



# FENÓMENOS DE INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA LA LEY DE FARADAY

## 1. Objetivos

- Observar el efecto producido al introducir un imán en una bobina.
- Estudiar qué ocurre al introducir un pequeño carrito dentro de una bobina por la que circula una corriente alterna. Analizar cómo dependen los efectos observados de la frecuencia de la corriente en la bobina.
- Discutir los resultados de estos experimentos usando la ley de Faraday.
- Determinar el campo magnético en el interior de un solenoide por el que circula una corriente alterna estudiando la fuerza electromotriz inducida en un pequeño carrito explorador que se introduce en el solenoide.

## 2. Fundamentos teóricos

### 2.1. Ley de Faraday

Hacia 1830 Michael Faraday y Joseph Henry, trabajando independientemente, descubrieron que si el flujo  $\Phi$  de campo magnético a través de un circuito varía con el tiempo, mientras dura esta variación, aparece una corriente en el circuito.

El hecho de que aparezca una corriente en el circuito se debe a que la variación del flujo magnético da lugar a una fuerza electromotriz (fem) en dicho circuito, denominada *fuerza electromotriz inducida (o fem inducida)*. La **ley de Faraday** establece que *la fuerza electromotriz inducida en un circuito es igual a menos la derivada del flujo magnético con respecto al tiempo,*

$$\varepsilon_{ind} = - \frac{d\Phi}{dt}$$

[1]

El signo menos indica que *la fem inducida (y por tanto, la corriente inducida) tiene un sentido que se opone al cambio que la provoca*, resultado que se conoce con el nombre de **Ley de Lenz**. Así, si el flujo magnético a través del circuito aumenta, la corriente inducida toma un sentido que se opone a este cambio, tratando de hacer disminuir el flujo magnético y si el flujo disminuye, la corriente inducida se opone a este cambio tomando un sentido que trata de hacer aumentar el flujo magnético a través del circuito. Esto se ilustra en Fig.1, en la que se muestra que cuando el imán se mueve hacia la espira se produce una corriente en la espira en el sentido indicado. El campo magnético debido a la corriente inducida en la espira (indicado por la línea a trazos) produce un flujo que se opone al aumento de flujo a través de la espira debido al acercamiento del imán.

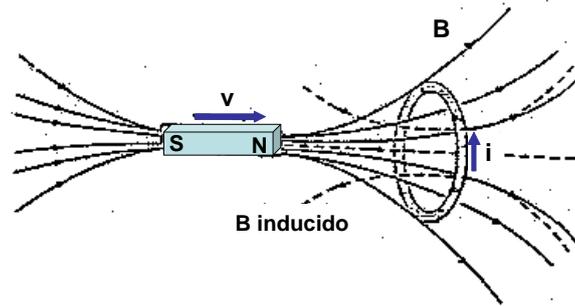


Figura 1

## 2.2. Campo magnético en el interior de un solenoide

Un solenoide es esencialmente un hilo conductor arrollado estrechamente en forma de hélice sobre un soporte, normalmente cilíndrico, como se indica en Fig.2.

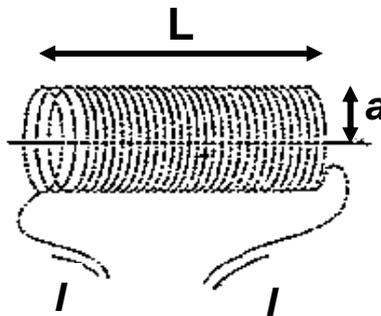


Figura 2

Las líneas de campo magnético debidas a un solenoide por el que circula una corriente  $I$  se indican en Fig.3 (a) y el valor del campo  $B$  en el eje del solenoide se muestra en Fig.3 (b) como función de la distancia  $x$  al punto medio del solenoide.

