



UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES

**Facultad de Ingeniería
Departamento de Física**

(62.03) FÍSICA II A

**Trabajo Práctico N° 5
Fenómeno de inducción
Cuatrimestre: I - 2010**

**Cátedra: Leone – Rus – Silveyra
Grupo N°: 5**

Integrantes:

<i>Padrón</i>	<i>Alumno</i>	<i>Email</i>
91286	Danko, Fernando	fernandodanko@hotmail.com
91108	Dianda, Agustín	a_dianda89@hotmail.com
91248	Fau, Pablo	faupablo@gmail.com
88893	Gastaminza, Germán	german_gastaminza@hotmail.com
88942	Güemes Terzibachian, Juan Ignacio	jigt87@hotmail.com

<i>Fecha de Entrega</i>	<i>Fecha de Devolución</i>	<i>Observaciones</i>
8/06/2010		

Resumen

El presente trabajo práctico tiene por objetivo estudiar el fenómeno de inducción. Para ello se realizaron diversos experimentos que ponen en evidencia la versatilidad de la inducción dentro del campo de aplicación práctico, dado que éste fenómeno electromagnético es el denominador común a lo largo de la experiencia.

Introducción teórica

Hasta el momento, se estudió el campo eléctrico generado por cargas estáticas y el campo magnético generado por cargas en movimiento. En ésta experiencia, se introduce un nuevo aspecto de la teoría electromagnética, donde se consideraran los campos magnéticos variables. Es necesario comenzar por el concepto de fuerza electromotriz inducida, donde entra en juego la **Ley de Faraday**. Dicha ley se aplicará, cualitativamente, a lo largo de todo el trabajo práctico. Ésta establece que el voltaje inducido en un circuito cerrado es directamente proporcional a la variación del flujo magnético a través de una superficie cualquiera que tenga al circuito como borde. Se puede expresar en forma matemática de diferentes maneras:

$$V_{ind} = \oint_C \vec{E}_{ind} \cdot d\vec{l} = \frac{-d\phi}{dt} = \frac{-d}{dt} \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad (1)$$

siendo V_{ind} la fuerza electromotriz inducida (voltaje inducido), C el camino cerrado por donde circula el campo eléctrico inducido $\vec{E}_{ind}$, y

$$\phi = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S}$$

el flujo magnético que atraviesa la superficie transversal que tiene como borde el circuito cerrado. Aclaremos que el signo negativo se debe a la **Ley de Lenz**, que nos dice que las fuerzas electromotrices serán de un sentido tal que se opongan a la variación del flujo magnético que las produjo.

La variación de flujo magnético puede deberse a diferentes causas:

- El campo magnético varía con el tiempo mientras el circuito permanece estático.
- El campo magnético no es uniforme, y el circuito se mueve con relación al mismo.
- La forma del circuito varía con el tiempo y el campo magnético es estacionario
- La orientación relativa entre el campo y el circuito cambia a lo largo del tiempo.

Método experimental, Discusión y Conclusiones Particulares

Experimento 1: Fuerzas sobre corrientes inducidas.

Para poder realizar esta experiencia contábamos con un electroimán conectado a un generador de corriente alterna (un transformador conectado a línea) y una barra cilíndrica de “madera” de un metro de altura concéntrica con el bobinado. Luego se colocó un anillo conductor (de aluminio) cerrado sobre el polo superior del electroimán y, a través de un interruptor, se conectó la bobina al generador. Al hacer esto, el anillo se elevaba hasta quedar en equilibrio a cierta altura sobre el polo superior del electroimán.

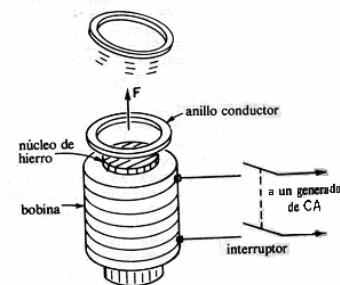


Figura 2: esquema del dispositivo

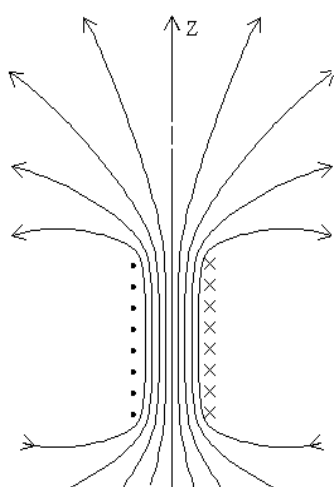


Figura 1: líneas de campo magnético

Si hacemos un análisis de lo ocurrido podemos observar que la bobina con corriente alterna generó un flujo magnético variable en el tiempo y este campo magnético circulaba por la barra cilíndrica, causando las líneas de campo que se muestran en la figura 1. El campo magnético es paralelo al eje en el interior del cilindro, pero fuera de este las líneas de campo divergen tal como se observa en la figura.

