

LEY DE FARADAY

MATERIAL NECESARIO

- Solenoide construido con cable de bobinado de 0.3 mm con dos arrollamientos: arrollamiento interno (primario) para hacer pasar corriente) y arrollamiento externo (secundario) para lecturas de f.e.m. inducida.
- Panel de montaje con potenciómetro, interruptor, conexiones y resistencia de protección.
- Dos polímetros digitales.
- Transformador 220 V / 12 V o 220 V / 7.5 V.

FUNDAMENTO

Michael Faraday comunicó en 1831 sus primeras observaciones cuantitativas sobre fenómenos relacionados con campos eléctricos y magnéticos dependientes del tiempo. Observó la aparición de corrientes transitorias en circuitos en las tres situaciones siguientes: (i) cuando se establecía o se suspendía una corriente estacionaria en otro circuito próximo; (ii) si un circuito cercano por el que circulaba una corriente estacionaria se movía respecto del primero; y (iii) si se introducía o retiraba del circuito un imán permanente.

Faraday tuvo el mérito de comprender las características comunes de estos tres experimentos y atribuyó el origen de las corrientes transitorias a las *variaciones* del flujo magnético que atravesaba el circuito. *El cambio común en los tres experimentos citados es la variación del número de líneas de campo magnético que atraviesa el circuito donde se producen las corrientes transitorias.* En la interpretación de Faraday, la variación del flujo magnético a través del circuito origina una fuerza electromotriz (f.e.m.) inducida responsable de la aparición de la corriente transitoria (desde ahora, corriente inducida). Recordemos que la definición de flujo magnético a través de una superficie arbitraria S es:

$$\Phi_B \equiv \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} \quad (\text{Definición de flujo magnético}) \quad (1)$$

Cuantitativamente la f.e.m. inducida depende del ritmo de cambio del flujo: no importa el número concreto de líneas de campo atravesando el circuito, sino su variación por unidad de tiempo. La relación entre f.e.m. inducida ε y variación de flujo constituye la Ley de Faraday:

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi_B}{dt} \quad (\text{Ley de Faraday}) \quad (2)$$

donde Φ_B es el flujo magnético que atraviesa el área delimitada por el circuito.

La característica esencial de la variación de flujo magnético a través de cualquier superficie es que induce un campo eléctrico *no electrostático* en el contorno que delimita este área. Las líneas de campo son *cerradas* y el campo eléctrico inducido es un campo no conservativo¹; la f.e.m. inducida está definida como la circulación de este campo a lo largo del contorno:

$$\varepsilon \equiv \oint_C \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} \quad (\text{definición de f.e.m.}) \quad (3)$$

El subíndice C en la integral indica que el producto escalar del integrando se realiza en los puntos pertenecientes al contorno, y el círculo que rodea la integral simboliza que ésta se calcula sobre el contorno completo. El significado físico de la f.e.m. se deduce de la ecuación (3) si consideramos una carga arbitraria que se mueve en un circuito conductor por la acción del campo inducido: la integral del segundo miembro de la ecuación representa el trabajo por unidad de carga a lo largo del circuito completo, porque se está integrando la componente tangencial de la fuerza por unidad de carga. El movimiento de cargas debido al campo inducido en los circuitos conductores origina las corrientes transitorias que observó Faraday. Debe observarse que la f.e.m. inducida está distribuida a través del circuito, a

¹ A diferencia del campo electrostático, cuya circulación a lo largo de cualquier trayectoria cerrada es nula.

diferencia de las fuentes de f.e.m. de los circuitos eléctricos, que están situadas en lugares específicos de los mismos.

Aplicación de la ley de Faraday en el caso de un solenoide

Un solenoide ideal está formado por un conjunto de N_i espiras arrollado compactamente sobre un cilindro de longitud L_i muy estrecho en comparación con su longitud. En el interior de un sistema como éste, el campo magnético permanece sensiblemente constante y dirigido a lo largo de su eje. Un dispositivo adecuado para el estudio de la ley de Faraday consiste en un solenoide (solenoides *interno* a partir de aquí) sobre el cual se han enrollado muy estrechamente apretadas y en su parte central N_e espiras (solenoides *externo*).

