



Universidad
Zaragoza



Escuela de
Ingeniería y Arquitectura
Universidad Zaragoza

ESTUDIO TRIDIMENSIONAL MEDIANTE EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS DEL EFECTO DE PANTALLAS MAGNÉTICAS CILÍNDRICAS APLICADAS A CONDUCTORES DE SECCIÓN RECTANGULAR

Autor

Juan Sangrós Alcalde

Director

Antonio Usón Sardaña

Ingeniería Técnica Industrial Eléctrica
Diciembre 2013

Escuela de Ingeniería y Arquitectura de Zaragoza



Estudio tridimensional mediante el Método de Elementos Finitos del efecto de las pantallas magnéticas cilíndricas aplicadas a conductores de sección rectangular

RESUMEN

En este trabajo se han desarrollado modelos tridimensionales de pletinas conductoras y pantallas cilíndricas con el objetivo de observar cómo las líneas de campo magnético son reorientadas y poder generalizar los resultados, y hacer una parametrización. El destino final del estudio son los instrumentos de medida de corriente eléctrica basados en sensores de efecto Hall y magnetoresistivos. También podría pensarse en aplicaciones en las que las barras conductoras de los sistemas trifásicos transportan corrientes de muy alta intensidad donde las interacciones mutuas pueden provocar efectos indeseados.

Para el cálculo numérico de los modelos tridimensionales se ha utilizado el Método de los Elementos Finitos. Las simulaciones son magnetostáticas, por lo que se han despreciado los efectos tanto pelicular como de proximidad. Se ha empleado el programa TOSCA contenido en el conjunto de programas OPERA 3D de Vector Fields.

Índice

Página

1. Introducción general al problema y el Método de los Elementos Finitos	4
2. Geometría del campo magnético y el factor de forma	5
2.1. Introducción al problema y geometría de las pletinas conductoras	5
2.2. Líneas de campo magnético y criterio de deformación	6
2.2.1. Estudio teórico de la deformación de las líneas de campo magnético	6
2.2.2. Estudio numérico de la deformación de las líneas de campo magnético	8
3. Efecto del apantallamiento magnético	12
3.1. Descripción del problema y metodología empleada	12
3.2. Pantallas magnéticas de material lineal	13
3.3. Pantallas magnéticas de material no lineal	15
3.3.1. Pantalla de acero al silicio Si-Fe	15
3.3.2. Pantalla de Trafoperm	19
4. Conclusiones	22
Referencias	23
Anexo 1	24

1. Introducción general al problema y el Método de los Elementos Finitos

En el presente documento analizo modelos tridimensionales de núcleos y pantallas magnéticas, y de forma específica, cómo el factor de forma de las pletinas conductoras modifica y determina las líneas de campo magnético y los problemas consecuentes al apantallamiento de éstas. Parto del trabajo previo realizado en su tesis por el doctor Antonio Usón, del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Zaragoza [USO_07], en el cual se abarcan muchas de las diferentes posibilidades en torno al estudio numérico mediante el Método de los Elementos Finitos (MEF) aplicado al análisis de instrumentos de medida de corriente eléctrica. En su documento, su intención no era otra sino proponer soluciones al error cometido por los aparatos de metrología eléctrica (pinzas amperimétricas) mediante la modelización virtual de estos reduciendo en lo posible la construcción de prototipos y utilización del laboratorio.

Con su trabajo como punto de partida, he analizado pletinas conductoras de diferentes dimensiones, parametrizadas según un factor de forma geométrico y cómo se ve afectado el apantallamiento magnético según dicho factor de forma, es decir, las proporciones geométricas de la pletina conductora. Utilizando diferentes materiales ferromagnéticos para el apantallamiento, se aprecian notorias divergencias entre los resultados, para concluir cómo la geometría de las secciones de los conductores tiene un peso fundamental sobre las líneas de campo producidas por el tránsito de la corriente y cómo pueden modificarse con estructuras de apantallamiento pasivo

Para la realización de los modelos y su correspondiente resolución numérica, se ha utilizado el programa comercial OPERA-3D, comercializado por la empresa Vector Fields, Ltd., el cual proporciona potentes herramientas tanto para la realización de modelos tridimensionales como en procedimiento numérico. Para lo primero, el módulo Modeller o pre-procesador ha sido el elegido y para el cálculo numérico, TOSCA, que fue originalmente creado por C.W. Trowbridge y J. Simkim [SIM 79] y permite la resolución de problemas magnetoestáticos. Por último, en cuanto al análisis de los resultados, visualización y conclusión, se ha utilizado el Post-Procesador insertado en OPERA-3D. Cabe añadir que todo análisis en el presente trabajo es magneto-estático, por lo que no se tiene en cuenta el posible efecto de las corrientes parásitas u otros factores derivados de la variación temporal del campo magnético. Los conductores serán siempre rectos, perpendiculares al plano de la pantalla y de longitud infinita.

2. Geometría del campo magnético y el factor de forma

2.1. Introducción al problema y geometría de las pletinas conductoras

En este trabajo, basado en la geometría de los conductores rectangulares (pletinas conductoras), he definido el factor principal inherente a éstas y sobre el que girará todo el estudio: el factor de forma (FC), cantidad adimensional que me permitirá realizar un estudio paramétrico. En el caso de una geometría conductora rectangular no se conoce solución analítica al campo magnético, de tal manera que el MEF es la herramienta que arroja luz sobre los diferentes casos.

El término apantallamiento no es el más adecuado, ya que por la Ley de Ampère, el debilitamiento o disminución de las líneas de campo más allá de la pantalla pasiva es imposible, al proceder de una corriente eléctrica que circula por el interior. No obstante, lo que pretenderé demostrar en mi trabajo es que dichas líneas de campo pueden reorientarse concéntricamente mediante el uso de una pantalla magnética. Una aplicación final del estudio sería, por ejemplo, la simplificación del tratamiento de la señal en instrumentos que miden la corriente con *arrays* de sensores magnéticos situados en aire alrededor de los conductores, como las descritas en [BAZ_00].

Por otra parte, el FC de las pletinas, al que numéricamente denominaré N_f , queda establecido como la relación entre las dos dimensiones del perfil del conductor,

$$N_f = b/a \quad (1)$$

con a la longitud de la arista menor y b la longitud de la arista mayor.

En mi trabajo considero así tres pletinas con sus correspondientes factores de forma a estudiar: 30 mm x 5 mm ($N_f=6$), 40 mm x 5 mm ($N_f = 8$) y 40 mm x 4 mm ($N_f = 10$).

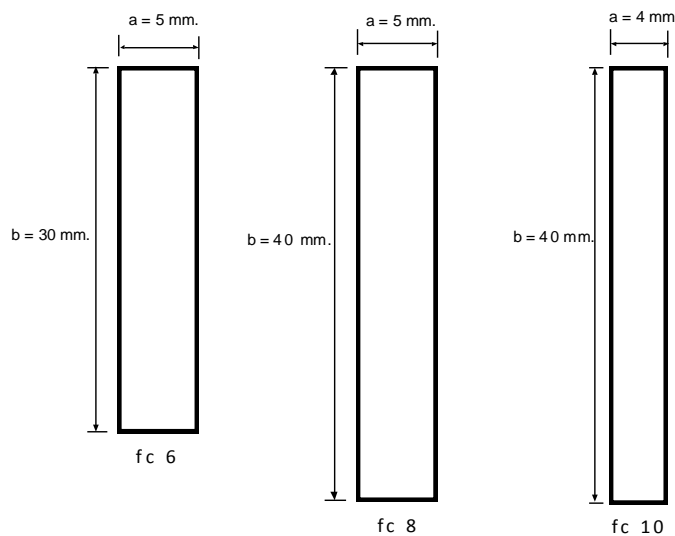


Fig 1 Visualización transversal de la superficie conductora de los diferentes modelos de pletina.

