

PRÁCTICA NÚMERO 9: Magnetismo

Integrantes

Atayde Aranda Aldo

Basile Álvarez Tomás Ricardo

Gallegos Salgado Jessica Andrea

Velázquez Martínez Jonathan Israel

Resumen

En esta práctica se abordará la Ley de Biot Savart, con la cual se calcula el campo magnético generado por una corriente eléctrica, que expresada matemáticamente, nos da el valor del campo magnético en términos de la corriente. Utilizaremos esto para comparar experimentalmente la exactitud matemática de una configuración particular, observando la intensidad del campo mientras la distancia varía.

También se probará la Ley de Curie, mostrando que al elevarse la temperatura, ciertos materiales pierden sus propiedades magnéticas.

Introducción

- **Ley de Biot y Savart**

Poco después de que en 1819 Oersted descubriera que la aguja de una brújula se desvía por la presencia de un conductor que lleva corriente, Jean-Baptiste Biot y Félix Savart realizaron experimentos cuantitativos en relación con la fuerza ejercida por una corriente eléctrica sobre un imán cercano. De sus resultados experimentales, Biot y Savart llegaron a una expresión matemática que da el valor del campo magnético en algún punto del espacio, en función de la corriente que dicho campo produce. Esta expresión se basa en las siguientes observaciones experimentales para el campo magnético \vec{dB} en un punto P asociado con un elemento de longitud ds de un alambre por el que pasa una corriente estable I .

1. El vector \vec{dB} es perpendicular tanto a ds (que apunta en la dirección de la corriente) como al vector unitario \hat{r} , dirigido desde ds hacia P.
2. La magnitud de \vec{dB} es inversamente proporcional a r^2 donde r es la distancia de ds a P.
3. La magnitud de \vec{dB} es proporcional a la corriente y a la magnitud del elemento de longitud ds .

4. La magnitud de dB es proporcional a $\sin u$, donde u es el ángulo entre los vectores ds y \hat{r} .

Estas observaciones se resumen en la expresión matemática conocida hoy en día como la ley de Biot-Savart.

$$dB = \frac{\mu_0 I ds \times \hat{r}}{4\pi r^2}$$

Donde μ_0 es una constante llamada permeabilidad del espacio libre:

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m/A} \quad [1]$$

• Campo magnético de un imán permanente

Un imán permanente es un objeto capaz de mantener el estado de magnetización durante un largo período de tiempo. El producto está hecho de ferromagnetos, que pueden consistir en hierro, acero, hierro fundido, níquel, cobalto, aleaciones individuales de metales de tierras raras. Existen minerales naturales (magnetitas), que también se utilizan como materia prima para la producción de imanes permanentes. Los productos pueden tener diferentes formas. [2]

Para calcular el campo magnético producido por un imán a lo largo de su eje, consideraremos la equivalencia existente entre corrientes e imanes. Sea un imán cilíndrico de radio a y longitud L . Si el momento magnético del imán es μ , la corriente equivalente I_{eq} que produce este momento magnético es $I_{eq} = \frac{\mu}{\pi a^2 L}$

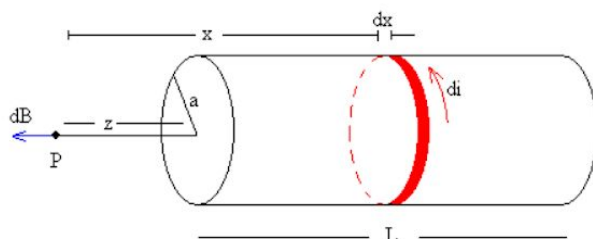


Imagen 1.

Para calcular el campo que produce el cilindro a distancia z , lo partimos en muchos anillos de grosor dx y por lo tanto la corriente que circula en cada uno es

$$di = \frac{I_{eq}}{L} dx = \frac{\mu}{\pi a^2 L} dx$$

Cada anillo genera un campo $dB = \frac{\mu_0 i a^2}{2(a^2 + x^2)^{3/2}} = \frac{\mu_0 \mu}{2\pi L (a^2 + x^2)^{3/2}}$ con x la distancia al anillo.

Ahora bien, si aproximamos $x \gg a$ entonces nos queda que $dB = \frac{\mu_0 \mu}{2\pi L x^3}$

Integramos este campo de anillos desde una distancia z hasta $z+L$ y nos queda

$B = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi L} \left[\frac{1}{z^2} - \frac{1}{(z+L)^2} \right]$ y si aproximamos que $z \gg L$ nos queda finalmente que

$$B = \frac{\mu_0 \mu}{2\pi z^3}$$

Es decir, la intensidad del campo magnético producido por un potente imán es inversamente proporcional al cubo de la distancia desde el imán al sensor. [3]

- **Ley de Curie**

En un material paramagnético, la ley de Curie establece que la magnetización del material es directamente proporcional al campo magnético aplicado e inversamente proporcional a la temperatura.