Cuando pasa una corriente de intensidad I el campo magnético en el interior del solenoide largo viene dado por la ecuación (4):

$$B = \mu_0 \frac{N_i}{L_i} I \quad (4)$$

donde la constante $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Hm}^{-1}$ es la permeabilidad del vacío (prácticamente igual a la del aire en ausencia de materiales ferromagnéticos).

Si el área de la base del solenoide interno es S , el flujo magnético que atraviesa una sección recta del mismo es:

$$\Phi = \mathbf{B} \cdot \mathbf{S} = \mu_0 \frac{N_i}{L_i} IS \quad (5)$$

Haciendo pasar una corriente variable por el solenoide interno se consigue variar el flujo. En este caso empleamos una corriente sinusoidal:

$$I = I_0 \text{sen } \omega t \quad (6)$$

Esta variación de flujo es detectada conectando un voltímetro al solenoide externo (ver figura 1). En valor absoluto la f.e.m. inducida es:

$$\varepsilon = \frac{d\Phi}{dt} = \mu_0 N_e \frac{N_i}{L_i} S \frac{dI}{dt} = \mu_0 N_e \frac{N_i}{L_i} S I_0 \omega \cos(\omega t) \quad (7)$$

En términos de los valores eficaces, este resultado puede escribirse:

$$\varepsilon_{ef} = \mu_0 N_e \frac{N_i}{L_i} S \omega I_{ef} \quad (8)$$

Es decir, la f.e.m. inducida es proporcional a la intensidad eficaz. En la constante de proporcionalidad interviene la permeabilidad μ_0 y un conjunto de factores que depende de los detalles de construcción del montaje. La representación gráfica de valores experimentales de voltajes frente a intensidades (valores eficaces en ambos casos) rinde una línea recta:

$$\varepsilon_{ef} = C \mu_0 I_{ef} \quad (9)$$

donde $C = N_i N_e S \omega / L_i$ es la constante del aparato. La determinación experimental de la pendiente de esta recta proporciona una medida de μ_0 . La comparación del valor así obtenido con el valor exacto nos permite verificar la ley de Faraday.

PARTE EXPERIMENTAL

Construcción del solenoide

El solenoide adecuado para realizar las medidas puede construirse empleando como soporte un tubo de cartón de unos 4 cm de diámetro y 30 cm de longitud (el tubo sobre el que va enrollado el papel de aluminio comercial para uso doméstico tiene estas medidas). Se usa cable para bobinado de 0.3 mm. Se sujeta un cabo de cable a 2 cm de uno de los extremos del tubo empleando cinta aislante, y se enrollan vueltas tan apretadas unas con otras como sea posible en sentido hacia el extremo opuesto. Si se emplea un tubo de 30 cm de longitud, pueden colocarse fácilmente sobre él unas 800-850 espiras (es cuestión de paciencia y de llevar bien la cuenta de las vueltas) llegando hasta unos 2 cm del extremo opuesto del tubo. Se sujetan bien con cinta aislante los dos cabos de cable, dejando aproximadamente 30 cm de cable suelto por cada lado, y entonces, en una posición centrada con respecto al tubo de cartón, se practica una segunda capa de vueltas (unas 150-200) superpuestas a la primera y también estrechamente apretadas. La capa interna es el solenoide primario, y la exterior el solenoide secundario.

El solenoide así fabricado se sujeta al panel de montaje y se conectan los cabos sueltos del primario a un par de bornas de un color y los cabos sueltos del secundario al par de bornas de otro color. Las cuatro bornas se sujetan al panel de montaje.

Montaje del solenoide en circuito

El solenoide primario se conecta empleando un transformador y un potenciómetro, intercalando en el circuito una resistencia de protección para evitar corrientes excesivas (en el caso de la figura 1 el potenciómetro es de $10\text{ k}\Omega$ y la protección de $33\ \Omega$), y un amperímetro colocado en serie. Los terminales del solenoide secundario se conectan a un voltímetro en corriente alterna.

