

EFFECTIVIDAD DEL BLINDAJE DE CAMPO MAGNÉTICO DE BAJA FRECUENCIA, CON PLACAS METÁLICAS

P. L. Arnera; M. B. Barbieri; D. A. Esteban; N. A. Casco; J. E. Conti

IITREE-LAT - FI-UNLP

iitree@iitree-unlp.org.ar

Palabras clave

Campo magnético – Blindaje – Coeficiente de blindaje – Cálculo

RESUMEN

La existencia de campo magnético de frecuencia industrial resulta necesariamente asociada 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 baja frecuencia, 50 ó 60 Hz, generado por las instalaciones de las empresas eléctricas debe ser controlado y permanecer por debajo de ciertos límites establecidos en las reglamentaciones vigentes. En nuestro país, según [1] y [2], el valor máximo de inducción magnética permitido en lugares de acceso público es de 25 μ T.

Con objeto de disminuir la magnitud del campo magnético, se analizan una serie de blindajes pasivos y abiertos basados en placas de materiales conductores ferromagnéticos y no ferromagnéticos de diferentes características mecánicas y eléctricas de uso habitual en instalaciones eléctricas.

En este trabajo se describen los resultados encontrados experimentalmente y los obtenidos mediante simulaciones numéricas de cómo se altera la distribución del nivel de campo magnético producido por circuitos recorridos por corrientes de 50 Hz ante la presencia de blindajes realizados con placas planas de hierro y aluminio.

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 los utiliza a fin de validar el modelo numérico de simulación mediante el método de elementos finitos en 3D.

El sistema probado en laboratorio trata de representar la situación que se presenta en las instalaciones compuestas de barras y/o cables subterráneos trifásicos que transportan altas corrientes y que se encuentran a distancias relativamente cercanas a los espacios públicos.

Los materiales usados para la experiencia son materiales de uso habitual en ingeniería y de costo razonable como lo son la chapa de hierro y la de aluminio de distintos espesores.

Una vez validado el modelo se realiza un estudio de la sensibilidad del nivel de campo magnético resultante ante diversas características del material de blindaje como lo son su espesor, conductividad eléctrica y la permeabilidad relativa en el caso de los materiales ferromagnéticos.

1. INTRODUCCIÓN

Con el objeto de controlar la magnitud del campo magnético generado por un circuito de corriente de frecuencia industrial se suele recurrir al expediente de interponer entre éste y el área a proteger con diferentes configuraciones de blindajes pasivos y abiertos realizados con placas de materiales conductores tanto ferromagnéticos y no ferromagnéticos de uso habitual en instalaciones eléctricas. El sentido y la fase de las corrientes inducidas en las placas es tal que tiende a cancelar parcialmente el campo magnético producido por las corrientes de los conductores.

Dada la complejidad del problema, las soluciones analíticas que existen para el cálculo del grado de blindaje obtenido recurren a ciertas simplificaciones sobre el modelo, y sólo resultan aplicables para ciertos casos “clásicos”. [3], [4].

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.

Finalmente, los resultados obtenidos, son comparados con resultados experimentales.

2. SIMULACIÓN NUMÉRICA

Con el fin de validar la simulación numérica del tipo de problema planteado se recurrió a 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.

El modelo estudiado consiste en una espira de corriente de forma rectangular de 3 m de longitud y 0,1 m de alto por la que circula una corriente de 200 A y 50 Hz enfrentada paralelamente a una placa rectangular metálica, blindaje, de 2 m de ancho y 1 m de alto separadas entre sí por un distancia de 0,1 m.

La Figura 1 presenta las vistas de frente y planta de dicho modelo.

El método de simulación empleado es el de los elementos finitos (FEM) implementado en un paquete de códigos comercial [5].

Todos los problemas analizados consideran variaciones sinusoidales en régimen permanente.

