

## Actividad 3: Electromagnetismo

Laboratorio de Física II

---

### Introducción

El fenómeno del magnetismo se conoce desde tiempos muy antiguos. La piedra imán o magnetita, un óxido de hierro que tiene la propiedad de atraer los objetos de hierro, ya era conocida por los griegos, los romanos y los chinos. Cuando se pasa una piedra imán por un trozo de hierro, éste adquiere a su vez la capacidad de atraer otros trozos de hierro. El término magnetismo proviene de la época de los filósofos griegos clásicos y tiene su origen en el nombre que recibía una región del Asia Menor, perteneciente al reino de Lidia, entonces denominada Magnesia. En ella abundaba una piedra negra o piedra imán capaz de atraer objetos de hierro. A pesar que ya en el siglo VI AC se conocía un cierto número de fenómenos magnéticos, el estudio de magnetismo no comienza a desarrollarse hasta más de veinte siglos después cuando la experimentación se convierte en una herramienta esencial para el desarrollo del conocimiento científico. William Gilbert (1544-1603), Ampère (1775-1836), Oersted (1777-1851), Faraday (1791-1867) y James Clerk Maxwell (1831-1879), investigaron sobre las características de los fenómenos magnéticos, elaborando un modelo físico del magnetismo cada vez más completo. Los fenómenos magnéticos habían permanecido durante mucho tiempo en la historia de la ciencia como independientes de los eléctricos. Pero el avance de la electricidad por un lado y del magnetismo por otro, preparó la síntesis de ambas partes de la física en una sola: el electromagnetismo, que reúne las relaciones mutuas existentes entre los campos magnético y las corrientes eléctricas. Maxwell fue el científico que cerró este sistema de relaciones al elaborar su teoría electromagnética.

En esta práctica estudiaremos el campo magnético generado por cargas eléctricas en movimiento. Más precisamente, analizaremos el campo magnético sobre el eje de una espira circular conductora por la que circula una corriente eléctrica constante.

# 1. Reseñas biográficas

## 1.1. Hans Christian Oersted

Nació en Rudkøbing el 14 de agosto de 1777 y falleció en Copenhague el 9 de marzo de 1851. De joven trabajó en la botica de su padre, sin embargo luego ingresó a la Universidad de Copenhague para estudiar física. Pronto se interesó por las corrientes eléctricas y se puso a la búsqueda de una conexión entre el magnetismo y la electricidad, de cuya existencia estaba convencido. En el año 1819 le llegó su gran día. Estaba haciendo una clase práctica, cuando acercó una aguja imantada a un hilo por el que circulaba una corriente eléctrica. Allí ocurrió algo inesperado: la aguja se desvió, sin apuntar en el sentido de la corriente ni en el contrario, sino en la dirección perpendicular al hilo. Cuando invirtió el sentido de la corriente, la aguja dio media vuelta y apuntó en sentido contrario. Esto constituyó la primera demostración de relación entre el magnetismo y la electricidad, por lo cual puede considerarse como el origen del electromagnetismo. El descubrimiento de Oersted tal vez fue anticipado en 1802 por un jurista italiano, Gian Domenico Romagnosi, aunque la descripción que este publicó de su experimento no es clara. En 1820 se anunció el descubrimiento de Oersted, lo cual ocasionó una explosión de investigación. Oersted al parecer, también fue el primero en aislar el aluminio en 1825.