2.2. Líneas de campo magnético y criterio de deformación

2.2.1. Estudio teórico de la deformación de las líneas de campo magnético

El primer punto es establecer un criterio de deformación de las líneas de campo magnético creado por la corriente eléctrica circulando a través de los distintos conductores, para los diferentes casos. Esto se realizó mediante la comparativa entre la geometría del campo magnético creado por un alambre recto (conductor filiforme) y la geometría del campo creado por las pletinas conductoras, ambos a la intensidad de 1 A. Si tomamos una línea circular de radio R , observamos que en el primer caso, el vector \mathbf{H} sólo tiene componente tangencial a esa línea; en el segundo caso, y como consecuencia de la forma elíptica que adoptan las líneas de campo, aparece una componente normal de \mathbf{H} que debilita la componente tangencial a esa misma circunferencia. La desviación típica de una muestra de valores procedentes del cociente entre la componente tangencial debida a la pletina y la componente tangencial creada por el conductor filiforme nos servirá como indicador de la deformación de la línea de campo magnético.

Con el propósito de evaluar las deformaciones inherentes al FC de las pletinas de las líneas de campo magnético respecto de su forma ideal (conductor filiforme), tengo en cuenta las dos componentes, que juntas constituyen el vector \mathbf{H} (intensidad de campo magnético) y que nos servirán para comprobar las diferencias entre el conductor ideal y la pletina rectangular:

- La componente tangencial a la línea teórica de \mathbf{H} , circunferencia de radio $R = 60$ mm, H_{tang} , creada por una intensidad de corriente unitaria $I = 1$ A.
- La componente normal H_{norm} en idénticas circunstancias al caso tangencial.

El valor de referencia de H_{tang} se puede calcular mediante la ley de Ampère, [RES 70]

$$H = \frac{I}{2\pi R} \text{ (A/m)} \quad (2)$$

con lo cual tenemos un valor teórico de 2.6526 A/m.

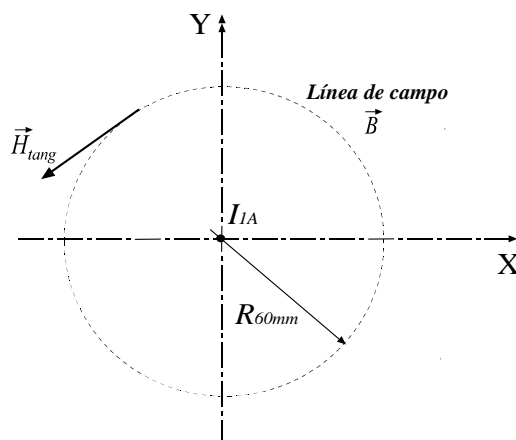


Fig 2. Esquema de campo magnético creado por un conductor filiforme. Sin deformación teórica en las líneas de campo.

En el caso ideal del conductor filiforme, como apreciamos en la figura 2, sin deformación de las líneas de campo, tenemos que:

$$|H| \begin{cases} H_{tang} \\ H_{norm} = 0 \text{ (A/m)} \end{cases} \Rightarrow |H| = |H_{tang}|$$

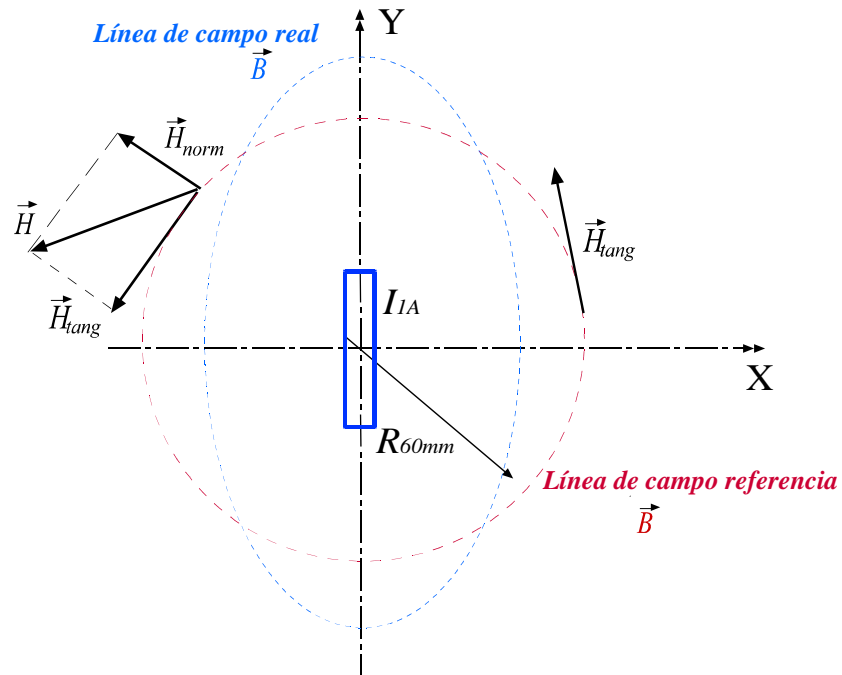


Fig 3. Esquema de campo magnético creado por una pletina conductora rectangular (azul) respecto al ideal (rojo). La deformación en las líneas de campo teóricas, pasando de una forma circular a otra elipsoidal, es notable.

En el caso de la pletina rectangular, tal como se aprecia en la figura 3 superior, donde las líneas de campo presentan forma elipsoidal, tenemos ambas componentes:

$$|H| \begin{cases} H_{tang} \\ H_{norm} \end{cases} \Rightarrow |H| > |H_{tang}|$$

2.2.2. Estudio numérico de la deformación de las líneas de campo magnético

Para comprobar que el resultado teórico esperado de referencia (en el caso filiforme) coincide con el modelo realizado en OPERA 3D, se resolvió un problema en el que se tomaron 360 valores de una línea de campo (circunferencia) a 60 mm del centro, donde se alojaba el conductor de 1x1 mm. Se obtuvo un valor uniforme del módulo de \mathbf{H} , $|\mathbf{H}| = 2.6526 \text{ A/m}$, a lo largo de todos los puntos de la circunferencia.

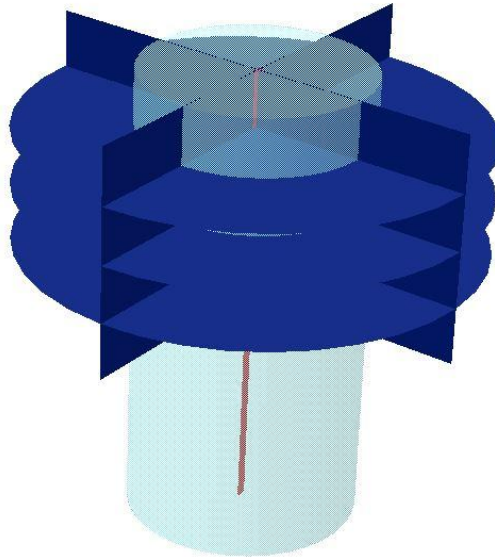


Fig 4. Modelo tridimensional de pletina conductora 5x40.

Por otra parte, para demostrar mediante el MEF la deformación de las líneas de campo, realicé tres simulaciones en Opera 3D con los tres modelos de pletinas diferentes de FC 6, 8 y 10 respectivamente, como se observa en la Fig. 1. Se tomaron 360 puntos a lo largo de una circunferencia de referencia de $R = 60 \text{ mm}$, una intensidad de 1 A en la pletina y una longitud de ésta de 2 metros (para más detalles sobre las características del modelo, ver Anexo 1) En las siguientes gráficas se observa la variación del módulo de \mathbf{H} respecto del ángulo φ . Los valores obtenidos de desviación típica se encuentran en la Tabla 1, resultados en los que se constata el aumento de la desviación típica conforme el FC se va incrementando.

Pletina	5x30 -> FC 6	5x40 -> FC 8	4x40 -> FC 10
Desviación Típica	0,01429	0,02578	0,02593

Tabla 1. Desviaciones típicas para cada modelo de pletina conductora.

En las figuras siguientes se muestra la variación del módulo de H respecto de φ para cada una de las tres pletinas estudiadas.