En el anillo conductor se formaba una FEM, debido a la variación del campo, y esto inducía una corriente que se oponía al cambio de flujo. Esta corriente al ser perpendicular con el campo, generaba una fuerza magnética, que es la que la sostenía en el aire al anillo.

Para analizar esto de otro manera se puede observar que el campo magnético que se formaba en el anillo (el cual consta con simetría cilíndrica) tenía dos componentes, una a lo largo del eje Z, B_z , y otra sobre el eje radial, B_r . Por otro lado, la fuerza magnética que se genera dentro del anillo va a estar dada por $\vec{F} = q \cdot \vec{v} \times \vec{B} = I \vec{l} \times \vec{B}$. Por lo tanto el esquema que nos queda sería como la figura 3.

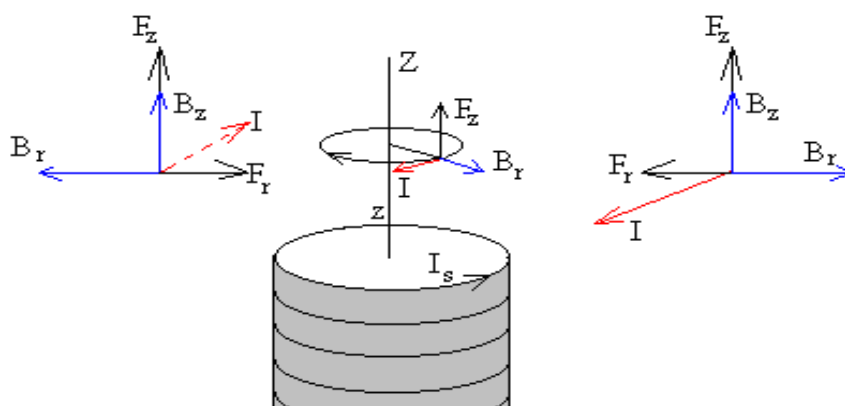


Figura 3: esquema de fuerzas magnéticas.

Las componentes radiales de la fuerza se anulan de dos en dos mientras que las componentes a lo largo del eje Z se suman. La fuerza resultante que ejerce el campo

magnético B producido por el cilindro sobre la corriente inducida I en el anillo tiene la dirección del eje Z . Esto es lo que explica que al conectar nuestra bobina el anillo salga “disparado” hasta una altura a y quede centrado con el cilindro.

Cuando se probó con otros anillos, como por ejemplo uno del mismo espesor y peso que el primer anillo, pero con un radio mayor, este se elevó a menor altura, ya que el campo magnético en el borde era de menor magnitud por estar más alejado de este y el flujo que atravesaba la espira era el mismo. Por lo tanto la Fuerza resultante sobre el anillo era menor, por tener una intensidad de campo menor, y es por esto que este anillo se elevó a menor altura que el anterior. Por ultimo, colocamos un anillo cortado, en este caso al no poder circular corriente, sobre el no actuaba ninguna fuerza, aunque sí había una FEM inducida en el.

Experimento 2: Péndulo de Inducción.

Si un disco de metal se mueve dentro de un campo magnético no uniforme, en cada segmento del disco varía constantemente el flujo magnético y en dicho segmento se induce una tensión, que da a lugar a una corriente. Por tanto, fluyen corrientes parásitas en todo el disco de metal. En el campo magnético, éstas sufren la acción de la fuerza de Lorentz, lo cual inhibe el movimiento del disco. Las corrientes parásitas se reducen drásticamente si en el disco se practican ranuras, de manera que la corriente sólo pueda pasar de una nervadura (o camino) a otra dando un rodeo. En este caso, el movimiento del disco se inhibe en menor medida (al verse reducida el área de la placa).

En la figura 4 se muestra un esquema del dispositivo con la placa de mayor área, en la cual las denominadas corrientes parásitas o de Foucault tienen una mayor libertad de caminos para establecerse con lo cual las fuerzas de “amortiguamiento” son mayores, provocando así el frenado relativamente rápido de la lenteja.

