

Determinación y comparación de la permeabilidad del aire entre un solenoide comercial y otro elaborado en el laboratorio

Alfaro Fuentes Ricardo^{1*}, Arévalo López Eugenia Paola², Cosío Castañeda Carlos¹

¹Facultad de Química. Av. Universidad 3000, Col. Universidad Nacional Autónoma de México. C. U. Delegación Coyoacán, Ciudad de México C.P. 04510. México.

²Facultad de Ciencias. Av. Universidad 3000, Col. Universidad Nacional Autónoma de México. C. U. Delegación Coyoacán, Ciudad de México C.P. 04510. México.

*Autor para correspondencia: ralfarof@quimica.unam.mx

ORCID[®]: 0000-0002-8659-9995

Recibido:

07/mayo/2023

Aceptado:

30/noviembre/2023

Palabras clave:

Campo magnético,
solenoid,
permeabilidad magnética

Keywords:

Magnetic field,
solenoid,
magnetic permeability

RESUMEN

Un solenoide debido a su forma helicoidal produce líneas de campo magnético homogéneas y paralelas al eje de simetría. En el presente trabajo se mostrará la dependencia de la magnitud del campo magnético con la intensidad de corriente eléctrica empleando un solenoide comercial y un solenoide elaborado en el laboratorio con la finalidad de compararlos. Experimentalmente se empleó un sensor de campo magnético, un amperímetro y una fuente electromotriz. Debido a que los datos obtenidos muestran una tendencia lineal, se aplicó el método de cuadrados mínimos para determinar la pendiente y en conjunto con la ecuación del fenómeno, determinar el valor de la permeabilidad magnética del aire. Al comparar Los resultados obtenidos, $5.83 \times 10^{-3} \frac{Tm}{A}$ para el solenoide comercial y $1.26 \times 10^{-6} \frac{Tm}{A}$ para el fabricado en el laboratorio, con el valor de referencia $(1.26 \times 10^{-6} \frac{Tm}{A})$, podemos observar que el solenoide fabricado en el laboratorio es el mejor dispositivo para obtener la permeabilidad, debido a que este solenoide contiene un solo devanado mientras que el solenoide comercial, el valor obtenido se aleja del valor de referencia, debido a la presencia de más de un devanado.

ABSTRACT

A solenoid due to its helical shape produces homogeneous magnetic field lines parallel to axis of symmetry. The present work we will show the dependence of magnetic field magnitude with the electric current intensity using a commercial solenoid and other developed in the laboratory to compare them. Experimentally a magnetic field sensor, ammeter and electromotive source were used. Data obtained show a linear trend, the method of least squares was applied to determine the slope and in conjunction with phenomenon equation, determine value of magnetic permeability of air. Comparing results obtained, $5.83 \times 10^{-3} \frac{Tm}{A}$ for commercial solenoid and $1.26 \times 10^{-6} \frac{Tm}{A}$ for laboratory-manufactured, with reference value $(1.26 \times 10^{-6} \frac{Tm}{A})$, we can observe that the solenoid manufactured in the laboratory is the best device to obtain permeability, because this solenoid contains a single winding while the commercial solenoid, the value obtained departs from the reference value, due to the presence of more than one winding.

Introducción

En la impartición de los cursos referentes al quehacer científico, uno de los elementos más importantes para la comprensión plena de los conocimientos son las asignaturas experimentales, ya sea con el desarrollo de protocolos experimentales como parte de sus laboratorios o con la presentación de cátedras. En el caso específico de la impartición de los conceptos referentes al campo magnético, los experimentos que involucran bobinas, toroides y/o solenoides requieren del transporte de cargas eléctricas a través del alambre que lo constituye (Sears et al, 2005). Por lo general, la magnitud de los campos magnéticos, $\vec{B}$, dentro de estos instrumentos es elevado debido al principio de superposición, que nos indica que el campo neto de un sistema es la suma de los campos individuales (Serway y Jewett, 2015). Los solenoides consisten en un arreglo helicoidal con un gran número de vueltas que ocasiona que la longitud sea mucho mayor en comparación con su diámetro, con lo cual, las líneas de campo magnético que se generan dentro del solenoide son paralelas al eje de simetría y el campo es perfectamente uniforme (Alonso y Finn, 1995). En su conjunto, las líneas de campo magnético presentan una trayectoria cerrada lo cual permite emplear la ley de Ampère (Ohanian y Markert, 2009) para evaluar el comportamiento del campo magnético como una función de la intensidad de corriente eléctrica que fluye por el dispositivo. Adicionalmente, en la ley de Ampère, aparece la correlación entre parámetros como la constante de permeabilidad magnética (μ_0), el número de vueltas que contenga el solenoide (N), y la longitud del solenoide (l), Ecuación 1.

$$|\vec{B}| = \frac{\mu_0 N}{l} I$$

Ecuación 1. Magnitud del campo magnético, $|\vec{B}|$, generado en el interior de un solenoide por el que fluye una intensidad de corriente eléctrica I .

