

APANTALLAMIENTO ELECTROMAGNETICO
Estudio de la variación de campo magnético debido a corrientes inducidas.
R.M.Gazoni (gazoni@cnea.gov.ar) – C. Zotelo (zotelo@at.fcen.uba.ar)

Resumen

Se estudia en el presente trabajo la variación del campo magnético debida a corrientes inducidas en materiales conductores de distinta naturaleza y geometría.

Introducción

El apantallamiento electromagnético hace referencia a la reducción que se observa en el campo magnético (variable) medido en un punto del espacio a una distancia determinada de la fuente de campo cuando se coloca algún medio conductor (pantalla) entre la fuente y el punto donde se mide el campo magnético.

La reducción del campo magnético cuando se coloca la pantalla respecto de la medición en ausencia de la misma se justifica a partir de la ley de inducción de Faraday, según la cual cuando se tiene un campo magnético variable atravesando una espira conductora, sobre ésta se induce una fuerza electromotriz que es proporcional a la derivada del flujo concatenado por su geometría y produce una corriente que a su vez generará un campo magnético (de acuerdo a la ley de Biot y Savart) que tenderá a oponerse al crecimiento del campo original.

De esta manera, en el punto donde se mide el campo magnético se obtendrá la superposición de los dos campos, siendo el campo resultante de menor intensidad que el que se registraría en ausencia de la “pantalla”.

En el presente trabajo se analizará en una primera instancia el fenómeno del apantallamiento cuando el medio que oficia de pantalla tiene geometría cilíndrica.

Para este caso, partimos de las ecuaciones de Maxwell:

$$\nabla \cdot E = \frac{\rho}{K\epsilon_0} \quad (1)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (3)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (2)$$

$$\nabla \times B = \mu_0 \mu_r J + \mu_0 \mu_r K \epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} \quad (4)$$

Consideramos ahora el caso de estudio particular que nos compete: dos solenoides concéntricos uno dentro de otro, con un cilindro conductor dispuesto entre ellos, tal como se observa en la Figura 1. Por el primer solenoide se hace circular una corriente alterna (que de acuerdo a la ley de Biot – Savart generará un campo magnético alterno) mientras que el solenoide interno “concatenará” el flujo producido por el externo y mediante un voltímetro podrá registrarse la f.e.m. inducida en el interno.

Consideramos que B_1 es campo generado por el solenoide externo, B_p el generado por las corrientes inducidas en la pantalla conductora y B_2 el campo magnético en el interior del solenoide interno, tenemos:

$$B_2 = B_1 + B_p \quad (5)$$

Considerando $B_{1(t)} = B_1 \cdot e^{i\omega t}$, por ley de inducción de Faraday, la fem inducida en la pantalla cilíndrica será:

$$\mathcal{E} = -\frac{\partial \Phi_B}{\partial t} = (\pi R^2) \cdot i \cdot \omega \cdot B_{2(t)} \quad (6)$$

Y teniendo en cuenta la geometría del arreglo, la corriente que circulará en la pantalla tendrá dirección azimutal, y su densidad lineal vendrá dada por:

$$J = \frac{\mathcal{E}}{\delta R} = \frac{\mathcal{E}}{2\pi R \cdot \rho / d} = i \frac{R d \omega}{2\rho} \cdot B_{2(t)} \quad (7)$$

Asimismo la corriente inducida en el cilindro generará un campo magnético B_p que vendrá dado por:

$$B_p = \mu_0 \cdot J \cdot K_{geom} = i \mu_0 \frac{\pi R d \cdot f}{\rho} \cdot K_{geom} \cdot B_{2(t)} \quad (8)$$

Donde K_{geom} es un coeficiente de corrección que depende de la geometría del problema estudiado y que podrá ser usado como parámetro de ajuste.

