantalla cerrada ferromagnética (b)

Por el contrario, para tendidos en formación horizontal es más apropiado utilizar pantallas abiertas de materiales conductores, ya que proporcionan valores más elevados del

FR, y de manera muy uniforme, sobre la zona a proteger situada por encima de la pantalla, mientras que las pantallas ferromagnéticas abiertas concentran su mayor eficiencia en las proximidades de la pantalla, tal y como se muestra en la Fig. (5).

En base a estas consideraciones, el resto de este trabajo se centrará en el análisis de tendidos en configuración horizontal, ya que, en comparación con la configuración en forma de trébol, es el caso más desfavorable desde el punto de vista magnético al generar un mayor nivel de campo. Se tendrán en cuenta únicamente perfiles de pantalla abiertos adecuados para esta configuración del tendido, empleándose aluminio como material de alta conductividad eléctrica para las pantallas (método de inducción de corrientes). Los parámetros eléctricos y térmicos del aluminio se muestran en la Tabla 2. Otros materiales como el cobre se han descartado por su elevado precio.

| Material | $\sigma$ (S/m)  | $\mu_r$ | $\rho$ (K·m/W) | $\alpha$ (°C <sup>-1</sup> ) |
|----------|-----------------|---------|----------------|------------------------------|
| Aluminio | $35 \cdot 10^6$ | 1       | 0,00625        | 0,004                        |

Tabla 2: Parámetros del material para pantallas

En caso de utilizar pantallas cerradas los pasos a realizar son similares. Sin embargo, se deben tener en cuenta otros aspectos derivados de la utilización de estos tipos de pantallas, como por ejemplo la mayor dificultad en su instalación, la dificultad de acceso en caso de averías en el tendido, el mayor calentamiento que sufren los cables al quedar encerrados dentro de la pantalla, etc.

3.2. TIPO DE PERFILES ABIERTOS

En función de los requisitos de mitigación, es posible seleccionar distintos tipos de perfiles de pantallas abiertas que se utilizan habitualmente en líneas subterráneas, y que van desde una simple plancha de aluminio situada horizontalmente sobre el tendido, hasta configuraciones más elaboradas en forma de U invertida o de H como se muestra en la Fig. (6) [8]. Esta complejidad en los perfiles trae consigo un incremento en la reducción alcanzada, como se puede observar en la Fig. (7) para el caso de estudio analizado, de modo que los mejores resultados se obtienen con la configuración en forma de H.

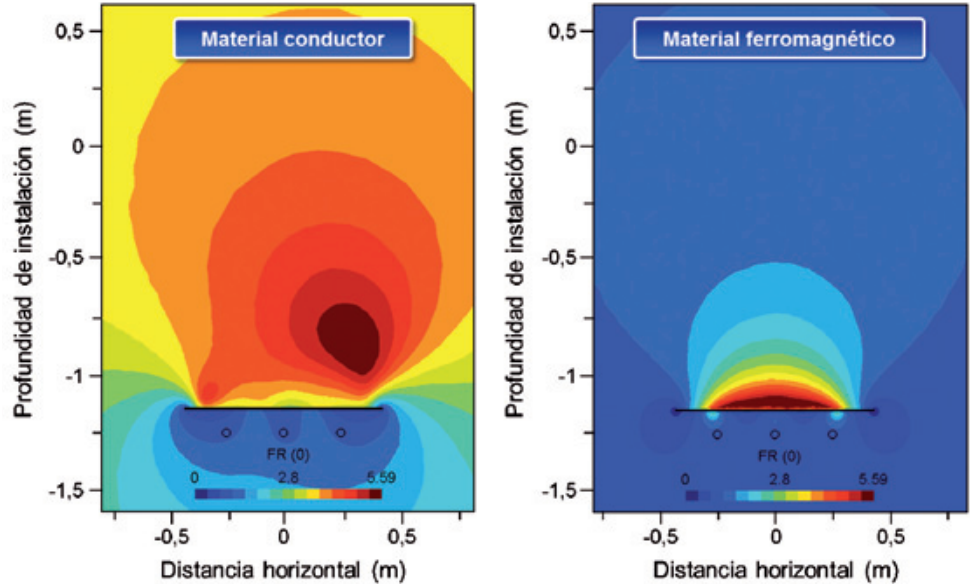


Fig. 5: Mapas de factores de reducción proporcionados por una pantalla horizontal de material conductor y otra de material ferromagnético aplicadas al caso de estudio

