

# BLINDAJE DE CAMPO MAGNÉTICO EN INSTALACIONES ELÉCTRICAS

Carlos Wall, Beatriz Barbieri, Daniel Esteban, Patricia Arnera, Nicolás A. Casco(\*)  
Instituto de Investigaciones Tecnológicas para Redes y Equipos Eléctricos (IITREE-LAT)  
Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional de La Plata – Argentina.  
48 y 116 (B1900AMF). La Plata. Argentina – caw@iitree-unlp.org.ar  
(\*)Instituto Argentino de Radioastronomía (IAR)  
Cno. Gral. Belgrano km 40 – Berazategui. Argentina - ncasco@iar.unlp.edu.ar

## RESUMEN

En el presente trabajo se muestran los resultados obtenidos en cálculos de campo magnético en las inmediaciones de puestos de transición entre líneas aéreas y cables subterráneos. A su vez y con el propósito de disminuir la magnitud del campo magnético, se analizan una serie de blindajes pasivos y abiertos basados en placas de materiales conductores ferromagnéticos de diferentes características mecánicas y eléctricas de uso habitual en instalaciones eléctricas. Con el objeto de minimizar el número de simplificaciones y obtener una solución más general al problema, en lugar de plantear modelos analíticos, 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. A su vez, los resultados obtenidos son comparados con resultados experimentales.

Lograda una buena representación del material a utilizar en las placas, se analiza un modelo detallado del puesto de transición que incluye el efecto de blindaje de las protecciones mecánicas y de la torre de acero. Se determinan las dimensiones mínimas de dicha protección que garantizan valores de campo compatibles con la legislación vigente en la República Argentina y se estudian distintas variantes geométricas y eléctricas del problema.

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

## 1. INTRODUCCIÓN

En las áreas de acceso público 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.

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 en lugares de acceso público es de 25  $\mu\text{T}$ .

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 [3].

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 doble terna de línea aérea – cable subterráneo en 132 kV. Los cálculos se realizan contemplando distintas alternativas.

## 2. METODOLOGÍA

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 [4] e IEC 61786:1998 [5]. 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

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

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  $B_R$ .

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 Figura 1.

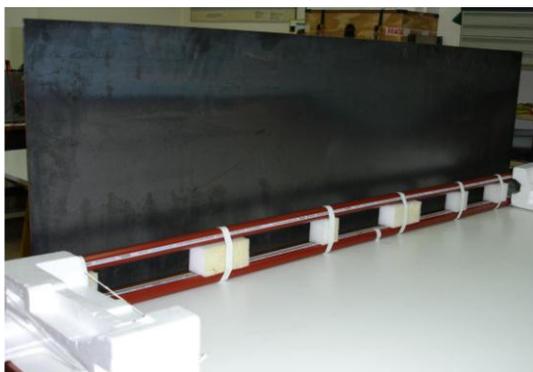


Fig. 1. Foto del modelo experimental de espira y placa de blindaje.

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 ( $\sigma$ ), permeabilidad relativa ( $\mu_r$ ) y profundidad de penetración ( $\delta$ ) 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.

**Tabla I**

Resumen de los valores experimentales

Material	e [mm]	$\sigma$ [S/m]	$\mu_r$	$\delta$ @ 50 Hz
Aluminio(a)	1,5	$35 \cdot 10^6$	1	12 mm
Hierro(a)	1 a 4,5	$8,4 \cdot 10^6$	260	1,5 mm
Hierro(b)	2,5	$8,4 \cdot 10^6$	240	1,5 mm

(a) Datos correspondientes a materiales empleados en laboratorio.

(b) Datos correspondientes a materiales empleados en el puesto.

En la Figura 2 se presentan los resultados obtenidos en mediciones y simulaciones, sin placa y para placas de diferentes materiales. Los resultados obtenidos están dentro del 20% de lo esperado.

También se analizó la sensibilidad del coeficiente de blindaje (relación entre valores de campo con o sin placa) al considerar distintos espesores de chapas. En la Fig. 3, se presentan los coeficientes de blindaje para distintos espesores de placa de un mismo material (ferromagnético).