De esta manera, reemplazando en (5), se tiene que el campo en el interior del solenoide interno será:

$$B_{2(t)} = B_{1(t)} + i\mu_0 \frac{\pi R d \cdot f}{\rho} \cdot K_{geom} \cdot B_{2(t)} \quad (9)$$

Y entonces:

$$B_{2(t)} = \frac{B_{1(t)}}{1 - i \frac{R d \cdot \mu_0 \omega}{2 \rho} \cdot K_{geom}} = \frac{B_{1(t)}}{1 - i \frac{R d}{\delta^2} \cdot K_{geom}} \quad (10)$$

Con

$$\delta^2 = \frac{2}{\sigma \cdot \mu_0 \omega} \quad (11)$$

Donde δ corresponde a la “distancia de penetración”. Consideramos que $d \ll \delta \ll R$, con R el radio del cilindro conductor, d su espesor y δ la distancia de penetración.

De esta manera, si se mide el cociente de las tensiones en el solenoide con y sin pantalla, tendremos:

$$\frac{V_{2(t)}}{V_{1(t)}} = \frac{B_{2(t)}}{B_{1(t)}} = \left[1 - i \frac{R d}{\delta^2} \cdot K_{geom} \right]^{-1} \quad (12)$$

Y el cociente de los valores pico (o eficaces) vendrán dados por

$$\left| \frac{V_{2(t)}}{V_{1(t)}} \right|_{pico} = \left| \frac{V_{2(t)}}{V_{1(t)}} \right| = \left[1 + \left(\frac{R d}{\delta^2} \cdot K_{geom} \right)^2 \right]^{-1/2} \quad (13)$$

Y a este cociente es a lo que denominamos factor de apantallamiento, y su dependencia con la frecuencia es lo que se pretende estudiar en este trabajo.

Desarrollo experimental

Durante la primera etapa del trabajo se montó un dispositivo como el que se presenta en la Figura 1, utilizando un solenoide construido con 244 espiras de alambre de cobre arrolladas en torno a un tubo de PVC, con un diámetro medio de 106mm, inductancia de 4,28mH y resistencia de 10,86 Ω . Este solenoide (primario) fue excitado mediante un generador de funciones desde los 50 Hz hasta algunas decenas de miles de hercios. Asimismo la tensión sobre este solenoide fue monitoreada mediante un canal de osciloscopio.

Concéntrico al solenoide primario y centrado respecto de la longitud del mismo, se ubicó un solenoide de 300 espiras, con inductancia de 1mH y resistencia de 8,6 Ω . Este solenoide se fijó a una varilla de acrílico a fin de fijar su posición y evitar interferencias con el campo magnético que aparecerían en el caso de utilizar soportes metálicos. Los cables del solenoide interno fueron trenzados y fijados a la varilla antes de conectarlos al canal restante del osciloscopio a fin de reducir los errores en la medición debido a concatenación de flujo por parte de los mismos.

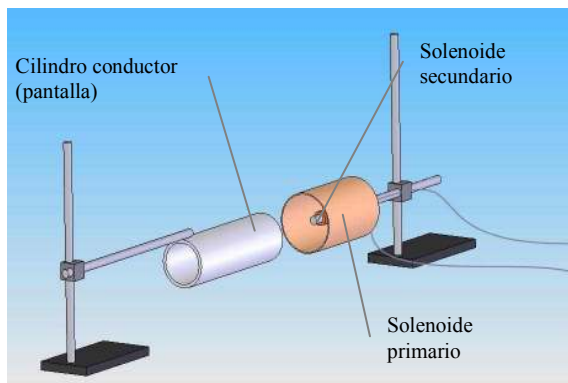


Figura 1.a. Configuración de ensayo para medir la tensión inducida sin apantallamiento

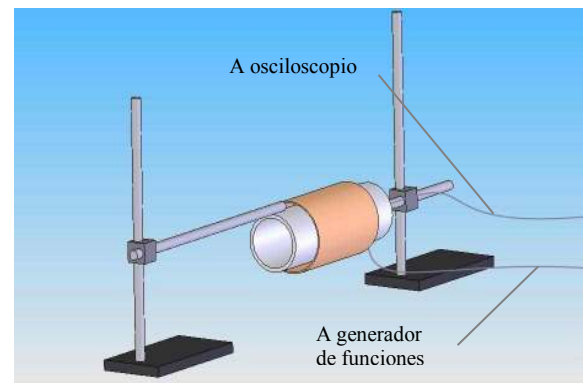


Figura 1.b. Configuración de ensayo para medir la tensión inducida con apantallamiento

Un cilindro conductor (aluminio de 1,9mm de espesor en un caso y cobre de 1,2mm de espesor en otro caso) fueron fijados a otra varilla aislante y a un soporte que permitía deslizar cada cilindro dentro del solenoide externo, rodeando al interno para observar las variaciones de la señal registrada por el osciloscopio en el solenoide interno.