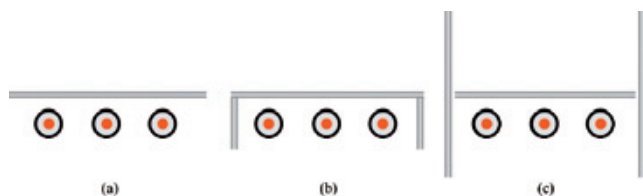


Fig. 6: Perfiles en placa horizontal (a), U invertida (b) y forma de H (c)

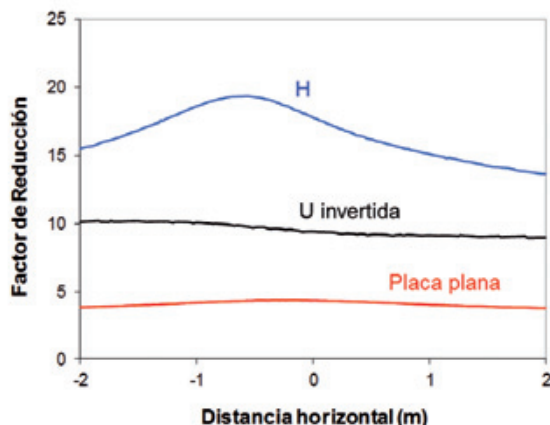


Fig. 7: Factor de reducción (FR) a 1 m del suelo para placa horizontal, en U invertida y en forma de H

Este resultado se debe fundamentalmente a la mayor cantidad de material empleado, pero también a que en las configuraciones en forma de U y H los tramos laterales (ausentes en la placa horizontal) pueden comportarse como lazos de compensación. Esto ocurre únicamente si se dan las siguientes condiciones: existe un buen contacto eléctrico entre las planchas laterales de los sucesivos tramos que forman la pantalla en su recorrido y, además, existe al inicio y al final del tramo apantallado algún tipo de conexión eléctrica que cierre el circuito por el que circula la corriente inducida en los tramos verticales de la pantalla, rodeando al tendido como muestra la Fig. (8).

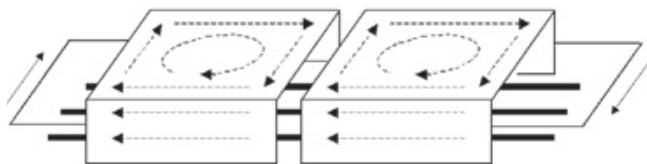


Fig. 8: Conexiones para la presencia de efecto lazo en pantalla en forma de U invertida

Estas condiciones derivan en la necesidad de realizar trabajos de soldadura en la zanja que complican en cierta forma la instalación de las pantallas.

### 3.3. DIMENSIONES Y PROXIMIDAD AL TENDIDO

En general, la eficiencia de las pantallas depende en gran medida de sus dimensiones y de su ubicación respecto al tendido. De igual forma, estos parámetros también afectan al

nivel de pérdidas inducidas en la misma, y por consiguiente, en la temperatura de trabajo de los cables. En este sentido, existen estudios que realizan un profundo análisis paramétrico para analizar la influencia de cada uno de estos parámetros en la reducción alcanzada y la temperatura del tendido [15].

