



Física Experimental 2



Práctica 1 - Campo Magnético

1 Objetivos

- Estudiar el campo magnético generado por la circulación de una corriente en un solenoide.
- Diseñar una experiencia que permita determinar el valor de la permeabilidad magnética del vacío (μ_0), realizar las medidas y analizar los resultados, comparando con el valor de referencia.
- Estudiar el campo magnético generado por un par de bobinas de Helmholtz alimentadas con corriente continua

2 Principales competencias a desarrollar

- Implementar en grupos una experiencia simple para estudiar el campo magnético generado por un solenoide, tomando decisiones sencillas sobre la forma de armar el montaje experimental y las medidas a realizar para llegar a desarrollar la práctica.
- Comprender la implicancia de los parámetros del sistema en el valor del campo magnético.
- Obtener datos, analizarlos y contrastar con modelos teóricos.
- Aplicar el método de mínimos cuadrados realizando los cambios de variable que se requieran e interpretando correctamente los coeficientes obtenidos.
- Elaborar conclusiones a partir de los resultados obtenidos.
- Conocer el funcionamiento y alcance de los sensores e instrumentos de medida y lograr manipularlos para realizar las medidas necesarias.
- Comunicar en forma escrita los resultados obtenidos de acuerdo a las pautas definidas.

3 Fundamento teórico

3.1 Relaciones entre campo eléctrico y magnético

El campo magnético (\vec{B}) es una magnitud vectorial que junto con el campo eléctrico constituye la base de la acción a distancia asociada con las partículas cargadas eléctricamente. La ley de Lorentz establece que una partícula con carga eléctrica q moviéndose con una velocidad \vec{v} en una región cualquiera del espacio donde existan campos eléctrico \vec{E} y magnético \vec{B} experimentará una fuerza \vec{F} dada por:

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (1)$$

Además de la relación anterior, el campo magnético cumple otras dos relaciones fundamentales: la ley de Ampere (por la cual la circulación de una corriente por un conductor induce un campo magnético proporcional a dicha corriente) y la ley de Faraday (por la cual la variación temporal de un campo magnético induce un campo eléctrico proporcional a dicha variación). La Ley de Ampere se escribe:

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{r} = \mu_o I \quad (2)$$

El primer término de la ecuación representa la circulación del campo magnético en una curva cerrada, y el segundo término la corriente I que atraviesa la superficie delimitada por dicha curva, multiplicada por la permeabilidad magnética del vacío (μ_o).

La Ley de Faraday se escribe:

$$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{r} = -\frac{\partial \phi_B}{\partial t} \quad (3)$$

El primer término de la ecuación representa la circulación del campo eléctrico en una curva cerrada (también conocida como *fem inducida*) y el segundo término representa la variación del flujo magnético por la superficie delimitada por dicha curva.

En el Sistema Internacional de unidades (SI), el campo magnético se mide en Tesla (T), las distancias en metros (m) y la corriente en Amperios (A).

3.2 Campo magnético en un solenoide

En esta práctica estudiaremos el comportamiento del campo magnético en un solenoide. Un solenoide es un conductor enrollado en forma cilíndrica y se caracteriza por su largo l , su radio R , y la densidad lineal de espiras n (cantidad de vueltas N

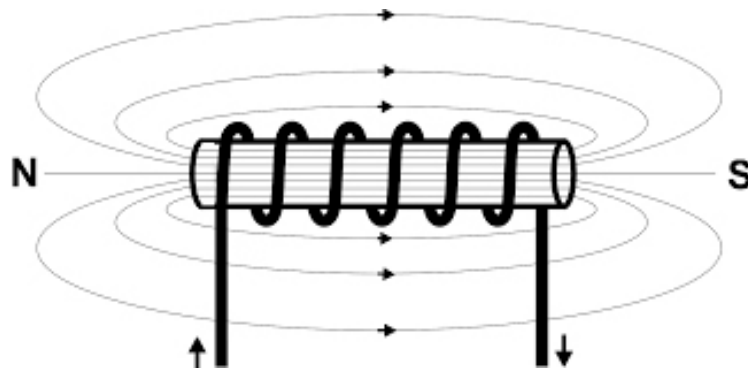


Figure 1: Líneas de campo asociadas al campo magnético generado por un solenoide.

del mismo sobre su longitud l , $n = N/l$). Cuando circula una corriente I por dicho conductor, se genera un campo magnético como se puede ver en la imagen 1.

Si asumimos que dicho solenoide es infinito (aproximación razonable si el solenoide es suficientemente largo y estamos trabajando cerca de la zona central del mismo), se puede considerar que el campo magnético inducido por el mismo es constante y paralelo a su eje.

