

Faraday tenía razón!!

María Paula Coluccio y Patricia Picardo

Laboratorio I de Física
para Biólogos y Geólogos
Depto. de Física, FCEyN, UBA
1999

Resumen

En el presente trabajo repetimos la experiencia que alguna vez llevara a cabo Faraday. La misma consiste en construir un circuito de corriente alterna, con dos bobinas, una encima de la otra. Analizamos cómo el campo magnético creado en la bobina primaria induce una corriente en la bobina secundaria.

Introducción

En el espacio que rodea a un conductor que transporta corriente se establece un **campo magnético (B)**, que puede representarse mediante **líneas de inducción** de la misma forma que el **campo eléctrico** es representado por **líneas de fuerza**. Y también al igual que para la corriente eléctrica puede definirse un flujo del campo eléctrico ϕ_B . Este flujo asociado se define como:

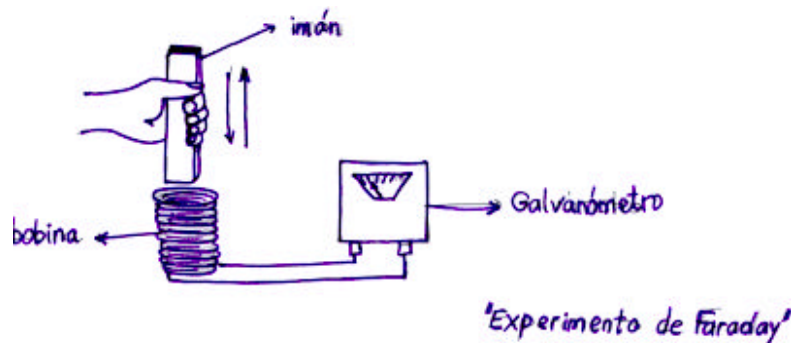
$$\phi_B = \int \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S}$$

Esta integral de superficie implica que la superficie en cuestión debe dividirse en elementos infinitesimales de área dS y que en toda la superficie se debe sumar el valor calculado de la cantidad escalar $\mathbf{E} \cdot d\mathbf{S}$ para cada elemento de área.

Ya desde principios del siglo pasado se encontró una conexión fundamental entre electricidad y magnetismo. Una corriente eléctrica en un alambre produce efectos magnéticos que pueden intensificarse enrollando al alambre en forma de bobina. Este fenómeno se conoce con el nombre de efecto Oersted. Luego de este descubrimiento los hombres de ciencia se dedicaron a buscar el fenómeno inverso: producir corriente eléctrica mediante campos magnéticos.

Años más tarde Faraday resolvió el problema, para lo cual realizó una serie de experiencias, la más sencilla de ellas está esquematizada en la **Figura 1**.

Figura 1:



Al mover el imán, en el conductor circular (bobina) se produce una corriente eléctrica, denominada **corriente inducida** y se dice que se ha establecido una **fuerza electromotriz inducida** (fem_i). El galvómetro muestra que efectivamente pasa una corriente por la bobina cuando el imán se acerca o se aleja de ésta. Si el imán está quieto no hay corriente en el conductor circular. Faraday tuvo la inspiración de intuir que el factor importante en este fenómeno es el cambio del ϕ_B en la bobina, lo que le permitió llegar a la siguiente expresión, conocida como la **ley de inducción de Faraday** :

$$E_i = d \phi_B / dt$$

Esta ley nos dice que la fem inducida (E) en un circuito es igual a la rapidez del cambio del flujo a través del circuito excepto por un signo negativo.

La ecuación anterior aplicada a una bobina de N vueltas resulta:

$$E = - N d\phi_B / dt = d(N\phi_B) / dt$$

En cada una de las vueltas de la espira aparece una fem y todas ellas deben sumarse si el embobinado está bien apretado. La intensidad del campo magnético no es constante en distintos puntos de una espira. En los puntos interiores el campo magnético es mucho más intenso que en los exteriores,

pero puede ser considerado constante en la parte media de la bobina. Además de depender de N, el campo magnético depende de la longitud de la espira (L) de la intensidad de la corriente eléctrica (i) y de la permeabilidad magnética propia de la bobina según:

$$B = \mu_0 * \frac{N}{L} * i$$

De acuerdo a esta ecuación el campo magnético es directamente proporcional a la intensidad de la corriente eléctrica, por lo que un aumento en i generará un incremento de B y viceversa. Cuando en un circuito actúa una corriente de intensidad variable dependiente del tiempo, la corriente es alterna (ac) y el campo eléctrico resulta:

$$B = \mu_0 * \frac{N}{L} * i_0 * \text{sen}(\omega t)$$

Utilizando esta ecuación y además sabiendo que el campo magnético es constante en puntos medios de la bobina, por lo que

$$\phi_B = \int B * dS = B * S$$

entonces podemos expresar el flujo de campo como:

$$\phi_B = \mu_0 * \frac{N}{L} * S * i_0 * \text{sen}(\omega t) = \mu_0 * \text{sen}(\omega t)$$

Derivando la expresión anterior con respecto al tiempo llegamos a una nueva ecuación para la ley de Faraday (donde la corriente eléctrica es alterna y la bobina sobre la cual esta circula tiene un campo magnético constante en su parte central). Esta expresión es:

$$E_i = - \mu_0 * \frac{N}{L} * S * i_0 * \omega * \text{cos}(\omega t)$$

Las ecuaciones que se proponen en el modelo matemático planteado, establecen que la fem_i se comporta como la derivada de la intensidad de corriente con signo negativo cuando se analizan ambas magnitudes con respecto al tiempo. Además se propone la siguiente relación de proporcionalidad:

$$E_i \propto i_0 \omega$$

siendo ω la frecuencia angular.

En nuestra experiencia estudiaremos estas relaciones propuestas. Para ello construiremos un circuito utilizando corriente alterna que producirá variaciones en el campo magnético generado por la bobina (espira primaria) cuando por ella circule esta corriente de intensidad variable. Estudiaremos si este campo magnético variable genera una diferencia de voltaje colocando una bobina (espira secundaria) sobre la espira primaria.

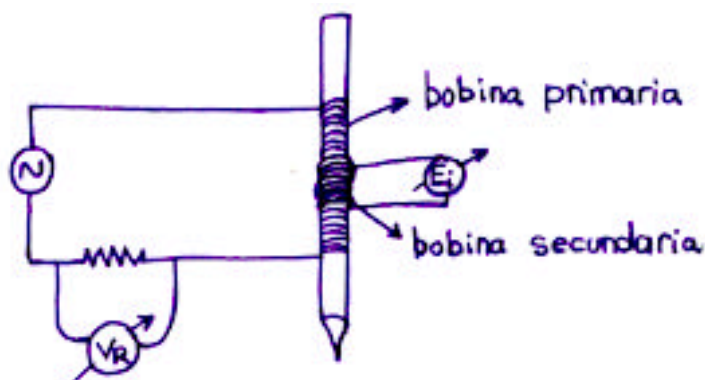
Método experimental

Para realizar nuestra experiencia construimos un circuito utilizando una fuente de tensión alterna, que produce una corriente eléctrica de intensidad variable. Utilizamos además una resistencia de magnitud conocida y construimos dos espiras enroscando alambre de Cu sobre una lapicera.

En la confección de las bobinas hay que tener especial cuidado en que las sucesivas vueltas de alambre queden bien apretadas unas con otras. Una de las bobinas se construye sobre la lapicera y se la conecta al circuito. A esta espira la llamaremos primaria. Esta espira primaria se comporta como el imán de la experiencia de Faraday, puesto que toda corriente está acompañada de un campo magnético. La otra bobina se forma por fuera de la espira primaria (espira secundaria) y no se la conecta a ninguna fuente de tensión. La espira secundaria sirve para evidenciar la existencia de un voltaje inducido por la variación en el campo magnético generado por la espira primaria.

La **Figura 2**, nos muestra un esquema del circuito utilizado.

Figura 2: dispositivo experimental.



Para medir la diferencia de potencial sobre la resistencia V_r (que nos permitirá calcular la intensidad i de acuerdo con la ley de Ohm, conociendo el valor de la resistencia utilizada (R)) y para medir el voltaje inducido sobre la espira secundaria utilizamos un osciloscopio. Este aparato nos permite conocer, además del valor de la magnitud medida, cómo es su representación en función del tiempo.