Agregando la constante de proporcionalidad, se obtiene la siguiente ecuación:

$$M = C \cdot \frac{B}{T}$$

M es la magnetización resultante.

B es la inducción magnética, medido en teslas.

T es la temperatura absoluta, en kelvin.

C es la constante específica del material (constante de Curie).

La ley indica que los materiales paramagnéticos tienden a volverse cada vez más magnéticos al aumentar el campo aplicado, y cada vez menos magnéticos al elevarse la temperatura.

La relación fue descubierta experimentalmente por Pierre Curie en 1896. Sin embargo, la Ley sólo es aplicable a temperaturas elevadas o campos magnéticos débiles, ya que falla en la descripción del fenómeno cuando los momentos magnéticos se hallan alineados; es decir, cuando nos acercamos a la saturación magnética. En este punto, la respuesta del campo magnético al campo aplicado deja de ser lineal. Llegado al punto de saturación, la magnetización es la máxima posible y no crece más, independientemente de que se aumente el campo magnético o se reduzca la temperatura. [4]

Se denomina **temperatura de Curie** (en ocasiones punto de Curie) a la temperatura por encima de la cual un cuerpo ferromagnético pierde su magnetismo, comportándose como un material puramente paramagnético. En el hierro ocurre a 770°, en el Níquel a 360°, por lo que el Níquel tiene una baja temperatura de Curie. [5]

Esta temperatura característica lleva el nombre del físico francés Pierre Curie, que la descubrió en 1895.

Pierre Curie descubrió, junto a su hermano Jacques, el efecto piezoeléctrico en cristales, estableciendo que la susceptibilidad magnética de las sustancias paramagnéticas depende del inverso de la temperatura, es decir, que las propiedades magnéticas cambian en función de la temperatura. En todos los ferromagnetos encontró un descenso de la magnetización hasta que la temperatura llegaba a un valor crítico, llamada temperatura de Curie (T_c), donde la magnetización se hace igual a cero; por encima de la temperatura de Curie, los ferromagnetos se comportan como sustancias paramagnéticas. [6]

Hipótesis

Campo magnético de un imán permanente

Esperamos que la intensidad de campo magnético medida, disminuya en $1/z^3$ cuando la distancia (z) aumente. Obteniendo un comportamiento asintótico y convergente a 0.

Péndulo de Curie

Esperamos que la magnetización de la moneda, dependa directamente de la temperatura alcanzada por la vela. Si la vela alcanza una temperatura mayor a la temperatura de Curie, la magnetización desaparecerá, haciendo que la moneda se despreque del tornillo. Si la vela alcanza una temperatura menor a la temperatura de Curie, la moneda permanecerá pegada al tornillo.

Objetivos

Analizar el comportamiento del campo magnético de un imán permanente al medir la magnitud del campo a diferentes distancias.

Construir un péndulo de Curie sencillo y observar su comportamiento para verificar la ley de Curie.

Materiales

Campo magnético de un imán permanente:

Gaussímetro

Regla

Imán de neodimio

Hoja cuadriculada

Péndulo de Curie:

Moneda con un alto contenido de Níquel (en este caso una moneda de ½ franco)

Alambre grueso de aluminio

Alambre de cobre

Vela

Base de madera

Tornillo

Imán permanente

Procedimiento experimental

Campo magnético de un imán permanente

1. Colocar una hoja cuadriculada. Fijar el imán de tal forma que se pueda medir el campo magnético B con el Gaussímetro en diferentes puntos.
2. Medir con la regla diferentes distancias z (5, 6, 7, 8, 9, 10 y 11 cm) y marcarlas en la hoja.

NOTA: El sensor debe estar lo suficientemente alejado de imán (aprox. 5 cm), pero no tanto ya que si se mide B muy lejos de él podríamos estar midiendo el campo magnético terrestre.

3. Con la ayuda del Gaussímetro determinar el campo magnético del imán en cada una de las distancias z del punto anterior. Se debe de tener cuidado especial de que al medir con el Gaussímetro se encuentre a la misma altura de la hoja en todos los puntos.
4. Graficar el campo B vs la distancia z .
5. Linealizar la gráfica para determinar su comportamiento.

