

Experimentos con un sensor de efecto Hall



**Javier I. Atorino¹, Luciano P. Bortolín¹, Ezequiel Rodríguez¹,
Rubén O. Farías¹ y Eduardo E. Rodríguez^{1,2}**

¹*Departamento de Física, Facultad de Ingeniería y Ciencias Exactas y Naturales,
Universidad Favaloro, Av. Belgrano 1723, C1093AAR, Ciudad Autónoma de Buenos
Aires, Argentina*

²*Instituto de Industria, Universidad Nacional de General Sarmiento,
Juan M. Gutiérrez 1150, CP B1613GSV, Los Polvorines, Buenos Aires, Argentina*

E-mail: erodrigu@ungs.edu.ar

(Recibido el 17 de Junio de 2009; aceptado el 31 de Agosto de 2009)

Resumen

Presentamos algunos proyectos experimentales que pueden realizarse usando un sensor de efecto Hall. Describimos los detalles constructivos del dispositivo experimental, su prueba y calibración. Con el sensor analizamos la dependencia espacial del campo magnético de espiras y comparamos los resultados con los que se calculan con la ley de Biot-Savart. También usamos el sensor para obtener experimentalmente una medida de la integral de línea del campo magnético a lo largo de un camino cerrado, y comparamos los valores medidos con la formulación de la ley de Ampere. Este estudio puede hacerse tanto para campos producidos por corrientes de conducción (caso de bobinas) como de corrientes de magnetización (caso de un imán permanente). Los experimentos con un imán permanente requieren del modelado del imán y ayudan a comprender el concepto de corriente de magnetización. Todos estos experimentos pueden ser realizados con elementos disponibles en un laboratorio de enseñanza y a un costo mínimo.

Palabras clave: Efecto Hall, Leyes de Ampere y Biot-Savart, corriente de magnetización

Abstract

We report several experimental projects that can be made by using a Hall probe. We describe details of the construction of the experimental device, testing and calibration. By using the sensor we measure the spatial dependence of the magnetic field produced by coils and the results are compared with those provided by the Biot-Savart law. We also use the Hall probe to experimentally obtain a measure of the line integral of the magnetic field along a closed path and the results are compared with that predicted by the formulation of the Ampere law. This study can be made both for magnetic fields produced by conduction currents (with coils) and magnetization currents (case of a permanent magnet). The experiments with the permanent magnet require modeling and help to understand the concept of the magnetization current. All these experiments can be performed in the basic laboratory with available equipment and at a minimum cost.

Keywords: Hall effect, Biot-Savart and Ampere laws, magnetization current

PACS: 01.50.Pa, 41.20.Gz, 07.55.Ge.

ISSN 1870-9095

I. INTRODUCCIÓN

El efecto Hall fue descubierto por Edwin H. Hall en 1879 mientras cursaba el último año en la universidad. [1] Este efecto consiste en la aparición de un campo eléctrico transversal al sentido de la corriente que circula por una muestra conductora cuando ésta se encuentra en un campo magnético. Los experimentos de Hall mostraron que los portadores de cargas eran partículas cargadas negativamente, hecho de gran relevancia en su época ya que los electrones no serían descubiertos hasta más de diez años después. Un experimento Hall sirve hoy en día para determinar el signo de los portadores de cargas de los distintos materiales.

Un sensor de efecto Hall se vale del efecto Hall para la medición de campos magnéticos o corrientes. Si por un sensor Hall circula corriente y se lo coloca en un campo magnético, aparece un voltaje proporcional al producto entre la corriente y la intensidad de la componente normal del campo magnético respecto del sensor. Si se conoce el valor de la corriente, se puede calcular la intensidad del campo magnético. A la vez, si se crea un campo magnético por medio de una corriente que circula por una bobina o un conductor, se puede practicar el experimento inverso de la determinación de la corriente mediante la medición del campo magnético con el sensor.

Este trabajo tiene como objetivo mostrar algunos experimentos que pueden llevarse a cabo en un laboratorio de enseñanza universitario en el marco de un curso de electromagnetismo. En particular, mostramos posibilidades

de trabajo en torno al estudio de las leyes de Biot-Savart y Ampere aplicadas a bobinas y a un imán permanente. Asimismo, analizamos el rol de las corrientes de magnetización para definir el campo magnético de una muestra magnetizada.