Se excitó el solenoide externo (primario) con frecuencias desde 50 Hz hasta algunas decenas de miles de hercios y se midió la señal inducida sobre el solenoide interno (secundario) para cada valor de frecuencia de excitación cuando no había pantalla alguna entre ellos. Posteriormente se colocó el cilindro conductor de aluminio y se procedió a medir para cada frecuencia la nueva señal inducida en el solenoide.

En la Figura 2 y Figura 3, se presentan los resultados obtenidos utilizando tubos de cobre y aluminio respectivamente.

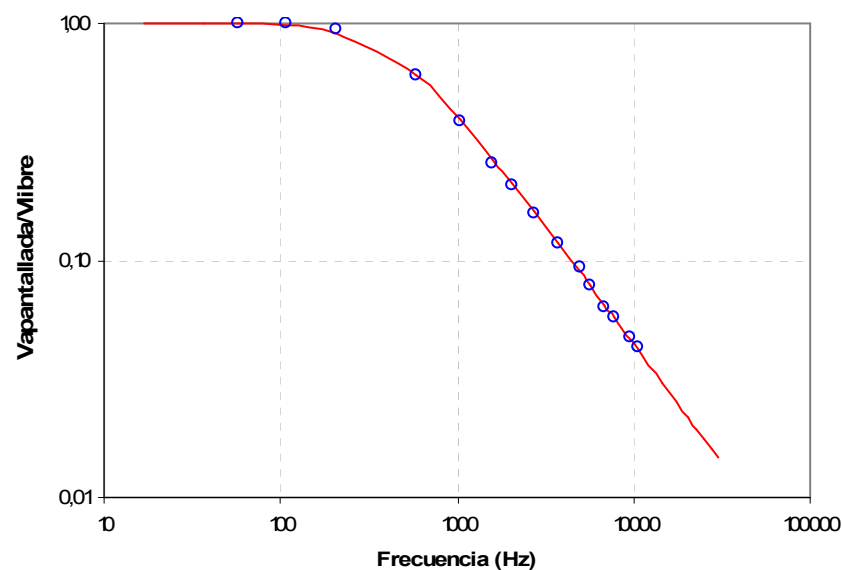


Figura 2. Apantallamiento obtenido con tubo de cobre de 1,2mm de espesor. Se agrega en línea continua el resultado correspondiente al modelo teórico desarrollado en la introducción.

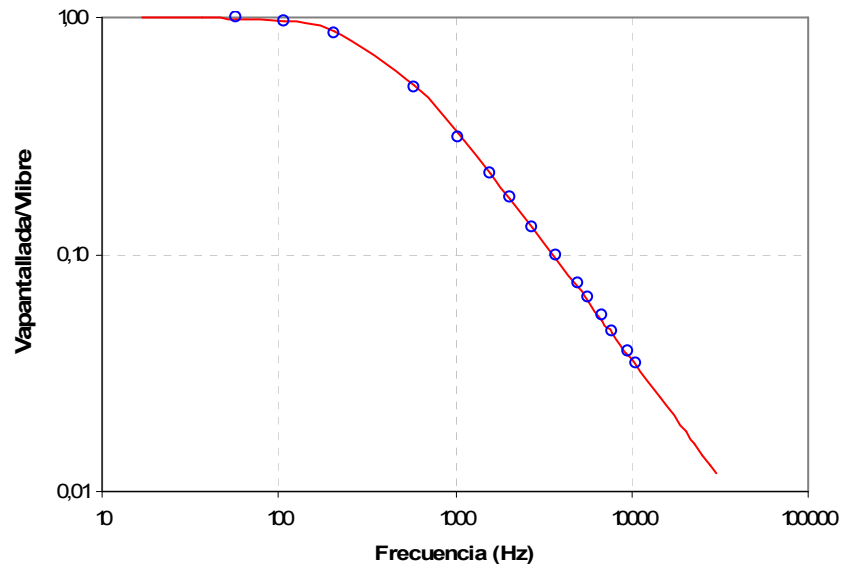


Figura 3. Apantallamiento obtenido con tubo de aluminio de 1,9mm de espesor. Se agrega en línea continua el resultado correspondiente al modelo teórico desarrollado en la introducción.