Como se muestra en la Ecuación 1, la magnitud del campo magnético en el interior de un solenoide es linealmente dependiente del número de vueltas y la intensidad de corriente eléctrica pero inversamente dependiente a la longitud. La constante de proporcionalidad, denominada permeabilidad magnética del medio o del material, es un indicativo de qué tan bien es conducido el flujo magnético en el medio o en el material. En el caso de que el medio sea el vacío o aire, el valor de dicha constante es $\mu_0 = 1.26 \times 10^{-6} \frac{Tm}{A}$.

En este trabajo se mostrará experimentalmente como el incremento de la magnitud del campo magnético es proporcional a la intensidad de corriente eléctrica, tanto

para un solenoide comercial como en uno construido en el laboratorio; sin embargo, para la determinación experimental del valor de la permeabilidad magnética del aire, mostraremos que el solenoide comercial no es el equipo más adecuado ya que, por lo general, son aditamentos que constan de varios devanados, mientras que con el solenoide fabricado en el laboratorio, que consta de un solo devanado, permite determinar el valor de la permeabilidad magnética del aire. En el caso del solenoide fabricado en el laboratorio se obtuvo un valor para la permitividad magnética del aire de $1.26 \times 10^{-6} \frac{Tm}{A}$ con una incertidumbre de $9.20 \times 10^{-9} \frac{Tm}{A}$, lo cual refiere a tener una elevada precisión y exactitud si se compara con el valor de referencia ($1.26 \times 10^{-6} \frac{Tm}{A}$) mientras que con el solenoide comercial se obtuvo un valor de $5.83 \times 10^{-3} \frac{Tm}{A}$, que se aleja bastante del valor de referencia.

Metodología

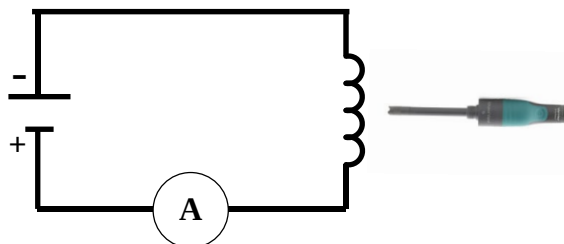
Construcción del solenoide

Para la construcción del solenoide se requirió un tubo de PVC de 1.5 pulgadas de diámetro. Entorno al tubo, se enrolló de manera compacta alambre de cobre esmaltado de calibre 18, asegurando un solo devanado, los extremos del alambre se fijaron al mismo tubo de PVC. El solenoide se colocó en una base de madera y se conectaron bornes en las puntas del alambre para asegurarse que la corriente eléctrica fluya sin riesgo de ruptura en el alambre de cobre.

Evaluación del incremento del campo magnético usando un solenoide comercial

El experimento consta de un circuito en serie empleando una fuente electromotriz, un solenoide y un multimetro para registrar la intensidad de corriente que se aplica. En el Esquema 1 se puede observar la representación de dicho circuito. Para medir la magnitud del campo magnético generado en el interior del solenoide, se debe de colocar en el centro del dispositivo generador de campo, sin hacer contacto con las paredes, un sensor de campo magnético "Go Direct" (marca Vernier), el cual se conecta a una computadora que contenga el software "Vernier Graphical Analysis" el cual es un programa de acceso libre en el "Homepage" del fabricante. Una vez impuesta una intensidad de corriente eléctrica, se colectan alrededor de once lecturas de campo magnético en un lapso de cinco segundos, esta relación de datos se colecta por configuración del programa. Para observar el incremento del campo magnético, se impusieron ocho diferentes intensidades de corriente eléctrica y se registraron las correspondientes lecturas de campo magnético.

Es importante hacer notar que, para una mejor determinación de la permeabilidad magnética del aire, se debe utilizar el máximo intervalo de intensidades de corriente que genere la fuente electromotriz.



Esquema 1. Diseño experimental para medir la intensidad de corriente eléctrica y el campo magnético dentro de un solenoide.

Evaluación del campo magnético con el solenoide de un devanado

Se montó el mismo circuito del apartado anterior, cambiando el solenoide comercial por el solenoide fabricado en el laboratorio y se procedió de forma análoga al experimento anterior.

Resultados y discusión

Características del solenoide fabricado

Para la determinación de la permeabilidad magnética del aire se requiere tanto del número de vueltas que conforman el solenoide como de la longitud del dispositivo, por lo que se procedió a contar el número de vueltas que contiene el dispositivo fabricado, el valor obtenido fue de 116 vueltas. Para estimar la mejor longitud se midieron seis veces el largo, se obtuvo el promedio y su incertidumbre combinada, obteniendo (16.8 ± 0.1) cm. La información detallada, se puede observar en la Tabla 1.