En relación con la mitigación proporcionada por la pantalla, como regla general es fácil determinar que a mayores dimensiones de la pantalla mejores resultados se obtienen. Esto se puede apreciar claramente en la Fig. (9a) para el caso de una pantalla plana horizontal de aluminio instalada en el caso de estudio analizado, donde se observa la evolución del FR en función de su espesor. Este resultado es extrapolable al resto de perfiles.

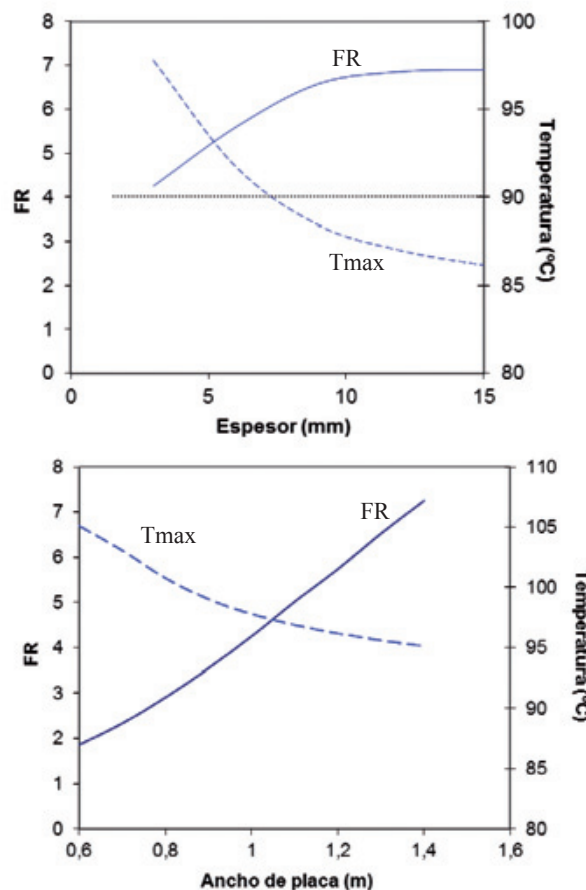


Fig. 9: Evolución del FR y la temperatura máxima en el tendido cuando: a) varía el espesor de una pantalla horizontal de 1 m de ancho situada a 10 cm del tendido, b) cambia el ancho de la misma pantalla considerando un espesor de 3 mm

Si bien ocurre lo mismo al incrementar las otras dimensiones de la pantalla [como por ejemplo su ancho, tal y como muestra la Fig. (9b)], éstas suelen estar restringidas por las dimensiones de la zanja, por lo que el único grado de libertad que suele quedar es el espesor de las planchas empleadas. De igual forma, el aumento de las dimensiones de la pantalla ayuda a disminuir el impacto térmico de esta sobre el tendido, tal y como se muestra también en la Fig. (9), donde se aprecia cómo al aumentar el espesor y el ancho

de la pantalla horizontal se reduce la temperatura máxima alcanzada por los cables.

Por otro lado, en relación a la separación de la pantalla respecto al tendido, también es fácil deducir que cuanto menor sea dicha separación mayores serán las corrientes inducidas en la misma y, por tanto, mayor el efecto mitigador. Un ejemplo se muestra en la Fig. (10) para el caso de una pantalla en U. Sin embargo, esto también implica mayores pérdidas resistivas en la pantalla y, como consecuencia, una mayor temperatura en los cables que pueden sobrepasar su límite térmico [90 °C para el caso de la Fig. (10)].

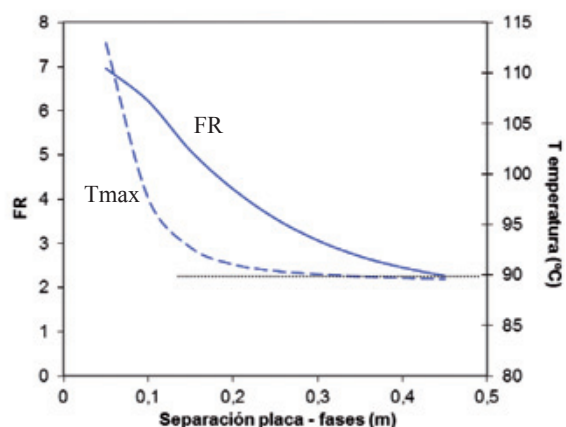


Fig. 10: Evolución del FR y la temperatura máxima en el tendido al variar la separación vertical entre una pantalla en U invertida y la línea