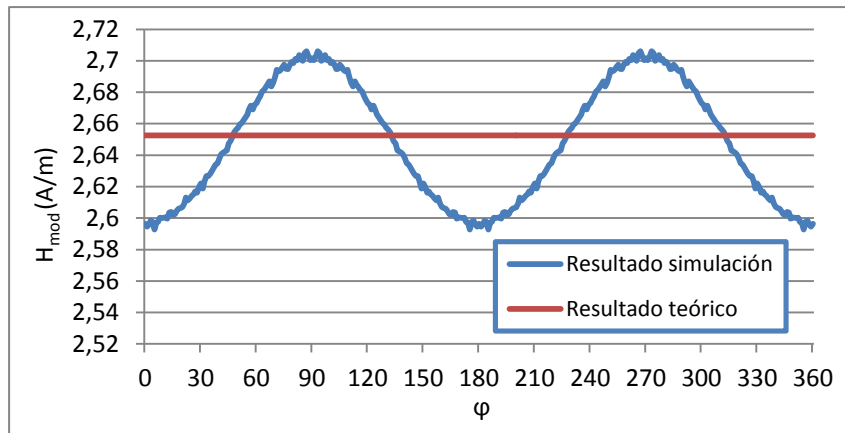


Fig 5. Curva del módulo de H a lo largo de una circunferencia a 60 mm de la pletina conductora de 5x30.

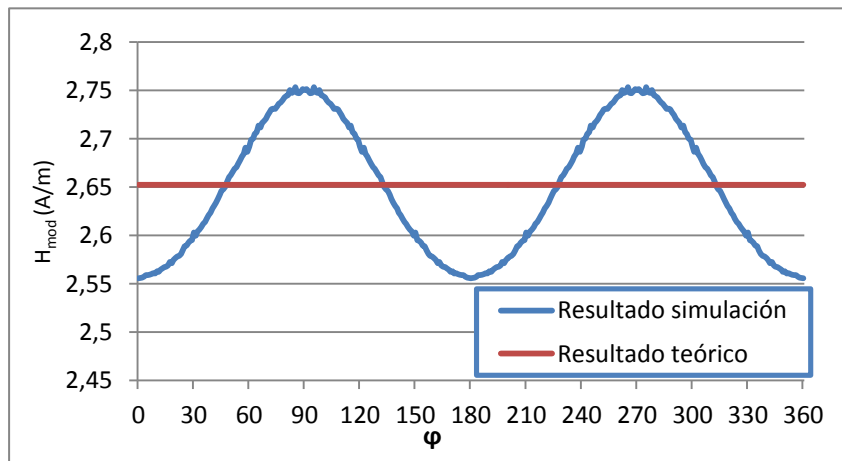


Fig 6. Curva del módulo de H a lo largo de una circunferencia a 60 mm de la pletina conductora de 5x40.

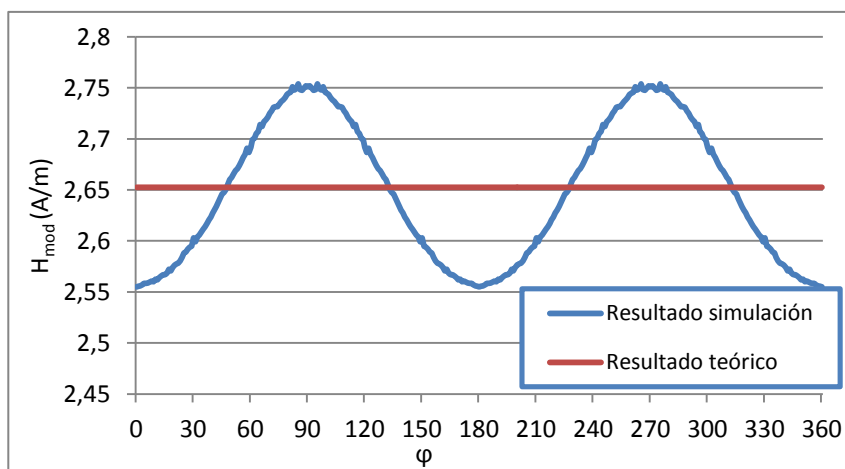


Fig 7. Curva del módulo de H a lo largo de una circunferencia a 60 mm de la pletina conductora de 4x40.

Los resultados que se muestran en las figuras se ajustan al valor teórico proporcionado por la Ley de Ampère si establecemos una media, como se ve en la recta teórica. Se aprecia la fluctuación debida a la geometría, subiendo en la base A (punto en los que el conductor, con su densidad de corriente propia, se encuentra más cerca de la circunferencia) y bajando en el punto medio de la altura B, lugar más alejado del perímetro respecto a la circunferencia.

No obstante, para afianzar los resultados suministrados por el programa de análisis tridimensional, he decidido contrastar la información con otro conocido programa de estudio magnético, FEMM. En este caso realizo un estudio bidimensional del problema con el fin de observar y poder mostrar detalladamente cómo las líneas de campo son deformadas por el FC de la pletina conductora.

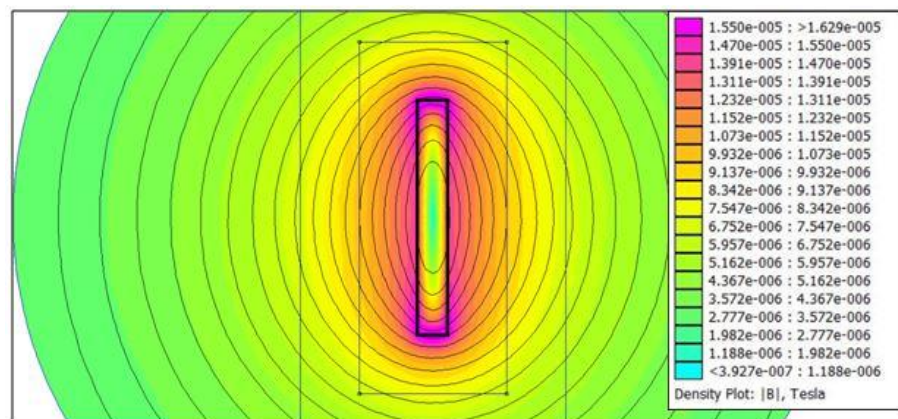


Fig. 8 Líneas de campo $|B|$ deformadas por el FC de la pletina y su densidad (en color). Pletina de 5x40 mm. Simulado bidimensionalmente en FEMM 2D.

Se aprecia notablemente la deformación de las líneas de campo por la geometría rectangular del perfil de la pletina. Ajustadas al contorno de la pletina en las proximidades de la pletina, mientras que conforme se alejan de ésta, van retornando a su forma circular original, fuera del efecto debido a un FC distinto a la unidad

Si comparamos en un ejemplo los resultados obtenidos mediante el estudio tridimensional (Opera 3D) con los obtenidos mediante el bidimensional (FEMM 2D), se aprecia la concordancia de valores, en ambos casos, que se confirman en las gráficas de la variación del campo magnético según el ángulo φ (figuras 9 y 10)

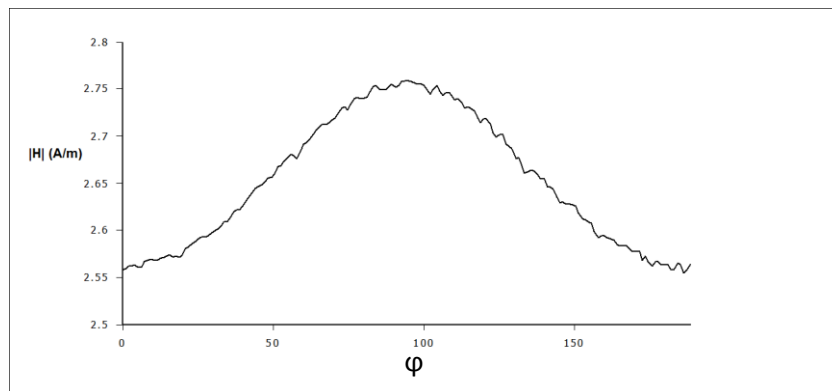


Fig 9. Curva del módulo de H a lo largo de una circunferencia a 60 mm de la pletina conductora de 5x40 en FEMM 2D.