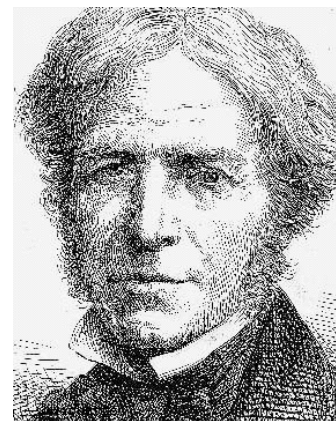
## 1.2. André Marie Ampère



Físico y matemático francés, nacido en Polémieux-au-Mont-d'Or (Lyon) el 22 de enero de 1775 y muerto por neumonía en Marsella el 10 de junio de 1836. Tuvo una vida familiar bastante trágica: su padre murió guillotinado en 1793 y en 1804 falleció su esposa al poco tiempo de estar casado. Fue un niño precoz, ya a los 12 años dominaba las matemáticas avanzadas. Fue profesor de física y química en Bourg y a partir de 1809 fue catedrático de matemáticas en París. Sus distracciones son célebres, en una ocasión olvidó una invitación a cenar con el emperador Napoleón. A Ampère se le acredita el descubrimiento del electromagnetismo –la relación entre la corriente eléctrica y los campos magnéticos. Su trabajo en este campo fue influido por el descubrimiento de Oersted. Cuando en 1820 se anunció en la Academia de Ciencias de París dicho descubrimiento, los físicos franceses entraron en gran actividad (nada parecido se volvió a ver hasta el anuncio de la fisión nuclear, un siglo más tarde). Ampère y Arago estuvieron a la vanguardia. Una semana después del anuncio del experimento de Oersted, Ampère demostró que la inclinación de la aguja de la brújula obedecía a lo que hoy se conoce como la “regla de la mano derecha”. Ampère demostró que no hacía falta imanes para poder observar interacciones magnéticas. Fue el primero en descubrir la fuerza magnética existente entre dos conductores paralelos por los cuales circulan corrientes eléctricas (demostró que si la corriente circula en el mismo sentido, se atraen el uno al otro, mientras que si los sentidos de la corriente son opuestos, se repelen) y desarrolló el solenoide (lo cual más tarde permitió a Sturgeon inventar el electroimán). En 1823 expuso una teoría que decía que las propiedades del imán tenían su origen en la existencia de corrientes microscópicas que circulaban eternamente por él. La culminación de sus estudios ocurrió en 1827 cuando publicó su *Teoría matemática de fenómenos electrodinámicos deducida exclusivamente a partir de experimentos*, en el cual dedujo formulaciones matemáticas precisas del electromagnetismo, principalmente la hoy llamada ley de Ampère. El amperio (A), la unidad de intensidad de corriente eléctrica recibió su nombre en su honor. A pesar de sus éxitos científicos, el juicio de su vida es claro a partir de su epitafio que eligió para su lápida: *Tandem felix* (Al fin feliz).

### 1.3. Michael Faraday

Físico y químico inglés, nació en Newington, Surrey el 22 de setiembre de 1791 y falleció en Hampton Court (Londres) el 25 de agosto de 1867. Faraday era uno de los diez hijos de un herrero que se trasladó con su familia a Londres. No tuvo prácticamente ninguna educación formal, por lo que se hizo aprendiz de encuadernador. Esto fue un golpe de suerte para él, porque tuvo los libros a su alcance, que oficialmente sólo le incumbían por la parte exterior, pero no pudo evitar ojearlos. Su segundo golpe de suerte fue que su patrón sentía simpatía por el deseo que tenía el joven por aprender, y le permitía leer. Además lo incentivaba a asistir a conferencias científicas. En 1812 un cliente le dio localidades para asistir a las conferencias de Humphry Davy en el Royal Institution. El joven Faraday tomó notas que después detalló cuidadosamente y se las envió a Davy. Davy quedó muy impresionado, y cuando tuvo oportunidad le ofreció un puesto como ayudante. Casi inmediatamente, Davy hizo un viaje por Europa, llevándose a Faraday como secretario y criado.