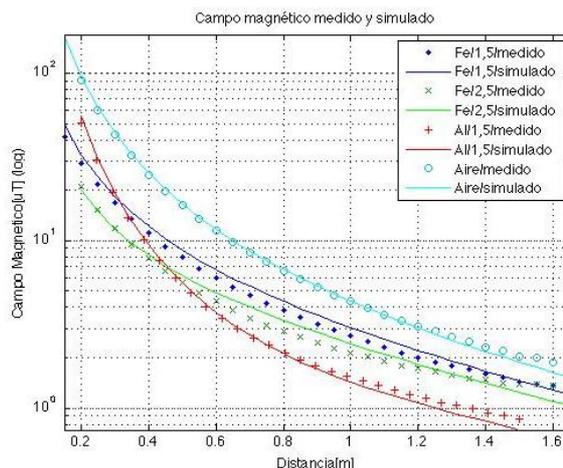


Fig. 2. Campo magnético medido y simulado (Al, Fe, Aire).

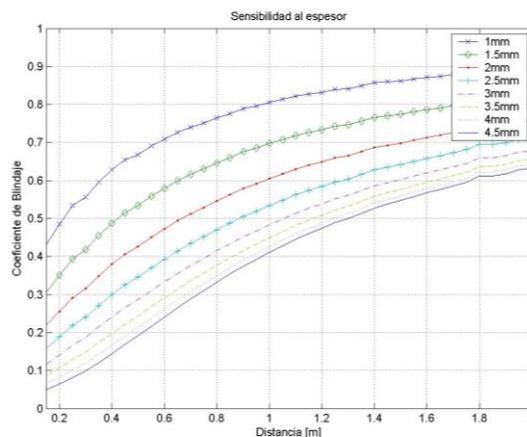


Fig. 3. Sensibilidad al espesor del coeficiente de blindaje (Fe).

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

En las Figuras 4 y 5 se aprecian las características principales del puesto de transición. Desde la parte superior las dos ternas, en la parte central la estructura metálica cilíndrica y a ambos lados las protecciones metálicas. La protección está compuesta por dos placas de hierro que rodean los cables de bajada, ver Figura 4. Se estudia la influencia de distintas configuraciones geométricas, analizando distintos valores de relación de ancho y separación, indicados en la Figura 4 como DX y DY. La altura de la protección mecánica es de 2 metros y el espesor de 2.5 mm.

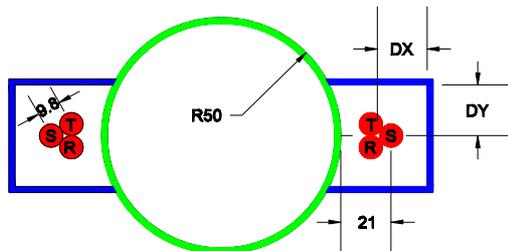


Fig. 4. Vista superior de la geometría del puesto de transición.

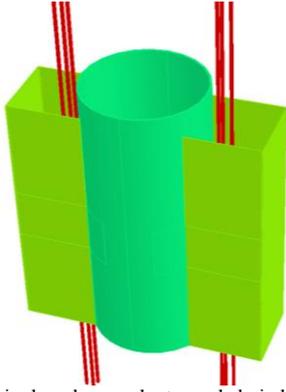


Fig.5. Modelo que incluye los conductores de bajada, la protección mecánica y la torre.

Se analizaron diversos casos, en primer lugar no se consideró la existencia de la torre ni de la placa. Luego se observó únicamente la existencia de la torre, y finalmente luego se consideraron diferentes dimensiones para la protección mecánica. En la Tabla II se resumen los casos considerados.

Además la corriente considerada fue de 200 A y se contemplaron desbalances del 5% en la componente de secuencia inversa.

**Tabla II**  
Resumen casos de corriente analizados

Caso	Dimensiones [cm]	Corrientes/Secuencia	
		Directa	Inversa
0	Sin torre ni placa	200 A	0 %
1	Sin placas	200 A	0 %
2	Sin placas	200 A	5 %
3	DX=20 / DY=20	200 A	0 %
4	DX=20 / DY=20	200 A	5 %
5	DX=30 / DY=30	200 A	0 %
6	DX=30 / DY=30	200 A	5 %

### 3. RESULTADOS

Los resultados son presentados en forma de mapas de isocampo y corresponden a una vista en planta de los valores de campo magnético resultante a un metro sobre el nivel del suelo. Debe destacarse que no existe simetría en ningún caso debido a la influencia de la línea aérea ubicada en la parte superior de la torre y el cable subterráneo en la parte inferior de la misma, que fueron representados según el correspondiente tendido.

El Caso 0, Figura 6, refleja los valores de campo presentes en los alrededores de la bajada sin considerar el efecto de reducción de las corrientes que se inducen en la torre y en las protecciones mecánicas.

