

# Magnetostricción

Juan José Guzmán Mejía\* and Juan Sebastián Sánchez Lozano\*\*

*Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia.*

(Dated: 6 de septiembre de 2024)

Este experimento tuvo como objetivos observar el fenómeno de interferencia utilizando un láser He-Ne en configuración de Michelson, estudiar el efecto de la magnetostricción en barras metálicas de cobre, hierro y níquel, y medir la histéresis magnética en el níquel. Para ello, primero se caracterizó una bobina midiendo el campo magnético para distintas corrientes, lo que permitió obtener una relación lineal entre ambas magnitudes. Luego, se montó un interferómetro de Michelson, en el que un espejo móvil se acopló a una barra situada dentro de la bobina. Variando la corriente, se registraron los mínimos de interferencia, calculando así los cambios en la longitud de las barras debido al campo magnético. Los resultados mostraron que tanto el níquel como el hierro presentaron magnetostricción, con una variación en la longitud en relación al campo magnético aplicado, independientemente de su signo. No obstante, no se logró evidenciar de manera concluyente el efecto de histéresis en el níquel. En el hierro, se observó un retorno del patrón de interferencia a su posición inicial tras alcanzar la saturación magnética. Por lo tanto, se confirma la relación entre las propiedades magnéticas y las deformaciones en materiales ferromagnéticos.

## I. INTRODUCCIÓN

A mediados del siglo XIX, la teoría ondulatoria de la luz ya estaba casi confirmada. Sin embargo, todas las ondas conocidas requerían un medio para propagarse. En el caso de la luz, aún no se había identificado tal medio, por lo que los físicos propusieron la existencia del éter, un supuesto medio en el que la luz se propagaría. Con el objetivo de comprobar la existencia del éter, Albert Michelson, quien estaba estudiando la velocidad de la luz, diseñó un dispositivo que más tarde se conocería como el interferómetro de Michelson [1].

En un interferómetro de Michelson, un haz de luz láser se divide en dos mediante un divisor de haz semitransparente. Estos haces se reflejan en dos espejos y luego se recombinan, produciendo un patrón de interferencia debido a la diferencia de fase acumulada durante su trayectoria. La fórmula que relaciona la distancia entre mínimos de interferencia con la longitud de onda es:

$$d = \frac{N\lambda}{2}, \quad (1)$$

donde  $N$  es el número de mínimos observados en un punto fijo y  $\lambda$  es la longitud de onda.

Por otro lado, la magnetostricción es un fenómeno descubierto por James Joule en 1842. Observó que, al aplicar un campo magnético a una barra de hierro, esta cambiaba de tamaño. Este fenómeno sería entonces conocido como 'magnetostricción Joule'. [2].

De esta forma, la magnetostricción describe cómo un material ferromagnético cambia de forma en presencia

de un campo magnético, reflejando la relación entre las propiedades magnéticas y elásticas del material. Esta deformación tiene un límite de saturación [3].

Cuando una barra rodeada por una bobina de alambre que conduce corriente se somete a un campo magnético, su longitud aumenta en la dirección del campo, mientras que las dimensiones perpendiculares disminuyen, manteniendo el volumen casi constante. El cambio relativo en la longitud

$$\frac{\Delta L}{L} \quad (2)$$

también se denomina magnetostricción y suele estar en el orden de magnitud de  $10^{-6}$ , lo que requiere métodos de medición precisos [4]. En algunos materiales, como el níquel, la magnetostricción puede ser negativa, es decir, la longitud paralela al campo disminuye mientras que la perpendicular aumenta [5].

La interferometría óptica, en particular el interferómetro de Michelson, es un método efectivo para medir estos pequeños cambios de longitud [3]. En este caso, uno de los espejos del interferómetro se acopla a la barra ferromagnética, de modo que cualquier cambio en la longitud de la barra altera el patrón de interferencia. Al contar el número de mínimos que pasan por un punto fijo, se puede calcular el cambio de longitud utilizando la fórmula 1.

La magnetostricción tiene aplicaciones en diversas áreas, siendo crucial para determinar propiedades como la permeabilidad de los materiales magnéticos [6]. Debido a que existe un intercambio de energía entre los estados magnético y elástico, los materiales magnetostrictivos son útiles en el control de movimiento y en sistemas de detección. Además, se emplean en dispositivos para el control de vibraciones en equipos mecánicos [3]. El fenómeno también es importante para el avan-

\* Correo institucional: j.guzmanm@uniandes.edu.co

\*\* Correo institucional: js.sanchez11@uniandes.edu.co

ce en la física de materiales, ya que permite estudiar el comportamiento atómico de los materiales en presencia de campos magnéticos.