Faraday vivía en y para el laboratorio, Davy pronto se dio cuenta que lo eclipsaría y comenzó a ser un tanto hostil. En 1825 Faraday pasó a ser el director del laboratorio y en 1833 profesor de química en el *Royal Institute*. En 1823 logró su primera hazaña cuando ideó métodos para licuar gases, por lo cual se puede considerar como uno de los pioneros en la criogenia. Realizó sus primeras investigaciones en el campo de la química bajo la dirección de Davy. Un estudio sobre el cloro le llevó al descubrimiento de dos nuevos cloruros de carbono. También descubrió el benceno. Faraday también investigó nuevas variedades de vidrio óptico. Sin embargo, las investigaciones que convirtieron a Faraday en el primer científico experimental de su época las realizó en los campos de la electricidad y el magnetismo. En 1821 trazó el campo magnético alrededor de un conductor por el que circula una corriente eléctrica y construyó un prototipo de motor eléctrico. En 1831 Faraday descubrió la inducción electromagnética, y el mismo año demostró la inducción de una corriente eléctrica por otra. Durante este mismo periodo investigó los fenómenos de la electrólisis y descubrió dos leyes fundamentales: que la masa de una sustancia depositada por una corriente eléctrica en una electrólisis es proporcional a la cantidad de electricidad que pasa por el electrolito, y que las cantidades de sustancias electrolíticas depositadas por la acción de una misma cantidad de electricidad son proporcionales a las masas equivalentes de las sustancias. Sus experimentos en magnetismo le llevaron a dos descubrimientos de gran importancia. Uno fue la existencia del diamagnetismo y el otro fue comprobar que un campo magnético tiene fuerza para girar el plano de luz polarizada que pasa a través de ciertos tipos de cristal. Introdujo además el concepto de líneas de fuerzas, por lo cual fue el precursor del concepto de campo. Además de muchos artículos para publicaciones especializadas, Faraday escribió *Manipulación química* (1827), *Investigaciones experimentales en electricidad* (1844-1855) e *Investigaciones experimentales en física y química* (1859). A pesar de sus limitados conocimientos matemáticos, Faraday tuvo éxito al llevar a cabo descubrimientos básicos sobre los cuales dependen virtualmente todos nuestros usos de la electricidad. Concibió la naturaleza fundamental del magnetismo y, hasta cierto punto, la de la electricidad y la luz. Como un modesto hombre que se contentó con servir a la ciencia lo mejor que pudo, Faraday declinó el título de caballero (Sir) y un ofrecimiento para convertirse en presidente de la Royal Society, además de docenas de medallas, cintas, grados y honores de todas clases. Fue además un hombre ético y extraordinariamente religioso: rechazó tomar parte en la preparación de un gas venenoso que se usaría en la guerra de Crimea. Sus muchos logros son reconocidos por el uso de su nombre: la constante de Faraday es la cantidad de electricidad requerida para entregar una cantidad estándar de sustancia en la electrólisis, y la unidad del SI de capacitancia es el Farad.

## 2. Fundamento Teórico

### 2.1. Campo magnético

Se puede definir el campo magnético  $\mathbf{B}$  en un punto del espacio en términos de la fuerza magnética ejercida sobre una carga  $q$  que se mueve con una velocidad  $\mathbf{v}$ . Esta fuerza es

$$\mathbf{F} = q\mathbf{v} \times \mathbf{B} \quad (1)$$

Si esta dado  $\mathbf{F}$  para tres vectores  $q\mathbf{v}$  linealmente independientes entre si queda determinado el campo magnético.

A partir de esta expresión para la fuerza pueden observarse diferencias con la fuerza eléctrica:

- La fuerza eléctrica siempre está en la línea del campo eléctrico, mientras que la magnética es perpendicular al campo magnético.
- La fuerza magnética sólo actúa cuando la carga está en movimiento, mientras que la eléctrica actúa también sobre cargas en reposo.
- La fuerza eléctrica puede efectuar trabajo al desplazarse una partícula cargada, en tanto la fuerza magnética no trabaja, siendo siempre perpendicular al desplazamiento. Por tanto la energía cinética de una partícula sujeta solamente a la fuerza magnética no cambia.

El campo magnético se puede visualizar usando una brújula. El campo tiende a alinear los llamados dipolos magnéticos paralelo a sí mismo. Ejemplos de dipolos son imanes barra y agujas de brújulas. Así con una brújula se puede mapear la dirección del vector  $\mathbf{B}$  en cada punto del espacio. La dirección de  $\mathbf{B}$  es la dirección del norte indicado por la brújula, como se muestra en la Fig. 1. (Si la aguja de una brújula solo está libre de girar en un plano, como suele ser el caso, entonces su dirección de equilibrio indicaría la dirección de la componente de  $\mathbf{B}$  en el plano.) El norte de una brújula es el extremo que apunta aproximadamente hacia el norte geográfico cuando no se encuentran objetos magnéticos en la cercanía. Cuando se afirma que un imán tiene polos norte y sur, en realidad lo que afirmamos es que se tiene un polo “buscador del norte” y un polo “buscador del sur” refiriéndonos a los polos norte y sur geográficos. Polos norte magnéticos atraen polos sur magnéticos y viceversa, lo cual indica que hay un polo sur magnético cerca del polo norte geográfico de la Tierra, y un polo norte magnético cerca del polo sur geográfico. La correspondencia entre polos magnéticos y geográficos es solo aproximada pues existe una diferencia entre el norte geográfico verdadero y el norte indicado por la brújula, la cual se denomina **declinación magnética**. Además en cualquier punto geográfico, el campo magnético terrestre forma un cierto ángulo con la horizontal, denominado **ángulo de inclinación**.