El Caso 1, Figura 7, muestra el campo magnético sin tener en cuenta los efectos de la protección mecánica pero considerando la torre. Como se ve, la torre no produce una reducción importante de los valores de campo en su exterior.

La Figura 8 corresponde al Caso 2 que es idéntico al Caso 1 pero con un desbalance. Se puede ver el campo magnético sufre un incremento con respecto al caso balanceado (Figura 7).

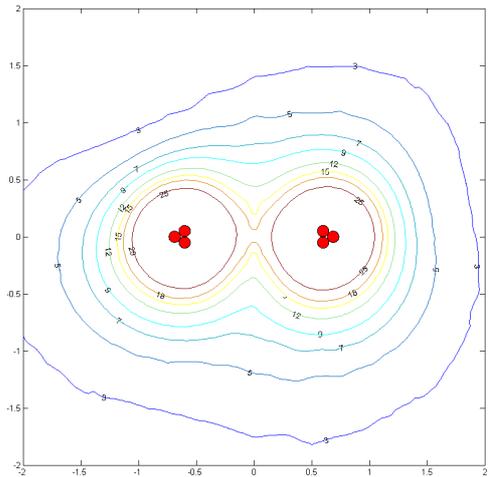


Fig.6. Resultados obtenidos para el Caso 0, curvas isocampo B.

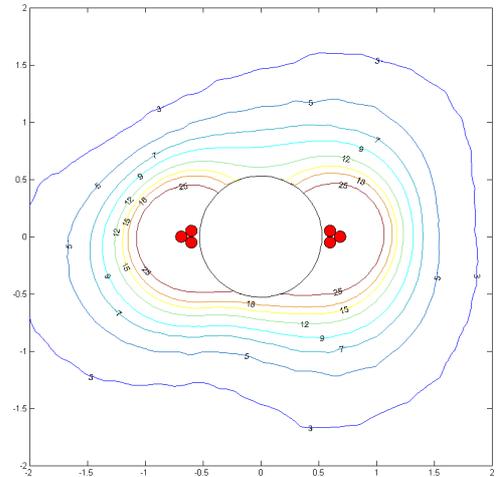


Fig.7. Resultados obtenidos para el Caso 1, curvas isocampo B<sub>R</sub>.

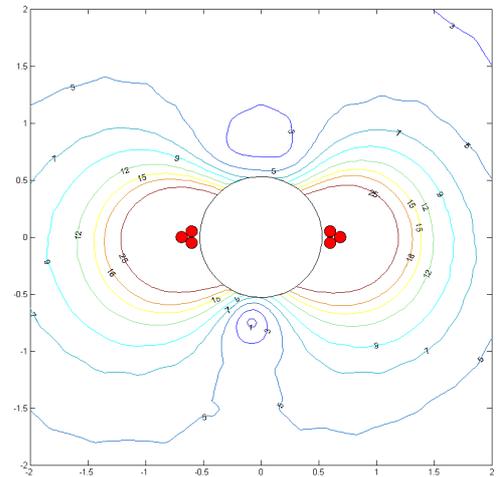


Fig.8. Resultados obtenidos para el Caso 2, curvas isocampo B<sub>R</sub>.

El Caso 3 (sin desbalance), Figura 9, muestra que la presencia de la protección mecánica reduce de manera notable los campos magnéticos. La línea de isocampo magnético de 25 μT queda prácticamente confinada dentro de la protección mecánica.

La Figura 10 corresponde al Caso 4 considerando desbalance. Aquí podemos ver que la línea de 25 μT se escapa ligeramente de la protección.

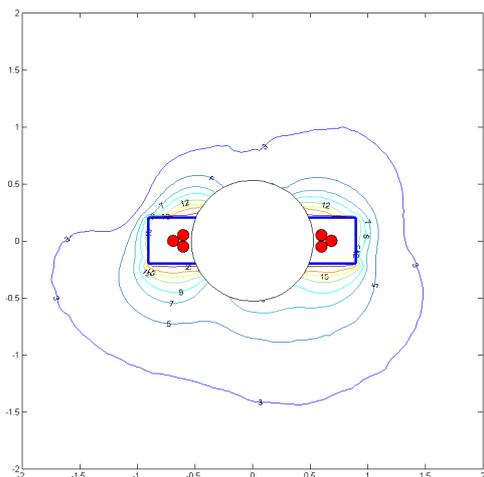


Fig.9. Resultados obtenidos para el Caso 3, curvas isocampo  $B_R$ .