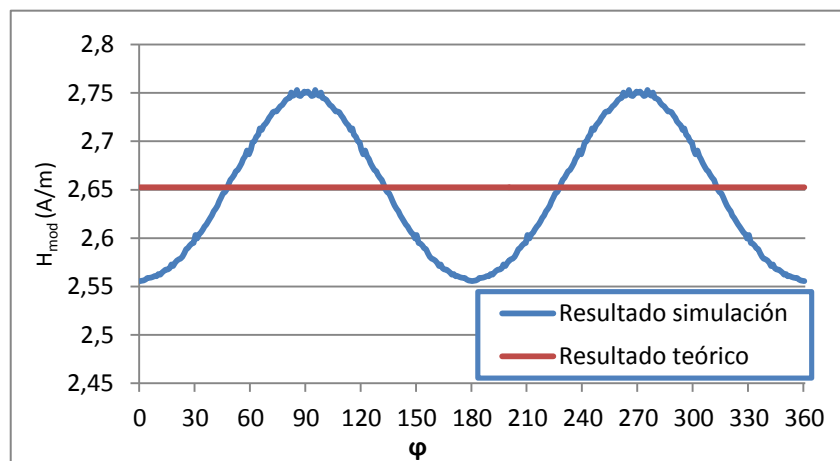


Fig 10. Curva del módulo de H a lo largo de una circunferencia a 60 mm de la pletina conductora de 5x40 en Opera 3D.

A continuación pasaré a describir el trabajo realizado para estudiar cómo el apantallamiento magnético puede ayudar a corregir estas desviaciones en las direcciones de los campos magnéticos.

3. Efecto del apantallamiento magnético

3.1. Descripción del problema y metodología empleada

De acuerdo con el desarrollo presentado en el documento [USO_07], el término apantallamiento magnético quizás no sea el más adecuado en el caso presente, dado que la propia Ley de Ampère hace imposible el debilitamiento de forma pasiva en posiciones exteriores a la pantalla de campos magnéticos procedentes de corrientes eléctricas circulando por conductores que se encuentran dentro de la pantalla. No obstante, lo que sí ocurre, según describe P.N. Miljanic en [MIL 97], es que una pantalla cilíndrica reorienta las líneas de campo magnético creadas por conductores interiores situados fuera del eje de simetría de la pantalla, haciéndolas concéntricas a ella, lo que es extrapolable a este estudio, cambiando el concepto de excentricidad respecto al eje de simetría por la geometría no filiforme de la sección del conductor, es decir, su factor de forma.

La utilización del Método de los Elementos Finitos para el cálculo de las distribuciones de campo magnético en el exterior de estas pantallas puede ser muy útil para prever mejoras en los errores de medida de corriente que incorporen pantallas interiores.

Partiendo del criterio del FC establecido en el apartado 2.1 de este documento, se realizarán simulaciones incorporando pantallas cilíndricas de pared muy delgada de diferentes materiales, tanto lineales como no lineales. Observaré el efecto para diferentes valores de permeabilidad magnética (en el caso de las pantallas lineales) o para diversos valores de intensidad de corriente (en el caso de las pantallas no lineales).

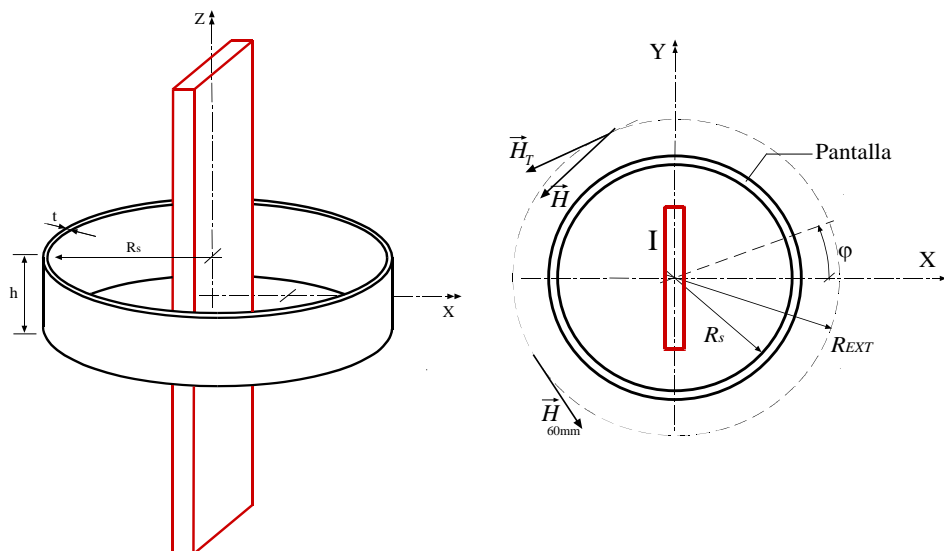


Fig 11. Esquema de disposición geométrica del modelo con pantalla magnética.

Las especificaciones de la pantalla magnética para todos los modelos son las siguientes: Radio interior $R_s = 53$ mm, espesor $t = 0.265$ mm, altura $h = 40$ mm. Las características de los modelos se detallan en profundidad en el Anexo 1.

Como ya se introdujo en el apartado 2.1, el criterio tomado para estudiar y comparar el comportamiento de las pantallas magnéticas de los diferentes materiales a la hora de rectificar las desviaciones del campo magnético producidas por el FC de la pletina ha sido el cociente

$$H_{tang}/H_{ref} \quad (3)$$

es decir, el valor de la componente tangencial a la circunferencia exterior a la pantalla del vector intensidad de campo magnético, H_{tang} , respecto al mismo valor producido en el mismo punto por el conductor de referencia, filiforme y a 1 Amperio, que coincide con su módulo. La desviación típica del conjunto de valores obtenidos nos indica el grado de discrepancia entre ambos, y por ende, cuán rectificado ha sido el campo magnético por la pantalla.

Como se aprecia en [USO_07], se han de tomar valores de dos componentes:

- La componente tangencial de **H** creada por una corriente eléctrica que circula por la pletina rectangular de longitud infinita centrada en el origen a lo largo de una circunferencia externa a la pantalla de radio 60 mm obtenido mediante el MEF.
- El módulo de **H** creado por una corriente eléctrica que circula por un conductor filiforme de longitud infinita centrado en el origen a lo largo de una circunferencia externa a la pantalla de radio 60 mm obtenido mediante la Ley de Ampère.

El cociente entre ambas se alejará de la unidad a medida que se deforme la línea de campo magnético, ergo la desviación típica, σ , será mayor cuanto mayor sea la dispersión entre los valores, y con ello la deformación.

3.2. Pantallas magnéticas de material lineal

En el primero de los casos trabajé con pantallas magnéticas de material lineal al que yo mismo establecía la permeabilidad magnética, en un amplio rango, para estudiar su efecto. A diferencia de los casos con materiales no lineales, en este la Intensidad fue fijada a 1 Amperio para todas las permeabilidades relativas.

Para cada una de las pletinas de FC 6, 8 y 10 se simularon 8 pantallas de permeabilidades relativas diferentes: 500, 1000, 2500, 5000, 7500, 10000, 50000 y 100000.

Los valores de las desviaciones típicas obtenidas (σ), se encuentran en la Tabla 2:

	Permeabilidad Relativa (μ)								
Pletinas	1	500	1000	2500	5000	7500	10000	50000	100000
5x30 (FC 6)	0,01429	0,00650	0,00452	0,00276	0,00202	0,00176	0,00162	0,00128	0,00124
5x40 (FC 8)	0,02578	0,01171	0,00814	0,00495	0,00362	0,00314	0,00289	0,00227	0,00219
4x40 (FC 10)	0,02593	0,01177	0,00818	0,00498	0,00364	0,00316	0,00291	0,00228	0,00220

Tabla 2. Valores de desviación típica obtenidos mediante simulaciones lineales

Si representamos la desviación típica obtenida para el vacío y para una permeabilidad relativa de 1000 y de 5000 en función del factor de forma, observamos cómo a mayor factor de forma, la deformación de las líneas de campo es mayor, pero también cómo el efecto de la pantalla atenúa esa deformación, ver Figura 12. Un punto de esta gráfica común a todas las permeabilidades es el (1, 0), ya que a un factor de forma 1, le corresponde una desviación típica igual a cero [USO_07].