## II. MONTAJE EXPERIMENTAL

Los componentes principales se muestran en la figura 1, los cuales son: una bobina (C) con su fuente de alimentación, 4 espejos (M1, M2, M3, M4), dos lentes (L) y un láser.

Primero, se realizó la caracterización de la bobina, midiendo el campo magnético para diferentes valores de corriente con un teslámetro. Estos datos permitieron realizar una regresión lineal, obteniendo una ecuación que describe el campo magnético en función de la corriente aplicada.

Posteriormente, se utilizó el esquema de la figura 1 para montar el experimento. El haz de luz del láser He-Ne se refleja en el espejo M1, pasa a través de un lente, se refleja nuevamente en el espejo M2, y luego se divide en dos haces parciales mediante el divisor de haz. Uno de estos haces se refleja en el espejo móvil M3, mientras que el otro se refleja en el espejo M4. Finalmente, ambos haces interfieren, produciendo un patrón de interferencia que se proyecta en una pared tras pasar por otro lente para mejorar la visibilidad.

El espejo móvil se acopló a una barra metálica (de hierro, níquel o cobre), la cual se colocó dentro de la bobina. La bobina estaba conectada a una fuente de voltaje en serie con un multímetro para medir la corriente, lo que permitió calcular los parámetros necesarios durante el experimento.

Una vez encendido el láser, el procedimiento comenzó con la barra de níquel, incrementando la corriente desde cero hasta el valor máximo permitido por la fuente, y luego disminuyéndola de nuevo a cero, registrando las corrientes correspondientes a cada mínimo de interferencia en un punto fijo. También se tomaron mediciones para corrientes negativas. A continuación, se repitió el procedimiento con la barra de hierro, omitiendo las corrientes negativas. Es importante destacar que la barra de cobre no se utilizó, ya que no exhibe propiedades ferromagnéticas ni magnetostrictivas.

Con las corrientes registradas, fue posible calcular el campo magnético producido por la bobina utilizando la regresión lineal obtenida en la gráfica 2. A partir de la ecuación (1), se calculó el cambio en la longitud ( $\Delta L$ ), sabiendo que la longitud de onda del láser es de 632.8 nm [7].

## III. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En la figura 2 se graficaron los valores medidos para el campo magnético en militeslas para diferentes valores

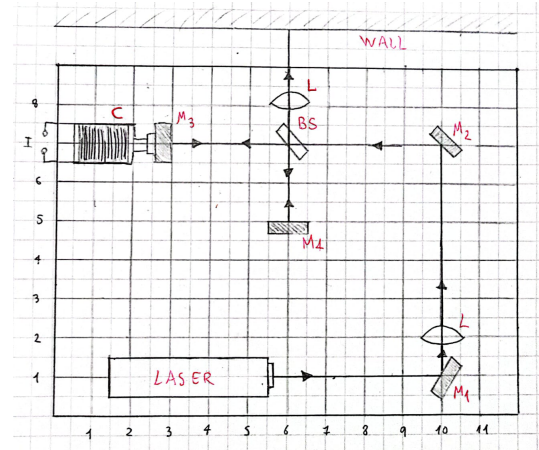


Figura 1. Esquema usado en el experimento siguiendo la configuración de Michelson, cuyos componentes son: una bobina (C), 4 espejos (M1, M2, M3, M4), dos lentes (L) y un láser. El haz de luz se divide en dos haces parciales para luego terminar interfiriendo y dar lugar al patrón de interferencia, el cual se muestra en una pared.

de corriente en amperios. Utilizando mínimos cuadrados, se hizo una regresión lineal a los datos para poder caracterizar la bobina. Además, se encontraron los residuales normalizados.

Se obtuvo una regresión lineal adecuada según lo esperado, ya que el campo magnético es directamente proporcional a la corriente y el intercepto es cercano a 0. De igual manera, la gráfica de residuales permite observar que la regresión se ajusta bastante bien a los datos. Cabe aclarar que las barras de error no se logran apreciar por la escala de los ejes.

En el cuadro I se muestran los valores medidos para el número de mínimos, la variación de longitud en nanómetros, corriente medida en amperios y campo magnético en militeslas para la barra de zinc.