Al ranurar la lenteja, la denominada con forma enrejada, las corrientes de Foucault no “tienen tanta libertad” de establecerse, o tienen más obstáculos, por lo cual la fuerza debida a ellas es menor, resultando como consecuencia de esto, un frenado más lento de la lenteja. El mismo análisis se hace para la denominada forma de peine, en la cual el tiempo de detención es mayor aún.

En la figura 5 se puede apreciar el sentido del campo magnético B (supuesto), los sentidos de las corrientes parásitas y de las fuerzas de amortiguamiento.

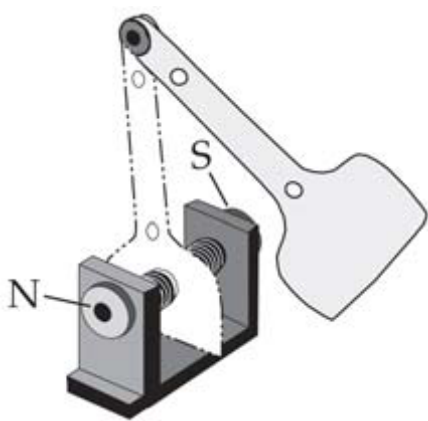


Figura 4: Esquema del dispositivo

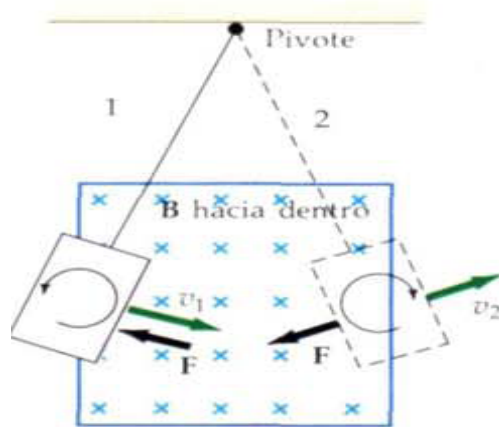


Figura 5: Fuerzas de amortiguamiento originadas por corrientes parásitas.

Experimento 3: fuerza electromotriz y corriente inducida.

Se realizaron dos experiencias con los siguientes materiales: imán de herradura, un bobinado y un amperímetro de aguja.

1) Se desplazo el imán haciendo pasar por el bobinado (conectado al amperímetro) y se detectó una corriente en el amperímetro.

Esto indica que hubo una corriente inducida con lo cual debemos mirar detalladamente la **ley de Faraday**:

$$Fem_{inducida} = - \frac{d\phi_{\vec{B}}}{dt} \Big|_{sc(t)}$$

Donde la FEM es la fuerza electromotriz inducida que produce que se establezca una corriente sobre una espira del bobinado, $Sc(t)$ es la superficie que tiene como frontera a cada espira del bobinado y $\phi_{\vec{B}}$ es el flujo del vector inducción magnética (B) sobre dicha superficie.

Mirando las líneas de campo del vector inducción magnética producidas en el imán vemos que se tiene una mayor densidad de líneas de campo y además la dirección del vector B tiende a ser paralela al diferencial de superficie a medida que me acerco a los polos del imán. Por lo tanto el módulo del flujo sobre una espira aumenta a medida que se acerca a los polos del imán. Haciendo desplazar el imán por el eje del bobinado vemos que en cada espira se produce una variación del flujo respecto al tiempo, ya que por ejemplo a medida que el imán va avanzando el modulo de flujo aumenta debido a que cada espira se acerca al polo magnético del imán. Esto induce una fuerza electromotriz que genera corriente (la que midió el amperímetro).

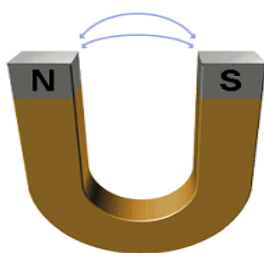


Figura 6: Imán de Herradura

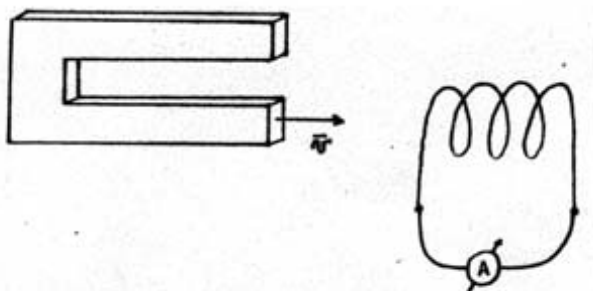


Figura 7: Esquema del experimento 3-1

2) al cerrar o abrir el imán con la pieza rectangular rápidamente se registra una corriente en el amperímetro inducida en el bobinado.