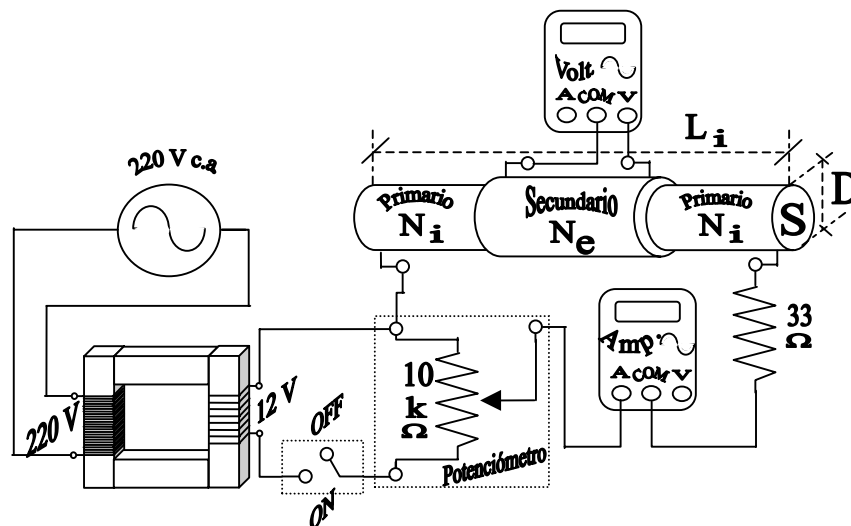


Figura 1. Montaje experimental. Los datos del montaje necesario para calcular la constante del aparato C son: número de espiras de los arrollamientos primario y secundario (N_i y N_e , respectivamente), longitud del arrollamiento interno L_i y diámetro del mismo D (para calcular el área S).

Medidas

Colocamos el montaje al mínimo de tensión, y *muy poco a poco* se va elevando el voltaje girando lentamente el potenciómetro, y se va construyendo una tabla con los valores de intensidad que circula por el primario y los valores de f.e.m. registrados en el voltímetro conectado al secundario. Se tomarán entre 10 y 15 medidas de f.e.m. frente a corriente circulante. Es importantísimo elevar la tensión de la fuente con extrema lentitud, ya que una elevación brusca haría circular por el solenoide primario una corriente elevada, que puede terminar por quemarlo. Como indicación general, no se debe permitir que por el solenoide primario circulen más de 200 mA (las escalas adecuadas en amperímetro y voltímetro son las de 200 mA y 200 mV).

TRATAMIENTO DE DATOS

i) Utilizando papel milimetrado representaremos gráficamente en abcisas los valores de corriente eficaz, y en ordenadas los de f.e.m. inducida. De esta representación se obtendrá el valor de la pendiente de la recta experimental, con su error correspondiente, y comparando este valor con el de la ecuación (9) determinaremos la permeabilidad del vacío μ_0 . (En rigor, se trata de la permeabilidad del aire; su valor es prácticamente coincidente con el del vacío).

ii) Realizar un ajuste de mínimos cuadrados para obtener el valor de la pendiente de la recta f.e.m. inducida versus intensidad, y de esta pendiente se obtendrá el valor de la permeabilidad del vacío μ_0 . Véase la diferencia con el error calculado gráficamente. ¿Qué determinación es mejor?

EJEMPLO

En la tabla 1 se presentan los datos obtenidos en tres ensayos distintos con un solenoide construido enrollando hilo sobre un lapicero redondo. El solenoide interno fue construido artesanalmente enrollando $N=610$ espiras de cable para bobinado (diámetro $e = 0.30$ mm) sobre el lapicero en dos capas de espiras, formando un cilindro de longitud $L = 102.00$ mm y diámetro externo $D_e = 8.50$ mm. Todas las longitudes fueron medidas con un calibre capaz de apreciar 0.05 mm. Teniendo en cuenta el espesor del hilo, se tomó como diámetro medio del solenoide $D = D_e - 2e = 7.90$ mm. La presencia del lapicero contribuye a la rigidez mecánica que requiere el montaje, pero no afecta a las medidas a realizar al no tratarse de un material ferromagnético.