Usando la ley de Ampere y la aproximación descrita anteriormente se demuestra que la intensidad del campo magnético en el interior de un solenoide puede expresarse como: $|\vec{B}| = \mu_0 n I$

En esta práctica estudiaremos el campo magnético generado por un solenoide y cómo varía el mismo cuando modificamos las variables n e I . Para esto contamos con un sensor de campo magnético que funciona mediante el efecto Hall que se explica en la sección 3.5.

3.3 Inductores (L)

Los inductores junto con las resistencias (R) y los capacitores (C) son el conjunto básico de componentes lineales que forman los circuitos eléctricos y por lo tanto su estudio es de gran importancia. A modo de ejemplo, los inductores toman un rol esencial en los circuitos para captar ondas electromagnéticas (como radio o TV).

Se denomina *inductor* a un componente de un circuito eléctrico que se caracteriza por tener una voltaje en bornes que depende linealmente de la derivada

de la corriente que pasa por él. La representación matemática de esto es:

$$V_L = L \cdot \frac{\partial I}{\partial t} \quad (4)$$

Donde el parámetro L que caracteriza eléctricamente a estos elementos se denomina inductancia y depende únicamente de la geometría del inductor. Para que esto sea posible es necesario considerar que el inductor está fabricado con un material que sea muy buen conductor, con resistencia despreciable o nula.

Aunque los inductores pueden fabricarse con las más diversas geometrías, la forma de solenoide o bobina es la más usada. Dicha geometría se caracteriza por su largo l , su área transversal A y el número de vueltas de la misma N .

Recordando que el voltaje se define como: $V = \int \vec{E} \cdot d\vec{s}$, y asumiendo que conoce los parámetros N , μ_0 , A y l de un solenoide se puede demostrar que: $L = \mu_0 l A n^2$

3.4 Bobina de Helmholtz

La bobina de Helmholtz^a es un dispositivo para producir un campo magnético aproximadamente uniforme. Consiste en dos bobinas puestas en el mismo eje, en las cuales circula una corriente eléctrica I en el mismo sentido, como se muestra en la Figura 2. Para construir la bobina de Helmholtz, se utilizan dos bobinas circulares de radio R idénticas, que se posicionan de manera simétrica a lo largo de un eje común. La separación en las bobinas es igual al radio R de las bobinas. Este tipo de instrumentos se utiliza, por ejemplo, para cancelar campos magnéticos externos, como el terrestre. En la Figura 3 se puede observar las líneas de campo magnético que se generan por el pasaje de corriente mencionado y la configuración de las propias bobinas.

Aplicando la ley de Biot-Savart es posible obtener la expresión del campo magnético sobre el eje de una de las dos bobinas:

$$B_1(x) = \frac{\mu_0 N I R^2}{2(R^2 + x^2)^{3/2}} \quad (5)$$

donde μ_0 es la permeabilidad del vacío, x la distancia al punto, I la corriente eléctrica que circula por la bobina, N la cantidad de vueltas de cada bobina y R el radio de la misma. Cada una de las bobinas que se usan en la práctica tienen 34 vueltas. Por como están dispuestas las bobinas se cumple que los campos magnéticos generados en cada punto x por cada una de ellas es igual. Por lo tanto se cumple que el campo magnético en el punto medio $x = R/2$ es igual a:

^aNombrada así en honor al físico alemán Hermann von Helmholtz.

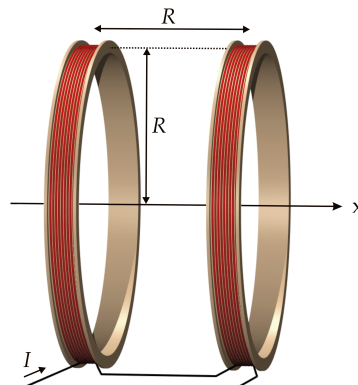


Figure 2: Bobinas de Helmholtz.

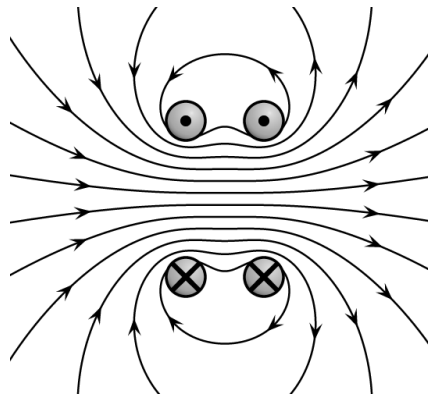


Figure 3: Líneas de campo magnético dentro de la bobina de Helmholtz

$$B(R/2) = 2B_1(R/2) = \left(\frac{8}{5\sqrt{5}}\right) \frac{\mu_o NI}{R} \quad (6)$$

Cuando las dos bobinas son alimentadas por corrientes con dirección opuesta, el valor del campo magnético entre las bobinas no es homogéneo, y es igual a cero en el centro.

