

Apantallamiento magnético por corrientes inducidas

OBJETIVOS:

- Observar el fenómeno de apantallamiento magnético mediante corrientes inducidas en un material conductor.
- Determinar la conductividad eléctrica de dos metales (cobre y aluminio) mediante un método no destructivo que no requiere contacto entre los elementos empleados.

CONCEPTOS NECESARIOS PARA LA PRÁCTICA:

- Inducción magnética
- Longitud de penetración
- Conductividad eléctrica
- Apantallamiento magnético

INTRODUCCIÓN BREVE

Cuando un material conductor es atravesado por un campo magnético variable, se generan fuerzas electromotrices (FEMs) 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 FEMs 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. Corrientes de Foucault auto-inducidas son las responsables del efecto pelicular en conductores.

A partir de cuantificar el efecto de apantallamiento magnético producido por las corrientes de Foucault es posible determinar el valor de la conductividad de un material. En esta práctica esto se realiza usando un transformador, y analizando la corriente inducida en el circuito secundario cuando es apantallado mediante un metal.

*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.

DESARROLLO EXPERIMENTAL y CONCEPTOS FUNDAMENTALES

El dispositivo experimental consiste de un transformador con bobinados primario y secundario cilíndricos, como el que se muestra esquemáticamente en la Figura 1.

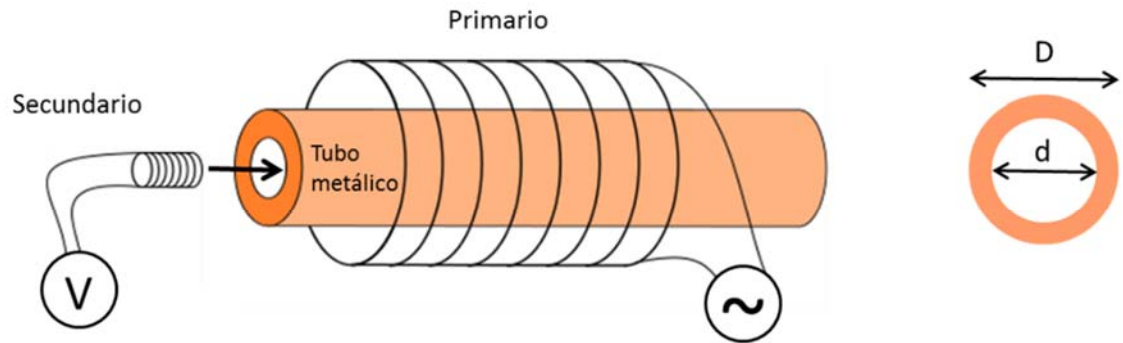


Figura 1. Arreglo experimental. El primario es alimentado con un generador de funciones para generar un campo magnético alterno. La inducción en el secundario es apantallada con tubo metálico de dimensiones conocidas.

Se aplica en el primario una corriente sinusoidal I_P de frecuencia angular ω y amplitud I_{max} :

$$I_P = I_{max} \cos(\omega t) \quad (1)$$

Despreciando efectos de borde, el campo magnético en el eje de un solenoide largo (B_I) al aplicarle una tensión sinusoidal de frecuencia ω y amplitud constante viene dada por la expresión:

$$B_P(t) = \frac{\mu_0 N_P}{l} I_P \quad (2)$$

donde μ_0 es la permeabilidad magnética del vacío, l la longitud de la bobina, N_P el número de vueltas.

Un arrollamiento secundario, con N_S vueltas, área transversal A_S y ubicado dentro del primario concatena parte del campo B_P y produce una tensión inducida:

$$V_{S0}(t) = \frac{\mu_0 N_P}{l} \omega N_S A_S I_{max} \sin(\omega t) \quad (3)$$

Si se introduce un tubo conductor no magnético entre los bobinados, las corrientes inducidas en el producen un apantallamiento magnético y el campo concatenado por el secundario se ve disminuido. Si la profundidad de penetración del efecto piel δ es mucho mayor que el espesor $(D-d)/2$ del tubo, la corriente inducida puede considerarse homogénea en toda la sección del tubo. Para tubos finos que cumplen la condición anterior y además cumplen $D+d \ll D$ y $D-d \ll d$ es posible obtener expresiones aproximadas para la resistencia azimutal R y la auto-inductancia L de un tubo de largo l , en términos del diámetro medio $(D+d)/2$ y del espesor $(D-d)/2$:

$$R \cong \frac{\pi(D+d)}{\sigma l(D-d)} \quad L \cong \frac{\mu_0 \pi (D+d)^2}{16 l} \quad (4)$$