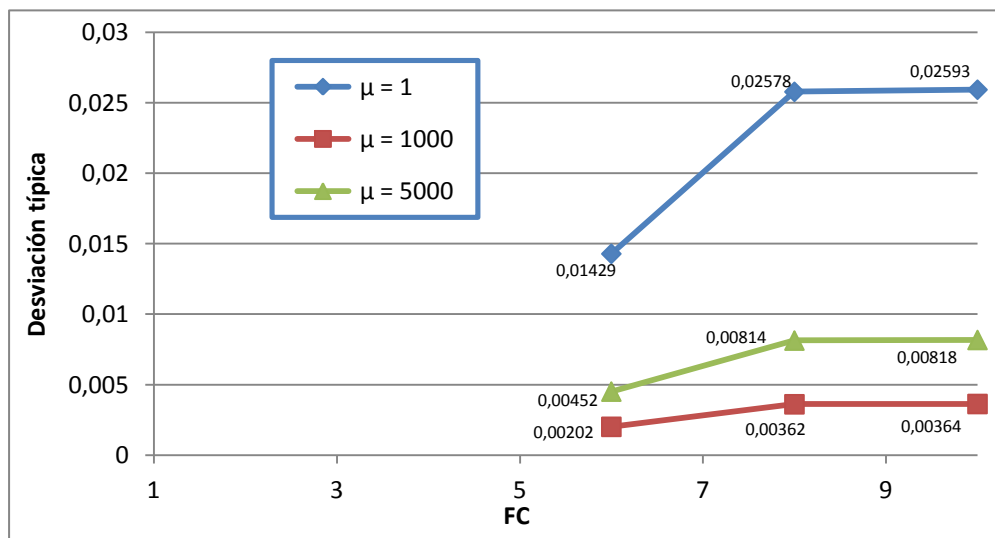


Fig 12. Variación de la desviación desviación típica en función de la permeabilidad relativa para una pletina de 5x30.

A continuación se muestran las gráficas correspondientes a cada pletina conductora individualmente, en la que se aprecia la línea de tendencia de sus valores a medida que la permeabilidad relativa se incrementa. La línea obtenida se ajusta muy bien a una línea teórica similar en los tres casos.

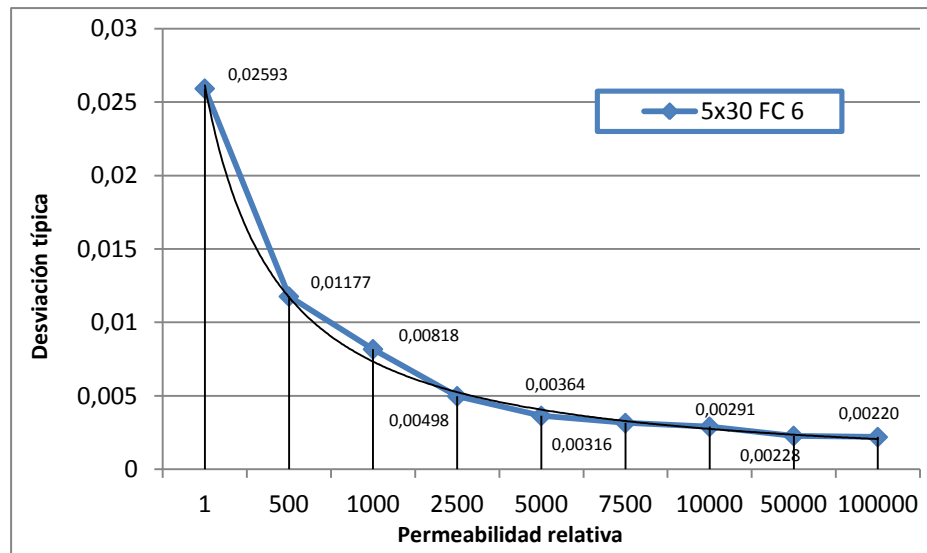


Fig 13. Variación de la desviación desviación típica en función de la permeabilidad relativa para una pletina de 5x30.

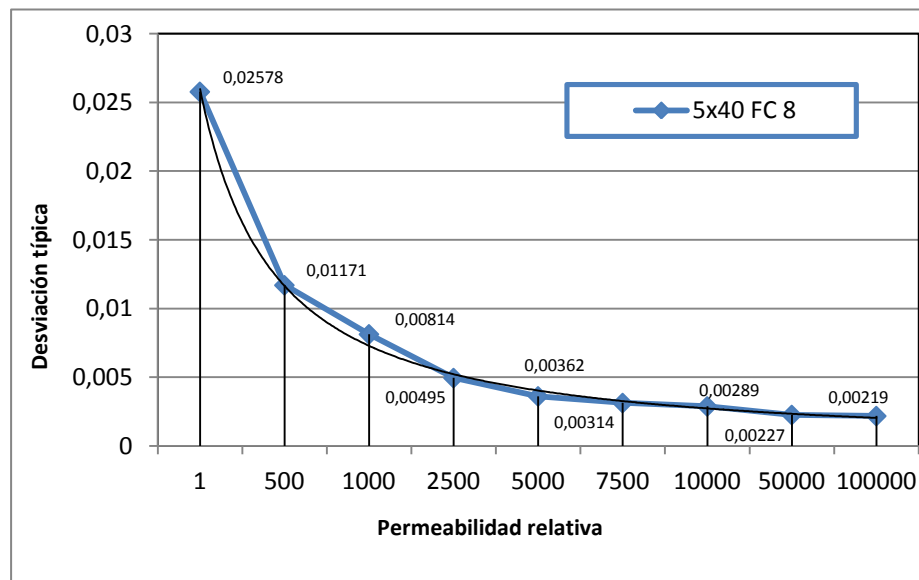


Fig 14. Variación de la desviación desviación típica en función de la permeabilidad relativa para una pletina de 5x40.

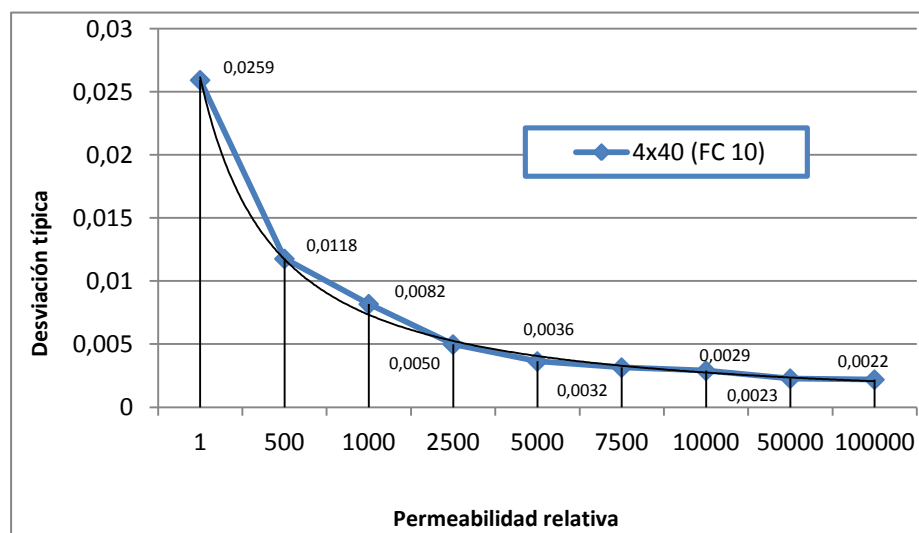


Fig 15. Variación de la desviación desviación típica en función de la permeabilidad relativa para una pletina de 4x40.