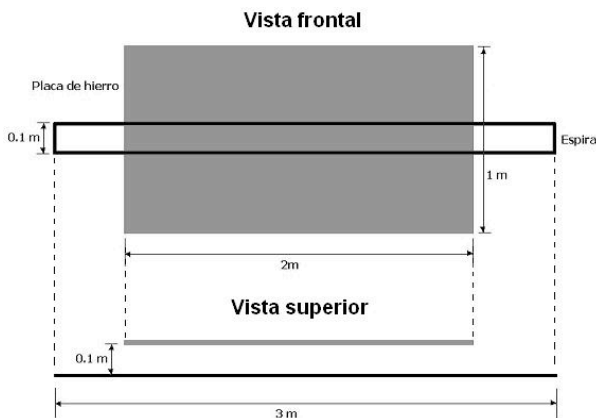


Figura 1 – Esquema de la configuración geométrica de la espira de corriente y blindaje.

La formulación de los elementos finitos consiste en subdividir la región bajo estudio en tetraedros (“maillar el dominio”) y realizar una aproximación lineal a la solución de las ecuaciones de Maxwell en cada volumen. Finalmente, para resolver el problema, se deben encontrar los coeficientes de dicha aproximación lineal. Esto último se realiza mediante la técnica de residuos ponderados de Galerkin [6].

Para obtener buenos resultados es indispensable la elección de un tamaño de la malla adecuado. Dentro de las placas metálicas y sus alrededores la densidad de elementos debe ser suficiente para representar la distribución de corriente dada por el efecto pelicular. En total se emplearon alrededor de 10^6 elementos en todo el modelo.

En todos los casos planteados, los materiales son considerados, lineales, isotrópicos y homogéneos. En general, los materiales ferromagnéticos

no son lineales, pero dependiendo de la forma particular de la característica magnética, y del valor máximo del campo magnético, la aproximación lineal puede resultar suficiente.

Para reducir en un factor cuatro el número de elementos y en consecuencia el tiempo de cálculo, sin perder exactitud en la solución, se aprovechan los dos ejes de simetría del modelo, imponiendo en forma apropiada condiciones a las fronteras.

Para cuantificar el efecto mitigante de las placas metálicas se emplea el coeficiente de blindaje que se define como:

$$\eta = \frac{|\mathbf{B}|_{con\ placa}}{|\mathbf{B}|_{sin\ placa}} \quad (1)$$

3. MODELO EXPERIMENTAL

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 2.

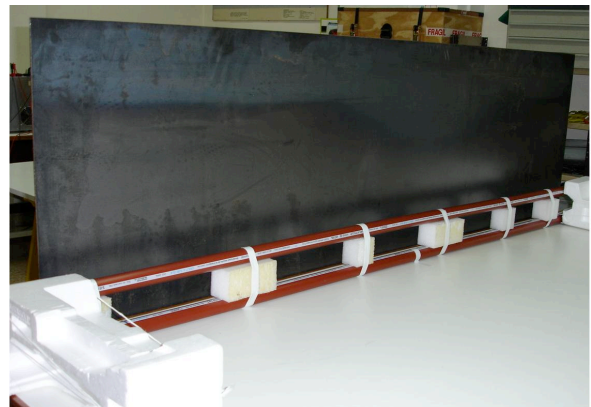


Figura 2 – Foto del modelo experimental de espira y placa de blindaje.

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 tres 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 como se presenta en la Tabla I.

Para que los resultados del estudio fueran realistas los valores consignados de conductividad y permeabilidad fueron determinados por medición en laboratorio para cada uno de los materiales utilizados.

Tabla I – Dimensiones y parámetros eléctricos medidos de cada una de las placas de blindaje utilizadas en el estudio.

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

3. MEDICIÓN

La medición de campo magnético se realizó siguiendo una línea recta que pasa por el centro de la espira y que es perpendicular al plano que la contiene. Las medidas se tomaron a intervalos de 0,05 m y las distancias se consideran respecto al plano que contiene a la espira.

La magnitud de la corriente utilizada se compatibilizó con la máxima admisible por los conductores de la espira de manera de reducir al mínimo la influencia del campo magnético ya presente en el área de medición por las instalaciones propias de baja tensión.