En la figura 3 pueden verse los datos del cuadro I graficados, cuyo eje vertical corresponde a la variación de longitud en nanómetros y el eje horizontal al campo magnético en militeslas calculado a partir de la caracterización de la bobina.

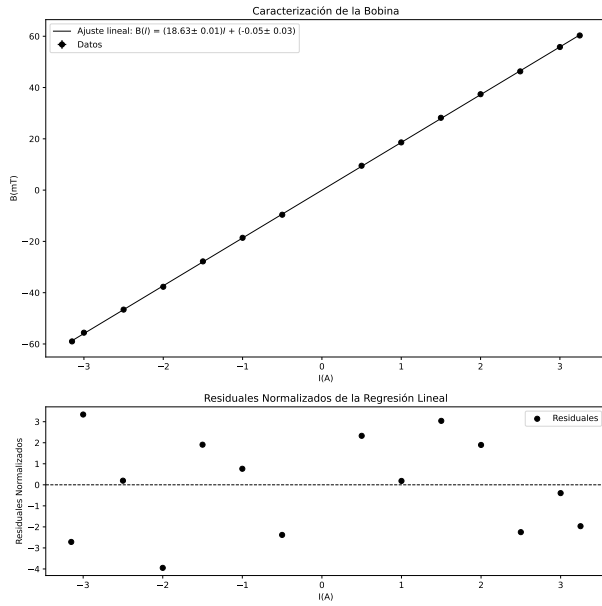


Figura 2. La primera gráfica corresponde a los datos, junto con su respectiva regresión lineal, de campo magnético (mT) contra corriente (A). Esta regresión es de la forma  $B(I) = (18,63 \pm 0,01)(\frac{mT}{A})I + (-0,05 \pm 0,03)(mT)$ . La segunda gráfica corresponde a los residuales normalizados de la regresión lineal, cuya distribución representa un correcto ajuste de curva. Cabe aclarar que las barras de error no son perceptibles debido a la escala de los ejes.

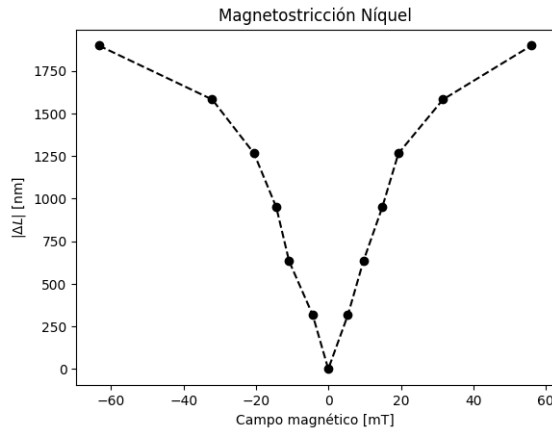


Figura 3. Gráfica de los datos del cuadro I. El eje vertical corresponde a la variación de longitud en nm y el eje horizontal al campo magnético en mT. No se logra apreciar las barras de error por la escala de los ejes.

Al analizar la gráfica, se observa que al incrementar el campo magnético, tanto en sentido positivo como negativo, la variación en la longitud de la barra también aumenta. De hecho, en la toma de datos se notó que el patrón de interferencia cambiaba de igual forma en

Mínimos	$\Delta L$ (nm)	Corriente(A)	Campo magnético(mT)
6	1898,4	$3,01 \pm 0,01$	$-63,38 \pm 0,2$
5	1582,0	$1,70 \pm 0,01$	$-32,09 \pm 0,2$
4	1265,6	$1,04 \pm 0,01$	$-20,54 \pm 0,2$
3	949,2	$0,80 \pm 0,01$	$-14,39 \pm 0,2$
2	632,8	$0,52 \pm 0,01$	$-10,85 \pm 0,2$
1	316,4	$0,29 \pm 0,01$	$-4,33 \pm 0,2$
0	0	$0,00 \pm 0,01$	$-0,0 \pm 0,2$
1	316,4	$-0,23 \pm 0,01$	$5,35 \pm 0,2$
2	632,8	$-0,58 \pm 0,01$	$9,64 \pm 0,2$
3	949,2	$-0,77 \pm 0,01$	$14,86 \pm 0,2$
4	1265,6	$-1,1 \pm 0,01$	$19,33 \pm 0,2$
5	1582,0	$-1,72 \pm 0,01$	$31,62 \pm 0,2$
6	1898,4	$-3,40 \pm 0,01$	$56,02 \pm 0,2$

Cuadro I. En este cuadro se muestran los valores medidos para el número de mínimos, la variación de longitud en nm, corriente medida en A y campo magnético en mT para la barra de zinc.

las dos direcciones del campo, lo que concuerda con la teoría: el signo de la variación de longitud no depende del signo del campo magnético. Es necesario mencionar que en realidad se sacó el valor absoluto del cambio de longitud porque, como se mencionó en la introducción, el níquel presenta magnetostricción negativa. Conviene señalar que en ambas direcciones no se puede apreciar adecuadamente el cómo se va alcanzando un valor de saturación debido a las limitaciones de la fuente de voltaje.