Como la divergencia del vector inducción magnética es siempre cero, las líneas de campo de B son siempre cerradas, mientras que las líneas de campo del vector intensidad de campo (H) nacen en el polo norte y mueren en el polo sur. Al estar circuito magnético cerrado las líneas de campo del vector intensidad de campo se encuentran todas dentro del circuito (cerradas) y mantiene una relación con B que se determina según su curva de histéresis. Cuando se abre el circuito (se extrae la pieza rectangular) se forman dos polos en los extremos del imán, esto hace variar el vector intensidad de campo en imán, y a su vez el vector inducción magnética. Por lo tanto se produjo una variación del vector B en el tiempo. Al variar B en el tiempo también varia el flujo de este vector y, por la **ley de Faraday**, se induce una corriente producida por la fuerza electromotriz inducida.

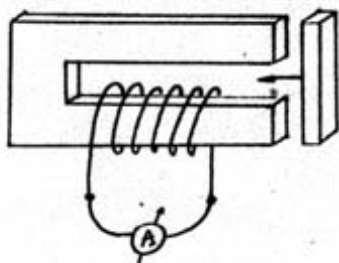


Figura 8: Esquema del experimento 3-2

Experimento 4: Tubo “mágico”.

Se dispone de dos caños de aluminio de iguales dimensiones (claramente huecos). Se introducen en cada uno de ellos una pieza cilíndrica de igual peso. Una de ellas es un imán, la otra no posee ninguna propiedad magnética. Se observa que el imán tarda mucho más tiempo en salir del tubo que la otra pieza, arrojando ambas con la misma velocidad inicial, sin alterar las condiciones del experimento entre una y otra.

La pieza sin propiedades magnéticas significativas cae acelerada por la gravedad (despreciando el rozamiento con las paredes del tubo). Sin embargo, es evidente que el imán experimenta una fuerza contraria a la atracción gravitatoria, que provoca que caiga notoriamente más lento. Analizaremos, en consecuencia, de dónde proviene dicha fuerza.

Consideramos entonces una de las “infinitas” espiras por las que podemos suponer que está compuesto el tubo de aluminio, ubicada en cualquier lugar a lo largo del tubo. A medida que el imán cae, atraído por la Tierra, esta espira experimenta un cambio de flujo, debido a la variación del campo magnético, que va aumentando si la espira está debajo del imán o va disminuyendo si la espira está sobre el imán. Este cambio de flujo, de acuerdo a la **ley de Faraday-Lenz**, genera una fuerza electromotriz inducida en la espira, que genera una corriente inducida, que a su vez genera un campo magnético cuyo flujo se opone al cambio de flujo experimentado por la espira.

Sobre la corriente inducida en la espira actúa una fuerza, generada por la interacción de dicha corriente y el campo magnético del imán. Según la **fuerza de Lorentz**, la fuerza experimentada por la espira depende de la intensidad de la corriente (en este caso la corriente inducida), la curva sobre la que circula la corriente y el campo magnético del imán. Esta fuerza tendrá componentes tanto verticales como horizontales, ya que las líneas de campo magnético del imán cortan oblicuas a la supuesta espira. Teniendo en cuenta la componente vertical, y considerando el sentido de la corriente inducida (en relación con la FEM explicada anteriormente), resulta evidente que la fuerza que experimenta la espira es hacia abajo, tanto si el imán está sobre la misma o por debajo. Por lo tanto, según la tercera ley de Newton de los pares de acción y reacción, el imán experimenta una fuerza en sentido contrario a la que ejerce sobre la espira, es decir, hacia arriba. Generalizando para las “infinitas” espiras por las que suponemos que está compuesto el tubo de aluminio, se tiene que a medida que el imán avanza por el tubo experimenta una fuerza resultante debido a la interacción con cada una de las espiras, que en conjunto ejercen una fuerza significativa, que se opone a la atracción gravitatoria y hace más lenta la caída del imán dentro del tubo.

Experimento 5: Freno de corriente.

El sistema consiste en un disco con la posibilidad de girar sobre un eje perpendicular a su superficie principal. Este disco está colocado entre dos bobinados unidos por un mismo núcleo con forma de herradura.

