

**CE C3 – DESEMPEÑO AMBIENTAL DEL SISTEMA****MITIGACIÓN DE CAMPO MAGNÉTICO EN INSTALACIONES ELÉCTRICAS
UTILIZANDO PLACAS METÁLICAS**

C. WALL*
IITREE-LAT-FI-UNLP
Argentina

B. BARBIERI
IITREE-LAT-FI-UNLP
Argentina

P. ARNERA
IITREE-LAT-FI-UNLP
Argentina

Resumen – El objetivo del presente trabajo es evaluar la eficacia de propuestas de mitigación del campo magnético originado por los conductores de una línea de transmisión de energía eléctrica.

La propuesta a implementar es interponer entre la instalación eléctrica y el área a proteger, diferentes blindajes pasivos y abiertos realizados con placas de materiales metálicos de uso habitual en instalaciones eléctricas. El sentido y la fase de las corrientes inducidas en las placas es tal que tiende a mitigar parcialmente el campo magnético producido por las corrientes de los conductores de fase.

Se considera también el efecto producido por la presencia de torres metálicas, emplazadas en el entorno en donde se pretende mitigar el campo magnético.

El enfoque seguido en el estudio realizado consiste en analizar el problema a partir de simulaciones numéricas. De este modo, se analizan los efectos del espesor del material, la conductividad eléctrica y la permeabilidad magnética del material utilizado para el blindaje.

Obtenida una buena representación del material a utilizar en las placas, se analiza un modelo que incluye el efecto de blindaje de estas.

Además se determinan las dimensiones mínimas de las placas que garantizan valores de campo magnético compatibles con la legislación vigente en la República Argentina (Res. SE 77/1998) y se estudian distintas variantes geométricas y eléctricas del problema.

Los cálculos se realizan considerando el Método de Elementos Finitos (MEF), el cual se encuentra implementado en un paquete de códigos comercial que ha sido utilizado a nivel mundial en varias oportunidades en el estudio de problemas de blindaje de campos magnéticos de frecuencia industrial.

Palabras clave: Campo magnético, Mitigación, Elementos Finitos, Mediciones y Simulación

1 INTRODUCCIÓN

La existencia de campo magnético de frecuencia industrial está asociado a los sistemas que generan, transmiten y distribuyen la energía eléctrica.

Los valores máximos de campo magnético producidos por las instalaciones de las empresas eléctricas se encuentran en las inmediaciones de las estaciones transformadoras, líneas de transmisión, cables subterráneos, puestos de transición, líneas aéreas y cables de distribución.

En las áreas de acceso público, la magnitud del campo magnético de frecuencia industrial generado por las instalaciones de las empresas eléctricas debe permanecer por debajo de ciertos límites establecidos en las reglamentaciones vigentes. En la República Argentina según [1] y [2], el valor máximo de inducción magnética permitido es 25 μ T.

Una estrategia para reducir el campo magnético en una región específica consiste en aprovechar las propiedades de los materiales metálicos (conductividad: σ y permeabilidad: μ) para alterar la distribución espacial del campo magnético producido por una fuente dada [3][4].

Este método requiere la instalación de pantallas metálicas entre la fuente de campo y la zona de interés. Pero existen varias posibilidades, dependiendo de las características de la instalación.

Las pantallas metálicas suelen estar compuestas de láminas delgadas, que pueden disponerse como una superficie abierta (blindaje abierto) o para formar una superficie que encierra un volumen de espacio (blindaje cerrado).

Dos mecanismos físicos independientes pueden contribuir al blindaje magnético de Frecuencias Extremadamente Bajas, considerando los materiales. Los fenómenos físicos involucrados en los efectos de apantallamiento son las corrientes de Foucault en los materiales conductores y, principalmente, el comportamiento ferromagnético en materiales de alta permeabilidad.

Cuando se disponen pantallas metálicas en las proximidades de los conductores de fase de líneas o cables, estas pueden provocar un efecto de mitigación del campo magnético generado por los conductores de fase. Dependiendo de las características de las placas se pueden obtener diferentes resultados [3][4].