Péndulo de Curie:

1. Usar el alambre grueso para formar un soporte del cual colgará el péndulo.
2. Amarrar un lado del alambre de cobre en el soporte y del otro lado amarrar la moneda.
3. Pegar el tornillo al imán y adherirlo a la base de madera, de tal forma que la punta del tornillo esté a la altura de la moneda.
4. Colocar la vela por debajo de la moneda.
5. Dejar que la moneda se pegue al tornillo por la atracción magnética y luego prender la vela. Esperar hasta que se alcance la temperatura de Curie y observar cómo se separa la moneda del tornillo.



Imagen 2: Montaje experimental Péndulo de Curie

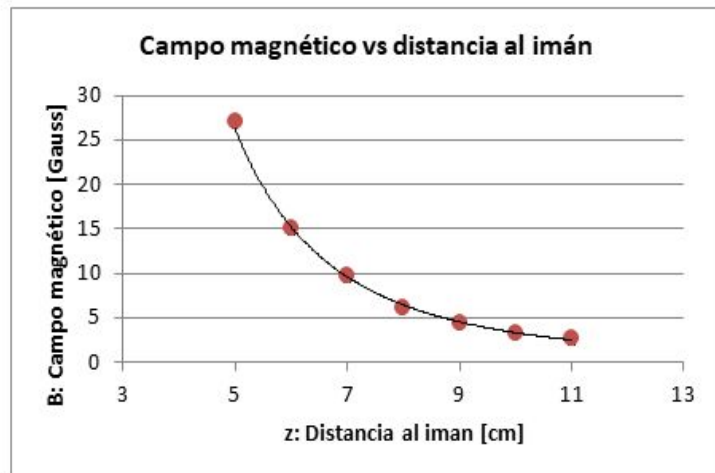
Resultados y análisis

Campo magnético de un imán permanente

Siguiendo el procedimiento mencionado, obtenemos la siguiente tabla y gráfica con el valor del campo magnético B medido con el gaussímetro como función de la distancia z al imán.

z: Distancia al imán [cm]	B: Campo magnético [Gauss]
5	27
6	15
7	9.7
8	6.2
9	4.4
10	3.3
11	2.6

Tabla 1: B vs z



Gráfica 1: B vs z

Notamos que esta gráfica no corresponde a un comportamiento lineal, así que lo aproximamos con una función potencial:

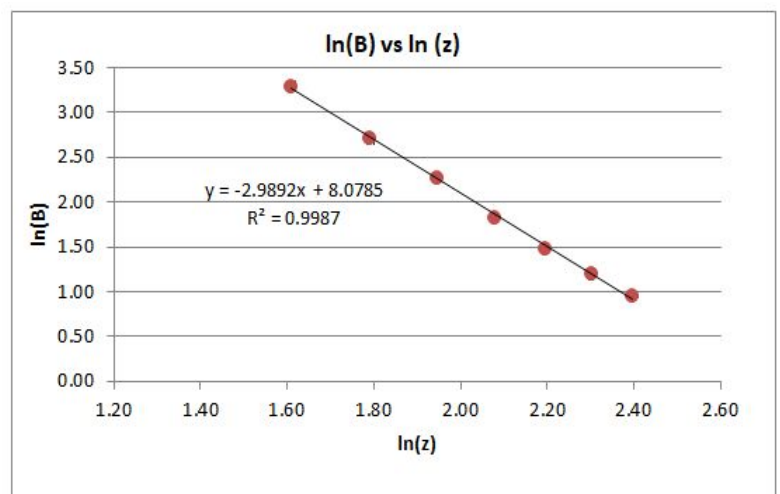
$$B = az^n$$

Entonces linealizamos los datos obteniendo el logaritmo natural de ambos lados de la ecuación, para obtener: $\ln(B) = \ln(a) + n \ln(z)$ (1)

En la siguiente tabla y gráfica mostramos los datos de $\ln(B)$ vs $\ln(z)$ los cuales ya tienen un comportamiento lineal.

$\ln(z)$	$\ln(B)$
1.609	3.296
1.792	2.708
1.946	2.272
2.079	1.825
2.197	1.482
2.303	1.194
2.398	0.956

Tabla 2: $\ln(B)$ vs $\ln(z)$



Gráfica 2: $\ln(B)$ vs $\ln(z)$

Usando el método de mínimos cuadrados, obtenemos la siguiente relación:

$$\ln(B) = -2.989 * \ln(z) + 8.078$$

Con un coeficiente de determinación $R^2 = 0.998$.