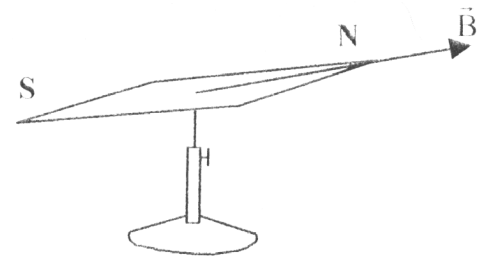


Figura 1: Determinación de la dirección de  $\mathbf{B}$  con una brújula.

La unidad del SI del campo magnético es el *tesla* ( $T$ ):  $[B] = T = \frac{N}{C.m/s} = \frac{N}{A.m}$ .

Electroimanes de laboratorio convencionales pueden producir campos de hasta  $2,5 T$ . Con electroimanes superconductores se llega a campos de  $25 T$ . El valor del campo magnético terrestre en la superficie es aproximadamente  $4 \times 10^{-5} T$ . El valor de la componente horizontal del campo magnético terrestre en la ciudad de Montevideo vale aproximadamente  $1,7 \times 10^{-5} T$ . De hecho, Uruguay se encuentra en el mínimo del campo magnético en la superficie de la Tierra

### 2.2. Fuentes de campo magnético y materiales magnéticos



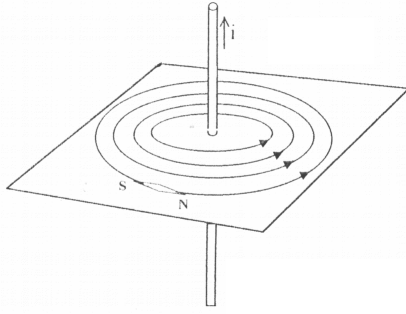


Figura 2: Líneas de campo magnético generado por un conductor lineal recto que transporta corriente.

podemos calcular el campo magnético a una distancia  $r$  de un alambre recto y largo (idealmente infinito) por el cual circula una corriente  $I$ . El mismo va a estar dado por:

$$B(r) = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \quad (3)$$

Esto implica que la fuerza entre dos segmentos de alambre paralelos y rectos de largo  $L$  por los cuales fluyen corrientes con intensidades  $I_1$  y  $I_2$  es  $F(r) = \mu_0 I_1 I_2 L / (2\pi r)$ , la fuerza siendo atractiva si las corrientes van en el mismo sentido. Si los dos conductores son aros circulares y coaxiales separados por una distancia  $s$  mucho menor que su radio  $R$  entonces la fuerza magnética entre ellos tendría que ser

$$F = \mu_0 I_1 I_2 \frac{R}{s} \quad (4)$$

Según el modelo de Ampère de imanes permanentes, estos son simplemente electroimanes formados por corrientes permanentes en el material, llamadas *corrientes atómicas*. En particular un imán cilíndrico hecho de material uniformemente imantado es equivalente a un solenoide electrificado de las mismas dimensiones.

La fuerza magnética entre dos solenoides idénticos puestos boca a boca sobre el mismo eje se puede estimar usando Ec. (4) si la altura  $h$  de cada solenoide y la separación entre ellos es mucho menor que su radio  $R$ . Sumando sobre las vueltas de los dos solenoides se obtiene

$$F = 2 \ln 2 \mu_0 I^2 \frac{R}{h} \quad (5)$$

cuando la separación entre las bocas de los solenoides es nula, es decir se tocan. Aquí se supone que fluye la misma intensidad por los dos solenoides e  $I$  es la intensidad total que circula por un solenoide, es decir que es la intensidad en el alambre del solenoide por el número de vueltas del alambre.

De esta manera se puede calcular aproximadamente la fuerza entre dos imanes permanentes de forma de pastillas cilíndricas puestos polo a polo, si uno conoce la intensidad de las corrientes permanentes que circulan dentro de ellos. En uno de los experimentos ustedes van a comprobar esta relación entre fuerza magnética y las corrientes atómicas.

La ley de Ampère, por si sola, permite calcular el campo magnético únicamente en situaciones de mucha simetría. Hay otra ley, la Ley de Biot-Savart, que juega el papel en magnetostática que juega la Ley de Coulomb en electrostática. La Ley de Biot-Savart expresa el campo magnético de una distribución de corriente dada como una integral. Usando esta ley se puede obtener, por ejemplo, el campo magnético de una espira rectangular.