Tabla 1. Medidas de longitud, incertidumbre y número de vueltas del solenoide fabricado.

Medida	longitud (cm)
1	16.8
2	16.7
3	16.9
4	16.8
5	16.9
6	16.8
Promedio	16.8
Desv	0.08
u(A)	0.03
u(B)	0.10
u(C)	0.1
N=116 vueltas	

Evaluación del incremento del campo magnético y determinación de la permeabilidad magnética del aire con un solenoide comercial

Para el experimento realizado se empleó un solenoide comercial con 110 vueltas y longitud de (15.1 ± 0.1) cm, el dispositivo no presenta indicaciones más detalladas por el fabricante. Los resultados obtenidos con este solenoide se presentan en la Tabla 2, en donde se presentan los valores promedios de la magnitud del campo magnético, así como de la intensidad de corriente eléctrica.

La Figura 1 muestra que el comportamiento de la magnitud del campo magnético en el interior del solenoide sigue una tendencia lineal consistente con la Ecuación 1 en donde se aprecia que tanto $\vec{B}$ como I son directamente proporcionales.

Para encontrar la correlación entre las variables se empleó el método de cuadrados mínimos para obtener el valor de la pendiente (m) y su incertidumbre (S_m).

Una vez determinado el valor de la pendiente se plantea su equivalencia con el modelo matemático de la Ecuación 1 para obtener la Ecuación 2 en donde se plantea que la pendiente es igual al producto de la permeabilidad por el número de vueltas del solenoide entre la longitud del mismo; con lo cual si se despeja resulta en la Ecuación 3 de donde se obtiene el valor de la permeabilidad magnética del aire. Los resultados obtenidos para cada solenoide se pueden ver en la Tabla 3. En este caso el valor de incertidumbre se calculó por medio de la ley de propagación de la incertidumbre.

El valor de permeabilidad magnética del aire calculado empleando un solenoide comercial es $(5.83 \pm 0.06) \times 10^{-3} \frac{Tm}{A}$, el cual está muy alejado del valor de referencia $1.26 \times 10^{-6} \frac{Tm}{A}$ y la razón más probable de esta discrepancia es que el solenoide comercial presente dos o tres devanados, por lo que el modelo matemático que se planteó en la introducción no corresponde.

$$m = \frac{\mu * N}{l}$$

Ecuación 2. Formula que muestra la correlación de los modelos (teórico y matemático) para obtener el valor de la permeabilidad.

Tabla 2. Medidas de intensidad de corriente eléctrica y campomagnético con su incertidumbre empleando un solenoide comercial.

I(A)	B(mT)	Incertidumbre de B (mT)
0.1	0.508739	0.000111
0.2	0.951566	0.000253
0.3	1.381780	0.000299
0.4	1.797866	0.000822
0.5	2.211239	0.000321
0.6	2.627503	0.000402
0.7	3.050039	0.000432
0.8	3.436330	0.000497

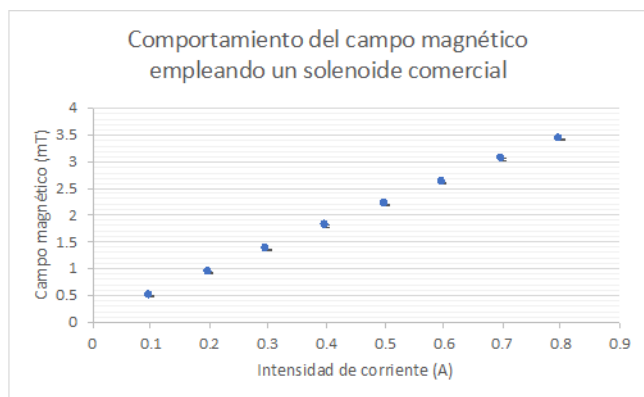


Figura 1. Incremento de la magnitud del campo magnético en el interior del solenoide comercial, las barras de incertidumbre son muy pequeñas para ser apreciadas.

Tabla 3. Determinación de m y b, así como la permeabilidad magnética del aire con su incertidumbre, empleando un solenoide comercial.

Variable	Magnitud
m	4.2584
b	0.0705
Incert. (m)	0.0329
Incert. (b)	0.0157
μ	0.0058328
Incert. (μ)	0.0000599

$$\mu = \frac{m * l}{N}$$

Ecuación 3. Formula con la cual se obtiene el valor de la permeabilidad.