Como se observa en las figuras precedentes, los resultados experimentales se ajustan muy bien al modelo teórico, encontrándose una discrepancia menor al 4% en la zona lineal del modelo (de 1Khz a 20 KHz).

Como segunda instancia de estudio, se pretendió verificar la validez del modelo descripto y de la ecuación obtenida (13) en el caso de apantallamiento donde no existe simetría cilíndrica.

Para esta etapa, se dispusieron dos solenoides iguales de 300 espiras, 1mH y $8,6 \Omega$ en sendas varillas aisladas y sujetas a soportes, de forma tal que quedasen enfrentadas y separadas unos 30 mm entre sí.

Como medio de “apantallamiento” se utilizaron placas de aluminio de 300mmx200mm y 2,3 mm de espesor en una primera instancia, agregándose una segunda placa de iguales características en una medición posterior.

Al igual que en la experiencia previamente descripta, se excitó uno de los solenoides con una señal alterna de frecuencias entre 50Hz y unos miles de hercios, registrándose para cada frecuencia de excitación la señal inducida sobre el restante solenoide cuando se encontraba directamente en frente del solenoide primario. Seguidamente se colocó la placa que hacia de las veces de “pantalla” y se repitió la medición.

En la Figura 4 y la Figura 5 se presentan los resultados del factor de apantallamiento correspondiente a una y dos placas de aluminio de 2,3 mm de espesor respectivamente.

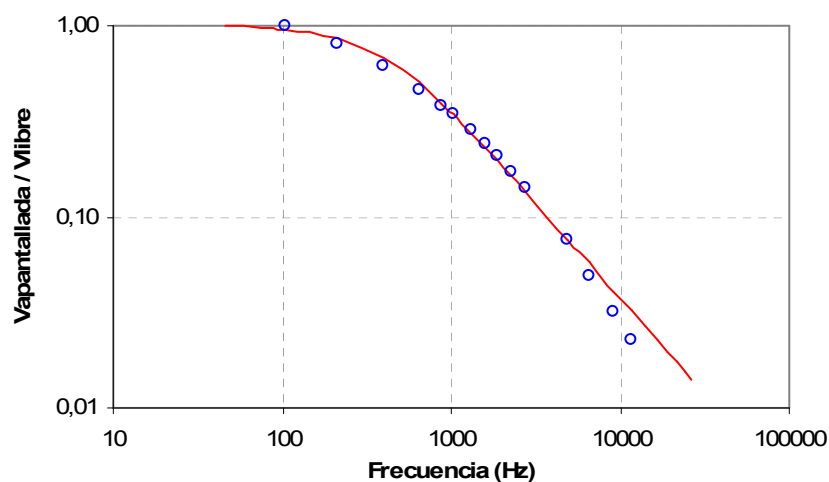


Figura 4. Apantallamiento obtenido a partir de una placa de aluminio de 2,3mm de espesor. Se agrega en línea continua el resultado correspondiente al modelo teórico desarrollado en la introducción.