Una placa de material de alta permeabilidad puede derivar el flujo, modificando la distribución de las líneas de campo magnético, sin que sea significativo el efecto de corrientes inducidas.

Una placa de material conductor (por ejemplo cobre o aluminio), puede proporcionar blindaje a través de corrientes inducidas.

En general para campos originados por corrientes alternas, el apantallamiento se lleva a cabo mediante configuraciones que utilizan materiales que tienen ambas propiedades, permeabilidad μ mayor que μ_0 y conductividad eléctrica lo suficientemente alta como para que se pongan de manifiesto los efectos de corrientes inducidas.

En este trabajo se describen los resultados encontrados experimentalmente y los obtenidos mediante simulaciones numéricas. Se analiza cómo se altera la distribución del nivel de campo magnético, producido por circuitos recorridos por corrientes de 50 Hz, ante la presencia de blindajes. Estos blindajes son realizados con placas metálicas empleadas en la protección mecánica de puestos de transición [5].

Para el análisis se implementó en laboratorio un sistema de conductores con geometría y corriente de magnitud controlada. Se realizaron determinaciones del nivel de campo en el entorno del sistema sin la presencia de las placas de blindaje y luego con las mismas. Los resultados obtenidos se utilizan a fin de validar el modelo numérico de simulación mediante el método de elementos finitos en 3D.

Una vez validado el modelo se analizó el caso de un puesto de transición típico, correspondiente a una simple terna de línea aérea – cable subterráneo en 132 kV. Los cálculos se realizan contemplando distintas alternativas.

2 METODOLOGÍA

2.1 Generalidades

La metodología empleada consistió en llevar a cabo simulaciones por medio de un software, utilizado a nivel internacional, para el cálculo de campos electromagnéticos. Este software utiliza el método de los elementos finitos (MEF) para resolver este tipo de problemas.

Los procedimientos de medición, de campos magnéticos producidos por líneas e instalaciones de potencia, se encuentran normalizados por las normas IEEE 644-1994 [6] e IEC 61786:1998 [7]. Estas sugieren dos formas distintas de cuantificar el campo magnético, una para los medidores de un solo eje (con una sola bobina) y otra para los medidores de tres ejes, con tres bobinas ortogonales entre sí. En ambos casos se supone que la variación de las componentes del campo es del tipo senoidal.

Según la norma, la indicación de un medidor de tres ejes, llamada campo resultante (B_R), queda definida según la ecuación (1).

$$B_R = \sqrt{B_X^2 + B_Y^2 + B_Z^2}, \quad (1)$$

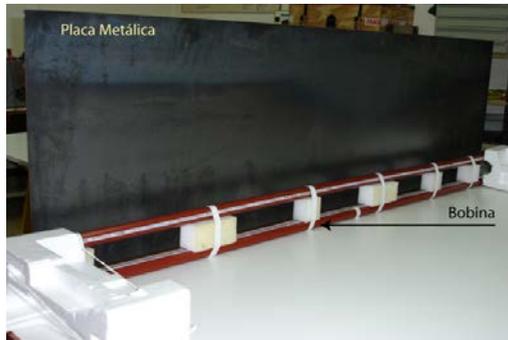
donde B_X , B_Y y B_Z son los valores eficaces de las componentes que definen al campo en cada una de las tres direcciones ortogonales del espacio

Los campos calculados y medidos en el presente trabajo siguen las recomendaciones de la norma para medidores de tres bobinas. Para determinar B_R en una simulación, primero se debe calcular el valor eficaz de cada una de las tres componentes espaciales que definen al campo: B_X , B_Y y B_Z . Luego se deben combinar los resultados como indica la ecuación (1) para obtener B_R .

2.2 Experiencia de laboratorio

El primer paso consistió en validar la simulación numérica. Para esto se implementó una geometría que resultara similar a los casos reales y que a su vez pudiera implementarse prácticamente con el máximo grado de control de sus parámetros tanto geométricos como eléctricos.