II. EL SENSOR DE EFECTO HALL

Para construir un magnetómetro puede usarse un sensor de efecto Hall comercial. En nuestro caso usamos el sensor UGN3503U, de respuesta de voltaje lineal para campos magnéticos $B < 900$ G [2]. El sensor utilizado tiene un costo no mayor que \$2 US, lo que evita el primer obstáculo a la hora de planear estos experimentos, cual es el costo del dispositivo específico necesario.

De acuerdo con información que provee el fabricante, un sensor de este tipo tiene una sensibilidad de 1.30 mV/G cuando se lo alimenta con una tensión continua de $V_{CC} = 5$ V y opera a la temperatura de 25 °C. El sensor posee una cara rotulada especialmente, que es la superficie que debe ubicarse perpendicularmente a la dirección del campo magnético que quiere medirse. Un dato a tener en cuenta es que cuando el campo magnético es nulo no lo es el voltaje de salida. El valor nominal del voltaje a campo nulo es la mitad de V_{CC} .

El armado del dispositivo de medición es sencillo. En primer lugar es necesario montar al sensor firmemente a una varilla no magnética (de madera, en nuestro caso) para poder manipularlo fácilmente y con precisión. El segundo paso consiste en el armado del circuito (Figura 1). Para esto ha de conectarse el borne V_{CC} del sensor a una fuente de alimentación regulada de 5.00 V respecto de masa, conectando al mismo tiempo el borne GND a masa. Para medir el voltaje de salida se conecta un voltímetro que mide la diferencia de potencial entre V_{OUT} y GND (el voltaje de salida del sensor se mide respecto de masa). En nuestro caso usamos un voltímetro digital de 3½ dígitos, con apreciación de 1 mV.

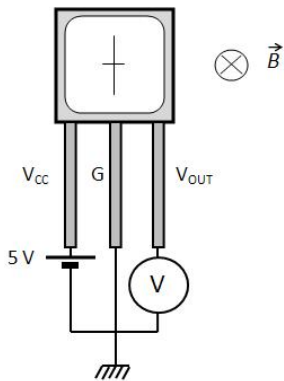


FIGURA 1. Circuito eléctrico del dispositivo. Conexión de la sonda con el voltímetro y la fuente de tensión continua.

Para probar la linealidad del sensor especificada por el fabricante debe medirse V_{OUT} para diferentes intensidades de campo magnético. Para ello puede procederse a medir V_{OUT} ubicando al sensor en el centro de un par de bobinas

de Helmholtz, donde el campo magnético generado por la corriente que circula por las bobinas es aproximadamente homogéneo. El campo magnético en el centro del par está dado por

$$B_z = \mu_0 \frac{8}{\sqrt{125}} \frac{NI}{R}. \quad (1)$$

En nuestros experimentos usamos dos bobinas de $N = 300$ vueltas y radio medio $R = 8.5$ cm, con sus centros separados una distancia igual al radio. La cara plana del sensor tiene que ubicarse perpendicularmente al eje de simetría del par de Helmholtz con el fin de medir el campo magnético, que está en la dirección del eje de simetría. La corriente I por las bobinas se mide con un amperímetro conectado en serie con las bobinas.

El procedimiento de verificación consiste en graficar V_{OUT} para distintos valores de la corriente. En la Figura 2 se observa una relación lineal entre la corriente que circula por las bobinas y el voltaje de salida del sensor, lo que implica, por la ecuación (1), una relación lineal entre el voltaje de salida y el campo magnético aplicado. También se observa que para $I = 0$, $V_{OUT} \neq 0$, siendo $V_{OUT} = 2.551$ V $\cong \frac{1}{2} V_{CC}$.

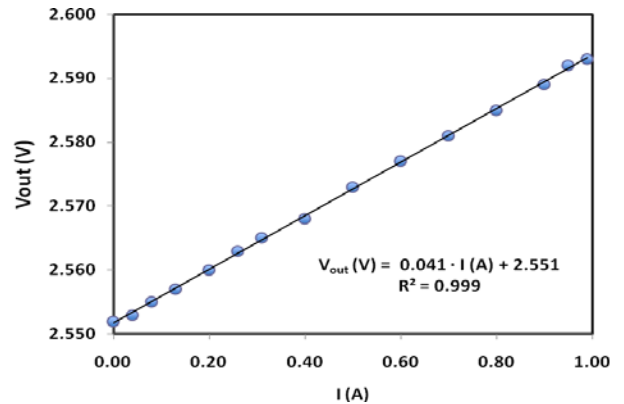


FIGURA 2. V_{OUT} en función de la corriente que circula en las bobinas.

