

Gaussímetro con movimiento automático para la evaluación de la densidad del flujo magnético en imanes permanentes

Gaussimeter with automatic movement for the evaluation of the density of the magnetic flow in permanent magnets

Julio David Gonzales-Balladares^{*1}, Evelyn Toque-Huamán²,
Rafael Ryutaro Fukuda-Hernandez¹

¹Universidad de Ingeniería y Tecnología, Lima, Peru.

²Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Lima, Peru.

Recibida en 20 de Marzo, 2024. Revisado en 21 de Mayo, 2024. Aceptado en 23 de Mayo, 2024.

El período de cuarentena de 2022 expuso la necesidad de diseñar instrumentos de laboratorio accesibles para los estudiantes que les permitan realizar experimentos desde casa. Aunque muchos estudios de magnetismo han desarrollado gaussímetros con desplazamiento manual, pocos están automatizados. Por ello, este estudio presenta el diseño de un gaussímetro elaborado con piezas de juguetes de construcción y una placa de desarrollo Arduino UNO para cuantificar la densidad de flujo magnético en imanes permanentes. Para evaluar su funcionamiento se realizaron pruebas de precisión y robustez. De esta manera, la prueba Kruskal-Wallis mostró similitud en las lecturas experimentales con el sensor WSH315 entre 1,62–3,54 cm. Mientras tanto, la prueba de Wilcoxon-Mann-Whitney mostró limitaciones en términos de precisión. Y la prueba de Youden-Steiner mostró robustez a la rotación de polaridad en el imán a una distancia de 1,19 cm con el sensor AD22151. Finalmente, los resultados experimentales mostraron proximidad con el método analítico y el método numérico. Además, los resultados demostraron la versatilidad del gaussímetro para adaptarse a otro sensor (MLX90393). Por lo tanto, este diseño se puede utilizar para realizar experimentos de magnetismo a bajo costo.

Palabras-clave: Gaussímetro, imán permanente, neodimio, sensor de efecto Hall, campo magnético.

The 2022 quarantine period exposed the need to design laboratory instruments that were accessible to students, allowing them to conduct experiments from home. Although many magnetism studies have developed manually displaced gaussimeters, only a few of them have been automated. Therefore, this study presents the design of a gaussimeter made with construction toy parts and an Arduino UNO development board to quantify the magnetic flux density in permanent magnets. To evaluate its operation, precision and robustness tests were carried out. In this way, the Kruskal-Wallis test showed similarity in the experimental readings with the WSH315 sensor between 1.62–3.54 cm. Meanwhile, the Wilcoxon-Mann-Whitney test showed limitations in terms of accuracy. And the Youden-Steiner test showed robustness to polarity rotation in the magnet at a distance of 1.19 cm with the AD22151 sensor. Finally, the experimental results showed proximity to analytical and numerical methods. Additionally, the results demonstrated the versatility of the gaussimeter to adapt to another sensor (MLX90393). Therefore, this design can be used to perform magnetism experiments at low cost.

Keywords: Gaussmeter, permanent magnet, neodymium, Hall effect sensor, magnetic field.

1. Introducción

La actividad experimental es uno de los aspectos claves en el proceso de enseñanza y aprendizaje en los cursos de ciencias (física, química). Por ello, su importancia para la enseñanza ha sido enfatizada por varios autores [1, 2]. En la última década, distintos estudios han demostrado cómo las actividades experimentales son fuentes importantes de conocimientos durante su aplicación en los laboratorios de ciencias [3, 4]. En relación a la enseñanza del magnetismo se han publicado estudios enfocados en mejorar su comprensión en el aula mediante experimentos sencillos [5, 6].

En la actualidad, el problema del alto costo de los instrumentos de medición en los laboratorios de ciencias no permite a muchos centros educativos de recursos limitados emplearlos en sus prácticas [6]. Además, durante el periodo de cuarentena del 2022 se agudizó este problema porque los estudiantes no tenían acceso a los laboratorios en sus centros de estudios. Esto generó la necesidad de desarrollar instrumentos de laboratorio de bajo costo, y fáciles de ensamblar para los estudiantes desde sus hogares.