Estos gráficos que nos brinda el osciloscopio nos permiten analizar si se cumple que la $fem_i(t)$ se comporta como la derivada cambiada de signo de la intensidad de la corriente con respecto al tiempo (t), siendo esta una de las relaciones propuestas para el análisis. La otra relación, $E_i \propto i_0 * \omega$ que propone el modelo de acuerdo a la siguiente ecuación:

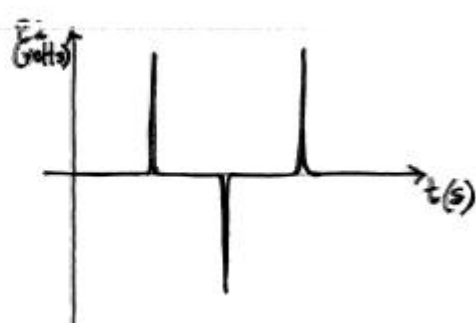
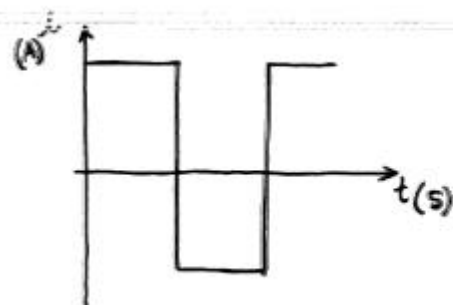
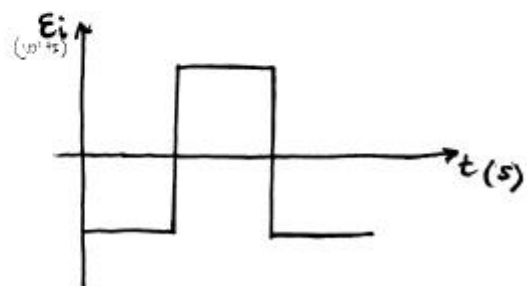
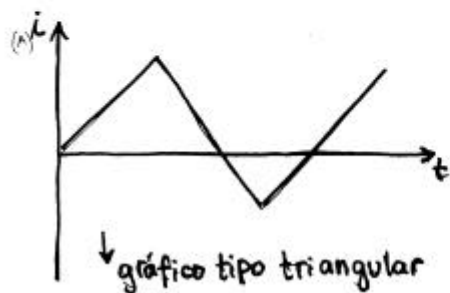
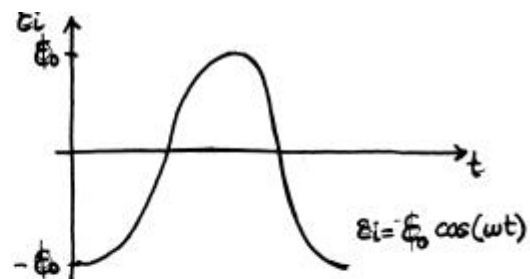
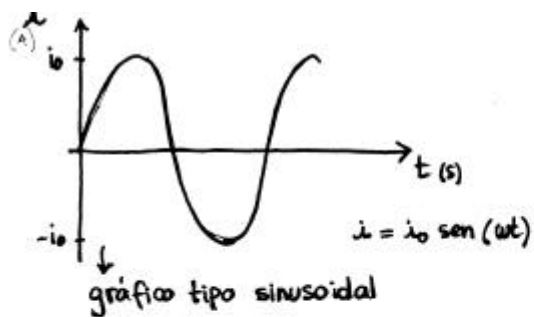
$$E_i = - \mu_0 * \frac{N}{L} * S * i_0 * \omega * \cos(\omega t)$$

será estudiada midiendo la fem_i para distintas intensidades de corriente a una frecuencia fija y luego para distintas frecuencias a una intensidad dada. Estos datos nos permiten estudiar la correlación entre estas variables, realizando para ello los gráficos necesarios.

Resultados y discusión

A partir de los gráficos que nos brinda el osciloscopio podemos comprobar que las funciones, $i(t)$ y $E_i(t)$ son periódicas y que se cumple la relación entre estas funciones que establece que $E_i(t)$ es la derivada negativa de la función $i(t)$.