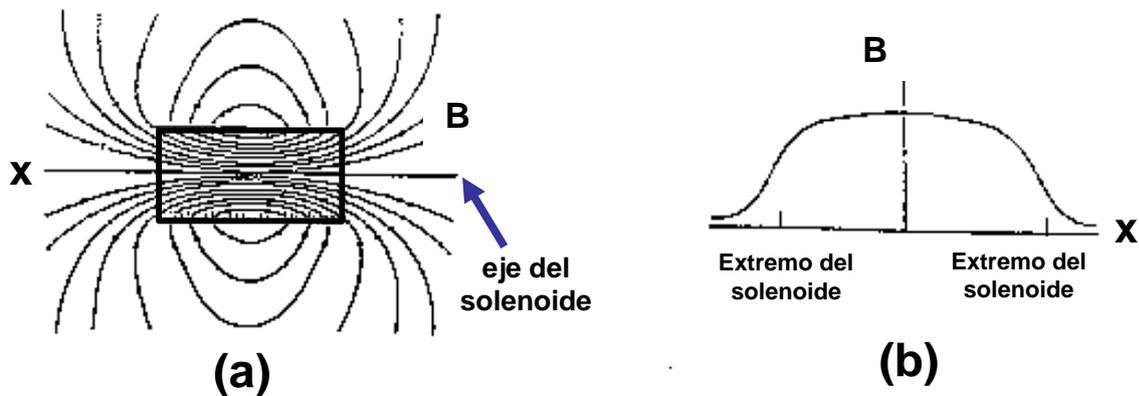


Figura 3

En estas figuras se puede apreciar que el campo  $B$  dentro del solenoide es aproximadamente uniforme y paralelo al eje del solenoide (las líneas de campo son aproximadamente paralelas al eje del solenoide), y se hace muy pequeño cuando salimos fuera de él. Se puede demostrar que en un solenoide de longitud  $L$  y radio  $a$  (ver Fig.2), el valor de  $B$  a una distancia  $x$  de su centro está dado por la expresión:

$$B_0 = \frac{\mu_0 n I}{2} (\cos\beta_2 - \cos\beta_1) \quad [2]$$

donde  $\mu_0$  es la permeabilidad magnética del vacío,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  H/m,  $n$  es el número de espiras por unidad de longitud del solenoide,  $n = N/L$  ( $N$  es el número de espiras del solenoide y  $L$  su longitud) y

$$\cos\beta_1 = - \frac{\frac{L}{2} - x}{\sqrt{\left(\frac{L}{2} - x\right)^2 + a^2}} \quad [3]$$

$$\cos\beta_2 = + \frac{\frac{L}{2} + x}{\sqrt{\left(\frac{L}{2} + x\right)^2 + a^2}}$$

El campo  $B(x)$  en el eje del solenoide se muestra en Fig.3 (b). Como se ha indicado antes, en el interior del solenoide,  $B$  es aproximadamente constante y su valor, usando (2), es aproximadamente,

$$B = \mu_0 n I \quad [4]$$

### 3. Para saber más...

- P.A. Tipler, G. Mosca, FISICA, Vol. 2, (Capítulo 28), 5ª edición, Ed. Reverté, Barcelona, 2005.
- R.A. Serway, J.W. Jewett, Jr., Vol. 2 (Capítulo 23), 3ª edición, Ed. Thomson, Madrid, 2002.

#### En internet:

<http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/electromagnet/fem/fem.htm>

<http://www.ua.es/grupo/gti/fisica/pdfs/index14.html#video>

[http://www.fisicanet.com.ar/fisica/electrodinamica/ap03\\_induccion.php](http://www.fisicanet.com.ar/fisica/electrodinamica/ap03_induccion.php)

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/electric/farlaw.html> (en inglés)

<http://www.phas.ualgary.ca/physlets/faraday.htm> (en inglés)

<http://www.ee.surrey.ac.uk/Teaching/Courses/EFT/dynamics/html/faradayslaw.html> (en inglés)

## 4. Material

1. Solenoide
2. Bobinas de, aproximadamente, 250, 500 y 1000 espiras
3. Imán recto
4. Carrete explorador
5. Osciloscopio
6. Multímetro
7. Generador de frecuencias
8. Cables de conexión