Al compararlo con la ecuación 1 obtenemos que $n = -2.989$ y que $a = 3224$

Entonces la ecuación que describe la relación entre B y z es:

$$B = 3224 z^{-2.989}$$

Con esto observamos que la magnitud del campo magnético disminuye con el cubo de la distancia.

Péndulo de Curie

Como se aprecia en las siguientes imágenes, pudimos construir un péndulo de Curie funcional.



Imágenes 3 y 4: Resultados del péndulo de Curie

La moneda de níquel se acerca al tornillo (pegado a un imán) por la atracción magnética. Posteriormente la vela calienta a la moneda hasta que llega a una temperatura lo suficientemente alta como para rebasar la temperatura de Curie, por lo que pierde sus propiedades magnéticas y por tanto se separa del tornillo. Una vez separada del tornillo y por tanto alejada de la flama, la moneda se enfría y su temperatura vuelve a estar por debajo de la temperatura de Curie. Entonces vuelve a sentir la atracción magnética del imán y se pega al tornillo, repitiendo así el proceso.

En nuestro experimento, cada una de estas oscilaciones del péndulo de Curie tomaba alrededor de 40 segundos en completarse y observamos 20 repeticiones hasta que detuvimos el experimento.

Observaciones y Conclusiones

Campo magnético de un imán permanente

Como se muestra en los resultados, concluimos que la magnitud del campo magnético del imán disminuye con el cubo de la distancia al imán. Esto se explica según el desarrollo matemático realizado en el marco teórico.

Además, es de esperar que el campo magnético de un imán siga una relación inversa con el cubo de la distancia en vez de con el cuadrado como sucede con el campo eléctrico de una carga eléctrica. Esto debido a que por la ley de Gauss magnética, los imanes sólo pueden existir en forma de dipolos y no existen monopolos magnéticos. Por esto, el campo magnético de un imán es comparable con el campo eléctrico de un dipolo eléctrico (que disminuye con el cubo de la distancia) y no con el de una carga puntual.

Además, el resultado obtenido para el exponente de z en la relación del campo magnético con la distancia es notablemente cercano al valor de -3 esperado. De hecho el error porcentual entre el exponente obtenido como resultado y el valor esperado es:

$$Error\ porcentual = \frac{|Valor\ esperado - valor\ medido|}{|Valor\ esperado|} * 100 = \frac{0.011}{3} * 100 = 0.36 \%$$

Por lo que concluimos que los resultados obtenidos son muy cercanos a los valores teóricos. Sin embargo, es importante destacar que la relación del campo magnético con el inverso del cubo de la distancia es sólo válido para un cierto intervalo de distancias. La distancia tiene que ser lo suficientemente grande como para que sean válidas las aproximaciones matemáticas realizadas en el marco teórico pero tampoco puede ser demasiado grande para así tener la certeza de que se está midiendo el campo del imán y no el campo magnético terrestre.

Péndulo de Curie

Intentamos realizar el experimento con varias monedas distintas, pero notamos que se quedaban pegadas y no se alcanzaba la temperatura suficiente como para eliminar sus propiedades magnéticas. Esto debido a que los materiales que componen estas monedas tenían una temperatura de Curie muy alta. Finalmente, se consiguió el resultado esperado con una moneda de ½ franco, seguramente porque tiene una composición alta de Níquel, el cual tiene una temperatura de Curie baja.

El péndulo construido funciona tal como se esperaría según lo descrito en el marco teórico. El péndulo de Curie es un artefacto muy útil para observar directamente el cambio en las propiedades magnéticas que sufre un material magnético al superar la temperatura de Curie. Además, en el péndulo de Curie es posible observar cómo este cambio generalmente es reversible y por esto se repiten las oscilaciones de la moneda tantas veces como se quiera.

Bibliografía

[1] Serway, R. & Jewett, J. (2009). *Física para ciencias e ingeniería con Física moderna*, Vol. 2 (7° ed.). México: Cengage Learning.

[2] Imanes permanentes. (s.f.). Recuperado 20 mayo, 2020 de <https://eurobalt.net/es/blog/2019/04/16/permanent-magnet/>

[3] Campo magnético producido por un imán. (s.f.). Recuperado 20 mayo, 2020 de <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica3/magnetico/iman/iman.html>

[4] Ley de Curie. (s.f.). Recuperado 21 mayo, 2020 de https://es.wikipedia.org/wiki/Ley_de_Curie

[5] Temperatura de Curie (s.f.). Recuperado 21 mayo, 2020 de https://www.ecured.cu/Temperatura_de_curie

[6] Temperatura de Curie (s.f.). Recuperado 21 mayo, 2020 de https://es.wikipedia.org/wiki/Temperatura_de_Curie