Para poder determinar el coeficiente de blindaje se determinó previamente la distribución de campo magnético sin la presencia de las placas de blindaje.

5. COMPARACIÓN DE RESULTADOS NUMÉRICOS Y EXPERIMENTALES

La comparación de los valores obtenidos en las simulaciones numéricas y las medidas en el laboratorio se presenta en las Figuras 3,4,5 y 6.

Para el caso sin blindaje (Figura 3), la diferencia entre los valores teóricos y las mediciones es inferior al 5%, que es del orden de los errores como consecuencia del instrumental de medición de campos y de la geometría.

Para las curvas con blindaje (Figura 4,5 y 6), las diferencias entre los valores teóricos y las mediciones son en todos los casos inferiores al 20 %.

Para distancias más alejadas de la espira, se puede notar que la magnitud de los valores medidos son siempre mayores a los simulados. Esto se explica por la presencia de campo residual en la sala donde se realizó la medición, proveniente de las instalaciones de baja tensión.

Para las distancias más próximas a la espira es posible obtener resultados que concuerden mejor si la simulación tiene en cuenta las dimensiones finitas de las espiras sensoras de campo empleadas por el instrumento de medición. Esto se debe a que la lectura obtenida por el sensor es un “promedio espacial” del campo magnético en el área que él ocupa. En aquellos lugares donde el campo varía en forma más abrupta, el valor promediado y el valor en

el centro del sensor, en general difieren. En cambio, cuando el campo varía en forma suave, el valor promediado y el valor en el centro del sensor, son más parecidos.

5.1 Sin blindaje

En la Figura 3 se presenta el resultado comparativo entre el nivel de campo simulado y el medido en el caso particular de ausencia de placas de blindaje, es decir el valor del campo en aire generado por la espira.

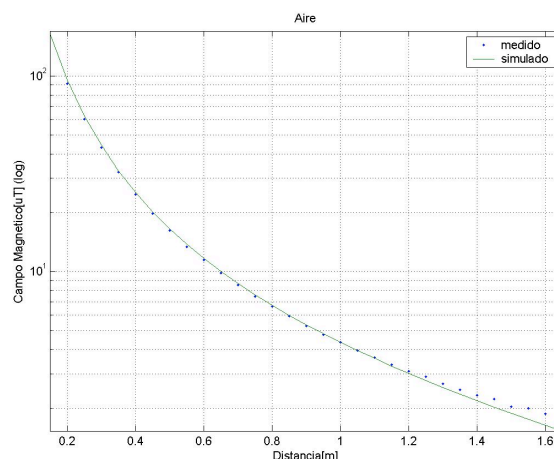


Figura 3 – Comparación del campo magnético medido y simulado en ausencia de placa.

5.2 Placa de hierro de 1.5 mm de espesor

En la Figura 4 se muestran los resultados obtenidos en la medición y en la simulación en el caso en que se realiza el blindaje con una placa de hierro de 1.5 mm de espesor dispuesta a 0,1 m del plano de la espira.

Como se puede ver los niveles de campo magnético resultantes en este caso son inferiores a los producidos por la espira en ausencia de blindaje, quedando demostrado el efecto de reducción del campo magnético en presencia de esta placa.

5.3 Placa de hierro de 2.5 mm de espesor

En la Figura 5 se presentan las curvas del nivel de campo magnético medido y simulado correspondientes al caso en que se utiliza una placa de hierro de 2,5 mm de espesor dispuesta a 0,1 m del plano de la espira.

Nuevamente se ve el efecto del blindaje, ya que los valores de campo magnético obtenidos son inferiores a los producidos por la espira sin blindaje. Además se puede ver también como el blindaje con este espesor es mayor que el obtenido con la placa de 1,5 mm de espesor.