Los resultados obtenidos con las tres pletinas son coherentes y muestran un descenso de la desviación típica conforme aumenta la permeabilidad del material de la pantalla. Las líneas de campo son rectificadas en puntos exteriores aproximándose más a su forma circular conforme aumenta la permeabilidad. En los tres casos la curva puede aproximarse a una única función potencial de la forma:

$$v = 0,0261\mu^{-1,157} \quad (4)$$

Para poder comprobar la validez de esta expresión, debería observarse la tendencia en pletinas de FC distintas a las analizadas, ya que es un resultado que puede ayudar a la parametrización.

3.3. Pantallas magnéticas de material no lineal

3.3.1. Pantalla de acero al silicio Si-Iron

Una vez observado el comportamiento de las pantallas magnéticas en materiales cuyas curvas de magnetización son lineales, vamos a estudiar el mismo problema para un material de curva no lineal, como es el acero al silicio, Si-Iron. En la figura inferior se puede observar su curva B-H correspondiente.

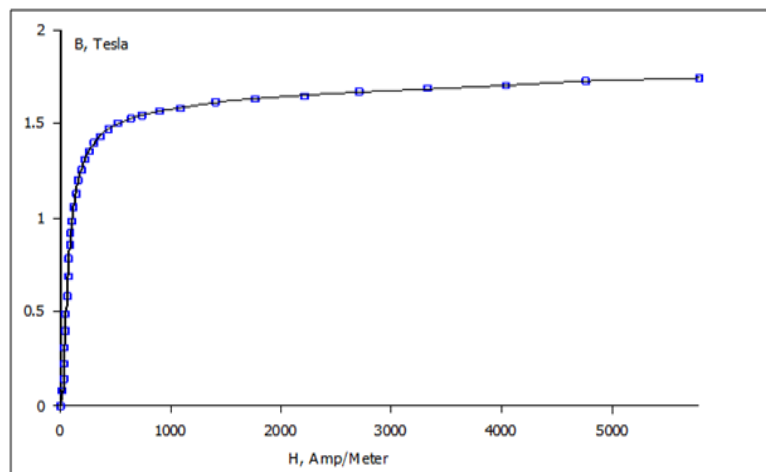


Fig 16. Curva de magnetización B-H del acero al silicio Si-Iron.

Para este caso, de condiciones de modelado idénticas a los anteriores (descritas en el Anexo 1), se sometió a los tres diferentes modelos de pletinas conductoras a variaciones de corriente para observar el comportamiento a lo largo de varios puntos de su curva de magnetización. Las intensidades que se hicieron circular por las pletinas conductoras fueron 25 A, 100 A, 250 A y 500 A. Por lo tanto, según el criterio establecido previamente para las desviaciones típicas, se obtuvo la siguiente tabla en función de la pletina y la intensidad de corriente.

	Intensidad de corriente (A)			
Pletinas	25	100	250	500
5x30 (FC 6)	0,0029	0,0029	0,0029	0,0135
5x40 (FC 8)	0,0030	0,0053	0,0053	0,0241
4x40 (FC 10)	0,0030	0,0053	0,0053	0,0242

Tabla 3. Valores de desviación típica para pantallas con pared de material Si-Iron

A continuación se muestran las gráficas correspondientes a cada pletina conductora, donde se aprecia la línea de tendencia de sus valores a medida que la intensidad de corriente aumenta. Se han representado también los valores obtenidos partiendo de los resultados lineales. Para calcularlos he estimado el valor del módulo de **H** en el interior de la pantalla, lo que me permite conocer la permeabilidad a la que trabaja el material de la pantalla. Con este valor de permeabilidad puedo estimar un valor de desviación típica mediante los resultados de la Tabla 2.

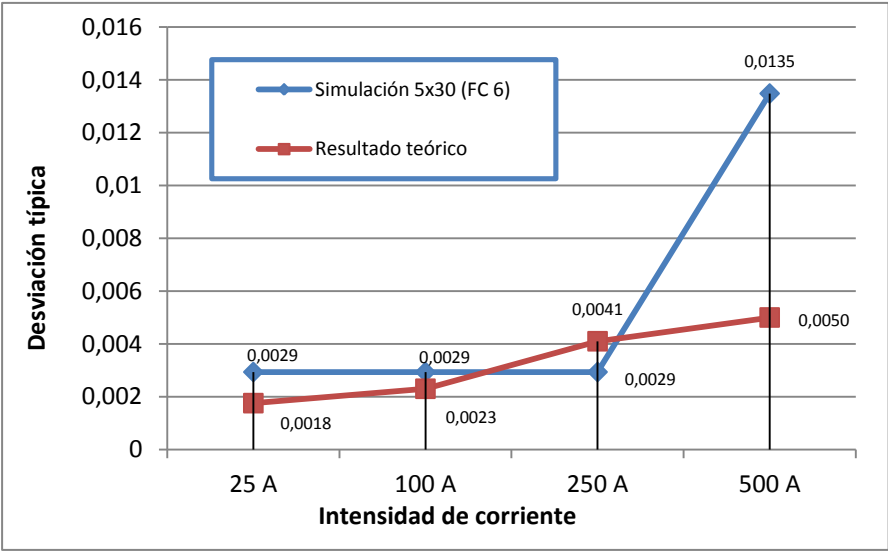


Fig 17. Variación de la desviación típica en función de la permeabilidad relativa para una pletina de 5x30.

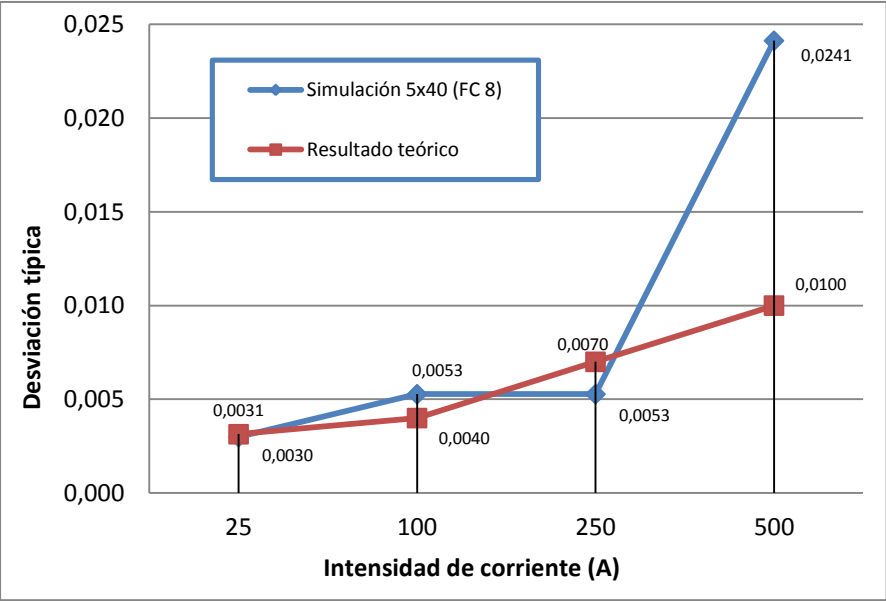


Fig 18. Variación de la desviación típica en función de la permeabilidad relativa para una pletina de 5x40.