El próximo paso es la calibración del dispositivo. Para esto utilizamos los mismos datos de la Figura 2 para calcular el valor del campo magnético a través de la ecuación (1). Utilizando el método de cuadrados mínimos calculamos la pendiente de la recta que mejor ajusta a los datos, pero esta vez invirtiendo la dependencia funcional, es decir, considerando el campo magnético como función del voltaje Hall. Para el sensor usado obtuvimos un coeficiente de sensibilidad $S = (0,0758 \pm 0,0004)$ T/V y en ausencia de campo magnético el voltaje de salida es aproximadamente la mitad de V_{CC} , observado en la Figura 2. Es por esto que para obtener el valor del campo magnético con el dispositivo, debemos restarle $V_{OUT}(B = 0)$ al valor de V_{OUT} medido y luego multiplicar el resultado por el coeficiente de sensibilidad S , es decir:

$$B(T) = [V_{OUT} - V_{OUT}(0)] \cdot S. \quad (2)$$

La calibración muestra que la limitación del dispositivo está dada por la apreciación del voltímetro. Con un voltímetro de 3½ dígitos, puede medirse variaciones del campo magnético del orden de 0.75 G, lo que es suficiente para una gran variedad de experimentos.

III. ESTUDIO DE UN PAR DE HELMHOLTZ

Un experimento apto para utilizar y probar el dispositivo consiste en medir el campo magnético a lo largo del eje de simetría de un par de bobinas de Helmholtz. Para esto utilizamos un metro de madera levemente desplazado del eje de simetría de las bobinas, sobre el que podemos apoyar y desplazar el sensor (el centro del sensor se desplaza muy aproximadamente sobre el eje) y medir su posición con respecto al centro del par de bobinas. Tomamos mediciones a intervalos de 1.0 cm, midiendo el campo a lo largo del eje de simetría, pasando desde un lado del par de bobinas hasta el otro. El esquema del experimento se muestra en la Figura 3.

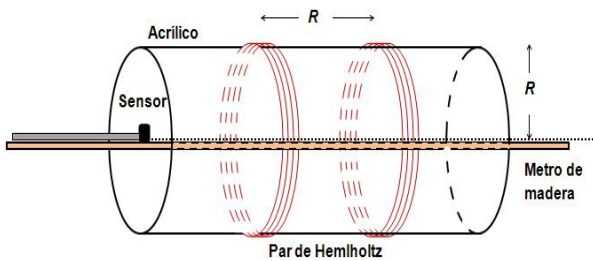


FIGURA 3. Medición del campo magnético axial de un par de Helmholtz, compuesto por dos bobinas planas idénticas separadas una distancia igual a sus radios. El sensor se desplaza sobre una regla de madera a lo largo del eje de simetría del conjunto de bobinas.

Para analizar los datos adquiridos, éstos deben compararse con el campo magnético producido por el par de bobinas a lo largo del eje de simetría. La ley de Biot-Savart [3, 4] permite calcular el campo producido por cada bobina. El campo resultante es la superposición de los campos magnéticos independientes generados por cada bobina, que queda representado por

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

Los resultados se muestran en la Figura 4 cuando la corriente que circula por las bobinas es 1.00 A. Se observa también que los valores calculados con la ecuación (3) se ajustan bien a los datos medidos. Observamos que el campo magnético es prácticamente constante en el centro del par de Helmholtz (característica saliente del par de bobinas, lo que fue usado para la calibración del sensor).

III. ESTUDIO DE LA LEY DE AMPERE

Otro experimento apropiado para realizar con el sensor es el estudio de la ley de Ampere. La ley de Ampere relaciona un campo magnético estático con la causa que la produce, es decir, con las corrientes presentes. Para el caso en que las únicas fuentes de campo son corrientes de conducción, la ley establece que la integral de línea del campo magnético B a lo largo de un trayecto cerrado es igual al producto de la permeabilidad μ_0 por la corriente de conducción neta I_{enc} a través del área encerrada por el trayecto:

$$\oint B \cdot dl = \mu_0 I_{enc} \quad (4)$$

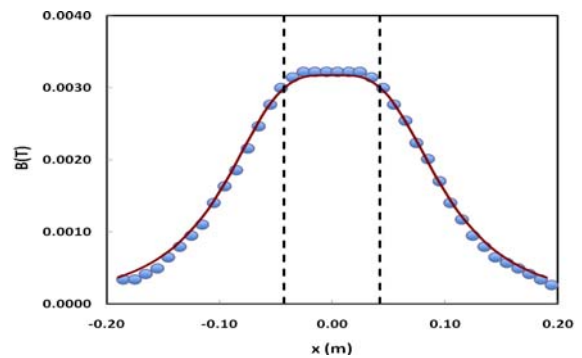


FIGURA 4. Campo magnético sobre eje del par de Helmholtz. Datos experimentales y ajuste teórico. Las líneas punteadas indican la posición de las bobinas.

