

Apantallamiento magnético por corrientes inducidas

OBJETIVOS:

- Observar el fenómeno de apantallamiento magnético mediante corrientes inducidas en un material conductor.
- Determinar la conductividad eléctrica de tubos mediante un método sin contacto

CONCEPTOS NECESARIOS PARA LA PRÁCTICA:

- Inducción magnética
- Conductividad eléctrica
- Efecto pelicular
- Apantallamiento magnético

INTRODUCCIÓN BREVE

Cuando un material conductor es atravesado por un campo magnético variable, se generan fuerzas electromotrices (FEM) circulares en el seno del material. Esto ocurre en cualquier situación donde un objeto conductor experimenta un cambio de intensidad o dirección del campo magnético en cualquier punto dentro de él. Por ejemplo, ocurren cuando un conductor se mueve a través de un campo magnético inhomogéneo, o cuando el campo magnético varía en un conductor estacionario.

Estas FEM a su vez producen corrientes, según lo permita la resistividad del material, llamadas corrientes parásitas, corrientes eddy*, o de Foucault. De acuerdo a la ley de inducción de Faraday, la intensidad de las corrientes parásitas es mayor en cuanto más intenso sea el campo aplicado, los cambios temporales sean más rápidos, o mayor sea la conductividad del metal.

Las corrientes parásitas a su vez producen calor, por efecto Joule, y fuerzas electromagnéticas. El calentamiento se utiliza por ejemplo en dispositivos (hornos, anafes) de calentamiento por inducción. Las fuerzas electromagnéticas se aprovechan para producir levitación, crear movimiento, o en fuertes sistemas de frenado. En otros dispositivos, las corrientes parásitas son indeseables como es el caso de los transformadores, donde producen pérdidas de potencia (de ahí el nombre de corrientes parásitas); en este caso se minimizan por ejemplo usando láminas delgadas.

Asimismo, las corrientes de Foucault son las responsables del efecto pelicular en conductores: mientras que

*El término corrientes eddy, viene del inglés, por analogía con corrientes observadas en agua. Cuando se desplaza un remo de lado a lado se producen turbulencias localizadas conocidas como *eddies* que dan lugar a vortices persistentes en el tiempo. Análogamente, las corrientes parásitas pueden necesitar un cierto tiempo para establecerse y pueden persistir en ausencia del campo debido a la inductancia de los conductores.

en condiciones de corriente continua la densidad de corriente transversal en un conductor es uniforme, en corriente alterna se observa una mayor densidad de corriente cerca de la superficie. Este fenómeno se conoce como efecto pelicular, efecto Kelvin o efecto skin; se muestra esquemáticamente para un conductor de sección circular en la figura 1a.

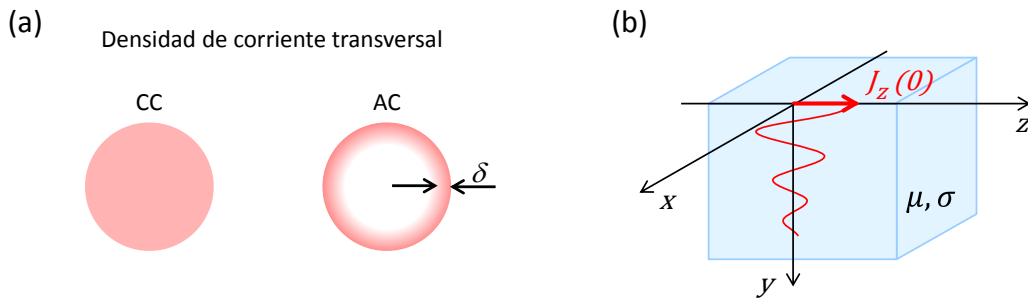


Figura 1. Efecto pelicular. (a) La densidad de corriente transversal en un conductor cilíndrico es uniforme en condiciones de corriente continua (CC) pero se concentra cerca de la superficie en corriente alterna (CA). (b) Geometría usada para calcular la distribución espacial de la densidad de corriente.

Naturalmente, el efecto pelicular puede describirse mediante las ecuaciones de Maxwell. Consideremos el caso idealizado de una corriente alterna sinusoidal en un hemi-espacio conductor homogéneo, como muestra el esquema de la figura 1b. En la región $y > 0$ el medio tiene una permitividad μ y una conductividad σ . La región $y < 0$ es vacío. Consideremos que la corriente es paralela a la interface, y únicamente en la dirección \mathbf{z} . Las ecuaciones de Maxwell, despreciando corrientes de desplazamiento, dado que consideramos al medio un buen conductor, son:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -i\omega\mathbf{B} \qquad \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \qquad (1)$$