Un gaussímetro o teslámetro es un instrumento empleado para medir la densidad del flujo magnético (B) en un punto dado en el espacio por medio de sensores de efecto Hall [7, 8]. Estos sensores han sido empleados para explicar la leyes de Ampere, y de Biot-Savart en

*Correspondence email address: julio.gonzalesb@ciplima.org.pe

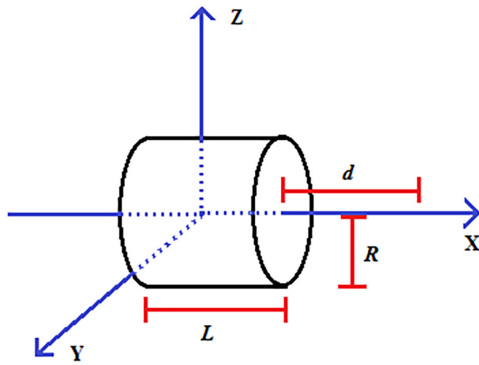


Figura 1: Parámetros para imanes con forma de cilindro empleados en el método analítico (Espesor = L , Radio = R , Distancia = d).

bobinas de Helmholtz [2, 9, 10], también para evaluar la fuerza de Lorentz en imanes permanentes [11], realizar experimentos para ilustrar el problema actual en el escenario de la física de altas energías [12], o estudiar el desplazamiento de B en el campo magnético de imanes permanentes [2, 13, 14].

El modelo actual para determinar B en el desplazamiento en un imán cilíndrico se obtiene utilizando métodos analíticos basados en el enfoque de Lorentz para corrientes estables, mostrado en la Eq. (1) y Eq. (2). Donde d es la distancia del sensor al imán, R su radio, L su espesor, μ_0 es la permeabilidad al vacío, M_s es la magnetización y B_r su remanencia [14–17]. Esto es representado en la Fig. 1. Sin embargo, el método de análisis de elementos finitos (FEM) con aplicaciones en ingeniería ha obtenido también buenos resultados al evaluar el campo magnético en imanes permanentes [9, 18].

$$B_{(x)} = \frac{\mu_0 M_s}{2} \left[\frac{d+L}{\sqrt{(d+L)^2 + R^2}} - \frac{d}{\sqrt{d^2 + R^2}} \right] \quad (1)$$

$$B_{(x)} = \frac{B_r}{2} \left[\frac{d+L}{\sqrt{(d+L)^2 + R^2}} - \frac{d}{\sqrt{d^2 + R^2}} \right] \quad (2)$$

En la última década, se han desarrollado gaussímetros de bajo costo con desplazamiento manual para demostrar la polaridad en imanes permanentes y medir su campo magnético [5, 13, 14, 19–22]. De igual manera, se han propuesto emplear los sensores de los smartphones para realizar experimentos de magnetismo en el aula [23, 24]. Con el uso de aplicativos que permiten medir el campo magnético y los campos electromagnéticos (EFM). Sin embargo, pocos estudios han desarrollado instrumentos de medición automatizados para obtener una mayor precisión [25, 26]. Ante este escenario, el presente estudio propone el diseño de un gaussímetro de bajo costo para la evaluación de B en imanes permanentes con la novedad de ser un instrumento automático de fácil construcción para los estudiantes.

Este diseño beneficia también a los centros educativos que no tienen en sus laboratorios estos instrumentos de medición por su alto costo. Así, este estudio abre la puerta a nuevas investigaciones en la enseñanza experimental sobre campos magnéticos.

2. Materiales y Métodos

2.1. El Gaussímetro

El diseño propuesto en este estudio tiene un costo de 23.00 USD (Tabla 1), y se sustenta en trabajos de investigaciones sobre gaussímetros de bajo costo elaborados con sensores Hall, microcontroladores, placas de desarrollo Arduino UNO y fuentes de alimentación [2, 13, 14, 19–22]. La novedad en el diseño es el uso de piezas de juguetes de construcción para un desplazamiento automático en un eje de coordenadas. Para ello se utiliza un engranaje de 1 cm de radio que gira por medio de un servomotor SG90 de 180° para dar movimiento a una barra de desplazamiento tipo cremallera, mostrado en la Fig. 2.

Todos los datos obtenidos con el gaussímetro se encuentran disponible en Mendeley DataDOI: 10.17632/8cp4k8ybh8.1. El programa empleado se ciemienta en un sketch de Arduino para sensores Hall modificado para permitir 30 mediciones de B posteriores al desplazamiento del imán.