Un experimento relevante consiste en medir el campo magnético generado por una serie de espiras a lo largo de una curva que encierre a las mismas. La curva debe pasar por el interior de las espiras y dar la vuelta por fuera, de manera que la corriente neta encerrada tenga un valor distinto de cero. Para esto, montamos sobre un tubo de acrílico una serie de espiras (Figura 5). El tubo queda colocado en la parte calada de una base de madera, con su eje de simetría principal al nivel de la superficie; es decir, la mitad del bobinado queda por arriba y la otra mitad, por debajo de la superficie. Sobre la base dibujamos la curva a recorrer, elegida en forma rectangular para mayor comodidad a la hora de recorrerla mientras el sensor se va ubicando en distintos puntos donde se va a medir la intensidad del campo magnético.

El cilindro de espiras en serie suma un total 1400 vueltas. La corriente circula en el mismo sentido en todas las espiras, por lo que todas generan campo magnético en el mismo sentido a lo largo del eje de simetría. Una vez establecida una corriente de 3.00×10^{-1} A por las espiras en serie, medimos el campo magnético recorriendo la curva a intervalos fijos de longitud $\Delta l = 1.0$ cm, ubicando el sensor sobre la curva con la cara de referencia perpendicular a la dirección de la curva.

Para analizar los datos, planteamos una sumatoria como aproximación de la integral de línea de la ecuación (4):

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} \cong \sum \vec{B} \cdot \Delta \vec{l} = \sum B \Delta l \cos(\theta), \quad (5)$$

donde θ es el ángulo entre B y el elemento de longitud sobre el trayecto de integración.

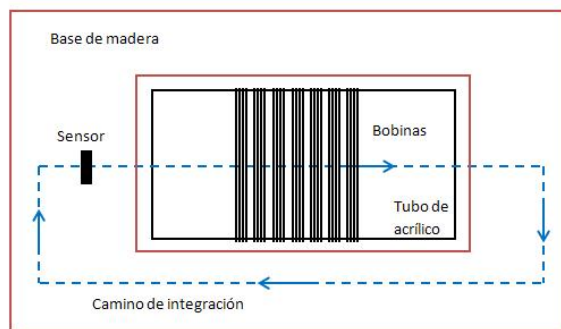


FIGURA 5. Esquema del experimento para estudiar la ley de Ampere. Un conjunto de bobinas cercanas son la fuente del campo magnético.

Notamos que la componente del campo a lo largo de la línea, $B \cdot \cos(\theta)$, es justamente la componente del campo que el sensor Hall mide. Con los datos medidos obtenemos el resultado de

$$\sum \vec{B} \cdot \Delta \vec{l} = (5.6 \pm 0.5) \times 10^{-4} \text{ T} \cdot \text{m}.$$

Para comparar este resultado con lo que predice la ley de Ampere, calculamos el miembro derecho de la ecuación (4) en donde $I_{enc} = N \cdot I$, donde I es la corriente que circula por las N espiras conectadas en serie, lo que resulta:

$$\mu_0 I_{enc} = (5.3 \pm 0.1) \times 10^{-4} \text{ T} \cdot \text{m}.$$

Se observa que los valores de los dos miembros de la ley de Ampere medidos independientemente coinciden dentro de la resolución experimental, por tanto concluimos que estos resultados experimentales verifican a la ley de Ampere.

IV. ESTUDIO DE UN IMÁN PERMANENTE

Otro experimento que puede efectuarse es el análisis del campo magnético producido por un imán permanente en forma de disco con un agujero en su centro, a lo largo de su eje principal de simetría. El dispositivo experimental es similar al utilizado para medir el campo a lo largo del eje principal de simetría de un par de Helmholtz, con la diferencia de que en vez del par ubicamos al imán permanente en el centro. Usamos un imán cerámico de diámetro exterior $d_e = 8.5$ cm y espesor $t = 1.4$ cm, con un agujero de diámetro $d_i = 3.3$ cm.