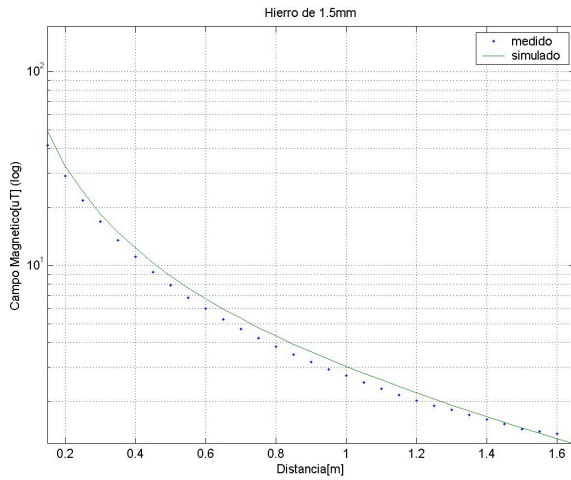


Figura 4 – Comparación del campo magnético medido y simulado con blindaje de material ferromagnético de 1,5 mm de espesor.

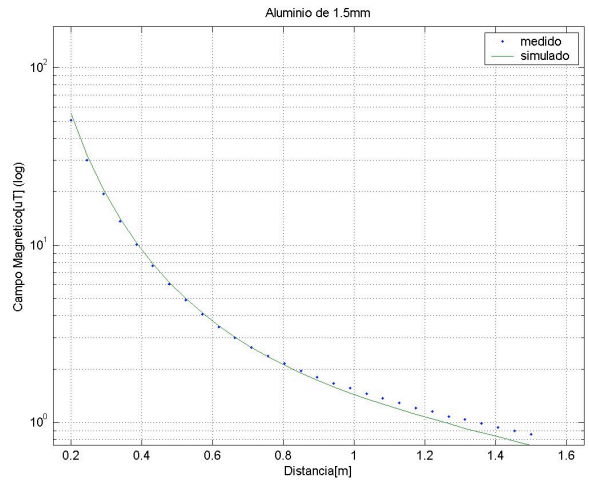


Figura 6 – Comparación del campo magnético medido y simulado con blindaje de aluminio de 1,5 mm de espesor.

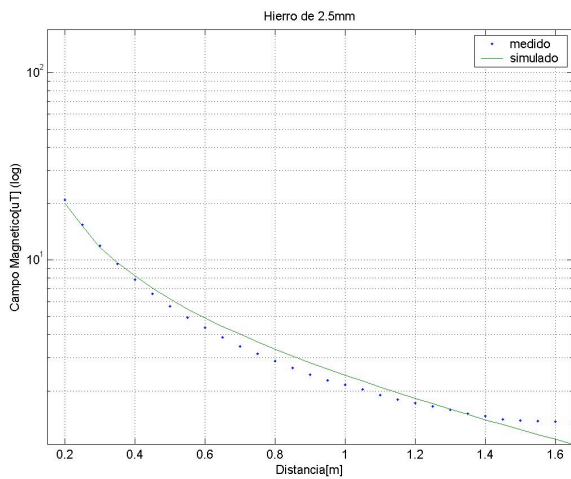


Figura 5 – Comparación del campo magnético medido y simulado con blindaje de material ferromagnético de 2,5 mm de espesor.

5.4 Placa de aluminio de 1.5 mm de espesor

En la Figura 6 se muestran los resultados correspondientes al nivel de campo magnético resultante cuando se utiliza como blindaje un material no ferromagnético como es el aluminio.

Para idéntico espesor, se puede apreciar un efecto de reducción del nivel del campo levemente inferior en comparación con los blindajes realizados con materiales ferromagnéticos.

6. SENSIBILIDAD

Con el objeto de cuantificar los efectos de las distintas variables de los blindajes magnéticos con chapas conductoras, se realizaron simulaciones para diferentes valores de espesor, conductividad y permitividad en las placas.

6.1 Sensibilidad al Espesor

Se realizaron simulaciones para el caso de realizar el blindajes con placas de material ferromagnético con $\mu = 260$ y $\sigma = 8,4E6$ S/m para diferentes espesores entre 1 mm y 4,5 mm. La configuración del blindaje analizada es idéntica a la empleada para el modelo experimental, es decir, una placa de 1 m por 2 m paralela a la espira a 0,1 m del plano que la contiene.