Teniendo en cuenta que $\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$ y $\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$, las ecuaciones (1) se pueden escribir como:

$$\nabla \times \mathbf{J} = -i\omega\sigma\mathbf{B} \qquad \nabla \times \mathbf{B} = \mu\mathbf{J} \qquad (2)$$

La densidad de corriente solo tiene componente en z , la cual solo depende de y . De la ley de Biot-Savart y por argumentos de simetría, queda que el campo magnético solo tiene componente en x . Entonces:

$$\frac{dJ_z}{dy} = -i\omega\sigma B_x \qquad -\frac{dB_x}{dy} = \mu J_z \qquad (3)$$

De las ecuaciones (3) se puede eliminar B_x y se obtiene una ecuación para la densidad de corriente J_z :

$$\frac{d^2 J_z}{dy^2} = i\omega\mu\sigma J_z \qquad (4)$$

La ecuación (4) cual tiene una solución simple:

$$J_z(y) = J_1 e^{Ky} + J_2 e^{-Ky} \qquad K = \sqrt{i\omega\mu\sigma} = (1+i)\sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}} \qquad (5)$$

Como la densidad de corriente es finita, $J_1 = 0$. Y la expresión para la densidad de corriente finalmente queda:

$$J_z(y) = J_z(0)e^{-iy/\delta}e^{-y/\delta} \quad \delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} \quad (6)$$

Al parámetro δ se lo llama longitud de penetración superficial (o en inglés skin depth). Por a la geometría analizada, estas expresiones son válidas para situaciones donde δ es mucho menor que el radio de curvatura del conductor.

Debido al efecto pelicular, la sección efectiva por la que circulan electrones en un conductor disminuye a frecuencias altas, aumentando la resistencia. Este fenómeno es muy perjudicial en las líneas de transmisión que conectan dispositivos de alta frecuencia. También es muy negativo en el comportamiento de bobinas y transformadores para altas frecuencias, ya que reduce el factor de calidad de los circuitos resonantes al aumentar la resistencia respecto a la reactancia. Una forma de mitigar este efecto es la utilización en las líneas y en los inductores del denominado hilo de Litz, consistente en un cable formado por muchos conductores de pequeña sección aislados unos de otros y unidos solo en los extremos. De esta forma se consigue un aumento de la zona de conducción efectiva.

DESARROLLO EXPERIMENTAL y CONCEPTOS FUNDAMENTALES

En este experimento se observará otro fenómeno producto de corrientes inducidas: el apantallamiento magnético.

El dispositivo experimental consiste de un transformador con bobinados primario y secundario cilíndricos, como el que se muestra esquemáticamente en la Figura 2. Se aplica en el primario una corriente sinusoidal I_P de frecuencia angular ω y amplitud I_0 :

$$I_P(t) = I_0 e^{-i\omega t} \quad (7)$$

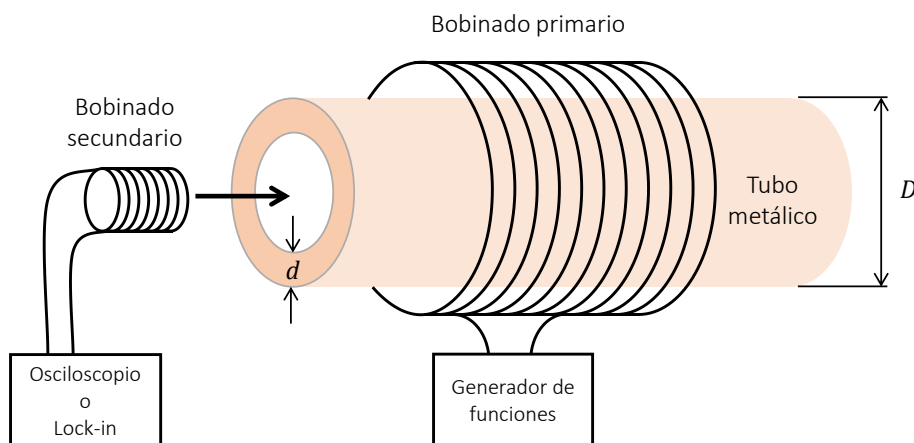


Figura 2. Arreglo experimental. El bobinado primario es alimentado con un generador de funciones para producir un campo magnético alterno de distintas frecuencias. La inducción en el secundario se registra con un osciloscopio o un amplificador lock-in, en presencia y ausencia de un tubo metálico de dimensiones conocidas.

Despreciando efectos de borde, el campo magnético inducido en el eje del solenoide primario es:

$$B_P(t) = \frac{\mu_0 N_P}{l_P} I_0 e^{-i\omega t} \quad (8)$$

donde μ_0 es la permeabilidad magnética del vacío, l_P la longitud del bobinado, y N_P el número de vueltas.