En nuestros experimentos tomamos mediciones a intervalos de 1 mm, midiendo el campo magnético a lo largo del eje de simetría, desde el centro del imán hasta una distancia donde el sensor de efecto Hall indicaba,

dentro de su resolución, campo magnético nulo. El intervalo de 1 mm elegido es necesario dado los grandes cambios en el campo magnético del imán en su cercanía (Figura 6).

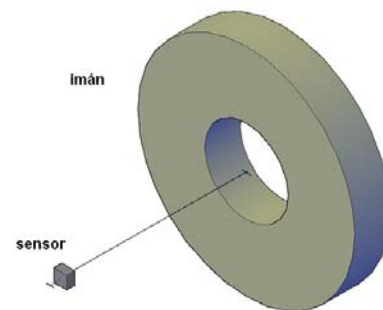


FIGURA 6. Esquema del experimento para estudiar la dependencia espacial del campo magnético de un imán permanente sobre el eje de simetría.

Para analizar los datos obtenidos necesitamos efectuar una modelización del imán. El modelo que proponemos supone la existencia de corrientes macroscópicas de magnetización, que son el resultado de la suma de las corrientes microscópicas del imán (Figura 7). [5] Modelamos entonces al imán con dos espiras circulares de corriente. Una de las espiras tiene un radio igual al radio externo R_e del imán y por ella circula una corriente I_e igual a la corriente de magnetización que fluye por la superficie externa. La segunda espira, de radio igual al radio R_i del agujero, lleva una corriente I_i igual a la corriente de magnetización en el perímetro del agujero, y está en sentido opuesto al de la corriente externa.

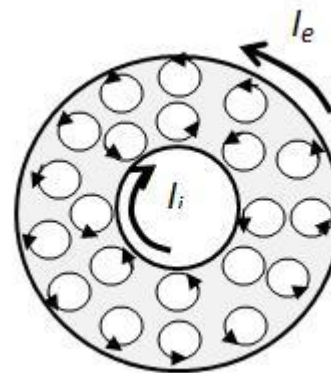


FIGURA 7. Corrientes de magnetización en una muestra magnetizada.

Por lo tanto, el campo magnético del imán queda representado por la superposición de los campos que producen estas dos corrientes I_e y I_i que circulan en sentidos opuestos en circuitos circulares de radios R_e y R_i , respectivamente. A una distancia x del centro del imán sobre el eje de simetría, el campo magnético puede representarse con

$$B(x) = \frac{\mu_0 I_e R_e^2}{2(R_e^2 + x^2)^{3/2}} - \frac{\mu_0 I_i R_i^2}{2(R_i^2 + x^2)^{3/2}} \quad (6)$$

La Figura 8 muestra el campo magnético medido con el sensor de efecto Hall. El cambio de sentido del campo magnético a lo largo del eje de simetría es consecuencia de la “competencia” de los efectos de las dos corrientes que circulan en sentidos opuestos.

Para encontrar los valores de las corrientes I_e y I_i que modelan al imán con agujero realizamos un ajuste de la ecuación (6) a los datos experimentales, el que se muestra con una línea en la Figura 8. También se muestra el gráfico de cada término de (6), correspondientes al campo que genera cada corriente periférica. Para el imán usado el mejor ajuste se obtiene con los valores:

$$I_e = (2880 \pm 10) \text{ A} \quad \text{y} \quad I_i = (2750 \pm 10) \text{ A}.$$

Los altos valores de I_e y I_i obtenidos dan idea de la magnitud de las corrientes de magnetización presentes en un imán permanente típico.

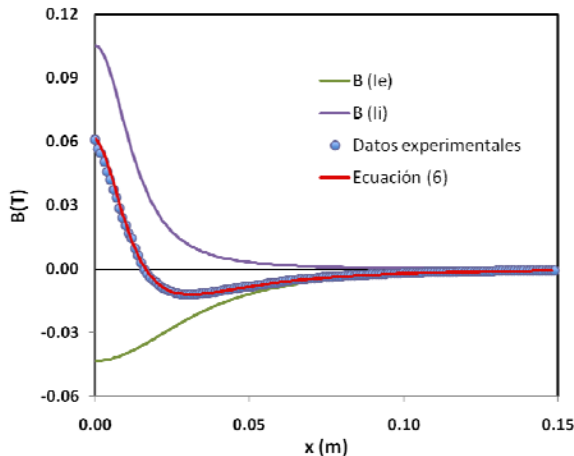


FIGURA 8. Campo magnético sobre el eje del imán. Datos experimentales y ajuste teórico. Se indican los campos $B(I_e)$ y $B(I_i)$ producidos por cada corriente de magnetización, de acuerdo con el modelo de la ecuación (6).