A pesar de esto, hay que destacar que las pantallas están realizadas con materiales de alta conductividad térmica, por lo que tienden a canalizar el calor generado en los cables hacia zonas de menor temperatura, tal y como se muestra en la Fig. (11) para el caso de una pantalla en forma de H.

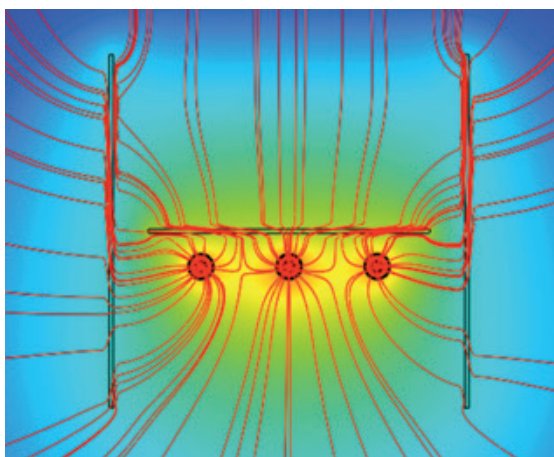


Fig. 11: Líneas de flujo de calor en línea con pantalla en forma de H

Por lo tanto, en la pantalla se presentan dos fenómenos contrapuestos: el calentamiento de los cables por las pérdidas resistivas inducidas en la pantalla y la evacuación del calor

generado en los cables por la alta conductividad térmica de los metales que la forman. El predominio de un efecto sobre el otro depende directamente de las dimensiones de la pantalla y de su separación al tendido. En consecuencia, es necesario realizar un profundo análisis paramétrico que permita encontrar los valores más adecuados de dichos parámetros. En cualquier caso, cuanto mayor cantidad de material tenga la pantalla, menores serán las pérdidas y mayor será el efecto de refrigeración que esta realice sobre el tendido.

A partir de estos resultados queda clara la importancia de la correcta selección de las dimensiones de la pantalla y su separación al tendido, ya que con ello no sólo se consiguen alcanzar los requerimientos de mitigación fijados, sino que además es posible lograrlos sin llegar a afectar a la capacidad de transporte de la línea.

Finalmente, hay que destacar que, en el caso de cables instalados bajo tubo, las dimensiones de éste limitan la proximidad del tramo horizontal de la pantalla al tendido, y por ende su efectividad. Por tanto, en estos casos es conveniente considerar la utilización de los perfiles de mayor eficiencia (como la U invertida o la H) para contrarrestar la disminución del FR por la mayor separación a la fuente a mitigar. Además, en esta situación la temperatura de los cables pueden elevarse notablemente al estar encerrados en el interior de los tubos, tal y como se aprecia en la Fig. (12), por lo que la forma de radiador de estas pantallas ayudarán a una mejor evacuación del calor y, por tanto, reducir la temperatura en la línea.