Para las determinaciones experimentales se preparó una configuración que se ajustó a la geometría y excitación eléctrica igual a la empleada en las simulaciones numéricas como se muestra en la Fig. 1. En la Fig. 2 se presenta una imagen con el modelo de cálculo correspondiente.



a) Vista del lado de la bobina



b) Vista del lado de medición

Fig. 1. Foto del modelo experimental de espira y placa de blindaje.

Para que los resultados fueran comparativos, en todos los casos verificados se mantuvo por la espira generadora de campo una corriente de 200 A y 50 Hz.

Se utilizaron placas de 2 m de largo y 1 m de alto con diferentes espesores (e), características de conductividad eléctrica (σ), permeabilidad relativa (μ_r) y profundidad de penetración (δ) en 50 Hz. Las placas se dispusieron paralelas a la espira a 0,1 m de la misma.

A los efectos de este trabajo, sólo se presentan algunos de los casos analizados que se vuelcan en la Tabla I.

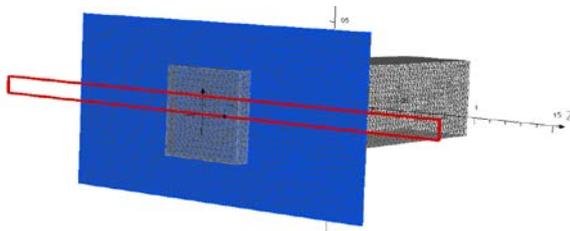


Fig. 2. Modelo de simulación de espira (Rojo) y placa de blindaje (Azul).

Tabla I. Resumen de los valores experimentales

Material	e [mm]	σ [S/m]	μ_r	δ @ 50 Hz
Aluminio	1,5	$35 \cdot 10^6$	1	12 mm
Hierro	1,5	$8,4 \cdot 10^6$	260	1,5 mm
Hierro	2,5	$8,4 \cdot 10^6$	260	1,5 mm

En la Fig. 3 se presentan los resultados obtenidos en mediciones y simulaciones, sin placa y para las placas indicadas en la Tabla I. Los resultados obtenidos están dentro del 20% de lo esperado.

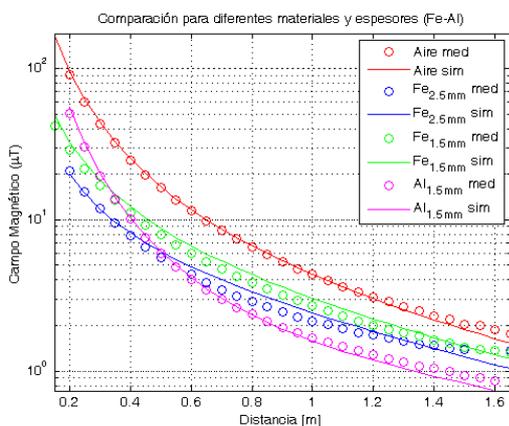


Fig. 3. Campo magnético medido y simulado.

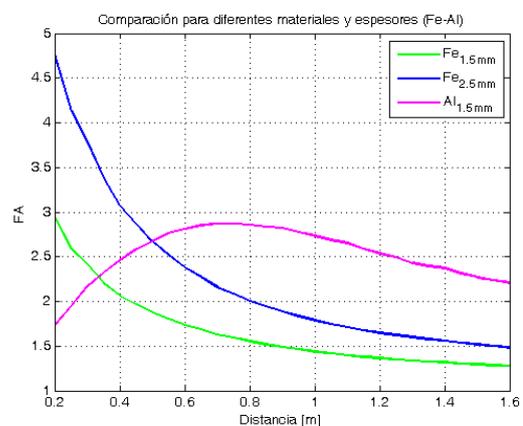


Fig. 4. Factor de apantallamiento (FA).

En la Fig. 4 se presentaron los valores del Factor de Apantallamiento correspondientes (FA: relación entre valores de campo sin mitigación sobre los valores con mitigación).