Tabla 1: Precio de los componentes usados en el diseño del gaussímetro con movimiento automático.

Componentes del Gaussímetro	Precio (USD)
Sensor Hall WSH315	1
Barra desplazamiento con carcasa	6
Engranaje de 20 dientes	1
Placa desarrollo Arduino UNO	10
Servomotor SG90 con cables	5
Total	23

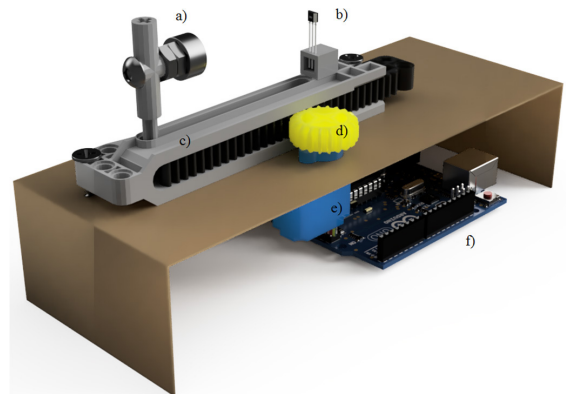


Figura 2: Configuración del gaussímetro. a) Imán, b) Sensor Hall, c) Barra desplazamiento con soporte, d) Engranaje, e) Servomotor, f) Placa de desarrollo tipo Arduino UNO.

2.2. Método numérico

El método de elementos finitos (FEM) es un método de aproximación utilizado para obtener un modelo discreto a partir de un número determinado de puntos. Para ello, se emplean softwares de simulación para calcular las densidades de flujo en el campo magnético [9, 18]. En la actualidad, un software de simulación libre muy empleado por los estudiantes es el FEMM pero requiere de una preparación previa para su uso. Por esta razón, para dar facilidad a los estudiantes se recomiendan páginas web de acceso libre (<https://www.kjmagnetics.com/fieldcalculator.asp>) que permitan obtener en línea valores referenciales de B en imanes de neodimio sin necesidad de descargar un programa.

2.3. Método analítico

Para determinar el valor teórico de B en imanes cilíndricos se emplea la Eq. (2) sustentada en el enfoque de Lorentz [14–17]. Para ello, se usa una hoja de cálculo en Excel tomando en cuenta el valor de B_r de 11700 Gauss para un imán de neodimio (N35) con R de 0.5 cm y L de 1cm.

2.4. Método experimental

Para evaluar de manera experimental B en un imán N35 denominado “IMA1” con R de 0.5 cm, y L de 1 cm se realizan 30 lecturas en cada punto programado en el servomotor (0° , 10° , 30° , 45° , 70° , 90° , 110° , 135° y 180°) iniciando a 0.4 cm, y repitiéndose este procedimiento tres veces con el sensor WSH315. Luego, se realiza el test de Anderson-Darling para evaluar la distribución de los datos de B en cada experiencia. Posteriormente, se evalúa la dispersión de los valores hallados de B en las tres repeticiones para el caso de muestras no paramétricas se emplea el test Kruskal-Wallis para determinar la similitud entre sus lecturas. Finalmente, para evaluar la precisión se comparan los valores de B experimentales con los valores obtenidos con el método numérico, y el método analítico por medio del test de Wilcoxon-Mann-Whitney.

Para analizar la robustez se emplea el test de Youden-Steiner para evaluar posibles cambios en el diseño del gaussímetro a una distancia de 1.2 cm, y evaluar también la variación en la polaridad por la rotación del imán. Para ello, los sensores Hall son colocados en orientación Norte para el sensor AD22151 y en orientación Sur para el sensor WSH315.