Se observa que el disco gira libremente y que al conectar los bobinados a una FEM este se detiene suavemente.

Debido a que el efecto de deriva térmica y otros similares no producen un movimiento neto de los electrones macroscópicamente apreciable, los podemos despreciar para nuestro análisis.

Podemos considerar entonces, que sobre el volumen del disco los electrones se mueven con velocidad $\vec{v} = \omega \vec{r} \times \vec{t}$

El campo magnético producido por el electroimán tiene módulo máximo en las proximidades del núcleo y decrece al alejarse de este, de tal forma que puede despreciarse lejos de este.

Al girar el disco los electrones cercanos al electroimán sufren una **fuerza de Lorentz** debido a la velocidad tangencial del movimiento circular, la cual es en dirección radial-axial y no aporta al efecto.

Si se toma una curva de ampere que se esté desplazando solidaria al disco, aparece sobre esta una FEM inducida según la **ley de Faraday-Lenz**. Como el disco es de un material conductor aparece una corriente eléctrica (parasita) que sufre los efectos del campo magnético resultante.

Tomando todas las curvas la fuerza resultante es contraria a la velocidad tangencial del disco, cuyo momento es el responsable de la desaceleración.

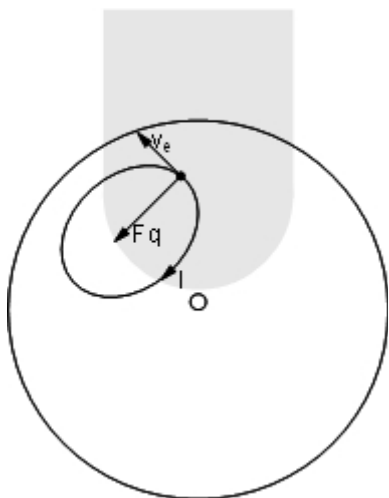


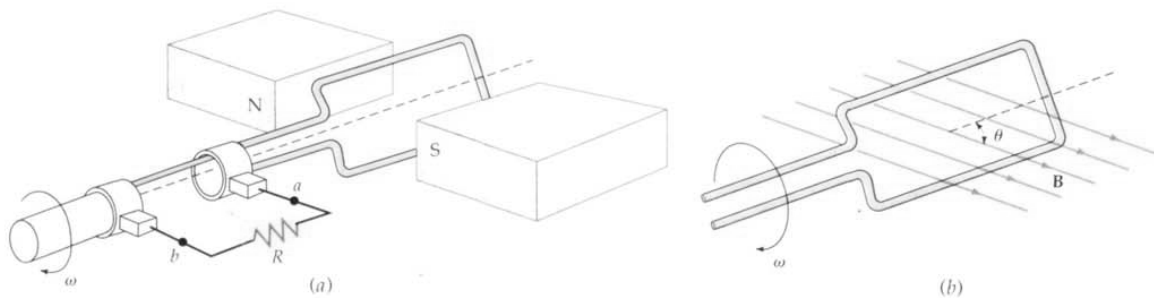
Figura 9: La fuerza de Lorentz que aparece sobre un electrón del disco tomando una curva particular.

Experimento 6: Motor y generador.

Los **Motores y generadores eléctricos**, son un grupo de aparatos que se utilizan para convertir la energía mecánica en eléctrica, o a la inversa, con medios electromagnéticos. A una máquina que convierte la energía mecánica en eléctrica se le denomina generador, alternador o dínamo, y a una máquina que convierte la energía eléctrica en mecánica se le denomina motor.

Dos principios físicos relacionados entre sí sirven de base al funcionamiento de los generadores y de los motores. El primero es el principio de la inducción descubierto por el científico e inventor británico Michael Faraday en 1831. Si un conductor se mueve a través de un campo magnético, o si está situado en las proximidades de un circuito de conducción fijo cuya intensidad puede variar, se establece o se induce una corriente en el conductor. El principio opuesto a éste fue observado en 1820 por el físico francés André Marie Ampère. Si una corriente pasaba a través de un conductor dentro de un campo magnético, éste ejercía una fuerza mecánica sobre el conductor.