Determinación de la permeabilidad magnética del aire empleando el solenoide con un devanado

Siguiendo el mismo procedimiento que con el solenoide comercial, se midieron para diferentes intensidades de corriente eléctrica la magnitud del campo magnético en el interior del solenoide construido con un solo devanado y los resultados de este experimento se resumen en la Tabla 4. Al igual que en el apartado anterior el incremento de la magnitud del campo magnético muestra una tendencia lineal respecto al incremento de la intensidad de corriente eléctrica, Figura 2. Los valores de pendiente con incertidumbre, así como el valor de la permeabilidad magnética del aire se presentan en la Tabla 5. Para este experimento el valor obtenido de la permeabilidad magnética del aire, valor ya redondeado al número de cifras significativas y usando las reglas de redondeo, es $1.26 \times 10^{-6} \frac{Tm}{A}$ con incertidumbre de $9.20 \times 10^{-9} \frac{Tm}{A}$. Como se puede observar el uso de un solenoide con solo un devanado da el mismo valor que la referencia y además de tener una elevada exactitud vemos que la medida obtenida es mucho muy precisa al tener una incertidumbre de dos órdenes de magnitud más pequeña.

Tabla 4. Medidas de intensidad de corriente eléctrica y campo magnético empleando un solenoide de un solo devanado.

I(A)	B(mT)	Incertidumbre de B (mT)
0.10	0.08965282	0.00012528
0.40	0.35290281	0.00101144
0.70	0.61864829	0.00059539
1.00	0.87859832	0.00044151
1.30	1.14888465	0.00052331
1.70	1.49613465	0.00039314
2.10	1.83876182	0.00030575
2.40	2.09002547	0.00042354
2.70	2.34018454	0.00055574

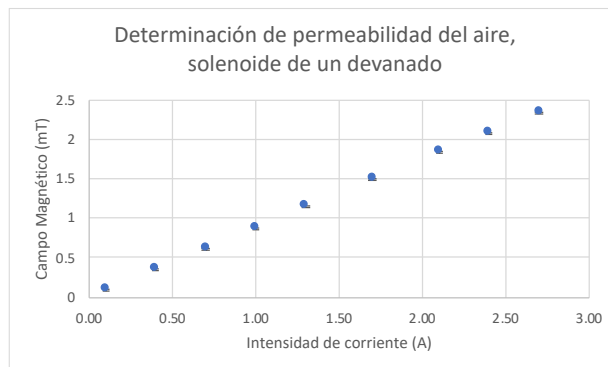


Figura 2. Comportamiento de la magnitud del campo magnético en el interior del solenoide con un solo devanado, las barras de incertidumbre son muy pequeñas para ser apreciadas.

Tabla 5. Determinación de m, b y la permeabilidad magnética del aire, con sus respectivas incertidumbres, empleando un solenoide de un devanado.

Variable	Magnitud
m	0.86774
b	0.01042
Incert. (m)	0.00334
Incert. (b)	0.00542
μ	1.2580×10^{-6}
Incert. (μ)	9.2037×10^{-9}

Conclusiones

Los resultados obtenidos muestran que ambos solenoides describen que conforme aumenta la corriente eléctrica se produce un incremento en la magnitud del campo magnético al interior del solenoide, lo que genera un comportamiento de tendencia lineal, que es consistente con el modelo del fenómeno, evidenciándose que el campo magnético y la intensidad son variables proporcionales.

Adicionalmente, dada la tendencia lineal observada, se empleó el método de cuadrados mínimos para encontrar la correlación entre las variables, y determinar el valor de la permeabilidad magnética del aire.

En el caso del uso del solenoide fabricado en el laboratorio el valor obtenido fue de $1.26 \times 10^{-6} \frac{Tm}{A}$ con una incertidumbre de $9.20 \times 10^{-9} \frac{Tm}{A}$, que al compararlo con el valor de referencia se observa que es el mismo valor y dado que se tiene una incertidumbre con tres órdenes de magnitud más pequeña que la medida, se puede determinar que este solenoide con un solo devanado proporciona un valor preciso y exacto; mientras que en el caso del solenoide comercial no es un instrumento adecuado ya que el valor obtenido de $(5.83 \pm 0.06) \times 10^{-3} \frac{Tm}{A}$ se aleja también en tres órdenes de magnitud al valor de referencia, por lo que no es adecuado para este tipo de experimentos y que esto se debe a que tiene más de un devanado

Agradecimientos

A los proyectos DGAPA-UNAM IA103293 y PE101723.

Referencias

- Alonso, M., Finn, E. J. (1995), Física, editorial Addison Wesley Iberoamericana.
- Ohanian, H. C., Markert, J. T. (2009), Física para ingeniería y ciencias. Vol. 2, edición 3, editorial McGraw Hill.
- Sears, F. W., Zemansky, M. W., Young, H. D., Freedman, R. A. (2005), Física universitaria, vol. 2, edición 11, editorial Pearson.
- Serway, R. A., Jewett, J. W. (2015), Física para ciencias e ingeniería, vol. 2, edición 9, editorial Cengage.