3. Resultados y Discusiones

3.1. Método numérico, analítico y experimental

Los valores de B obtenidos por el método numérico son mostrados en la Fig. 3. Para homologarse con los valores d del método analítico y experimental (Tabla 2) se le

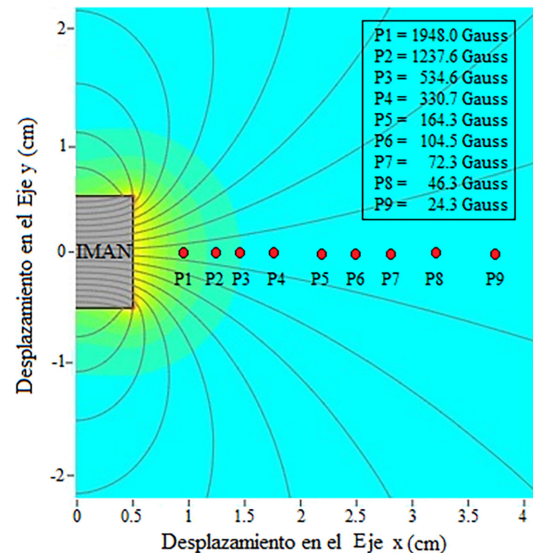


Figura 3: Aproximación en la densidad de flujo magnético por métodos numéricos en un imán cilíndrico de 0.5 cm de radio y 1 cm de espesor.

Tabla 2: Comparación entre los valores de la densidad del flujo magnético obtenidos por el método analítico, numérico y experimental para un imán N35 de 0.5 cm de radio y 1 cm de espesor.

d (cm)	Método Analítico B (Gauss)	Método Numérico B (Gauss)	Método Experimental B (Gauss)
0.4	1854.72	1948.00	1767.68 (1719–1810)
0.6	1162.73	1237.60	1341.76 (1296–1384)
0.9	517.34	534.60	517.85 (511–525)
1.2	312.52	330.70	322.35 (315–330)
1.6	156.10	164.30	151.29 (144–158)
1.9	98.51	104.50	102.41 (95–109)
2.3	66.08	72.30	74.48 (67–78)
2.7	42.80	46.30	46.55 (36–57)
3.5	22.31	24.30	25.60 (18–29)

resto ($L/2 = 0.5$ cm) al desplazamiento mostrado por el simulador (Fig. 3).

Para determinar B experimentalmente se empleó la Eq. 3. Donde el valor de 1.4 mV/Gauss es la sensibilidad en el sensor WSH315, $V_{initial}$ es el voltaje inicial en configuración bipolar en el sensor y tiene un valor cercano a 2.5 V, mientras V_{out} es el voltaje de repuesta del sensor Hall al campo magnético. Posteriormente, con el test de Anderson-Darling se determinó que los valores experimentales no tienen una distribución normal ($p < 0.05$). Por ello, son representados en la Tabla 2 con el valor de su mediana y sus valores (mínimos–máximos).

$$B(\text{Gauss}) = \frac{(V_{out}(\text{mV}) - V_{initial}(\text{mV}))}{(1.4 \left(\frac{\text{mV}}{\text{Gauss}}\right))} \quad (3)$$

Para determinar los valores de B por el método analítico se empleó la Eq. (2) para cada punto de desplazamiento d del método experimental. Finalmente, Los

valores obtenidos por el método numérico, experimental, analítico son mostrados en la Tabla 2.

3.2. Precisión

Los resultados del Test Kruskal-Wallis confirmó que el sensor WSH135 presento similitud ($p > 0.05$) en las tres repeticiones experimentales realizadas entre los 1,6–3,5 cm, mostrado en la Fig. 4 donde se aprecia una mayor dispersión de los valores de B cercanos al imán. De manera similar, Ładyżyńska-Kozdraś et al. [20] determino que mientras más alejado este el imán del sensor se obtendrán valores de B más ajustados. Según Darmawan et al. [19] este fenómeno ocurre porque los sensores Hall son muy sensibles a valores altos de B por encostrarse en los límites de su rango de trabajo generado por la limitación del voltaje de su fuente de alimentación. Además, Velásquez et al. [21] señala que la zona cercana al imán tiene una alta densidad del flujo magnético por ello cualquier vibración puede generar fluctuaciones en la medición. También, entre los posibles factores que afectan la precisión se deben considerar las pequeñas vibraciones mecánicas generadas por el sistema de engranajes en el imán durante su desplazamiento.