El osciloscopio nos permite modificar la firma de las curvas y en todos los casos podemos observar que la relación propuesta se cumple tal como lo muestran los siguientes gráficos:



El valor de la resistencia utilizada en el circuito y medido con el óhmetro es de:

$$R = (100.7 \pm 0.3) \Omega$$

En la **Tabla 1** se vuelcan los valores medidos para la diferencia de potencial y la fuerza electromotriz inducida para distintas intensidades de corriente eléctrica y a una frecuencia constante de (15.55 ± 0.02) KHz.

Tabla 1

$(V_r \pm \Delta V_r)$ V	$(E_i \pm \Delta E_i)$ mV
$1,02 \pm 0,02$	$9,29 \pm 0,05$
$2,22 \pm 0,02$	$19,00 \pm 0,02$
$3,10 \pm 0,02$	$26,8 \pm 0,02$
$4,00 \pm 0,02$	$35,00 \pm 0,02$
$5,16 \pm 0,04$	$44,60 \pm 0,02$
$6,76 \pm 0,02$	$58,20 \pm 0,02$
$7,84 \pm 0,03$	$68,80 \pm 0,02$
$9,44 \pm 0,02$	$82,00 \pm 0,04$
$11,80 \pm 0,04$	$103,00 \pm 0,02$
$12,80 \pm 0,04$	$112,00 \pm 0,02$
$13,50 \pm 0,02$	$118 \pm 0,02$

Los errores en las mediciones anteriores provienen de las fluctuaciones del osciloscopio.

En la **Figura 3** se puede ver la representación gráfica de $E_i(i)$ con ω constante. El valor de i_0 correspondiente a cada valor de E_i fue calculado a partir del V_r medido sabiendo que:

$$i_0 = V_R / R \quad (\text{con unidades} = [v] / [\Omega])$$

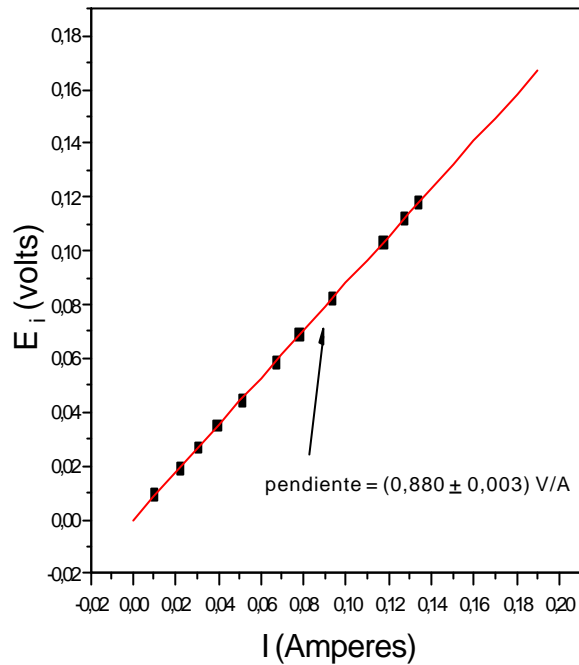


Figura 3: E_i en función de la intensidad. Los puntos corresponden a los datos experimentales, y la recta es la que mejor ajusta a dichos puntos de acuerdo con la regresión lineal realizada por el programa Origin 4.0.

Se puede apreciar que existe una relación de proporcionalidad directa entre ambas variables. La recta es la que mejor ajusta a los datos experimentales de acuerdo a la regresión lineal del programa Origin 4.0. La pendiente de esta recta de acuerdo al modelo propuesto resulta:

$$(0,880 \pm 0,003) \text{ V/A} = \mu_0 * \frac{N}{L} * S * \omega$$

En la **Tabla 2** se vuelcan los valores correspondientes a E_i y V_R para distintos valores de frecuencia y a una intensidad de corriente fija de 0,14 A.