El generador está constituido por una espira de N vueltas, que gira dentro de un campo magnético uniforme y aunque este sea constante, el flujo concatenado por la espira es función del ángulo θ que forma la normal de la superficie de la espira, con las líneas del campo magnético B .



$$\phi_m = NBA \cos \theta$$

$$\theta = \omega t + \delta$$

Donde δ es el ángulo inicial, y ω es la frecuencia angular de rotación. Reemplazando se obtiene que:

$$\phi_m = NBA \cos (\omega t + \delta) = NBA \cos (2 \pi f t + \delta)$$

Resultando la FEM de la bobina:

$$e = NBA \omega \sin(\omega t + \delta)$$

La misma bobina, puede usarse como motor, aplicándole una corriente alterna, en lugar de hacer girar la espira, pudiendo usarse así como motor de C.A.

La velocidad a la que funciona un motor depende de la intensidad del campo magnético que actúa sobre la armadura, así como de la corriente de ésta. Cuanto más fuerte es el campo, más bajo es el grado de rotación necesario para generar un voltaje inducido lo bastante grande como para contrarrestar el voltaje aplicado. Por esta razón, la velocidad de los motores de corriente continua puede controlarse mediante la variación de la corriente del campo.

Esto fue lo que hemos realizado en el laboratorio de física, conectado el motor a una fuente, observamos el giro de los bobinados. Una vez establecido el movimiento, observamos también la variación de la velocidad de giro de la espira, al acercarle un imán, modificando así el campo magnético y la corriente inducida.

La otra experiencia fue la inversa, haciendo girar la espira de un generador, observamos en un multímetro la FEM inducida en la bobina y su proporcionalidad con la velocidad de giro de la misma.

Experimento 7: Inductor de sensaciones.

El dispositivo a analizar era una caja negra con dos bornes metálicos y una palanca. La experiencia consistía en ubicarse, con dos o más alumnos, alrededor de la caja, tomados de la mano. Los dos alumnos a ambos extremos debían apoyar un dedo en cada borne del dispositivo. Luego, algún otro alumno fuera de la cadena o el mismo profesor debería darle un golpe seco y fuerte a la palanca. Inmediatamente después de golpear la palanca, los alumnos que estaban en la cadena experimentaban una sensación. Luego de terminada la experiencia, se abre la caja y analiza la causa de la descarga eléctrica.

Al quitar la tapa, se observan dos alambres enrollados un núcleo metálico, conectados a los dos bornes metálicos. El núcleo se encontraba cerrado cuando la palanca estaba arriba, y se abría cuando esta se bajaba. Esta “apertura” del núcleo sería

un “entrehierro” del mismo.

Sabemos gracias a la **Ley de Faraday**, que podemos definir a la fuerza electromotriz inducida como el cambio de flujo magnético por unidad de tiempo, y, gracias a la **Ley de Lenz**, que esta fuerza se opone a este cambio de flujo:

$$V_{ind} = - \frac{d\phi}{dt}$$

El núcleo de la caja tenía forma de herradura, y la palanca estaba unida a un hierro que “cerraba” el núcleo. Por la manera en que circula la corriente por los bobinados, podemos decir que por el interior del núcleo circula campo magnético B . Además, podemos definir al flujo magnético como:

$$\phi = \int_S B \cdot dS$$

donde S es la superficie transversal del núcleo. Mientras el núcleo esté cerrado, las líneas de campo magnético circularán por el interior del mismo, y el flujo a través de la superficie transversal de este será constante ya que la corriente que circula también lo es. Ahora, cuando la palanca sea golpeada, el hierro que encerraba el toroide se separará del mismo, dejando “abierto” el núcleo. Las líneas de campo que atravesaban la superficie entre el núcleo y el hierro unido a la palanca ya no van a continuar dentro del toroide, y se dispersarán. A partir de esto habrá una variación en el flujo magnético a través de esta superficie. Recordando la ecuación de la **Ley de Faraday** (ver **Introducción Teórica**), podemos ver que dependiendo de esta variación, la fuerza electromotriz inducida será proporcionalmente menor o mayor. Esta FEM es, entonces, la fuerza que circula hacia los bornes y nos genera la descarga eléctrica.

Conclusiones Generales

Los experimentos realizados en este trabajo práctico nos permitieron elaborar algunas conclusiones acerca de la fuerza electromotriz inducida:

- La rapidez del cambio de flujo magnético produce una corriente eléctrica, es decir, una FEM inducida.
- La FEM genera una corriente (siempre que el medio lo permita) que a su vez genera un campo magnético cuyo flujo se opone al cambio de flujo experimentado por un bobinado.
- La fuerza electromotriz inducida no depende del valor de flujo magnético, sino de la variación del mismo respecto del tiempo.