Lejos de una espira de corriente o un solenoide el campo magnético que este produce está bien aproximado por el de un dipolo:

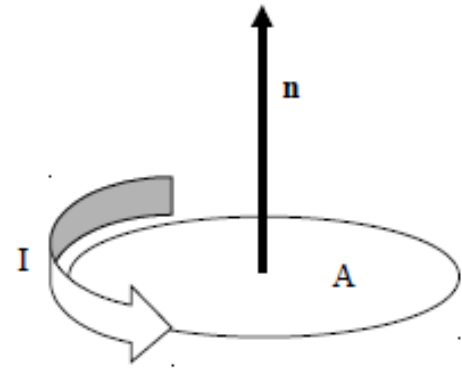
$$\mathbf{B}(\mathbf{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \left[ \frac{3(\mathbf{m} \cdot \mathbf{r})\mathbf{r} - r^2\mathbf{m}}{r^5} \right] \quad (6)$$

donde  $r$  es la distancia desde el dipolo,  $\mathbf{m}$  es el *momento dipolar*, un vector que determina el sentido en que apunta el dipolo y cuan fuerte es.

Para una sola espira plana  $\mathbf{m} = I\mathbf{A}\mathbf{n}$ , donde  $A$  es el área de la espira,  $\mathbf{n}$  es un versor normal a la espira, e  $I$  es la intensidad de corriente en la espira (con  $I$  positivo cuando la corriente circula contra reloj por la espira vista desde el lado donde apunta  $\mathbf{n}$ ). El momento dipolar de un solenoide es la suma de los momentos dipolares de cada una de sus  $N$  vueltas. Entonces es

$$\mathbf{m} = NI_1A\mathbf{n} \quad (7)$$

donde  $I_1$  es la intensidad de corriente que circula por una sola vuelta del solenoide, es decir la intensidad en el alambre del solenoide. Nota que  $I_T = I_1N$  es la intensidad total de corriente que circula entorno al eje del solenoide. En términos de esta intensidad total  $\mathbf{m} = I_T A\mathbf{n}$ .



Para nosotros va a ser importante el hecho de que dos solenoides que tienen el mismo momento dipolar, pero que difieren en otras características, tengan el mismo campo magnético lejos de ellos mismos. En un experimento vamos usar este hecho para medir las corrientes atómicas en un imán permanente.

Todo material responde hasta algún grado a la presencia de un campo magnético. El campo produce dipolos magnéticos en el material, o alinea dipolos preexistentes, y estos dipolos a su vez producen un campo magnético que en muchos casos es muy débil pero en algunos es muy fuerte.

Si en una región donde ya hay un campo  $\mathbf{B}_0$  se coloca un largo cilindro del material paralelo al campo entonces los dipolos en el material amplifican el campo dentro del material por un factor  $k_m$ , la *permeabilidad magnética* relativa del material. El valor de  $k_m$  se puede usar como indicador de cuan fuerte es el efecto, que por cierto también cambia el campo fuera del material. Podemos distinguir tres tipos de sustancias: diamagnéticas, paramagnéticas y ferromagnéticas. Cuando se coloca un material **diamagnético** dentro de un campo magnético, las corrientes atómicas circulan dentro del material de tal modo que se produce un campo magnético que se opone al campo externo. Por tanto  $k_m < 1$  (pero en la mayoría de los materiales es de unas pocas partes por millón menor a 1). Materiales diamagnéticos incluyen cobre, oro, plomo, bismuto, plata, mercurio, silicio, diamante, nitrógeno. En los materiales **paramagnéticos**  $k_m > 1$ . En estas sustancias los átomos (o moléculas) individuales tienen momentos magnéticos atómicos, pero en ausencia de un campo magnético externo los mismos están orientados al azar. Cuando se las coloca dentro de un campo externo, tienden a alinearse en forma paralela, por lo que aumenta el campo. Ejemplo: aluminio, calcio, cromo, platino, tungsteno, oxígeno, magnesio, litio, niobio. Por último, los materiales **ferromagnéticos** se diferencian de los paramagnéticos en que sus momentos magnéticos atómicos interaccionan tan fuertemente que tienden a alinearse espontáneamente. En un trozo de hierro o níquel, la magnetización espontánea está confinada en regiones llamadas dominios magnéticos, macroscópicamente pequeños pero microscópicamente enormes (diametros del orden de  $10^{-6}$  a  $10^{-3}$  m) ya que comprenden millones de momentos magnéticos individuales. Cuando un material ferromagnético se coloca en un campo magnético externo, los dominios magnéticos alineados con el campo externo crecen a expensas de sus dominios vecinos no alineados con este. Esto provoca un aumento muy grande del campo magnético, por lo que  $k_m \gg 1$  (del orden de varios cientos o miles, aunque varía con el valor del campo externo). La magnitud de  $k_m$  depende principalmente de la facilidad con la que puede ocurrir el movimiento de las paredes de los dominios. Por esta razón un trozo de hierro dulce, bien recocido, tiene una permeabilidad mucho mayor que un trozo de hierro de igual composición pero trabajado en frío (trefilado) o uno con impurezas. De modo semejante, una vez magnetizado un trozo de hierro no regresa completamente a su configuración inicial cuando se apaga el campo externo, quedando con una magnetización remanente. Los imanes permanentes son materiales con una magnetización remanente muy grande. Ejemplo: hierro, acero, cobalto, níquel, gadolinio, disprosio y ciertos materiales cerámicos.