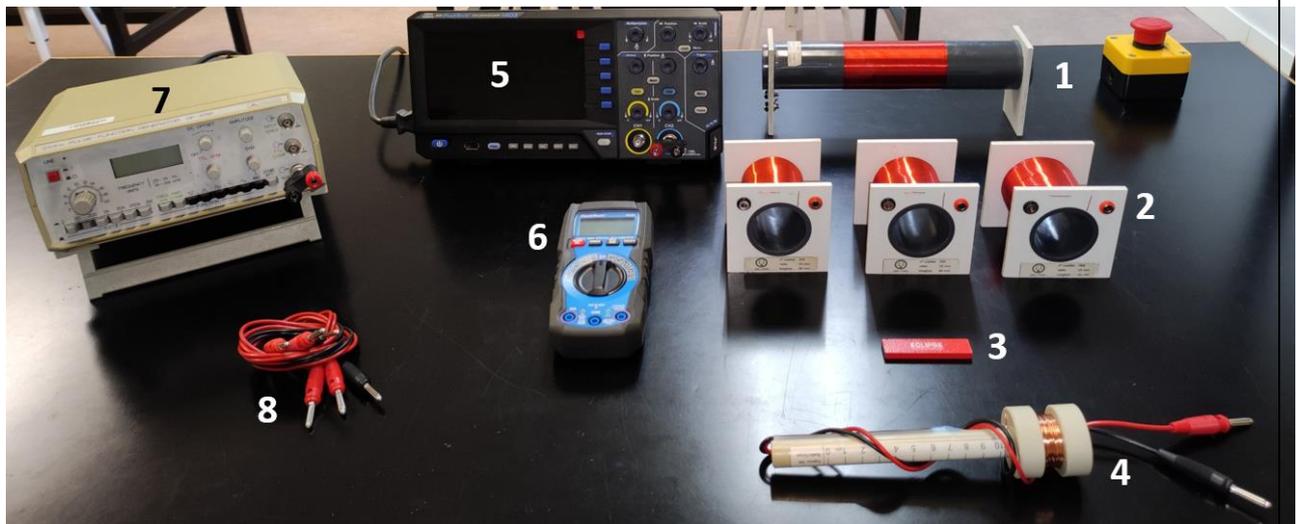


Figura 4

## 5. Método experimental

### 5.1. Inducción imán-bobina

1. Conectar la bobina de 250 espiras al osciloscopio. El osciloscopio mostrará la fuerza electromotriz en la bobina. La fuerza electromotriz debería ser cero inicialmente.
2. Introducir rápidamente el imán en el interior de la bobina de 250 espiras. Anotar las observaciones. ¿Se observa una fuerza electromotriz en la bobina?.
3. Mantener quieto el imán en el interior y sacarlo rápidamente. ¿Qué sucede?.
4. Repetir los ensayos con el otro polo del imán. ¿Se advierte ahora una fem inducida?, ¿en qué sentido?.

5. Mover la bobina, con el imán introducido y quieto. ¿Se observa una fem inducida?.
6. Repetir los pasos anteriores con las bobinas de 500 y 1000 espiras, respectivamente. ¿Qué diferencias se observan?

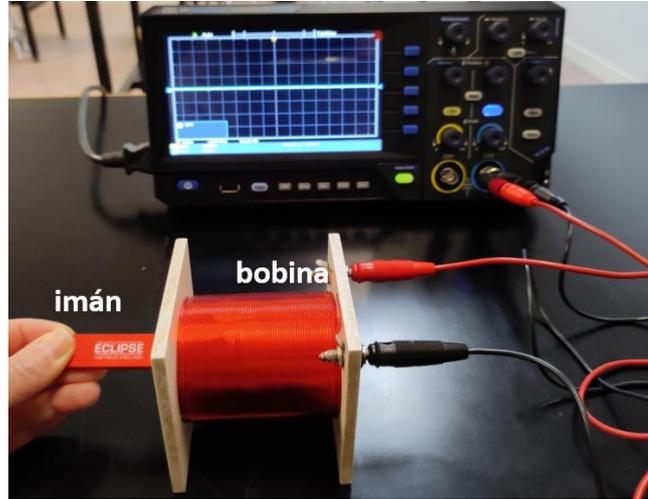
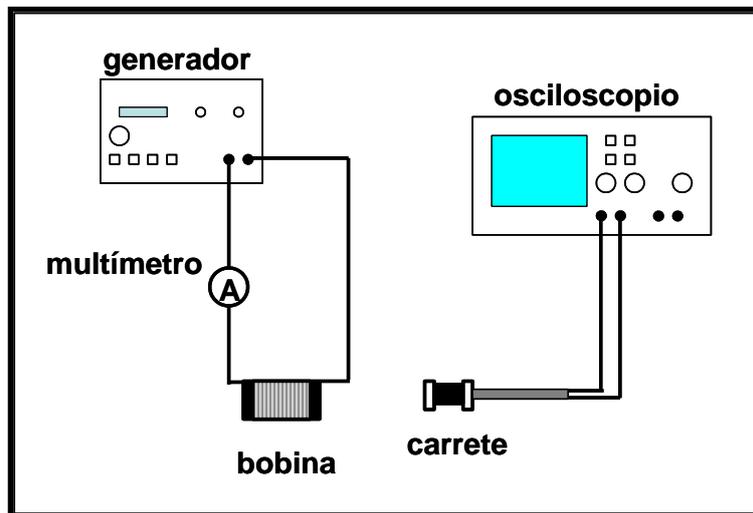