Tabla 2

$(\omega \pm \Delta\omega)$ KHz	$(E_i \pm \Delta E_i)$ mV
$4,344 \pm 0,002$	$34,00 \pm 0,02$
$5,889 \pm 0,003$	$45,40 \pm 0,02$
$7,587 \pm 0,002$	$58,00 \pm 0,02$
$11,570 \pm 0,002$	$90,00 \pm 0,04$
$14,290 \pm 0,003$	$110,00 \pm 0,02$
$16,670 \pm 0,004$	$128,01 \pm 0,02$
$21,840 \pm 0,004$	$170,02 \pm 0,02$

La **Figura 4** corresponde al gráfico de $E_i(\omega)$ a intensidad constante. Se puede ver que entre ambas variables existe una relación lineal. Utilizando el método de mínimos cuadrado con el programa Origin 4.0 hallamos la recta que mejor ajusta a los datos experimentales.

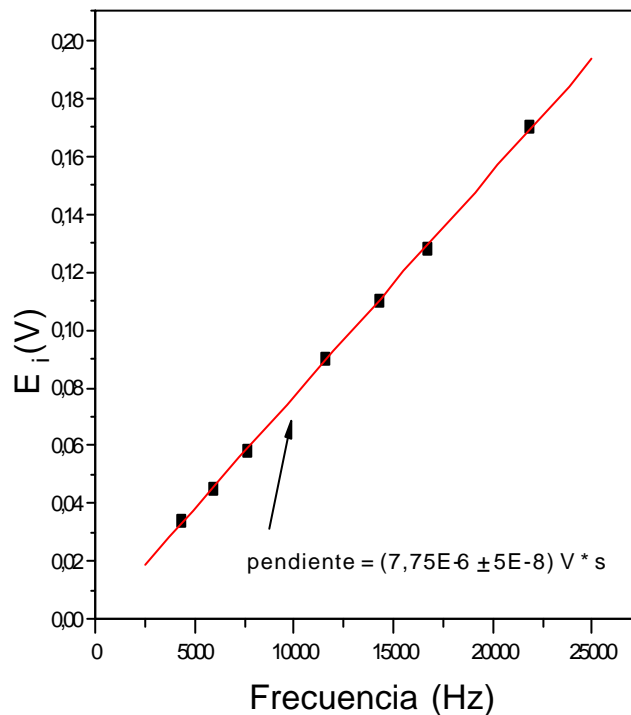


Figura 4: E_i en función de la frecuencia. Los puntos corresponden a los datos experimentales, y la recta es la que mejor ajusta a dichos puntos, según el programa Origin 4.0.

La pendiente resulta, de acuerdo a la relación propuesta que intentamos comprobar:

$$(7,75E-6 \pm 5E-8) \text{ V} \cdot \text{s} = \mu_0 \cdot \frac{N \cdot S}{L} \cdot i_0$$

Ambas pendientes están formadas por una constante que se debe a factores geométricos de la bobina, como el n° de vueltas que la forman, su longitud, y como todos estos factores son propios de la bobina utilizada en ambas pendientes adquieren el mismo valor y pueden ser calculados a partir de estas según:

$$P1/\omega = P2/i_0 = \mu_0 \cdot \frac{N \cdot S}{L}$$

$$5,659E-5 \approx 5,537E-5 = \mu_0 \cdot \frac{N \cdot S}{L}$$

Conclusión

Al analizar las relaciones propuestas a partir de los datos experimentales pudimos comprobar que lo establecido por la ley de inducción de Faraday se cumple para el circuito estudiado. Por lo tanto la fem inducida es igual a la velocidad de variación del flujo magnético, con signo negativo. En símbolos esta ley se expresa como:

$$E_i = - d \phi_B / dt$$

El signo negativo se debe a que el sentido de la fem_i debe ser tal que se oponga a la variación del flujo que la genera. Si el flujo crece, la fem inducida tiene un sentido tal que la corriente inducida se opone al crecimiento del flujo.

La relación entre el magnetismo y la electricidad establecida por Faraday es de gran importancia física. Aparatos como el teléfono, el micrófono, el fonógrafo y el amperímetro basan su función en esta ley.

Bibliografía consultada:

- *Física, Parte 2*, David Halliday, Robert Resnick, Compañía Editorial Continental S.A., México, primera edición en español de la tercera edición en inglés: enero 1980.
- *Introducción a la Física*, Alberto P. Maiztegui, Jorge Sábato, Editorial Kapelusz, S.A., Buenos Aires, sexta edición, abril de 1966.