### 2.3. Ley de Faraday

De acuerdo al experimento de Oersted, un campo magnético estacionario es asociado a una corriente estacionaria. En aquellos tiempos era tentador argumentar, en base a la simetría, que si una corriente producía un campo, enton-

ces un campo estacionario debería producir una corriente estacionaria. Muchos investigadores buscaron esto pero fracasaron.

Los experimentos realizados por Faraday en Inglaterra y Joseph Henry en Estados Unidos, en 1831, mostraron que se podía producir una corriente eléctrica en un circuito mediante un campo magnético **variable**. Los resultados de estos experimentos, muchos de los cuales veremos en esta práctica, condujeron a formular una de las leyes fundamentales del electromagnetismo, que hoy se conoce como Ley de Inducción de Faraday.

Esta ley establece que la magnitud de la *fem* inducida en un lazo es igual a la tasa de cambio en el tiempo del flujo magnético a través del lazo. Este enunciado puede escribirse como

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi_m}{dt}, \quad (8)$$

donde  $\Phi_m$  es el flujo magnético que pasa por el circuito, el cual está dado por

$$\Phi_m = \int \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A}, \quad (9)$$

el dominio de integración siendo una superficie delimitada por el lazo. Aquí el elemento de área vectorial  $d\mathbf{A}$  es un vector perpendicular a la superficie cuyo módulo es igual al área  $dA$ . Para el caso especial de una superficie plana de área  $A$  y un campo uniforme  $\mathbf{B}$  que forma un ángulo  $\theta$  con el vector  $d\mathbf{A}$  el flujo a través de la superficie es

$$\Phi_m = BA \cos \theta \quad (10)$$

A partir de estas expresiones se puede concluir que una *fem* puede inducirse en el circuito de varias maneras: puede variar la magnitud de  $\mathbf{B}$  con el tiempo, el área del circuito puede variar, el ángulo  $\theta$  puede variar, o puede ocurrir cualquier combinación de las anteriores.

El signo de menos en Ec. (8) recoge el enunciado de la **ley de Lenz**, que establece que la polaridad de la *fem* inducida es tal que tiende a producir una corriente que creará un flujo magnético que se opone al cambio de flujo magnético a través del lazo.

### 3. Procedimiento experimental

El objetivo de esta práctica es medir el campo magnético generado por una espira circular de  $N$  vueltas y radio  $a$  sobre su eje. Si  $I_1$  es la corriente que circula por una vuelta de la espira, la corriente total será  $i = NI_1$ . Apoyados en la ley de Biot-Savart (Ec. (6)) y el momento magnético de una espira de  $N$  vueltas (Ec. (7)), buscamos determinar el campo magnético sobre puntos ubicados sobre el eje de la espira, a una distancia  $x$  de su centro,  $\mathbf{B}(x)$ , como mostramos en la Fig. 3.