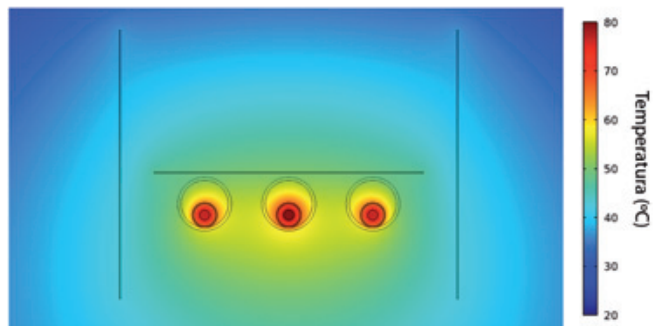


Fig. 12: Pantalla en forma de H sobre línea enterrada bajo tubo

### 3.4. ESTIMACIÓN DE COSTES

Otro aspecto importante a considerar en el proceso de diseño y selección de una pantalla es evidentemente su coste. Sin embargo, hay que tener en cuenta que el coste no es únicamente el asociado a la compra del material y su instalación, sino que además hay que tener en cuenta el coste de las pérdidas inducidas en la misma durante los años de explotación del tendido mitigado. Este coste ocasionado por las pérdidas puede determinarse según la sección 3-2 de la Norma 21144 [14].

Teniendo en cuenta todo esto, queda claro que una mayor cantidad de material en la pantalla implica un mayor desembolso inicial en materia prima. Sin embargo,

aumentando la sección de la planchas se consigue también reducir el nivel de pérdidas y, por tanto, su coste. Por ello es interesante analizar la evolución del coste total a largo plazo (incluyendo coste del material y pérdidas) en función del espesor del material. Esto se muestra en la Fig. (13) y la Tabla 3 para el caso de estudio propuesto en el supuesto de 30 años de operación de una línea con una pantalla plana horizontal de aluminio (de 1 m de ancho y situada a 10 cm del tendido) y una pantalla en forma de H (con placas de 80 cm de longitud, estando los tramos verticales separados 1 m y el tramo horizontal a 10 cm del tendido).

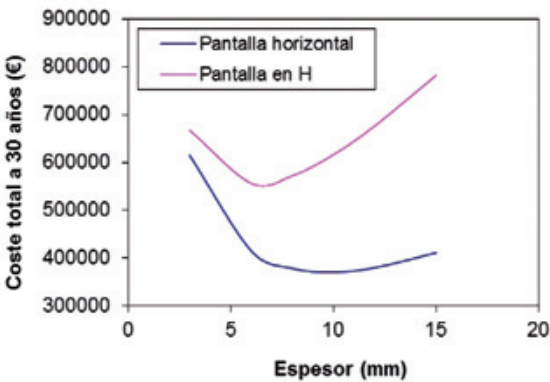


Fig. 13: Coste total a 30 años de dos pantallas de aluminio en función de su espesor

En el cálculo se han supuesto los siguientes datos:

- Corriente por la línea: 961 A
- Precio de la energía el primer año: 0.1 €/kWh
- Precio de una plancha de aluminio de 3 mm x 1 m x 2 m: 107 €

- Longitud del tramo apantallado: 1000 m
- Tasa anual de depreciación: 5%
- Aumento anual de la carga: 0.5 %
- Aumento anual del coste de la energía (precio del kWh): 2%
- Coste anual para cubrir las pérdidas: 0.03 €/W€ año

Como se puede apreciar, en ambas configuraciones un incremento del espesor por encima de 3 mm no sólo mejora el FR y la temperatura máxima en los cables, sino que además disminuye las pérdidas lo suficiente para que el coste total a 30 años sea más reducido, llegándose a dar un mínimo alrededor de los 10 mm en el caso de la pantalla horizontal y en torno a 7 mm en la pantalla en forma de H. A partir de este mínimo la reducción del coste en las pérdidas no es suficiente para compensar el sobre coste del material, volviendo a incrementarse el coste total.