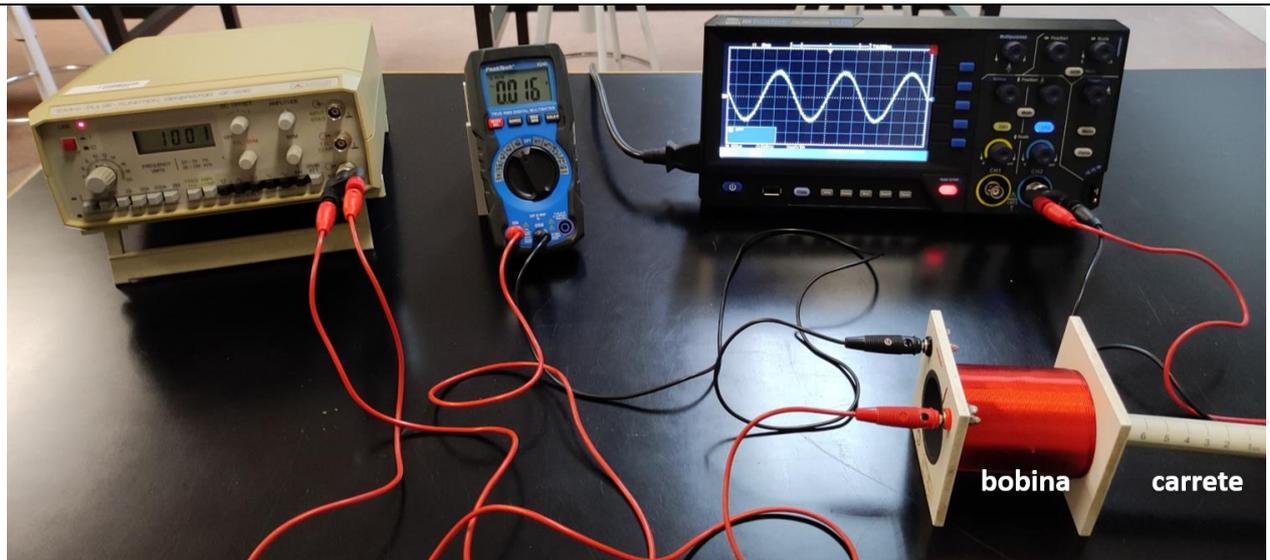
Figura 5

## 5.2. Inducción bobina-bobina

1. Tomar el carrete (en realidad el carrete no es más que una pequeña bobina) y la bobina de 1000 espiras, y realizar el montaje indicado en la figura 6. La bobina se conecta al generador de frecuencias y el carrete al osciloscopio, de modo que el osciloscopio medirá la fuerza electromotriz en el carrete.



Esquema del montaje



**Figura 6**

2. Encender el generador de frecuencias y seleccionar una salida sinusoidal de frecuencia  $f = 4 \text{ kHz}$ . Por la bobina circulará una corriente  $I = I_0 \cos \omega t$ , donde  $\omega = 2\pi f$  es la frecuencia angular. Anotar el valor de la corriente en la bobina medido por el multímetro (notar que, como a través de la bobina circula una corriente alterna  $I = I_0 \cos \omega t$ , el valor medido en el multímetro es la corriente eficaz,  $I_{ef} = I_0 / \sqrt{2}$ ).

Al circular una corriente por la bobina, crea un campo magnético aproximadamente uniforme en su interior y proporcional al valor de la corriente,

$$B = \mu_0 n I = B_0 \cos \omega t \quad [5]$$

donde  $n$  es el número de espiras por unidad de longitud de la bobina y  $B_0 = \mu_0 n I_0$ .

¿Qué se observa ahora en el osciloscopio?. Medir el período de las oscilaciones y determinar su frecuencia. Comprobar que coincide con la frecuencia de la corriente en la bobina ( $f = 4 \text{ kHz}$ ). Determinar el voltaje pico a pico  $V_{pp}$  y la amplitud  $\varepsilon_0$  en el carrete,  $\varepsilon_0 = V_{pp} / 2$ .

3. Repetir las medidas para frecuencias de 3 kHz, 2 kHz, 1 kHz y 500 Hz. Regular en todos los casos la amplitud en el generador hasta que la corriente medida por el multímetro sea aproximadamente igual a la que se tenía en el caso anterior, de modo que estemos seguros que la amplitud de la corriente  $I_0$  que circula por la bobina sea la misma. Medir la amplitud y frecuencia de las oscilaciones de la fem en el carrete para todos los casos.
4. Representar gráficamente la tensión pico-pico en función de las frecuencias. Discutir el significado de los parámetros del ajuste usando la ley de Faraday.