Los resultados del test de Wilcoxon-Mann-Whitney ($p < 0.05$) mostraron que los valores B experimentales eran distintos a los valores del método analítico, y el método numérico entre los 0,4–3,5 cm. Esta limitación en la precisión en los gaussímetros es confirmado por otros autores. Así, Ri [18] considera que las ecuaciones analíticas empleadas para determinar el campo magnético brindan valores aproximados en comparación con el método numérico. Por su parte, Guarín y Velásquez [13] manifiestan que estos gaussímetros de censado de posición en un eje tienen detección limitada a una región del desplazamiento. Por esta razón, Yariçi y Öztürk [15] lograron obtener valores experimentales similares al método analítico (Eq. (2) y Eq. (4)) solamente en el caso de $d \gg R$. Por esta razón, el gaussímetro puede ser usado en las prácticas de laboratorio para detección

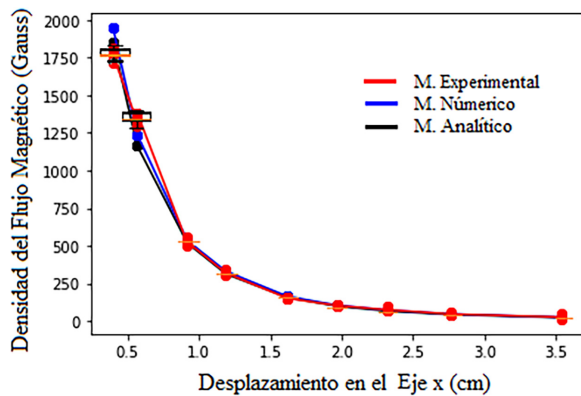


Figura 4: Densidad del flujo magnético del imán cilíndrico de neodimio N35 ($R = 0.5$ cm, $L = 1$ cm) con respecto a la distancia a lo largo de su eje (x).

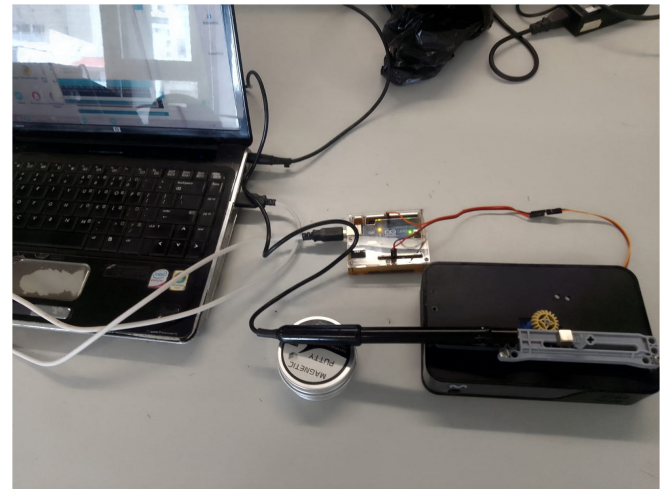


Figura 5: Montaje experimental del gaussímetro con movimiento automático con un sensor de laboratorio MG-BTA adaptado para detectar valores de densidad de flujo magnético menores de 60 Gauss.

de valores de B a distancias lejanas del sensor al imán (Figura 5).

$$B(x) = B_r \cdot d^{-3} \quad (4)$$

3.3. Robustez

Los campos magnéticos tienen dos características importantes que son la densidad de flujo magnético y la polaridad. Por esta razón, se modificaron cuatro variables en el diseño del gaussímetro (Tabla 3). Entre ellos, el uso del sensor AD22151 con orientación de la polaridad distinta del sensor WSH315 (Figura 6), el uso de una fuente de alimentación externa XD-42 de 5V, el uso de un condensador ($C_{104} = 100$ nf) para mejorar la señal en V_{OUT} (Fig. 6), y el uso de otro Imán de neodimio denominado “IMA2”. El test de Youden-Steiner fue realizado a 1.2 cm de distancia, y los efectos (S a Z) generados por las ocho modificaciones en el diseño son mostrados en la Tabla 4.

De los resultados de los ocho efectos (S a Z) de la Tabla 4 se determinó el valor de desviación estándar (SD) global de 6.49 Gauss. Por su parte, los resultados de la Tabla 5 mostraron que las diferencias (Δ) en la influencia de las variables de estudio (\bar{G} y \bar{g}) del test

Tabla 3: Parámetro de evaluación para el test de Youden-Steiner.