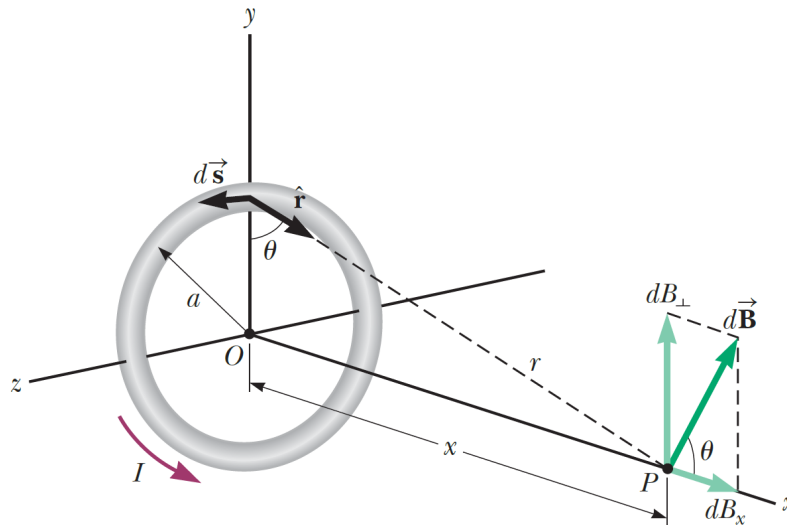


Figura 3: Campo magnético  $d\mathbf{B}$  generado por un elemento de espira de largo infinitesimal  $ds$  ( $ds$  es tangente a la espira circular, tiene módulo  $ds$  y apunta en la dirección en que circula la corriente  $i$ ) en un punto ubicado sobre el eje de la espira a una distancia  $x$  del centro de la espira. Note que, por simetría, el  $\mathbf{B}$  total de la espira apunta en la dirección de su eje. Figura adaptada de (Serway & Jewett, 2016).

Utilizamos un sensor, punta o sonda Hall, que es un dispositivo electrónico que se basa en el efecto Hall para medir el módulo de campos magnéticos<sup>1</sup>.

En la Fig 4 se muestra una fotografía del montaje experimental para esta práctica. La lectura del campo magnético se hará en la computadora, con el software Logger Pro de Vernier, que se conecta a la punta Hall mediante la interfaz Vernier. Como se observa, la punta Hall se posiciona de forma perpendicular a la espira y alineada con su centro (salvando errores experimentales).

La distancia  $x$  de la punta Hall a la espira (ver Fig. 3) la leeremos del video correspondiente directamente de la escala sobre el riel en el que se posiciona la espira (en el video verá que los desplazamientos sucesivos son de 1 cm), mediante una escuadra plástica que se coloca de forma paralela a la espira y siempre en contacto con la punta Hall. En la Fig. 5 se observa este posicionamiento.

<sup>1</sup>No entraremos en detalles sobre este fenómeno ya el que abunda literatura. Ver por ejemplo [https://es.wikipedia.org/wiki/Efecto\\_Hall](https://es.wikipedia.org/wiki/Efecto_Hall) y [https://es.wikipedia.org/wiki/Sensor\\_de\\_efecto\\_Hall](https://es.wikipedia.org/wiki/Sensor_de_efecto_Hall).

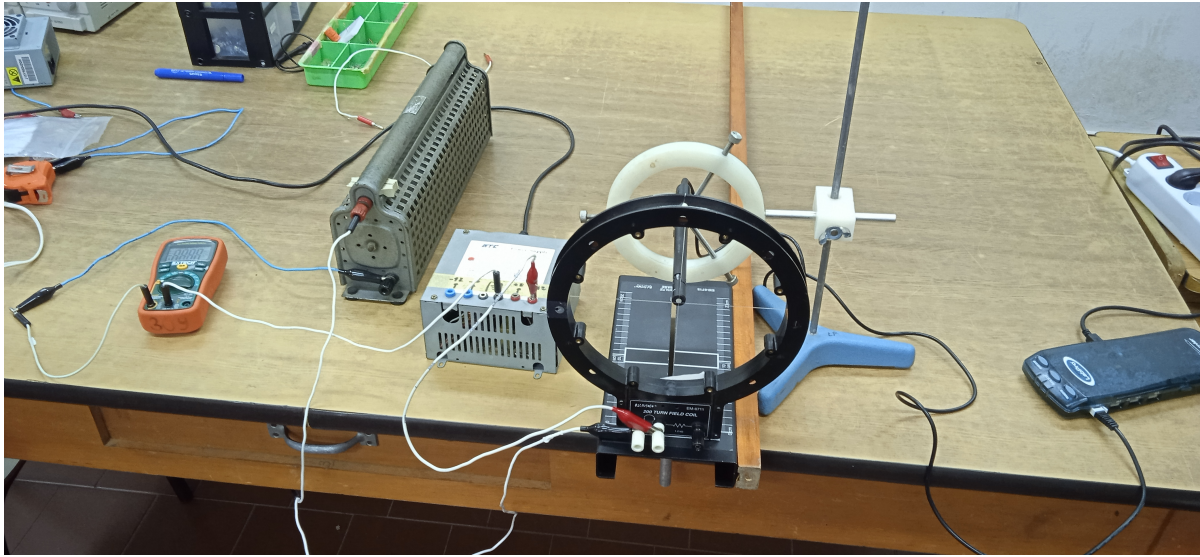


Figura 4: Montaje experimental. Los principales componentes son: espira, punta Hall, fuente, resistencia eléctrica, amperímetro e interfaz Vernier (¡intente reconocerlos!).