En la Figura 7 se presentan los resultados para todos estos casos comparado con el correspondiente a la situación sin placa de blindaje.

Por otra parte en la Figura 8 se presenta un gráfico con los coeficientes de blindaje obtenidos para los diferentes espesores de la placa de material ferromagnético.

Tal como se puede apreciar, el coeficiente de blindaje (1) se hace mayor al utilizar espesores mayores, aunque se puede ver que con espesores superiores a 4 mm la mejoría obtenida es casi imperceptible ya que las curvas resultan cada vez mas próximas entre si. Esto se debe a que la profundidad de penetración del campo en la placa de hierro es de 1,5 mm y por lo tanto utilizar placas con espesores mucho mayores a este valor no producirán mejoras notables en la reducción del campo magnético.

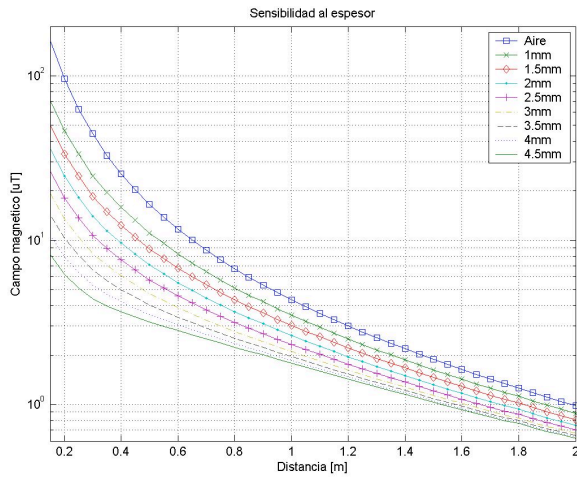


Figura 7 – Sensibilidad al espesor en el nivel del campo magnético con materiales ferromagnéticos.

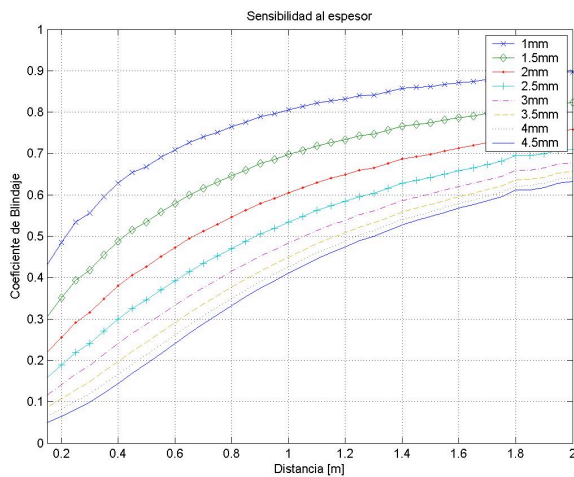


Figura 8 – Sensibilidad al espesor del coeficiente de blindaje con materiales ferromagnéticos.

6.2 Sensibilidad a la Permeabilidad y Conductividad

Se realiza un análisis de la sensibilidad a los parámetros eléctricos de las chapas metálicas, para ello se llevan a cabo simulaciones sobre placas metálicas con valores de permeabilidad relativa que varían entre 1 y 10^5 y conductividades entre 0 y $50 \cdot 10^8$ S/m.

En la Figura 9 se muestran las curvas del coeficiente de blindaje calculados a 0,1 m de la placa para diferentes conductividades en función de la permeabilidad para placas de 2,5 mm de espesor.

En la Figura 10 se presentan las curvas anteriores considerando que la placa posee 1,5 mm de espesor.

Analizando los resultados se observa que si se emplean placas metálicas no ferromagnéticas, es decir con permeabilidad relativa 1, se obtendrán mejores blindajes cuanto mayor sea la conductividad de la placa.

Por otro lado si se emplean placas ferromagnéticas la mejora en el coeficiente de blindaje obtenida para conductividades mayores disminuye a medida que se utilizan placas con permeabilidades relativas más altas, llegándose a la conclusión que si se emplean placas con permeabilidad relativa mayor a 1000 la conductividad no produce efectos significativos en la reducción del campo magnético.