Variables	Valor Nominal		Valor Alternativo	
	Valor	Código	Valor	Código
Sensor Hall	AD22151	A	WSH315	a
Alimentación	Arduino Pin 5V	B	Módulo XD-42	b
Condensador C_{104}	Con conexión	C	Sin conexión	c
Imán N35	Imán “IMA1”	D	Imán “IMA2”	d

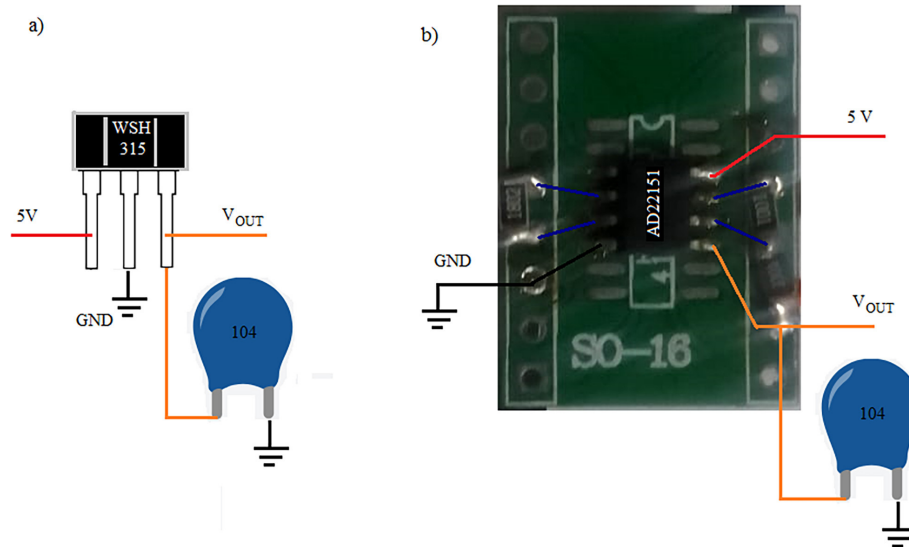


Figura 6: Configuración de los sensores Hall con conexión opcional del condensador 104 para el test de Youden-Steiner. a) Sensor WSH315. b) Sensor AD22151.

Tabla 4: Esquema del test de Youden-Steiner para la evaluación de las modificaciones en el diseño del gaussímetro.

Efecto S	Efecto T	Efecto U	Efecto V	Efecto W	Efecto X	Efecto Y	Efecto Z
A	A	A	A	a	a	a	a
B	B	b	b	B	B	b	b
c	C	c	C	c	C	c	C
D	D	d	d	d	d	D	D
(Gauss)	(Gauss)	(Gauss)	(Gauss)	(Gauss)	(Gauss)	(Gauss)	(Gauss)
306.29	302.33	319.78	318.16	316.64	317.69	311.53	318.74

Tabla 5: Evaluación de la influencia de las variables de estudio por el test de Youden-Steiner.

Variables	\bar{G} (Gauss)	\bar{g} (Gauss)	$\Delta(\bar{G} - \bar{g})$
Sensor (AD22151 o WSH315)	311.64	316.15	4.51
Alimentación (Arduino o XD-42)	310.74	317.05	6.31
Condensador C ₁₀₄ (Si o No)	313.56	314.23	0.67
Imán (“IMA1” o “IMA2”)	309.72	318.07	8.35

de Youden-Steiner son menores a SD. $\sqrt{2}$. Por ello, al cumplir el criterio de $\Delta(\bar{G} - \bar{g}) < 9.17$ Gauss permitió determinar la robustez en la detección de B ante los cambios establecidos en la Tabla 3.

Finalmente, los resultados de las pruebas de precisión, y robustez demuestran que el gaussímetro con movimiento automático es capaz de determinar valores de B cercanos a los obtenidos por el método analítico y numérico. Por ello, el gaussímetro puede ser empleado en experimentos de laboratorio con imanes permanentes. Un ejemplo de estos experimentos es mostrado en la Figura 7. Donde, se aprecia el aumento de los valores de B al mantener constante R , y aumentar L en imanes cilíndrico de neodimio.