Una vez verificado el manejo del software mediante la experimentación práctica, el segundo paso consistió en implementar la simulación del problema real planteado.

3 CASOS ANALIZADOS

3.1 Puesto de transición

En las áreas urbanas se pueden encontrar puestos de transición entre Líneas Aéreas (LA) y Cables Subterráneos (CS), estos puestos de transición pueden ser de diferentes tipos, como ser transiciones entre LA-CS, esto es la LA continua su traza en forma de CS, o bien se encuentran derivaciones de la LA en forma de T, esto es la LA continua su traza como tal, pero en alguna de sus estructuras se instala una derivación por medio de CS. En este trabajo se considera un puesto con una derivación en "T".

En la Fig. 5 se presenta una imagen de las instalaciones, en color rojo se aprecian los conductores de las fases y en color gris la estructura metálica y en anaranjado la protección mecánica. En la Fig. 6 se presenta una vista en planta a la altura de la protección mecánica, en la que se indican las dimensiones.

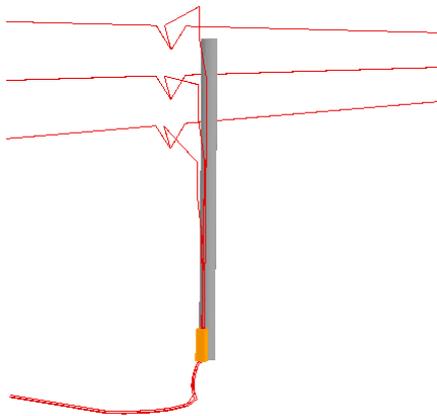


Fig. 5. Vista de las instalaciones.

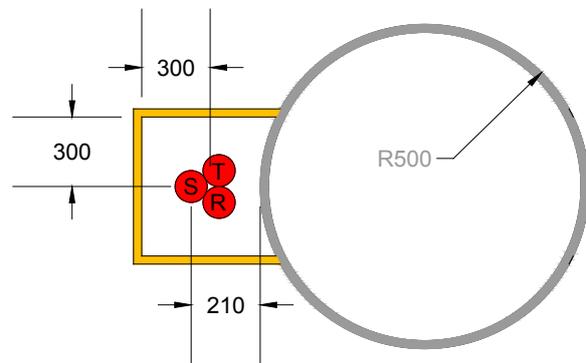


Fig. 6. Vista en planta a la altura de la protección mecánica.

La proximidad de estas instalaciones al área pública hace que en algunas circunstancias resulte necesario implementar medidas de mitigación, las cuales se pueden implementar de diferentes maneras, una de ellas es aprovechar las instalaciones de protecciones mecánicas, que se instalan para preservar la integridad de los conductores de fases.

Si las protecciones mecánicas se realizan por medio de placas metálicas y fuera necesario mitigar los valores de campo magnético, se pueden considerar las características eléctricas de las placas y a partir de ellas dimensionarlas de forma tal de lograr en el área pública, valores adecuados de campo magnético. Además se debe considerar el efecto de la presencia de la estructura metálica tubular.

Se analizan los valores de campo magnético que se generan en un puesto de transición, en 132 kV simple terna. En estas condiciones se consideran los valores de campo magnético debidos a la LA, al CS y la transición. En la Fig. 7 se presenta una imagen con la distribución de corrientes por los conductores de fase en la LA (Negro y Azul) y la que se deriva por el puesto de transición al CS (Rojo).

3.2 Materiales considerados

En primer lugar se consideran únicamente los conductores de fase, sin elementos metálicos en el entorno (Caso 0). Luego se contempló la presencia de la estructura metálica, con sus características (Caso 1).

A partir de los resultados obtenidos, se considera la implementación de la protección mecánica con diferentes materiales. El primer material metálico considerado es de uso habitual en este tipo de instalaciones (Caso 2). Este tipo de placa posee valores bajos de conductividad y permeabilidad.