Un arrollamiento secundario, con N_S vueltas y área transversal A_S , ubicado dentro del primario concatena produce una FEM:

$$V_{S0}(t) = -\frac{\partial \Phi_{BP}}{\partial t} = -N_S A_S \frac{\partial B_P(t)}{\partial t} = -i\omega \frac{\mu_0 N_P}{l_P} N_S A_S I_0 e^{-i\omega t} \quad (9)$$

Si se introduce un tubo conductor no magnético entre los bobinados, se inducen en él corrientes azimutales que contrarrestan al campo magnético que las indujo. Producen así un apantallamiento magnético y el campo concatenado por el secundario se ve disminuido.

En condiciones donde la longitud de penetración δ es mayor que el espesor del tubo d , la densidad de corriente en el tubo será uniforme. Bajo esta aproximación de tubo fino, se puede considerar al tubo como una espira de radio $a = \frac{D-d}{2}$, y expresar de manera aproximada la resistencia azimutal R y la auto-inductancia L del tubo como:

$$R = \frac{2\pi a}{\sigma l d} \quad L = \frac{\mu_0 \pi a^2}{l} \quad (10)$$

donde l es el largo del tubo. Asimismo, la FEM inducida en el tubo será:

$$V_T(t) = -i\omega \frac{\mu_0 N_P}{l_P} \pi a^2 I_0 e^{-i\omega t} = -i\omega \frac{\mu_0 N_P}{l_P} \pi a^2 I_0 e^{-i\omega t}$$

$$V_T(t) = -i\omega N_P L I_P(t) \quad (11)$$

En este último paso se consideró que las longitudes del tubo y del solenoide primario son idénticas.

La corriente azimutal inducida en el tubo será entonces:

$$I_T(t) = \frac{V_T(t)}{R+i\omega L} = \frac{-i\omega N_P L}{R+i\omega L} I_P(t) \quad (12)$$

Y la inducción magnética generada por esta corriente en el interior del tubo es:

$$B_T(t) = \frac{\mu_0}{l} I_T(t) = -\frac{\mu_0 N_P}{l} \frac{i\omega L}{R+i\omega L} I_P(t) \quad (14)$$

Finalmente la inducción magnética total y la FEM generadas en el secundario en presencia del tubo conductor están dadas por:

$$B_S = \frac{\mu_0 N_P}{l} \left(1 - \frac{i\omega L}{R+i\omega L}\right) I_P(t) \quad (15)$$

$$V_S(t) = -i\omega \frac{\mu_0 N_P}{l} A_S N_S \left(1 - \frac{i\omega R L + \omega^2 L^2}{R^2 + \omega^2 L^2}\right) I_P(t) = V_{S0} \left(\frac{R^2 - i\omega R L}{R^2 + \omega^2 L^2}\right) I_P(t) \quad (16)$$

En consecuencia, el voltaje inducido en el secundario en presencia del tubo conductor presenta un desfase dado por:

$$\varphi = \arctan\left(\frac{\omega L}{R}\right) \quad (17)$$

Existen entonces varias opciones para obtener la conductividad del tubo a partir de mediciones comparativas de la FEM generada en el secundario en presencia y ausencia del tubo conductor. Realice al menos los siguientes dos en el laboratorio:

1) Mida la diferencia de fase φ entre la corriente del primario y la FEM inducida en el secundario. La conductividad del tubo puede obtenerse a través de:

$$\sigma = \frac{2 \tan \varphi}{\omega \mu_0 a d} \quad (18)$$

2) Determine el coeficiente de apantallamiento magnético η en función de la frecuencia f :

$$\eta = \frac{|V_{s0}| - |V_s|}{|V_{s0}|} = 1 - \frac{1}{\sqrt{1 - \omega^2 L^2 / R^2}} = 1 - \frac{1}{\sqrt{1 - k^2 f^2}} \quad (19)$$

Realice un ajuste y obtenga la conductividad a partir $k = \mu_0 \pi \sigma a d$.

PREGUNTAS PARA EL MINI EXAMEN PREVIO A LA PRÁCTICA:

- 1- Explique qué es el blindaje magnético. ¿Cómo puede conseguirse? ¿Dónde se usa?
- 2- ¿Qué son las corrientes de Foucault? Dé ejemplos de aplicaciones tecnológicas.
- 3- ¿Por qué son indeseables las corrientes inducidas en transformadores y generadores? ¿Cómo se reducen sus efectos negativos?
- 4 - Describa Explique la Ley de Faraday
- 5- ¿Cómo funciona un amplificador lock-in?
- 6- Describa los métodos amperométrico, potenciométrico y de inducción para determinar conductividades, y discuta las ventajas y desventajas de cada uno.