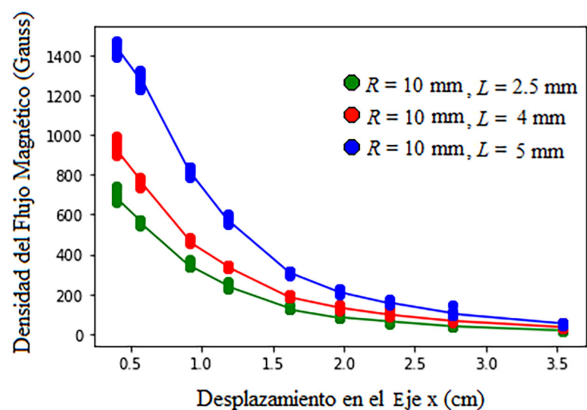


Figura 7: Comparación en el desplazamiento de la densidad de flujo magnético en imanes cilíndricos de neodimio con distintos espesores y radio constante (10 mm).

3.4. Versatilidad

El gaussímetro con movimiento automático permite realizar distintos experimentos en las clases de física experimental. De esta manera, al reemplazar el sensor (WSH315) por un sensor Hall (MLX90393) con detección en tres dimensiones (3D) es posible determinar B en los tres ejes de coordenadas (B_x, B_y, B_z), y el

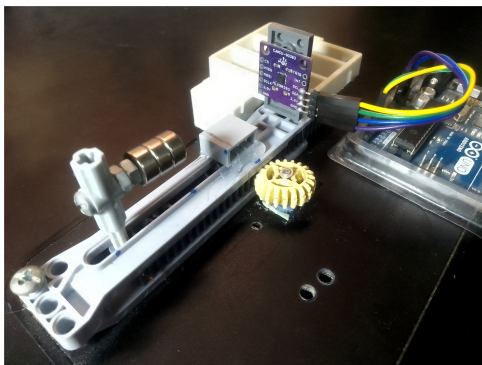


Figura 8: Montaje experimental del gaussímetro con movimiento automático con un sensor MLX90393.

Tabla 6: Valores de la densidad del flujo magnético obtenidos con el sensor MLX90393 de tres imanes unidos N35 de 0.5 cm de radio y 0.45 cm de espesor.

D (cm)	B _X (Gauss)	B _Y (Gauss)	B _Z (Gauss)
2.4	49.33 (49.39–49.28)	4.18 (4.19–4.16)	2.89 (2.91–2.88)
2.9	31.49 (31.54–31.36)	2.64 (2.90–2.62)	1.86 (1.98–1.84)
3.4	21.42 (21.46–21.40)	1.84 (2.02–1.81)	1.34 (1.43–1.33)
3.9	15.96 (16.02–15.92)	1.44 (1.56–1.41)	1.09 (1.15–1.08)
4.5	12.66 (12.69–12.63)	1.16 (1.23–1.14)	0.94 (0.97–0.93)
5.0	9.78 (9.80–9.76)	0.94 (0.97–0.92)	0.81 (0.83–0.80)
5.5	7.64 (7.67–7.60)	0.77 (0.79–0.76)	0.72 (0.73–0.71)

vector de inducción magnética en un plano definido. Esta configuración es mostrada en la Figura 8.

Para la prueba de detección en 3D con el sensor MLX90393 se unieron tres imanes N35 de 0.5 cm de radio y 0.45 cm de espesor. Se descargó el sketch de la librería de Arduino del autor Adafruit (<https://www.arduino.cc/reference/en/libraries/adafruit-mlx90393/>). Se modificó el sketch para orientar los ejes de coordenadas según la Figura 1, y mostrar los valores de B en Gauss. Finalmente, los valores de las medianas de 30 lecturas en tres repeticiones son mostrados en la Tabla 6. La versatilidad en el gaussímetro es demostrado con su flexibilidad y facilidad de adaptarse al experimento propuesto.

4. Conclusiones

El diseño del gaussímetro con movimiento automático es de fácil construcción para los estudiantes, tiene un costo de 23.00 USD, y sus componentes son fáciles de adquirir. El diseño mostrado permite la exploración cuantitativa de la densidad de flujo magnético con valores cercanos a los obtenidos por el método analítico y el método numérico. Por ello, puede ser empleado en prácticas de laboratorio para obtener valores referenciales del campo magnético de un imán dentro del rango de trabajo del sensor Hall. Además, su bajo costo beneficia a las distintas instituciones educativas que no poseen estos instrumentos de medición en sus laboratorios, y

contribuye también con la formación de los estudiantes por medio de actividades experimentales en magnetismo realizables desde sus hogares.