La segunda variante consiste en considerar placas de Al de diferentes espesores para la protección 2,5 mm (Caso 3) y 5,0 mm (Caso 4), este material tienen como principal características su alto valor de conductividad, la permeabilidad relativa es igual a 1.

La tercera variante consistió en considerar la utilización de materiales de alto valor de permeabilidad, contemplando materiales disponibles en el mercado. Para este trabajo se consideraron placas de cuyo espesor es de 0,64 mm. Estos materiales poseen un valor muy bajo de conductividad. Las características eléctricas de los materiales considerados para todos los casos, se presentan en la Tabla II.

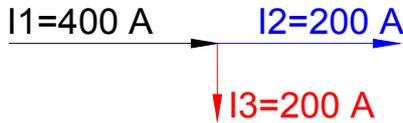


Fig. 7. Distribución de corrientes por la LA y el CS en el puesto de transición.

Tabla II. Casos y características de los materiales considerados

Caso	Material	e [mm]	σ [S/m]	μ_r
0	-	-	-	-
1	-	-	-	-
2	Fe ₂₄₀	2,5	$8,4 \cdot 10^6$	240
3	Al _{2,5mm}	2,5	$35 \cdot 10^6$	1
4	Al _{5,0mm}	5,0	$35 \cdot 10^6$	1
5	Fe ₈₀₀₀	0,64	$2,08 \cdot 10^6$	8000
6	Fe ₃₀₀₀₀	0,64	$1,8 \cdot 10^6$	30000

Para la torre metálica se consideraron los siguientes valores: $\sigma = 8,4 \cdot 10^6$ S/m y el $\mu_r = 240$, Casos 1 a 6.

4 RESULTADOS OBTENIDOS

En los resultados que se obtuvieron en todos los Casos se superponen los efectos de las corrientes por la LA, la transición y el CS. Por un lado se calcularon los valores de campo generados por la LA y el CS. Por otro lado se calcularon los valores de campo magnético generados por los conductores en la transición para los diferentes casos. Luego se superpusieron los valores según lo indicado en la Ec. 1.

Los resultados obtenidos se presentan por medio de curvas de nivel de campo magnético. Cada curva une los puntos de igual valor de campo. Los menores valores se representan en color azul y los mayores valores en color rojo.

4.1 Puesto de transición sin protección mecánica

En la Fig. 8 se presentan los resultados obtenidos sin considerar la presencia de la torre y protección mecánica, Caso 0. En la Fig. 9 se presentan los resultados considerando la presencia de la torre metálica, en línea puntada se indica a modo de referencia la ubicación de la protección mecánica.

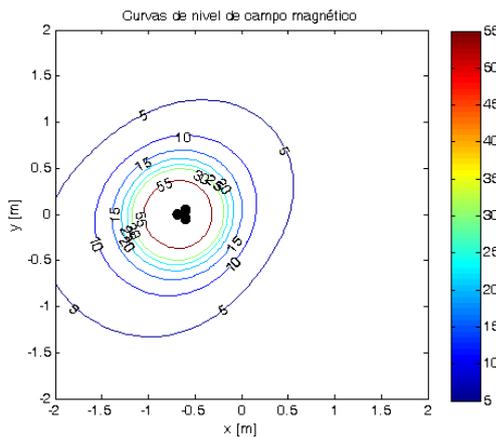


Fig. 8. Valores de campo magnético [μT] – Caso 0.

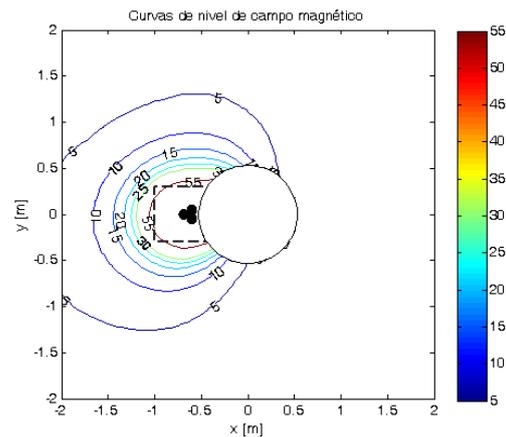


Fig. 9. Valores de campo magnético [μT] – Caso 1.