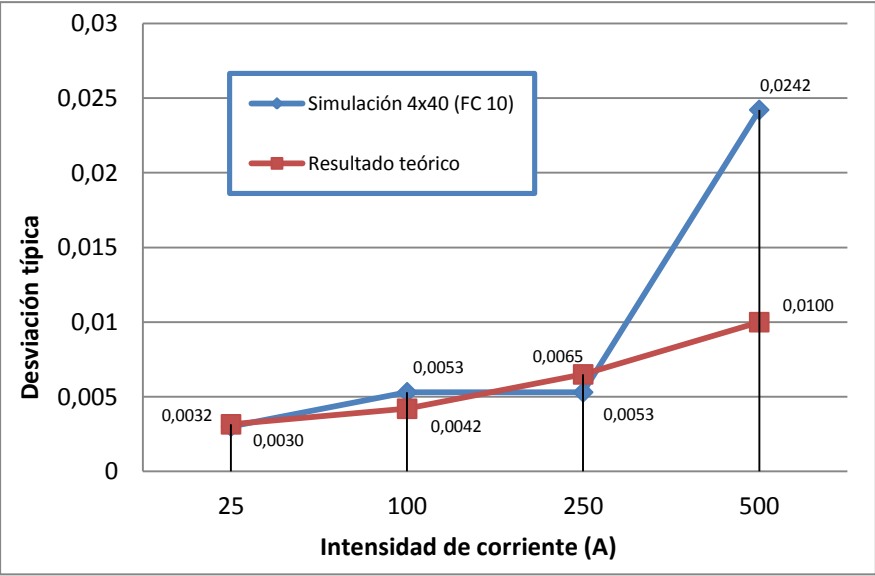


Fig 19. Variación de la desviación típica en función de la permeabilidad relativa para una pletina de 4x40.

3.3.2. Pantalla de Trafoperm

El otro material empleado en las simulaciones ha sido el *trafoperm* [VAC_13], un acero empleado en la construcción de transformadores. En la figura 20 se muestra la curva de magnetización de este material.

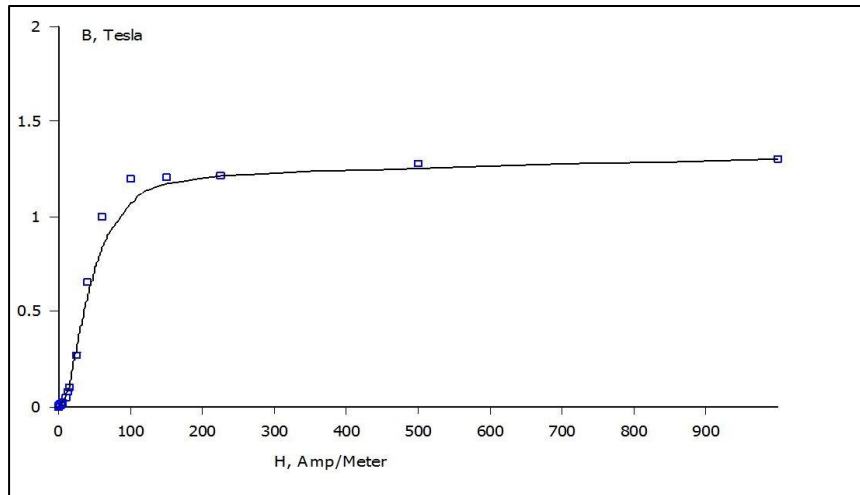


Fig 20. Curva de magnetización B-H del trafoperm.

Los valores obtenidos para la desviación típica en cada pletina y para cada valor de corriente se encuentran en la Tabla 4.

Las gráficas correspondientes a las pletinas conductoras e FC 6, 8 y 10 se muestran en las Figura 21, Figura 22 y Figura 23, respectivamente.

	Intensidad de corriente (A)			
	25	100	250	500
Pletinas				
5x30 (FC 6)	0,0022	0,0090	0,0051	0,0051
5x40 (FC 8)	0,0040	0,0166	0,0250	0,0259
4x40 (FC 10)	0,0041	0,0164	0,0248	0,0260

Tabla 4. Valores de desviación típica para pantallas con pared de material trafoperm.

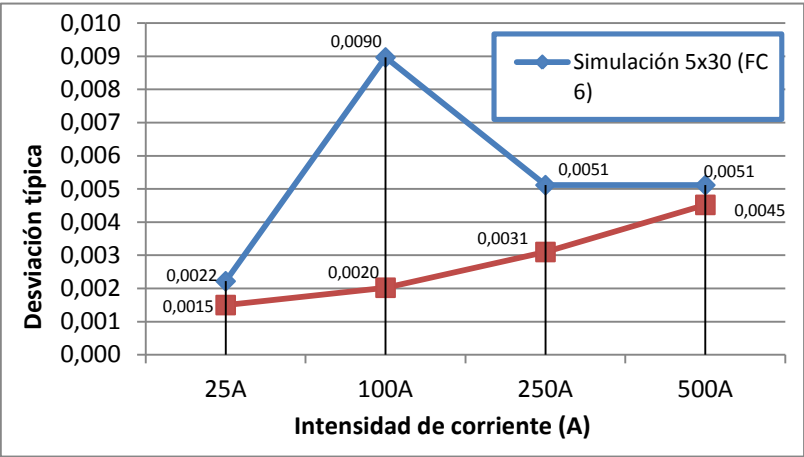


Fig 21. Variación de la desviación desviación típica en función de la permeabilidad relativa para una pletina de 5x30.

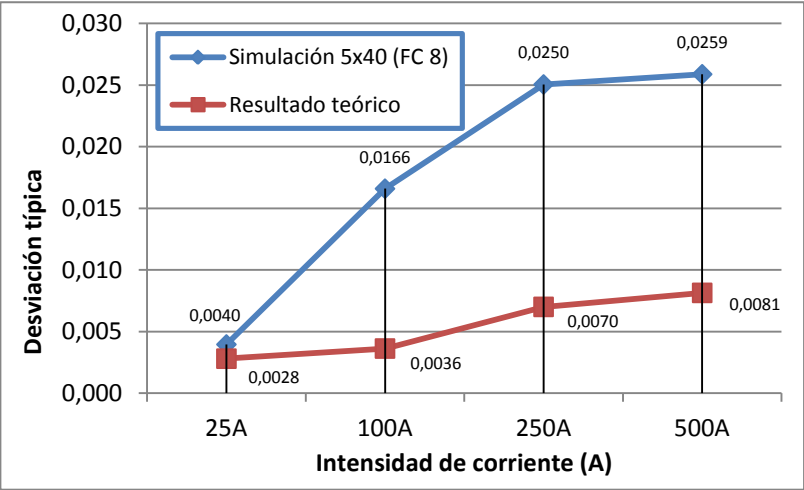


Fig 22. Variación de la desviación desviación típica en función de la permeabilidad relativa para una pletina de 5x40.

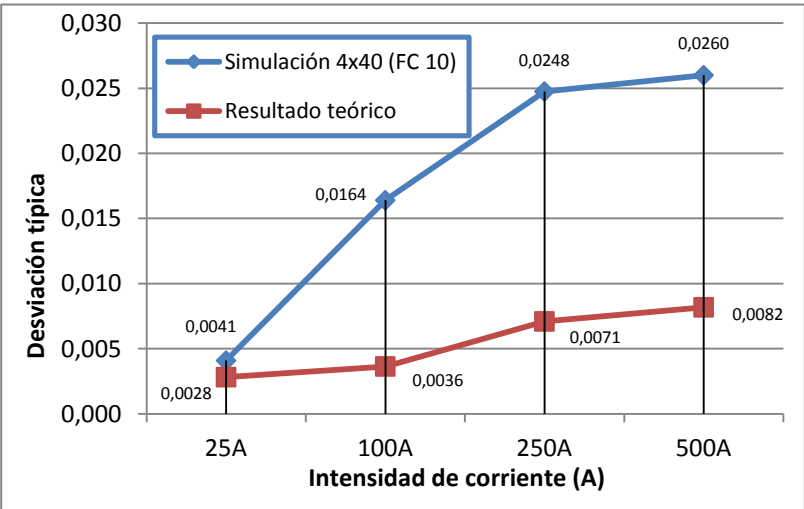


Fig 23. Variación de la desviación desviación típica en función de la permeabilidad relativa para una pletina de 4x40.

Los resultados de las simulaciones lineales muestran una divergencia con los resultados teóricos cuyo origen asocio a la curva de magnetización. Las simulaciones se han repasado y el material de la pared presenta la permeabilidad esperada para el valor de H creado por la corriente interior. El valor teórico de la permeabilidad del Si-Iron para una corriente de $I = 500$ A es de 800. En el trafoperm las parejas de valores a partir de 1000 A/m no están caracterizadas, por lo que asocio error al valor estimado de permeabilidad. El resultado de estas comprobaciones, valor de la permeabilidad relativa en puntos interiores a la pantalla, las muestro en las Figura 24 (caso de Si-Iron) y Figura 25 (caso del Trafoperm). También es posible que el espesor t de la pantalla pueda afectar a los resultados, ya que no he podido mallar con elementos muy pequeños lo que puede originar errores de cálculo.