Agradecimientos

Este trabajo fue apoyado y financiado por la Universidad de Ingeniería y Tecnología (UTEC) y la Dirección de Investigación de la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC).

Referencias

- [1] J. Carrascosa, D. Perez, A. Vilches y P. Valdez, *Cad. Brás. Ens. Fis.* **23**, 157 (2006).
- [2] W.C. Magno, M. Andrade y A.E.P. Araújo, *Rev. Bras. Ens. Fis.* **32**, 3403 (2010).
- [3] A. Hofstein y V.N. Lunetta, *Science Education* **88**, 28 (2004).
- [4] J. Guisasaola, J. Almudí, J. Zubimendi y K. Zuza, *Enseñanza de las ciencias* **23**, 303 (2005).
- [5] P. Onorato y M. Malgieri, *Eur. j. phys.* **41**, 025202 (2020).
- [6] G.Y.B. Campos, W.B. Costa y N.F.A. Azevedo Neto, en: *Física: Intervenções pedagógicas, tecnologias e metodologias emergentes à efetividade do ensino-aprendizagem*, editado por R.J. Oliveira (Editorial Científica, Guarujá, 2022).
- [7] E. Ramsden, en: *Hall-effect sensors: Theory and application*, edited by Newnes (Elsevier, Londres, 2006), 2 ed.
- [8] S. Ursache, E. Lunca y S. Vornicu, en: *International conference on electromechanical and energy systems (sielmen)* (Craiova, 2019).
- [9] M.A. González-Muñoz, *Tecnura* **15**, 111 (2011).
- [10] J. Atorino, L. Bortolín, E. Rodríguez, R. Farías y E. Rodríguez, *Lat. Am. J. Phys. Educ.* **3**, 606 (2009).
- [11] J. Mengelkamp, M. Ziolkowski, K. Weise, M. Carlstedt, H. Brauer y J. Haueisen, *IEEE Transactions on Magnetics*. **51**, 1 (2015).
- [12] A. Doff y R.M. Szmowski, *Rev. Bras. Ens. Fis.* **45**, e20230181 (2023).
- [13] N. Guarín-Zapata y A. Velásquez, *Revista colombiana de física* **42**, 27 (2010).
- [14] A. Beyaz y D. Parlak, *Yuzuncu Yıl University Journal of Agricultural Sciences* **31**, 710 (2021).
- [15] I. Yarıçı y Y.A. Öztürk, *Turk. J. Elec Eng. & Comp. Sci.* **31**, 238 (2023).
- [16] J.M. Camacho y V. Sosa, *Rev. Mex. Fis. E* **59**, 8 (2013).
- [17] E.P. Furlani, *Permanent magnet and electromechanical devices: Materials, analysis, and applications* (Academic Press, New York, 2001), 1 ed.
- [18] E. Ri, *Modern Physics Letters B* **23**, 1897 (2009).
- [19] D. Darmawan, F. Rahmawati, Suprayogi y A. Suhendi, *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series* **853**, 012018 (2017).
- [20] E. Ładyżyńska-Kozdraś, A. Sibilska-Mroziewicz y S. Czubaj, en: *Mechatronics 2017*, editado por T. Březina y R. Jabłoński (Springer, Cham, 2017).
- [21] A.A. Velásquez, J. Baena-Rodríguez y Y.F. Gutiérrez, *Ing. Cienc.* **11**, 99 (2015).

- [22] R.F. Silva, V. Freitas, O.R.R. Cunha y B.S. Mendes, *Rev. Bras. Ens. Fis.* **45**, e20230105 (2023).
- [23] A.Y. Nuryantini, A. Sawitri y B.W. Nuryadin, *Phys. Educ.* **53**, 065021 (2018).
- [24] M. Monteiro, C. Stari, C. Cabeza y A.C. Marti, *The physics teacher* **55**, 580 (2017).
- [25] A. Cabrera, D. Milanés, F. Gilart y R. Vásquez, *Revista Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones* **41**, 60 (2020).
- [26] F. Lopes, F. De Oliveira, T. Gouvêa y A. Bigansolli, *Revista de formación e innovación educativa universitaria* **7**, 51 (2014).