En la Fig. 10 se presentan los resultados correspondientes al Caso 2, se observa la distorsión de las líneas de campo en el entorno de la protección.

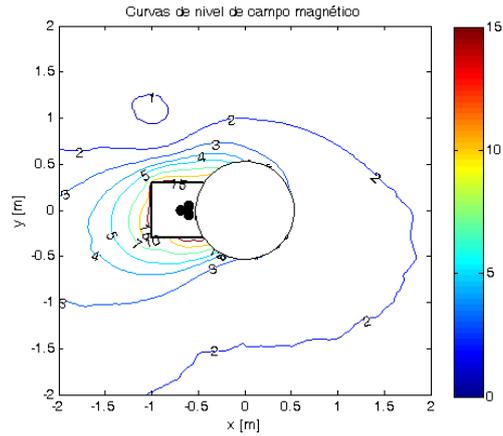


Fig. 10. Valores de campo magnético [μT] – Caso 2

En la Fig. 11 se presentan los resultados correspondientes al Caso 3 y en la Fig. 12 los correspondientes al Caso 4. Ambas soluciones se implementan por medio de la utilización de placas de Al.

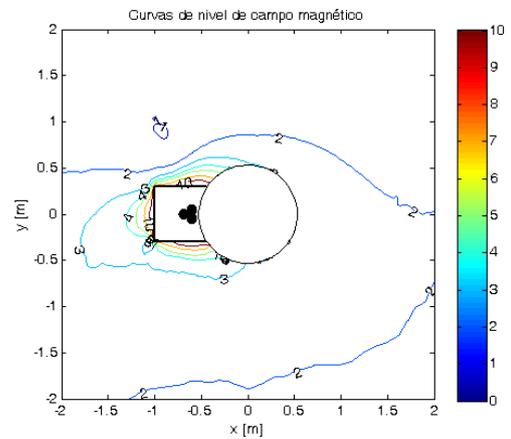
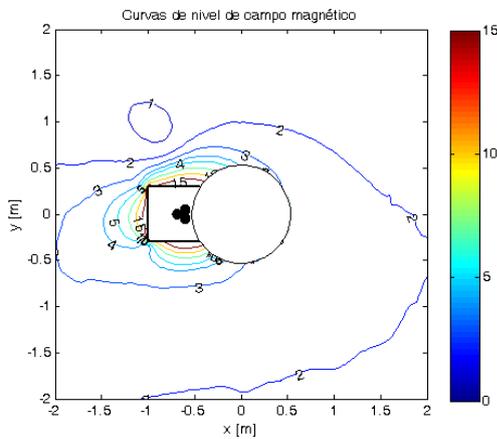


Fig. 11. Valores de campo magnético [μT] – Caso 3. **Fig. 12.** Valores de campo magnético [μT] – Caso 4.

En la Fig. 13 se observan los resultados correspondientes al Caso 5 y en Fig. 14 los del Caso 6. Estos casos consideran placas de aleaciones cuyos valores de permeabilidad son muy altos.