3.5 Efecto Hall

El sensor que utilizaremos en esta práctica para medir el campo magnético basa su funcionamiento en el efecto Hall. Suponga que se tiene un conductor (de sección transversal $A = h \times l$, con h el ancho y l la altura) por el cual circula una corriente eléctrica i , que se encuentra inmerso en una región donde existe un campo magnético \vec{B} y las cargas (cuya magnitud es q), tienen una velocidad de arrastre \vec{v}_d . Consideremos aquí cargas positivas $+q$, pero el razonamiento para cargas negativas ($-q$) es análogo. Para simplificar el problema, supondremos la configuración de la

Figura 4. Las cargas se mueven con una velocidad \vec{v}_d según el eje x y el campo magnético \vec{B} se encuentra presente solo en el eje y (perpendicular al desplazamiento de la carga q).

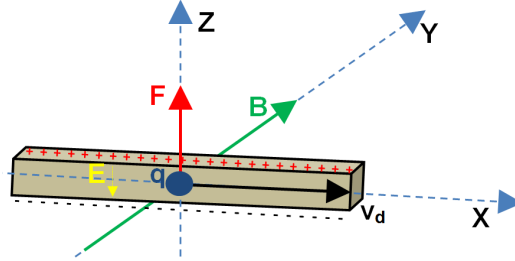


Figure 4: Fuerzas sobre portadores de carga positiva de un conductor en un campo magnético.

De acuerdo a la ley de Lorentz, las cargas en movimiento sufrirán el efecto de una fuerza $F = qv_d B$, con dirección en el eje z . Esto quiere decir que las cargas positivas serán acumuladas en el borde superior del conductor, mientras que las cargas negativas se acumularán en el borde inferior. De esta manera, se crea un campo eléctrico \vec{E} , en el eje z cuyo sentido se muestra en la Figura 4 y por lo tanto un potencial eléctrico.

Cuando se llega al equilibrio, el voltaje de Hall alcanza su máximo. Este equilibrio implica que la fuerza magnética lateral que cada carga sufra ($qv_d \wedge \vec{B}$) es igual a la fuerza eléctrica lateral ($q\vec{E}$). Expresando esto mediante la ley de Lorentz se obtiene que:

$$q\vec{E} + qv_d \wedge \vec{B} = 0 \Rightarrow \vec{E} = -v_d \wedge \vec{B} \quad (7)$$

Utilizando la geometría del problema, se llega entonces a que $E = v_d B$. Si se utilizan las variables j (densidad de corriente en el conductor) y n (densidad de portadores de carga), es posible expresar la velocidad de arrastre v_d como j/ne . Sustituyendo las ecuaciones que vinculan el campo eléctrico con el magnético y las definiciones de densidad de corriente, es posible expresar el voltaje de Hall como:

$$V = \frac{iB}{eln} \quad (8)$$

La ecuación anterior permite obtener el voltaje Hall a partir del valor del campo magnético o viceversa: obtener la magnitud del campo magnético a partir de la medición de una diferencia de potencial.

4 Realización de la experiencia

A continuación se encuentran algunas recomendaciones a seguir para la obtención y análisis de los datos experimentales. Debe prestarse especial atención a las consideraciones de seguridad así como las limitaciones del sensor de campo

magnético.

4.1 Procedimiento sugerido

Esta práctica tiene dos partes independientes: estudio del campo magnético en el interior de un solenoide (a) y del campo magnético generado por un sistema de bobinas de Helmholtz (b).

- a) En la primera parte se debe estudiar: el campo magnético a lo largo del eje del solenoide cuando circula una corriente constante, la dependencia del campo magnético con la corriente eléctrica y la dependencia del campo magnético con la densidad de espiras del solenoide.

Antes de empezar a realizar las medidas de cada parte, deben analizar y definir la forma más adecuada de armar el montaje experimental y de tomar las medidas. En el caso del estudio del campo magnético con la corriente, discutan cuántas medidas tomar, con la precaución de no superar 1 A de corriente. Para todo esto analicen que hipótesis acerca del solenoide se consideran en el desarrollo teórico y cuál es la forma más adecuada de poder abarcarlas en la experiencia.

Pregunta: Tomando como válida la ecuación 4 para un inductor puro (o ideal):

¿Por qué aparece un voltaje en bornes del solenoide real cuando la corriente es constante?

Para relevar la dependencia entre el campo \vec{B} y la relación de vueltas del solenoide n se recomienda fijar la corriente de la fuente en un valor cercano a 1A.

A partir de las medidas de B en función de I y de n se determinará el valor de la permeabilidad magnética del vacío (μ_0).