Se quiso evidenciar el efecto de histéresis en la barra de Zinc, por lo que se hizo la gráfica de la figura 4. No obstante, la histéresis no se pudo apreciar correctamente porque al realizar dos tomas de datos seguidas de ida y vuelta no se obtuvo una gráfica muy concisa respecto a este fenómeno. Esto pudo deberse a que la ida y vuelta no se hizo apropiadamente o a posibles imperfecciones materiales en la barra de zinc.

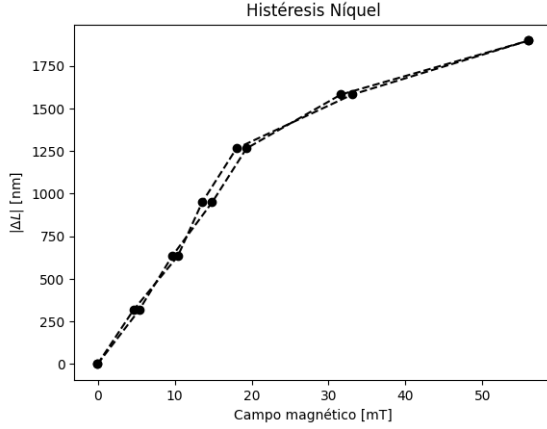


Figura 4. Gráfica de variación de longitud en nm contra campo magnético en mT. Con esto, se quería evidenciar la histéresis en la barra de Zinc; sin embargo, no presenta un comportamiento consistente con lo esperado. No se logra apreciar las barras de error por la escala de los ejes.

En el cuadro II, se muestran los valores medidos para el número de mínimos, la variación de longitud en nanómetros, corriente medida en amperios y campo magnético en militesla para la barra de hierro.

Mínimos	$\Delta L$	Corriente (A)	Campo magnético (mT)
0	0	$0 \pm 0,01$	$-0,0 \pm 0,2$
1	316,4	$0,7 \pm 0,01$	$12,99 \pm 0,2$
0	0	$3,14 \pm 0,01$	$58,45 \pm 0,2$

Cuadro II. En este cuadro se muestran los valores medidos para el número de mínimos, la variación de longitud en nm, corriente medida en A y campo magnético en mT para la barra de hierro.

La gráfica de los datos tomados para la barra de hierro se encuentra en la figura 5, cuyo eje vertical corresponde a la variación de longitud en nanómetros y el eje horizontal al campo magnético en militeslas calculado a partir de la caracterización de la bobina.

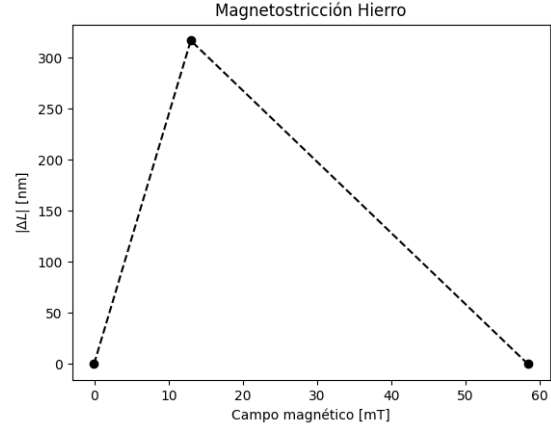


Figura 5. Gráfica de variación de longitud en nm contra campo magnético en mT. Como se puede observar, el hierro vuelve a su longitud inicial debido a saturación magnética. No se logra apreciar las barras de error por la escala de los ejes.

En el caso del hierro, a partir de  $(1,38 \pm 0,01)A$ , el patrón de interferencia se devolvió en vez de seguir expandiéndose. Esto pudo deberse a que se alcanzó rápidamente un valor de saturación, de forma que la barra paró de alargarse. De hecho, como se puede ver en la gráfica, al final volvió a su longitud inicial y solo alcanzó a pasar un mínimo.