Por tanto, queda clara la necesidad de hacer un estudio pormenorizado de cada situación a fin de obtener el coste óptimo que permita lograr los requerimientos de mitigación solicitados en el lugar de instalación, y todo ello afectando lo menos posible a la capacidad de transporte del tendido a mitigar, para lo cual habrá de llegarse a una solución de compromiso entre coste del material, FR y coste de las pérdidas.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se han comentado los principales aspectos relacionados con las técnicas de mitigación del campo magnético ocasionado por líneas subterráneas, destacando la instalación de pantallas metálicas como principal técnica

| Placa plana horizontal |      |                |                 |                            |                 |           |
|------------------------|------|----------------|-----------------|----------------------------|-----------------|-----------|
| Espesor (mm)           | FR   | Pérdidas (W/m) | Coste Alum. (€) | Coste pérdidas 30 años (€) | Coste total (€) | Tmax (°C) |
| 3                      | 4,29 | 28,17          | 53.556          | 561.028,60                 | 614.588,89      | 98,44     |
| 6                      | 5,68 | 15,45          | 107.112         | 307.699,39                 | 414.817,07      | 91,84     |
| 8                      | 5,93 | 11,82          | 142.816         | 235.404,97                 | 378.226,90      | 89,88     |
| 10                     | 6,10 | 9,66           | 178.520         | 192.386,80                 | 370.912,90      | 88,67     |
| 12                     | 6,22 | 8,31           | 214.224         | 165.500,45                 | 379.730,66      | 87,86     |
| 15                     | 6,34 | 7,19           | 267.780         | 143.194,73                 | 410.981,07      | 87,1      |

| Pantalla en forma de H |       |                |              |                            |                 |           |
|------------------------|-------|----------------|--------------|----------------------------|-----------------|-----------|
| Espesor (mm)           | FR    | Pérdidas (W/m) | Coste Al (€) | Coste pérdidas 30 años (€) | Coste total (€) | Tmax (°C) |
| 3                      | 19,83 | 27,04          | 128.534,4    | 538.523,72                 | 667.077,95      | 96,89     |
| 6                      | 33,33 | 15,025         | 257.068,8    | 299.235,17                 | 556.337,30      | 90,41     |
| 8                      | 37,10 | 11,51          | 342.758,4    | 229.231,07                 | 572.026,56      | 88,37     |
| 10                     | 39,66 | 9,42           | 428.448,0    | 187.607,01                 | 616.094,66      | 87,06     |
| 12                     | 41,82 | 8,12           | 514.137,6    | 161.716,44                 | 675.895,86      | 86,14     |
| 15                     | 43,40 | 6,98           | 642.672,0    | 139.012,41                 | 781.727,81      | 85,24     |

Tabla 3: FR, temperatura máxima y costes para pantalla plana y pantalla en H en función del espesor de la cha

de mitigación en este tipo de instalaciones. En este sentido, se han considerado tres perfiles abiertos de aluminio (placa horizontal, U invertida y en forma de H), configuraciones que resultan ser las más adecuadas para la mitigación de líneas en formación horizontal. Por su parte, las pantallas de tipo cerrado son más adecuadas para tendidos en forma de trébol, siendo más efectivas cuando se realizan con materiales ferromagnéticos.

Dado el número de parámetros de estos sistemas, no es trivial la elección de uno u otro tipo de pantalla, y menos aún sus dimensiones para alcanzar los requerimientos de mitigación necesarios en el lugar de emplazamiento. Por ello, la utilización de herramientas basadas en el método de los elementos finitos ha permitido poner de manifiesto la influencia de estos parámetros en el nivel de reducción alcanzado en la zona a proteger. Como consecuencia de los resultados obtenidos, se puede concluir que se obtienen mejores resultados cuanto mayor es el tamaño de la pantalla. Por ello, la configuración de mayor eficiencia resulta ser el perfil en H. Por otro lado, si además se reduce la separación entre la pantalla y el tendido, la mitigación obtenida se incrementa de manera notable. No obstante, esto último repercute negativamente en el nivel de pérdidas que se inducen en la pantalla, lo que ocasiona un incremento de la temperatura de los conductores y, por tanto, reduce su vida útil y obliga a reducir la capacidad de transporte del tendido mitigado. Sin embargo, del estudio realizado también se concluye que incrementar las dimensiones de la pantalla favorece la evacuación del calor del sistema, lo que en ocasiones da lugar a un enfriamiento del tendido que evita la reducción de su capacidad.