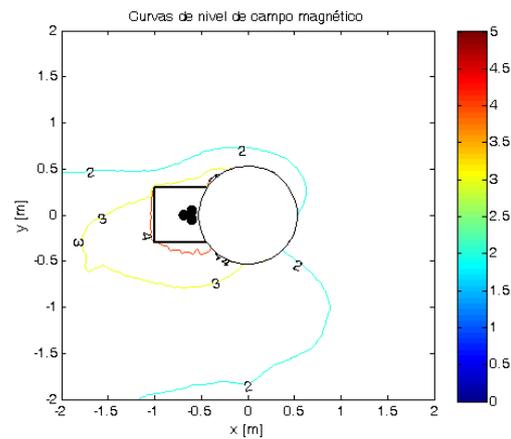
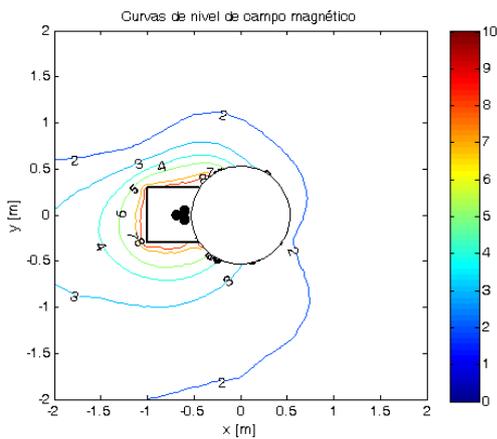


Fig. 13. Valores de campo magnético [μT] – Caso 5. **Fig. 14.** Valores de campo magnético [μT] – Caso 6.

5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el Caso 0 no se considera ningún elemento metálico en el entorno (Fig. 8), si bien esta situación no es real, permite evaluar el efecto de la presencia de la torre metálica. Esto se aprecia en el Caso 1, Fig. 9, en donde es posible observar que la torre metálica produce una distorsión en las líneas de campo magnético. El efecto de la presencia de la torre es una reducción de los valores de campo magnético hacia los valores positivos del “eje X”, no obstante hacia el lado negativo se observa un aumento de los valores de campo magnético. El mayor valor de campo magnético obtenido en la zona de acceso público fue de 55 μT .

La introducción de una pantalla metálica, como la considerada en el Caso 2, en donde los valores de las características eléctricas no son muy elevadas, permite lograr un efecto de mitigación, logrando que en el exterior de la protección mecánica los valores disminuyan y permanezcan por debajo de los 15 μT .

En los Casos 3 y 4 se consideró la utilización de Al, la principal característica es su alto valor de conductividad, las corrientes inducidas permiten alcanzar el efecto de mitigación de campo magnético en el exterior de la protección. En el Caso 3 el mayor valor obtenido fue de 15 μT . Cuando se considera una placa de mayor espesor se obtienen mejores resultados, los mayores valores obtenidos para el Caso 4 fueron de 10 μT . El incremento en el espesor tiene un límite en el doble de la profundidad de penetración.

Por último se consideraron materiales con altos valores de permeabilidad, Casos 5 y 6. En estos casos se obtuvieron menores valores de campo magnético en el área pública.

En el Caso 5 el mayor valor fue de 8 μT , para un valor de permeabilidad relativa de 8000.

En el Caso 6 el mayor valor fue de 4 μT , para este caso la permeabilidad relativa considerada fue de 30000.

A medida que aumente el valor de permeabilidad relativa se logran menores valores de campo magnético en el exterior de las protecciones.

Si se considera como referencia el mayor valor de campo magnético obtenido para el Caso 1, 55 μT , es posible realizar una comparación de los niveles de mitigación obtenidos para todos los casos. Para esto se presenta en la Tabla III una comparación de los valores de FA considerando para todos los casos el mayor valor de Campo magnético obtenido en el área pública.

Tabla III. Valores máximos de Campo magnético y FA

Caso	Campo B [μT]	FA
1	55	1
2	15	3,7
3	15	3,7
4	10	5,5
5	8	6,9
6	4	13,8

En la Fig. 15 se grafican los valores máximos de campo magnético obtenidos en función de los Casos analizados. Se incluye además, a modo de referencia el valor máximo admitido por la reglamentación.

En la Fig. 16 se muestran los valores correspondientes al FA en función de los casos, se incluye el valor mínimo requerido de FA, igual a 2,2.