- b) Se medirá el valor del campo magnético entre las bobinas de Helmholtz (a lo largo del eje central) cuando la corriente que alimenta las dos bobinas tiene el mismo sentido.

Además se observará en forma cualitativa como varía el valor del campo cuando la corriente que alimenta las dos bobinas tiene sentido opuesto.

Todas las medidas de campo magnético realizadas serán afectadas por la presencia de un campo magnético residual ambiental (*offset*), debido al campo

terrestre y a instrumentos del laboratorio que pueden ser fuentes de campos magnéticos estáticos. Se recomienda medir el campo residual ambiental y restarlo a cada medida realizada con el solenoide y las bobinas de Helmholtz.

4.2 Sensor de campo magnético

A continuación se presentarán algunos elementos a considerar a efectos de trabajar con mayor precisión con el sensor de campo \vec{B} .

1. El sensor particular con el que se cuenta en el laboratorio, por funcionar mediante el efecto Hall, es solamente capaz de medir una componente del campo magnético. Por esto es importante que se preste especial atención a tenerlo siempre orientado de forma adecuada.
2. El sensor cuenta con dos escalas. En esta práctica se trabajará solo con la menor de ellas, que cubre el rango entre $-0.3mT$ y $0.3mT$.
3. Tener en cuenta que el campo magnético que mide el sensor es afectado por el campo magnético ambiental debido al campo terrestre y a otros factores externos.

5 Pauta para el análisis de los resultados y para la elaboración del informe

A continuación encontrarán una pauta general para el reporte de la práctica 1. Para esta entrega se pide un formato diferente al del informe tradicional que utilizamos en Física experimental 1, buscando que el énfasis del mismo esté en la parte del armado de la experiencia y la realización de las medidas, así como del análisis de resultados. Por lo tanto no se pedirá una sección específica de objetivos ni de fundamento teórico, sino una introducción donde se describa el objetivo de la experiencia, que leyes físicas, modelo físico, hipótesis están involucradas. Este formato se acerca más a lo que es una publicación en una revista científica.

- **Formato general - 1 punto.** Incluye organización, contenido general del reporte, redacción y ortografía.
- **Introducción - 1 punto.** Se describen brevemente los objetivos. Deben explicarse únicamente los conceptos y ecuaciones más importantes que sean necesarias para el desarrollo de la práctica.
- **Metodología - 2 puntos.** Bien explicada, con esquema del dispositivo (pueden colocar fotos si aporta información relevante) y consideraciones a tener en cuenta durante la práctica. Es importante relacionar con las hipótesis del modelo teórico, así como dar los detalles importantes relativos a como se debe armar el dispositivo y tomar las medidas para cumplir con estas hipótesis.

Explicar específicamente como se toman las medidas de campo magnético para tener en cuenta el campo terrestre y ambiental, discutiendo sobre los factores que lo determinan y además explicar como se obtiene un valor representativo de la incertidumbre del campo magnético para cada medida.

- **Análisis de datos A - Campo en el eje del solenoide - 1 punto.** Presentar la gráfica de los datos experimentales del sondeo del campo en el eje del solenoide con sus barras de incertidumbre junto con el modelo teórico. Analizar los resultados obtenidos.
- **Análisis de datos B - Solenoide, calculo de μ_0 - 3 puntos.** Presentar las graficas de las medidas de B en función de I y de n con la curva resultado del ajuste. Presentar el valor de μ_0 obtenido por mínimos cuadrados para cada caso junto a su incertidumbre . Discutir los resultados y compararlos con los valores esperados.
- **Analisis de datos C - Bobinas de Hemholtz - 1 punto.** Presentar la gráfica del relevamiento de B en el eje de las bobinas de Helmholtz en cualquiera de sus configuraciones (circulando la misma corriente en las dos bobinas o circulando corrientes opuestas). Discutir de los datos eperimentales y compararlos con lo esperado.
- **Conclusiones - 1 punto.** Detalladas y explicadas, ligadas a los objetivos de la práctica y vinculando con el modelo y las hipótesis realizadas. Analizar posibles causas de diferencias con los valores o resultados esperados. ¿Cómo influye el hecho de que el solenoide no sea ideal (espaciamiento de espiras no homogéneo, largo finito, otros)?
- Anexo con las tablas con los datos experimentales relevados, incluyendo sus incertidumbres y unidades.

6 Anexo: Tablas de datos

Se proporciona una de las tablas a modo orientativo (ver Tabla 1). Podrán realizar mas o menos medidas de las que se encuentran en la tabla y esa decisión forma parte de los aspectos experimentales que deberán discutir. De igual forma, deberán discutir para las otras medidas que magnitudes son las relevantes en cada caso para registrar en una tabla. Tabla 1: Campo magnético en función de la corriente

B(mT)	δB (mT)	I(A)	δI (A)	B(offset)(mT)