Del análisis económico llevado a cabo también se desprende que el aumento del espesor de la pantalla puede incluso reducir el coste a largo plazo de la misma, debido a la disminución que sufren las pérdidas inducidas en la pantalla y, por tanto, su coste total durante los años de explotación del tendido. En consecuencia, el perfil y las dimensiones de la pantalla a instalar en cada situación deberán obtenerse como una solución de compromiso entre coste, cumplimiento de los requisitos de mitigación y su impacto sobre la capacidad de transporte de la línea.

Finalmente, hay que indicar que el análisis realizado para la selección de la pantalla más adecuada, así como las principales conclusiones de este trabajo, son extrapolables a otro tipo de instalaciones similares en las que existan conductores que discurren paralelos, como por ejemplo centros de transformación, instalaciones en edificios, etc.

## 6. AGRADECIMENTOS

El presente estudio ha sido desarrollado al amparo del proyecto ENE 2010-18867 del Ministerio de Ciencia y Tecnología.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] *Environmental Health Criteria 238. Extremely low frequency fields*. World Health Organization (WHO). Geneva, 2007. ISBN: 978-92-4-157238-5
- [2] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP), "ICNIRP guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic field (up to 300 GHz)". *Health Physics*. 1998. Vol. 74. n1. 4. p. 494-522.
- [3] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP), "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic field (1 Hz t 100 kHz)". *Health Physics*. December 2010. Vol. 99. nº. 6. p. 818-836.
- [4] Unión Europea. Recomendación del Consejo 1999/519/CE de 12 de julio de 1999. *Diario Oficial de la Unión Europea*, 30 de julio de 1999. L199, p. 59.
- [5] *Campos electromagnéticos: evaluación de la exposición laboral*. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. Notas Técnicas de Prevención 894.
- [6] *Campos electromagnéticos entre 0 Hz y 300 GHz: criterios ICNIRP para valorar la exposición laboral*. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. Notas Técnicas de Prevención 698.
- [7] Unión Europea. Directiva 2004/40/CE, de 29 de abril de 2004. *Diario Oficial de la Unión Europea*, 24 de mayo de 2004. L 159/1.
- [8] *Guidelines for Mitigation Techniques of Power-Frequency Magnetic Fields Originated from Electric Power Systems*. CIGRE WG. C4.204, TB-373, 2009.
- [9] Cruz P, Riquelme J, del Pino JC, et al., "A comparative analysis of passive loop-based magnetic field mitigation of overheads lines", *IEEE Trans. Power Delivery*. July 2007. Vol. 22, no. 3, p. 1773-1781.  
<http://dx.doi.org/10.1109/TPWRD.2007.899784>
- [10] Hasselgren L, Luomi J, "Geometrical aspects of magnetic shielding at extremely low frequencies", *IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility*. August 1995. Vol. 37, No. 3.
- [11] Plonus A. *Electromagnetismo aplicado*. Pujal Carrera M (traductor). Barcelona: Editorial Reverté S. A., 1994. ISBN: 84-291-3063-2
- [12] P. Dular, C. Geuzaine, *GetDp reference manual: the documentation for GetDp, a general environment for the treatment of discrete problems* [en línea]. Disponible en web: <http://www.geuz.org/getdp/>
- [13] Incropera F, De Witt D. *Fundamentos de transferencia de calor*. Palos Báez E (traductor). 4ª edición. México: Prentice Hall Iberoamericana, 1999. ISBN: 970-17-0170-4
- [14] AENOR. *Cables eléctricos. Cálculo de la intensidad admisible*. UNE 21144. Madrid. AENOR, 1997.
- [15] del Pino JC, Cruz P, "Influence of different types of magnetic shields on the thermal behaviour and ampacity of underground power cables", *IEEE Trans. Power Delivery*. July 2011. Vol. 26, no. 4, p. 2569-2667.  
<http://dx.doi.org/10.1109/TPWRD.2011.2158593>