En este punto es importante tener en cuenta que la profundidad de penetración del efecto piel δ depende de la frecuencia aproximadamente según la siguiente expresión:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\mu_0 \omega \sigma}} \quad (5)$$

donde σ es la conductividad del material. En consecuencia, para una dada geometría del tubo, las condición de $\delta \gg (D-d)$ se cumplirá para frecuencias por debajo de un cierto valor.

Si consideramos un tubo largo con respecto a la longitud del secundario, y también $D \ll l$, de modo de despreciar efectos de borde, la FEM inducida en el tubo será:

$$V_T(t) = \frac{\omega N_P}{l} \frac{\mu_0 \pi (D+d)^2}{16} I_{max} \sin(\omega t) \quad (6)$$

La corriente azimutal en el tubo será entonces:

$$I_T(t) = \frac{\omega N_P}{l} \frac{\mu_0 \pi (D+d)^2}{16 \sqrt{R^2 + L^2 \omega^2}} I_{max} \sin(\omega t - \varphi) \quad (7)$$

Donde φ es la fase con respecto a la corriente en el primario

$$\tan(\varphi) = L\omega/R \quad (8)$$

La corriente I_T genera un concatenamiento adicional de flujo en el secundario dado por:

$$\Phi(t) = \frac{\mu_0^2 N_S A_S N_P}{l^2} \frac{\omega \pi (D+d)^2}{16 \sqrt{R^2 + L^2 \omega^2}} I_{max} \sin(\omega t - \varphi) \quad (9)$$

y la fem generada en el secundario por este flujo adicional se puede obtener directamente usando la Ley de Faraday $\Delta V = -d\Phi/dt$. Finalmente se puede calcular la fem total que se generará en el secundario en presencia del tubo $V_S = V_{S0} + \Delta V$:

$$V_S(t) = \frac{N_P}{l} \mu_0 \omega N_S A_S I_{max} [\sin(\omega t) - \sin(\varphi) \cos(\omega t - \varphi)]$$

$$V_S(t) = \frac{N_P}{l} \mu_0 \omega N_S A_S I_{max} \cos(\varphi) \sin(\omega t - \varphi) \quad (10)$$

Entonces, midiendo la diferencia de fase φ entre la corriente del primario y la fem inducida en el secundario, es posible a través de las ecuaciones 8 y 4, obtener la conductividad del material del tubo.

En una primera parte construya y caracterice el arreglo experimental. En segundo lugar realice mediciones de φ en función de la frecuencia de trabajo. Primero obtenga φ simplemente de mediciones de valores RMS de $V_{S0}(t)$ y $V_S(t)$. Luego obtenga los valores de φ usando un osciloscopio, y finalmente usando un amplificador lock-in. Discuta y compare los métodos usados y los valores de conductividad obtenidos.

PREGUNTAS A RESPONDER DURANTE LA PRÁCTICA E INCLUIR EN EL INFORME:

- Cómo es que las mediciones RMS permiten obtener los valores de φ .
- Como sugiere obtener los valores de φ a partir de las mediciones de $\varphi(\omega)$
- Que se observa si no se cumple la condición de $\delta \gg (D-d)$
- Es posible estimar δ experimentalmente?
- Es posible realizar el experimento a la inversa, alimentando el secundario y midiendo en el secundario?

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 transformadores y generadores? Cómo se reducen sus efectos negativos?
- 4 - Describa Explique la Ley de Faraday
- 5- Describa los métodos amperométricos, potenciométrico y de inducción para determinar conductividades, y discuta las ventajas y desventajas de cada uno

BIBLIOGRAFIA

- Popovic B D - Introductory Engineering Electromagnetics (1971, Addison Wesley)
Griffiths D J - Introduction to Electrodynamics (1999, Prentics Hall)