El solenoide exterior se fabricó superponiendo $N_e = 315$ espiras del mismo hilo, también en dos capas, inmediatamente por encima del bobinado del inductor interno, y equidistantes sus extremos de los bordes de aquel para verificar así la condición de que toda la variación de flujo en el solenoide interno contribuya a la f.e.m. inducida.

La constante de este aparato (ver ecuación (9)) es (¿qué unidades tiene esta constante?):

$$C = (2.90 \pm 0.04) \cdot 10^4 \quad (10)$$

En la tabla 2 aparece el ajuste de mínimos cuadrados de los datos obtenidos en cada ensayo, donde se han retenido sólo las cifras significativas. Obsérvese que las ordenadas en el origen b son muy próximas a cero y además sus errores son comparativamente muy grandes, indicando así que se trata efectivamente de una recta que pasa por el origen.

TABLA 1. Medidas de f.e.m. inducida versus corriente

Ensayo 1		Ensayo 2		Ensayo 3	
I_{ef} (mA)	E_{ef} (mV)	I_{ef} (mA)	E_{ef} (mV)	I_{ef} (mA)	E_{ef} (mV)
134	4.8	206	7.4	164	5.9
178	6.4	257	9.3	197	7.1
317	11.5	296	10.7	229	8.2
440	16.0	339	12.2	286	10.4
523	19.0	383	13.9	311	11.3
589	21.3	478	17.4	380	13.8
694	25.1	521	18.8	424	15.4
759	27.5	542	19.7	471	17.0
934	33.8	602	21.8	501	18.1
1115	40.4	647	23.4	549	19.9
-	-	737	26.7	579	21.0
-	-	762	27.6	597	21.7
-	-	822	29.8	621	22.5
-	-	858	31.1	640	23.2
-	-	931	33.7	680	24.7

TABLA 2. Ajuste de datos

Ensayo	Ord. origen b	Pendiente m	C. correlación
1	-0.02 ± 0.03	$(3.624 \pm 0.005) \cdot 10^{-2}$	0.999993
2	-0.03 ± 0.03	$(3.627 \pm 0.005) \cdot 10^{-2}$	0.999985
3	-0.06 ± 0.03	$(3.637 \pm 0.007) \cdot 10^{-2}$	0.999976

Tomando el valor medio de la pendiente y el valor de la constante del aparato expresada por la ecuación (10), se obtiene para μ_0 el valor:

$$\mu_0 = (1.25 \pm 0.02) \cdot 10^{-6} \text{ H/m} \quad (11)$$

Este valor obtenido concuerda dentro de un 2% con el valor exacto.

PREGUNTAS

1. ¿Cuál es el valor obtenido para la permeabilidad del aire al realizar la experiencia? Calcúlese con su error correspondiente.
2. Se tiene una espira de alambre de cobre en las cercanías de un cable por el que circula una corriente continua de 100 A. ¿Hay flujo magnético a través de su superficie? ¿Hay corriente inducida en la espira?
3. Por el cable del enunciado anterior hacemos pasar corriente alterna, en lugar de corriente continua. Responder a las mismas preguntas.
4. ¿En qué fenómeno físico se basa la operación de las centrales térmicas de producción de electricidad, sean de carbón o de fuel? ¿Y la operación de las centrales nucleares? ¿Y las centrales eólicas? ¿Qué diferencia hay entre ellas?
5. En la realización de la práctica debe tenerse mucho cuidado para evitar que por el solenoide conectado a la fuente circule una corriente excesiva. ¿Cuál es el fenómeno físico responsable de esto?
6. ¿Por qué motivo el solenoide secundario es más corto que el primario y va enrollado en la zona central? (si hay dudas sobre esto, se aconseja consultar el libro de Tipler, vol. 2, capítulo 26).