V. CORRIENTES DE MAGNETIZACIÓN Y LEY DE AMPERE GENERALIZADA

A fin de incrementar la comprensión de la existencia y el rol de las corrientes de magnetización en el imán, puede procederse de manera análoga a lo analizado en el caso de la serie de espiras. En este caso se busca analizar la validez de la ley de Ampere generalizada: [3]

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I_M \quad (7)$$

Experimentos con un sensor de efecto Hall

donde I_M es la corriente de magnetización encerrada por el circuito de integración, cuando sólo está presente una corriente de este tipo.

Para usar la aproximación (5) tenemos que definir una curva cerrada. En este caso –y sólo por razones prácticas– realizamos la siguiente aproximación: como el campo magnético es prácticamente nulo para distancias mayores a las medidas, consideramos una curva con un tramo sobre el eje de simetría y que se cierra muy lejos del imán, de tal forma que los valores de campo significativos son sólo los que medimos a lo largo del eje. Por otro lado, como el campo axial es simétrico con respecto al centro del imán, simplemente multiplicamos por dos la sumatoria que realizamos con los datos disponibles.

En este caso: $\Delta l = 1.0 \text{ mm}$, y el resultado que obtuvimos es

$$\sum \vec{B} \cdot \vec{\Delta l} = (1.5 \pm 0.1) \times 10^{-4} \text{ T}\cdot\text{m}.$$

Este valor debe compararse con el producto del segundo miembro de la ecuación (7), donde en este caso la corriente de magnetización I_M encerrada es la suma de las corrientes I_{ext} y I_{int} que circulan a través de la curva cerrada. Considerando el sentido en que estas corrientes atraviesan la curva, resulta:

$$I_M = I_{ext} - |I_{int}| = (130 \pm 12) \text{ A}.$$

De esta manera:

$$\mu_0 I_M = (1.6 \pm 0.1) \times 10^{-4} \text{ T}\cdot\text{m}.$$

Como vemos, los valores de la circulación y de $\mu_0 I_M$ coinciden, verificando la ley de Ampere nuevamente y validando el modelado del imán con agujero con dos corrientes de magnetización.

IV. CONCLUSIONES

En síntesis, en este trabajo construimos y calibramos un magnetómetro basado en un sensor de efecto Hall, capaz de medir campo magnético con gran precisión. Con el sensor estudiamos experimentalmente una ley fundamental del electromagnetismo como lo es la Ley de Ampere, tanto para cuando las corrientes son de conducción (bobinas) como de magnetización (imán). Modelamos también un imán permanente con un agujero con un método efectivo, obteniendo una buena correlación entre el modelo y los resultados experimentales. Todo esto nos permite concluir que el construir un medidor de campo magnético con un sensor de efecto Hall resulta en una actividad provechosa dentro de un curso universitario de física experimental.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Fundación Universitaria Dr. René G. Favaloro por apoyo financiero. Este trabajo fue realizado

Javier I. Atorino et al.

con apoyo del proyecto de investigación UNGS-IDEI 30/4019.

REFERENCIAS

[1] Hall, E. H., *On a new action of the magnet on electric currents*, American Journal of Mathematics **2**, 287 (1879). El trabajo puede leerse en el sitio de Internet <http://www.stenomuseet.dk/skoletj/elmag/kilde9.html>. Consultado el 15 de junio de 2009.

[2] La hoja de datos del sensor UGN3503U puede obtenerse en el sitio de Internet <http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/allegromicrosystems/3503.pdf>. Consultado al 12 de junio de 2009.

[3] Halliday, D. y Resnick, R., *Física, Parte II* (Compañía Editorial Continental, S. A., México, 1970).

[4] Sears, F. et al., *Física universitaria, vol. II* (Pearson Educación, México, undécima edición, 1999).

[5] Feynman, R., Leighton, R. B. and Sands, M., *The Feynman Lectures on Physics* (Fondo Educativo Interamericano, Bogotá, 1972).