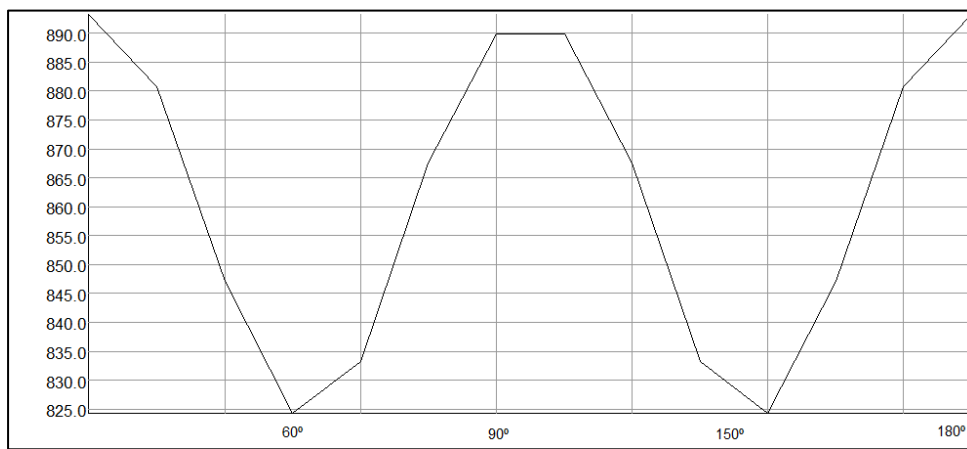


Fig 24. Fluctuación de la permeabilidad relativa en el interior de la pantalla de Si Iron a 500 A.

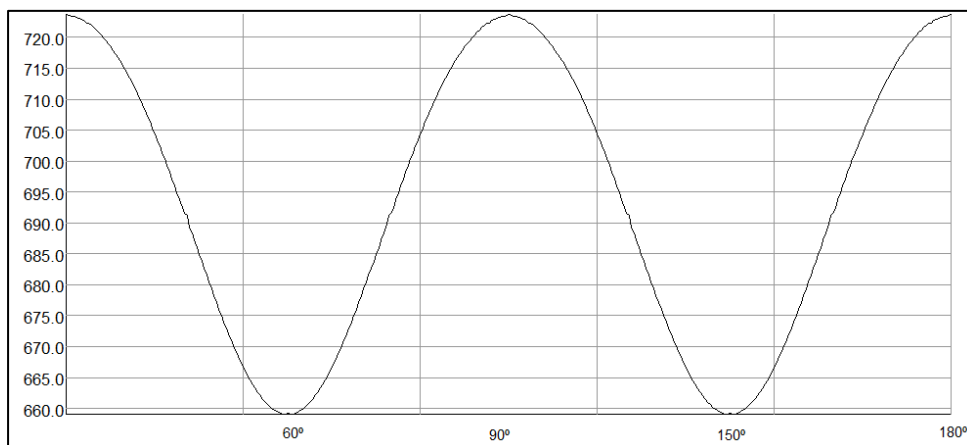


Fig 25. Fluctuación de la permeabilidad relativa en el interior de la pantalla de trafoperm a 500 A.

4. Conclusiones

En este trabajo he desarrollado modelos tridimensionales de pantallas magnéticas y demostrado cómo afectan a la forma de las líneas de campo magnético creadas por corrientes eléctricas circulando por pletinas conductoras. He realizado simulaciones donde el material de la pantalla presentaba una permeabilidad constante y otras con materiales no lineales.

El uso de este tipo de pantallas puede ser de utilidad para simplificar y mejorar instrumentos de medida de corriente basados en sensores magnéticos como los sensores de efecto Hall o magnetorresistivos.

Ha quedado por realizar una comprobación experimental de los resultados, que me permitieran validar las simulaciones numéricas, siendo esta la primera tarea futura a realizar. También es importante la perfecta caracterización de los materiales magnéticos, así como disponer de equipos informáticos capaces de gestionar bases de datos mayores que las que yo he generado. Una limitación con la que me he encontrado es la del mallado de la pantalla, al ser esta de espesor muy pequeño respecto al resto de magnitudes de mi problema, lo que exigía un tamaño de elemento muy pequeño y un incremento notable en el número de nudos del modelo.

Otra labor futura es continuar la parametrización del problema con la intención de generalizar los resultados.

Referencias

- * **[BAZ 00]** Bazzocchi, R., Di Rienzo, L. "Interference rejection algorithm for current measurement using magnetic sensor arrays" *Sensor and Actuators* 85 (2000) pp. 38-41.
- * **[MIL 97]** Miljanic, P.N. "Mutual Inductance Highly Independent of Primary Winding Position and Ambient Fields" *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 46. No. 2 pp. 471-473. April 1997.
- * **[RES 70]** Resnick, R., Halliday, D., "Física, parte II" 2ª Edición. Compañía Editorial Continental, S.A. 1970.
- * **[SIM 79]** Simkin, J. Trowbridge, C.W. "On the use of total scalar potential in the numerical solutions of field problems in Electromagnetics". *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 14, pp. 423-440, 1979.
- * **[USO_07]** Usón, A. "Aplicación del MEF al perfeccionamiento de pinzas amperimétricas". Tesis doctoral de la Universidad de Zaragoza. 2007.
http://zaguan.unizar.es/record/1912/files/TUZ_0026_uson_finitos.pdf.
- * **[VAC_13]** <http://www.vacuumschmelze.com/en/the-company/quality/information-sheets-msds/trafoperm.html>

Anexo 1. Modelo de OPERA-3D utilizado en el documento

Nombre del archivo: Simulación_Opera_Pantalla.OPCB

Background: Potencial reducido. Aire. Dimensiones (coordenadas en mm) $-500 < x < 500$; $0 < y < 500$; $0 < z < 1000$. DSL = 1, MES = 50, ET = lineal, Simetrías positiva OXY, negativa OXZ.

Surroundings_II: Potencial reducido. Aire. Cilindro centrado en el origen, altura = 2000 mm, radio = 500 mm. DSL = 2, MES = 30, ET = lineal.

Surroundings_I: Potencial total. Aire. Cilindro centrado en el origen, altura = 300 mm, radio = 100 mm. DSL = 3, MES = 10, ET = lineal.

Air_Int_Ext: Potencial total, aire, cilíndrica, centrado en el origen, de altura 280 mm y radio 80 mm. DSL = 4, MES = 5, ET = lineal.

Shielding_01: Potencial total, capa de material ferromagnético cilíndrica, centrada en el origen, radio 53 mm, espesor 0,265 mm, y altura 40 mm. En las dos superficies curvas se define un backward-layering con 1 capa de 0,1*layer. DSL = 5, MES = 1, ET = lineal.

Wire_Case: Potencial reducido. Aire. Cilindro, centrado el origen, radio = 5 mm, altura = 2000 mm. DSL = 6, MES = 5, ET = cuadrático.

Wire_Ext_Case_2R1: Potencial reducido. Aire. Cilindro, de eje paralelo al eje Z. radio = 5 mm, altura = 2000 mm. DSL = 6, MES = 5, ET = cuadrático.

Database: Simulación_Opera_Pantalla. 01.

Condiciones de contorno: en la celda background se imponen condiciones de contorno tangenciales en las caras paralelas a los planos OXY y OXZ, y condiciones de contorno normales para las caras paralelas a OYZ.

Tiempo de ejecución por simulación: 2 h 40 m en Intel i5, 3.2 GHz por núcleo de procesador, procesador de 4 núcleos, 8 Gigas de RAM, Windows 7 Enterprise, Opera 15.1 RS, TOSCA versión 10.506