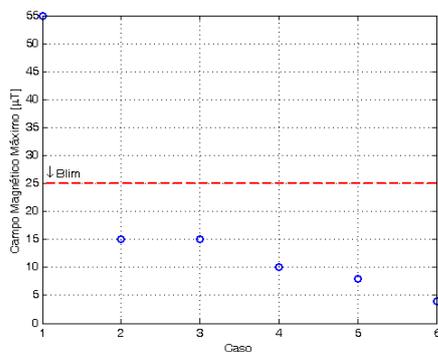


Fig. 15. Valores Máximos de campo magnético.

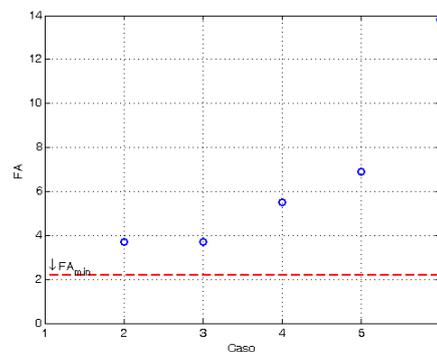


Fig. 16. Valores FA.

6 CONCLUSIONES

En el presente trabajo se consideró la posibilidad de mitigar el campo de inducción magnética por medio de la utilización de blindajes pasivos, implementados con placas de materiales de uso habitual en las instalaciones eléctricas. Además se consideraron placas de aluminio y placas de aleaciones, con altos valores de permeabilidad.

Comparando los Casos 0 y 1, se observa que si la estructura es metálica, la misma influirá en la distribución de campo magnético. Por este motivo resulta de suma importancia conocer cuáles son sus características eléctricas, para de esta forma evaluar en forma adecuada el efecto producido por esta.

La utilización de placas metálicas de uso habitual en protecciones mecánicas de cables, representa una solución técnico-económica viable y de sencilla implementación. Si se requiere un análisis considerando mayores cargas por la transición, es posible contemplar dimensiones mayores para el mismo material.

Si se requieren valores mayores de mitigación, sin modificar las dimensiones, es posible recurrir a otras soluciones, como ser el empleo de Aluminio, Casos 3 y 4, en donde la utilización de placas de mayor espesor arrojó mejores resultados. Además es posible contemplar otros materiales, como los considerados en los Casos 5 y 6.

Los materiales de alto valor de permeabilidad suelen ser muchos más costosos que la chapa convencional o el Aluminio. Además estos materiales son sensibles al deterioro por efecto de corrosión, lo que requiere un seguimiento de su estado durante la vida útil.

Se destaca además, la utilización de herramientas de simulación, validadas por mediciones, para realizar la evaluación de distintas alternativas de mitigación y seleccionar la que presente mejor solución técnico económica.

Finalmente se puede decir que es posible conseguir que los valores límites de 25 μ T, reglamentados en Argentina, queden confinados al interior de las protecciones mecánicas de esta instalaciones utilizando los materiales y dimensiones adecuados.

7 REFERENCIAS

- [1] Resolución SE 77/98, Secretaría de Energía de la Nación (Argentina). Boletín Oficial N° 28.859 1ª Sección.
- [2] Resolución ENRE 0546/1999, Ente Nacional Regulador de la Electricidad (Argentina). Boletín Oficial N° 29.135, p.17.
- [3] Cigré Technical Brochure 373 “Mitigation Techniques of power-frequency magnetic fields originated from electric power systems”. WG C4.204, February 2009.
- [4] Handbook of Shielding Principles for Power System Magnetic Fields. Volume 1: Introduction and Application. Electric Power Research Institute, Palo Alto, California, 1994.
- [5] P. L. Arnera; M. B. Barbieri; D. A. Esteban; N. A. Casco; J. E. Conti, “Efectividad del blindaje de campo magnético de baja frecuencia, con placas”, CIDEL Argentina 2006.
- [6] IEEE Std 644TM-1994 (R2008), “IEEE Standard Procedures for Measurement of Power Frequency Electric and Magnetic Fields From AC Power Lines”.
- [7] IEC 61786:1998, “Measurement of low-frequency magnetic and electric fields with regard to exposure of human beings-Special requirements for instruments and guidance for measurements”.