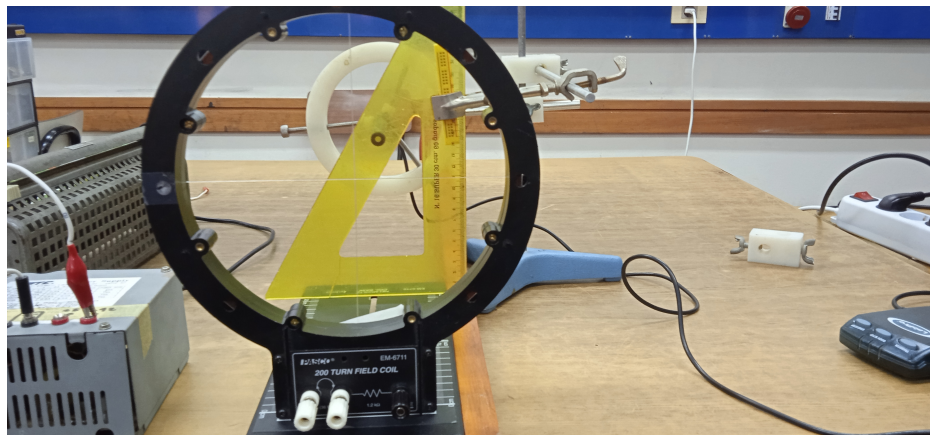


Figura 5: Montaje experimental. La escuadra plástica ayudará para leer la distancia de la punta Hall al centro de la bobina.

En la plataforma EVA encontrará fotografías que muestran los parámetros ( $N$ ,  $a$  e  $I_1$ ) que necesita para sus cálculos. Principalmente las siguientes fotografías:





### 3.1. Guía experimental

1. Compruebe que el campo magnético en el eje de la espira solo tiene una componente en la dirección  $x$  y su módulo es:

$$B_x(x) = \frac{\mu_0 i a^2}{2(a^2 + x^2)^{3/2}}, \quad (11)$$

donde  $i$  es la corriente *total* que circula por la bobina.

2. A partir del material audiovisual subido en la plataforma EVA para esta actividad, recabe los datos experimentales de  $B_x$  en función de la distancia  $x$ .
3. En una misma ventana grafique el campo magnético experimental ( $B_x^{exp}$ ) y el teórico ( $B_x^{teo}$ ) en función de la distancia  $x$ .
4. A partir del campo magnético experimental en función de la distancia (deberá hacer algún proceso de linealización de los datos), calcule el momento magnético de la bobina y compárelo con el valor teórico esperado.

Los momentos magnéticos deberán tener su incertidumbre y los debe expresar correctamente (la incertidumbre con dos cifras significativas). Considere la incertidumbre del ajuste lineal y en la medición del radio  $a$  (las demás cantidades involucradas, considérelas sin incertidumbre).

### Repaso de propagación de incertidumbres

Suponga que una variable  $z$  es función de otras  $n$  variables, de las que conocemos su incertidumbre:  $x_1 \pm \Delta x_1$ ,  $x_2 \pm \Delta x_2$ , ...,  $x_n \pm \Delta x_n$ . Como vimos en el curso de Laboratorio de Física I, si  $z = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , la incertidumbre de  $z$  la calculamos como:

$$\Delta z = \left| \frac{\partial f}{\partial x_1} \right| \Delta x_1 + \left| \frac{\partial f}{\partial x_2} \right| \Delta x_2 + \dots + \left| \frac{\partial f}{\partial x_n} \right| \Delta x_n$$

### Referencias

- Asimov I., 1987, Enciclopedia biográfica de ciencia y tecnología, 3. Vol. 1234, Alianza Editorial
- Kane J., Sternheim M., 1991, Barcelona. Ed. Reverté
- Maiztegui A. P., Sabato J. A., 1972, in , Introducción a la física 2. pp 539–539
- Serway R. A., Jewett J. W., 2016, Física: electricidad y magnetismo. Cengage Learning