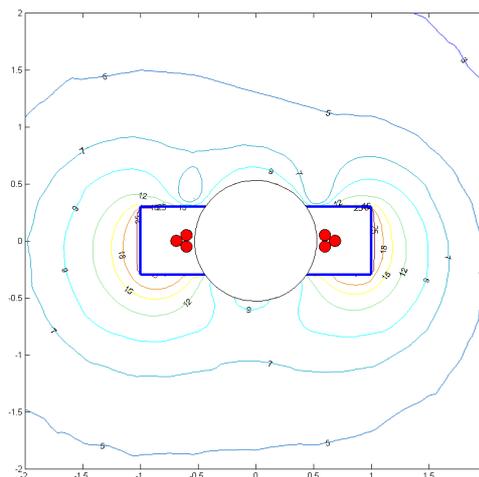


Fig.12. Resultados obtenidos para el Caso 6, curvas isocampo  $B_R$ .

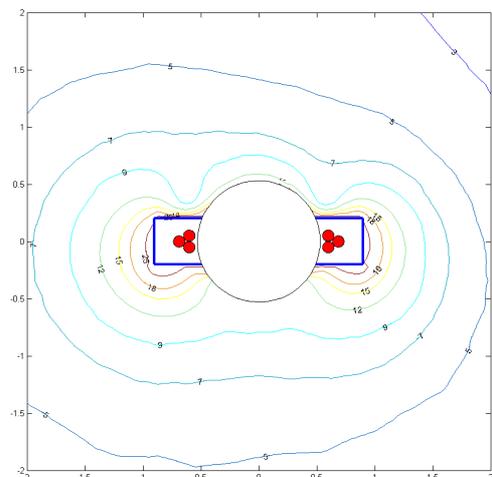


Fig.10. Resultados obtenidos para el Caso 4, curvas isocampo  $B_R$ .

El Caso 5 sin desbalance se presenta en la Figura 11. En ella se puede ver que la protección mecánica reduce aún más los campos magnéticos, quedando la línea de isocampo magnético de  $25 \mu T$  totalmente dentro de la protección mecánica.

El mismo resultado se obtiene en el Caso 6 considerando desbalance, Figura 12. Se aprecia que si bien los campos son mayores que en el Caso 5, la línea de  $25 \mu T$  no excede los límites de protección mecánica.

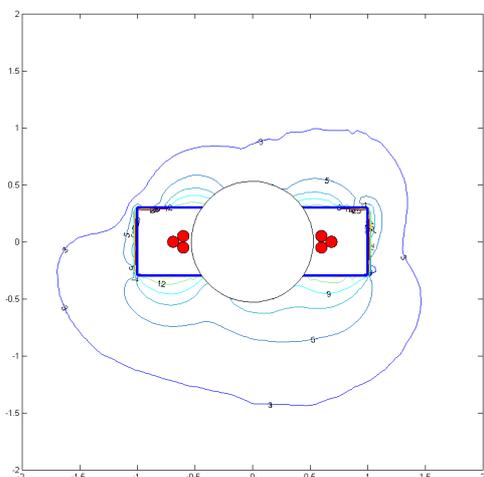


Fig.11. Resultados obtenidos para el Caso 5, curvas isocampo  $B_R$ .

#### 4. DISCUSIÓN

La evaluación de sensibilidad realizada para distintos espesores de chapa, permite asegurar que la mejora en la mitigación del campo magnético se obtiene hasta espesores de chapa del orden del doble de la profundidad de penetración por efecto pelicular. Espesores mayores no aportan beneficios superiores.

Los cables en los puestos de transición deben contar con una protección mecánica. Este trabajo demuestra que dicha protección puede ser utilizada en forma eficiente para mitigar el campo magnético generado por los conductores de manera de cumplir con la reglamentación vigente.

#### 5. 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. Esto trajo aparejado una solución técnico-económica viable y de sencilla implementación.

A medida que se incrementan las dimensiones de la protección se logra un mejor efecto de mitigación. Es posible conseguir que los valores límites de  $25 \mu T$ , reglamentados en Argentina, queden confinados al interior de las protecciones mecánicas.

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 performance.

#### 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] 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*.
- [4] IEEE Std 644™-1994 (R2008), "IEEE Standard Procedures for Measurement of Power Frequency Electric and Magnetic Fields From AC Power Lines".
- [5] 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".
- [6] CIGRÉ TB 373 "Mitigation Techniques of power-frequency magnetic fields originated from electric power systems", February 2009.