#### IV. CONCLUSIONES

En este experimento, se logró observar el fenómeno de magnetostricción en el hierro y en el níquel haciendo uso de un interferómetro de Michelson, pero no se logró analizar correctamente el comportamiento de la histéresis magnética del níquel posiblemente debido a imperfecciones en el procedimiento o en el material. Asimismo, el cobre no exhibió magnetostricción porque no es un material ferromagnético.

En la caracterización de la bobina, se obtuvo un resultado lineal adecuado, lo que permitió calcular de forma confiable el campo magnético. Esto, junto con el cálculo de las variaciones de longitud, permite ver que el hierro y el níquel presentaron magnetostricción dependiente del campo magnético aplicado y no de su signo, lo cual concuerda con la teoría de magnetostricción Joule.

Curiosamente, el hierro mostró un retorno del patrón de interferencia a su posición inicial tras alcanzar la saturación magnética, indicando que, aunque se experimentaron cambios de longitud, estos se revertieron una vez se alcanzó una corriente de  $(1,38 \pm 0,01)A$ .

En resumen, el experimento confirmó la relación entre las propiedades magnéticas y las deformaciones en materiales ferromagnéticos, haciendo uso del interferó-

metro de Michelson como una herramienta para medir

pequeños cambios de longitud debido a la magnetostricción.

- 
- [1] J. M. Sanchez, “El interferómetro de michelson: de la relatividad especial al escándalo volkswagen,” 2015.
  - [2] A. Grunwald and A. G. Olabi, “Design of a magnetostrictive (ms) actuator,” *Grunwald, Artur and Olabi, Abdul-Ghani (2008) Design of a magnetostrictive (MS) actuator. Sensors and Actuators A: Physical*, 144 (1). pp. 161-175. ISSN 0924-4247, vol. 144, pp. 1–3, 05 2008.
  - [3] N. Ekreem, A. G. Olabi, T. Prescott, A. Rafferty, and M. Hashmi, “An overview of magnetostriction, its use and methods to measure these properties,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 191, pp. 96–101, 08 2007.
  - [4] A. R. Piercy, “The changing shape of magnetostriction,” *Physics Education*, vol. 32, p. 160, may 1997.
  - [5] A. Rafferty, S. Bakir, D. Brabazon, and T. Prescott, “Calibration and characterisation with a new laser-based magnetostriction measurement system,” *Materials & Design*, vol. 30, no. 5, pp. 1680–1684, 2009.
  - [6] H. Samata, Y. Nagata, T. Uchida, and S. Abe, “New optical technique for bulk magnetostriction measurement,” *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 212, no. 3, pp. 355–360, 2000.
  - [7] A. Giménez Vega, T. Rolón, and M. Franco, “Caracterización del haz del láser He-Ne con el interferómetro de Michelson y el programa tracker,” *Reportes científicos de la FACEN*, vol. 13, pp. 114 – 121, 12 2022.

## APÉNDICE DE CÁLCULO DE ERRORES

En las ecuaciones 3, 4, 6 y 6 se muestran las operaciones necesarias de mínimos cuadrados para calcular la pendiente, el intercepto, la incertidumbre de la pendiente y la incertidumbre del intercepto respectivamente. En cada ecuación de estas,  $x_i$  es cada dato del eje  $x$ ,  $y_i$  es cada dato del eje  $y$  y  $n$  es el número de datos.

$$m = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (3)$$

$$b = \frac{\sum y_i \sum x_i^2 - \sum x_i \sum x_i y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (4)$$

$$\sigma_m = \sqrt{\frac{n \sum (y_i - mx_i - b)^2}{(n-2)n \sum x_i - (\sum x_i)^2}} \quad (5)$$

$$\sigma_b = \sqrt{\frac{1 + (\sum x_i)^2}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}} \quad (6)$$

Para la propagación de errores se usó la ecuación 7 para una función de la forma  $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , siendo  $x$  cada variable y  $\sigma_x$  la incertidumbre asociada a cada variable. Con esto, se halló la ecuación 8 para la incertidumbre del campo magnético calculado a partir de la regresión lineal.

$$\sigma_f = \sqrt{\sum_i^n \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \sigma_{x_i} \right)^2} \quad (7)$$

$$\sigma_B = \sqrt{(I\sigma_m)^2 + (m\sigma_I)^2 + (\sigma_b)^2} \quad (8)$$

La variación de longitud de las barras no posee incertidumbre porque está calculada a partir de la longitud de onda del láser (el cual se tomó como dato teórico) y el número de mínimos.