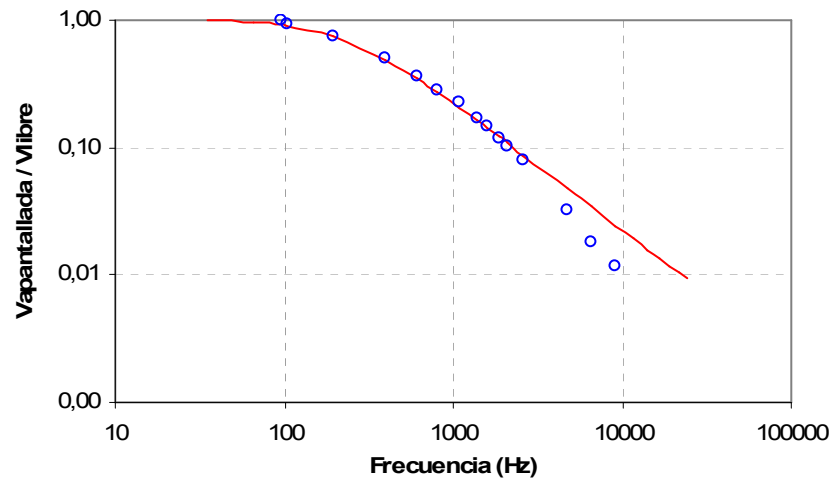


Figura 5. Apantallamiento obtenido a partir de dos placas de aluminio de 2,3mm de espesor. Se agrega en línea continua el resultado correspondiente al modelo teórico desarrollado en la introducción.

Como se puede observar en los dos últimos gráficos, el modelo resulta aceptable para bajas frecuencias, observándose una discrepancia importante entre éste y los resultados experimentales por encima de los 5000Hz, aumentando dicha discrepancia con la frecuencia. Los posibles motivos de esta discrepancia serán discutidos en las conclusiones del presente trabajo.

Conclusiones

Como se mostró en el presente trabajo, puede observarse una gran coincidencia entre el modelo teórico desarrollado y los resultados experimentales obtenidos para el caso de estudio con simetría cilíndrica. En estos casos la discrepancia entre el modelo teórico y las mediciones experimentales fueron menores al 4%.

No obstante en los casos de “apantallamiento plano”, la concordancia entre el modelo y los resultados experimentales no fue tan buena, observándose una notable discrepancia cuando la frecuencia de oscilación del campo superaba los 5Khz.

Si bien la discrepancia observada en las experiencias con simetría plana podría adjudicarse a que el modelo se desarrolló para el caso de simetría cilíndrica; al desarrollar el modelo análogo para el caso plano, se observó la misma dependencia funcional del factor de apantallamiento con la frecuencia, con lo que se entiende que las discrepancias no radican en la simetría del modelo sino en las consideraciones del modelo en sí mismas.

Un análisis mas detallado de ambos modelos, permite ver que una de las consideraciones que se realizan es que el flujo concatenado por la “pantalla” responde al correspondiente debido al campo magnético generado en el solenoide primario y al correspondiente al campo generado por las corrientes inducidas en la pantalla (lo que representaría la autoinducción de la pantalla).

Sin embargo, al analizar la tensión inducida sobre el solenoide secundario, sólo se consideró el flujo debido a los campos del solenoide primario y a las corrientes inducidas en la pantalla, sin considerarse la autoinducción del solenoide secundario.

En una primera aproximación esto resulta aceptable, dado que como el instrumento de medición cuenta con una alta impedancia, la corriente que circula por el solenoide secundario es pequeña, con lo que el campo producido por la misma también resulta ser pequeño. No obstante, en el caso de apantallamiento plano, dado que el solenoide se encuentra mas alejado de las fuentes de campo (solenoide primario u pantalla), el efecto de autoinducción podría resultar de mayor importancia y justificar la discrepancia entre el modelo teórico y los resultados experimentales.

Se considera que para mejorar el presente trabajo podría analizarse un modelo que contemple la autoinducción en el solenoide secundario. Otra alternativa posible sería realizar un análisis numérico para la situación particular de ensayo, que permita calcular los campos mediante iteraciones que reflejen la autoinducción en cada etapa (solenoide primario, pantalla y solenoide secundario).

Se considera que los resultados del presente trabajo fueron satisfactorios, logrando alcanzar una mayor comprensión del fenómeno de inducción en general y del apantallamiento electromagnético en particular.

Referencias

1. Pablo Bellino y Franco Fiorini , Apantallamiento magnético debido a corrientes inducidas en conductores. Laboratorio 5, Cátedra del Dr. S. Gil, Dpto. de física, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, U.B.A.
2. S. Gil y E. Rodriguez, Estudio de las corrientes de Foucault – Eddy Currents. Física re-creativa www.fisicarecreativa.com
3. S.Fahy, C.Kittel & S.Louie, Electromagnetic screening by metals, Am. J. Phys. **56** 989 (1988).
4. P.Rochon & N.Gauthier, Strong shielding due to an electromagnetically thin metal sheet, Am.J.Phys. 58 276 (1990).