### 5.3. Medida del campo magnético en el interior de un solenoide

Supongamos que se tiene un solenoide como el de Fig. 7, de radio  $a$  y longitud  $L$ , por el que hacemos circular una corriente alterna  $I = I_0 \cos \omega t$ . Al variar  $I$  en el tiempo, el campo  $B$  debido al solenoide también variará en el tiempo y, de acuerdo a (2), su valor en un punto del eje a una distancia  $x$  de centro del solenoide se podrá escribir:

$$B = B_0 \cos \omega t \quad [6]$$

donde  $B_0$  es la amplitud del campo  $B$  en dicho punto, dada por:

$$B_0 = \frac{\mu_0 n I_0}{2} (\cos \beta_2 - \cos \beta_1) \quad [7]$$

con  $\cos \beta_1$ ,  $\cos \beta_2$  dados por la relación (3).

Si colocamos un pequeño carrete explorador dentro del solenoide con su eje coincidiendo con el eje del solenoide (ver Fig.7), habrá una variación de flujo magnético a través de las espiras del carrete y, por tanto, aparecerá una fem inducida en el carrete.

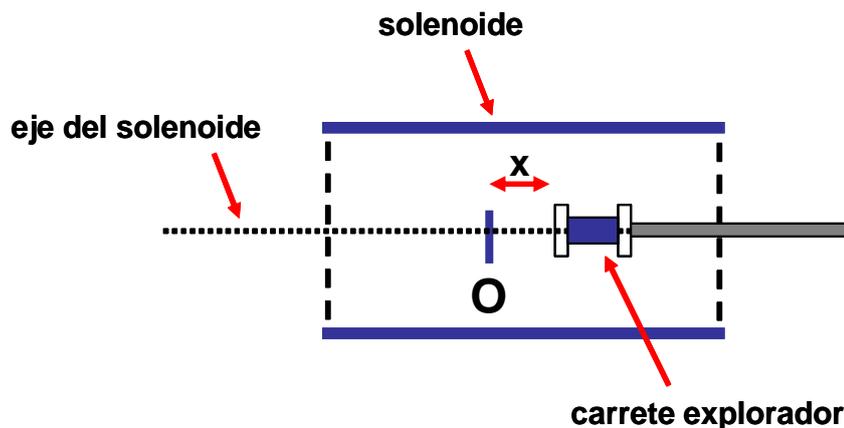


Figura 7

En primera aproximación, como el carrete es pequeño en comparación con el solenoide, el campo  $B$  debido al solenoide se puede considerar constante en la sección transversal del carrete. Por tanto, el flujo  $\Phi$  a través de las  $N_c$  espiras del carrete será,

$$\Phi = N_c A_c B = N_c A_c B_0 \cos \omega t \quad [8]$$

donde  $A_c$  es el área de cada espira del carrete y  $B$  el campo magnético debido al solenoide en el punto  $x$  donde se encuentra el carrete,  $B = B_0 \cos \omega t$ , con  $B_0$  en dicho punto dado por (7). Usando la ley de Faraday, se tendrá por tanto que la fem inducida en el carrete será

$$\varepsilon_{ind} = \varepsilon_0 \sin \omega t \quad [9]$$

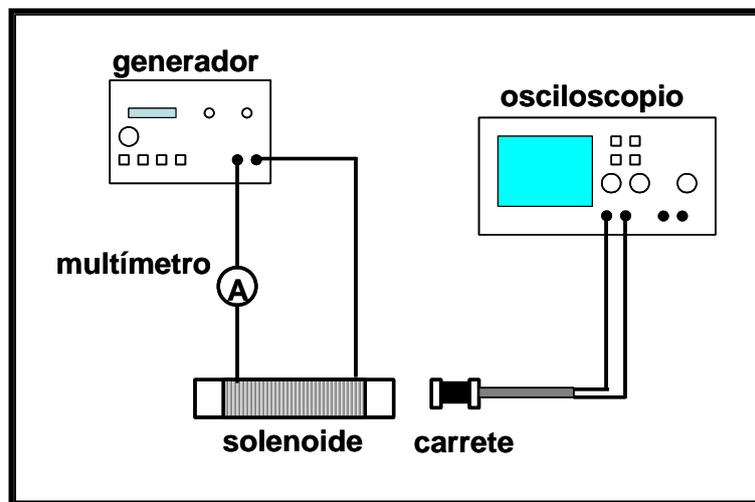
con  $\varepsilon_0$ , la amplitud de la fem inducida, dada por  $\varepsilon_0 = N_c A_c \omega B_0$ . Por tanto, si medimos la amplitud  $\varepsilon_0$  de la fem inducida en el carrete en un punto  $x$  del eje del solenoide podremos calcular la amplitud  $B_0$  en dicho punto del campo magnético debido al solenoide:

$$B_0 = \frac{\varepsilon_0}{N_c A_c \omega}$$

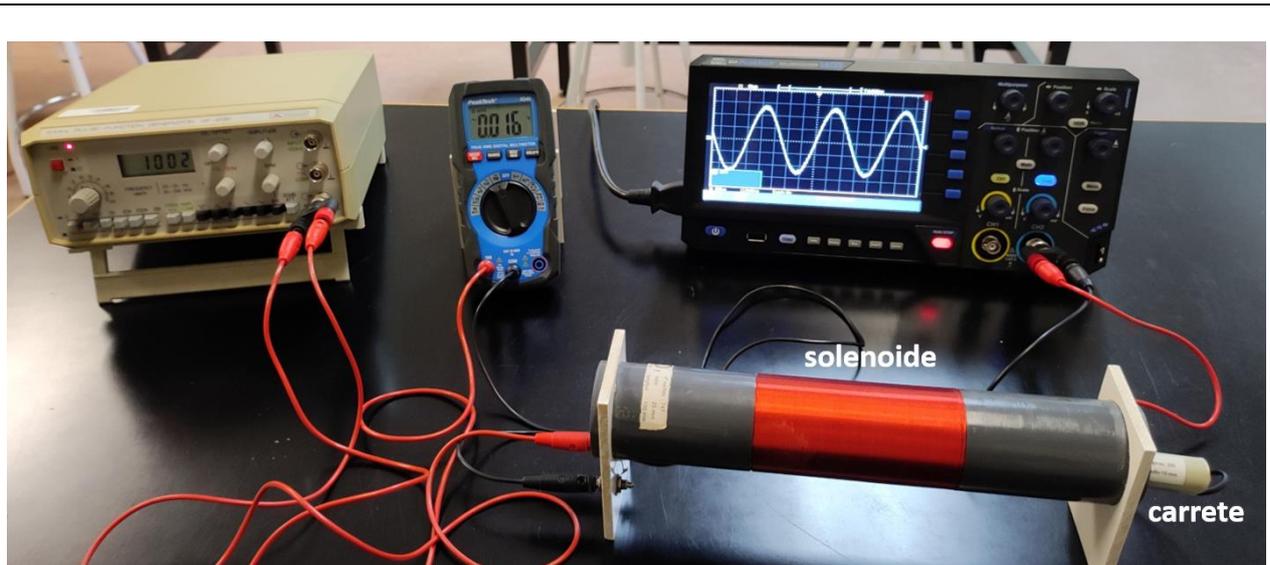
[10]

Para ello seguiremos los siguientes pasos:

1. Anotar el número de espiras del solenoide y del carrete. Medir la longitud  $L$  del solenoide. Obtener el radio del carrete con el objeto de calcular el área  $A_c$  de cada espira del carrete.
2. Realizar el montaje de la figura 8 e introducir el carrete en el interior del solenoide, teniendo en cuenta que cuando el carrete se encuentre en el centro del solenoide la distancia  $x$  medida en la regla del carrete es 0 cm.



Esquema del montaje



**Figura 8**

3. Se selecciona en el generador una frecuencia de 1 kHz y se aumenta la amplitud del mismo hasta observar claramente en el osciloscopio la fem inducida en el carrete explorador.
4. Anotar el voltaje pico a pico  $V_{pp}$  y calcular la amplitud  $\varepsilon_0 = V_{pp} / 2$  de la fem inducida en el carrete.
5. Apuntar el valor de la corriente en el solenoide indicado en el multímetro. Recordar que, como a través del solenoide circula una corriente alterna  $I = I_0 \cos \omega t$ , el valor medido en el multímetro es la corriente eficaz,  $I_{ef} = I_0 / \sqrt{2}$ .
6. Repetir los pasos anteriores variando la distancia  $x$  del carrete al centro del solenoide de 1 en 1 cm.
7. Representar los valores experimentales y teóricos de  $B_0$  en función de  $x$ .
8. Discutir los resultados.