En el análisis de la Figura 10 se arriba a idénticas conclusiones para placas de 1,5 mm de espesor.

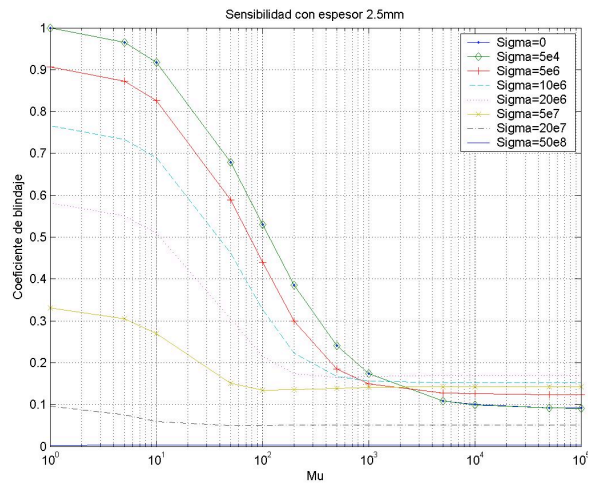


Figura 9 – Coeficiente de blindaje, para espesor de 2.5 mm, en función de la conductividad y permeabilidad del material.

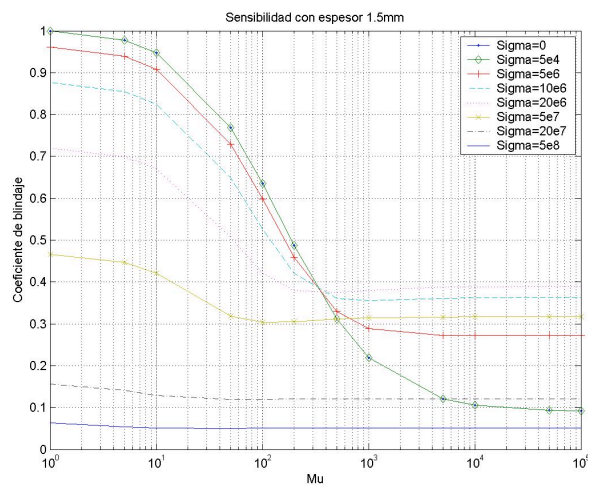


Figura 10 – Coeficiente de blindaje, para espesor de 1,5 mm, en función de la conductividad y permeabilidad.

7. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se estudió la posibilidad de mitigar el nivel de campo magnético a partir de blindajes pasivos que consisten en placas de materiales de uso habitual en instalaciones eléctricas.

Para el cálculo de las prestaciones del blindaje mediante algoritmos de elementos finitos es necesario refinar la malla dentro y en los alrededores de las placas de blindaje. De esta forma, se obtienen resultados que están dentro del 20% de lo esperado.

En general se puede afirmar, que a mayor espesor de las placas, mayor es la disminución del campo magnético. Para espesores comparables con la profundidad de penetración del efecto pelicular, esta mejora deja de ser significativa.

En lo referente a las características eléctricas del blindaje, para materiales tanto no ferromagnéticos como ferromagnéticos, con $\mu_r < 1000$, como es el caso más habitual, se optimiza el blindaje a mayores valores de conductividad.

8. 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] L. Sandrolini, M. Massarini, U. Reggiani, "Transform Method for Calculating Low-Frequency Shielding Effectiveness of Planar Linear Multilayered Shields", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 36, no. 6, pp. 3918-3919, November 2000.
- [4] J. Yaping Du Burnett, K. Hung Hom, "Magnetic Shielding Principles of Linear Cylindrical Shield at Power-Frequency", *IEEE 1996 International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, 1996, pp. 488-493.
- [5] Vector Fields Ltd., *Opera 3D Reference Manual*, Kidlington, OX5 1JE, England, 1998.
- [6] O. C. Zienkiewicz, K. Morgan, *Finite Elements and Approximation*, John Wiley & Sons, 1983.