



Efecto Hall

Alcérreca Pavón Yamil Alexis
Laboratorio de Física Contemporánea I,
Facultad de Ciencias, 2019-1
Universidad Nacional Autónoma de México

El efecto Hall es un principio físico mediante el cual se induce una diferencia de potencial en un conductor sometido a un campo magnético. Usando un electroimán y una barra conductora, se demuestra experimentalmente la ecuación que rige a este fenómeno. Además, utilizando un imán de ferrita se estudia la relación entre un campo magnético y la distancia y, en conjunto con el electroimán, se mapean los efectos que tienen los bordes de un sistema magnético no infinito. **Bien!**

Objetivos:

1. Encontrar la relación entre el voltaje Hall y el campo magnético.
2. Encontrar una relación lineal entre el voltaje Hall y la corriente de control aplicada a un electroimán.
3. Encontrar la relación entre el voltaje Hall con el ángulo de inclinación respecto a un campo magnético.
4. Comprobar que el Voltaje Hall sirve para medir distancias a un campo magnético constante.
5. Con ayuda del efecto Hall, mapear un Campo Magnético, incluyendo los efectos de borde.

1. INTRODUCCIÓN

Cuando se tiene una corriente eléctrica, para fines teóricos siempre se asume que los portadores de carga tienen signo positivo. Dependiendo del sistema en cuestión, esto puede ser o no cierto. La física del estado sólido establece la existencia de dos tipos diferentes de portadores de carga: los electrones y los hoyos que dejan estos atrás al, por ejemplo, llenar la capa de valencia de una impureza. Los electrones tienen signo negativo, y los hoyos positivo. El saber los signos de los portadores hace posible, entonces, conocer ciertas propiedades de un sistema, ya que de esa manera se sabrá cuáles son estos portadores.

En 1879 el físico estadounidense Edwin Hall diseñó, en la Universidad de Harvard, un experimento que permite determinar el signo de los transportadores de carga en un conductor. Su experimento se basa en un principio físico nombrado el efecto Hall en su honor. El efecto Hall establece que, al introducir una corriente eléctrica en un campo magnético, se creará una diferencia de potencial entre los extremos del material paralelos al desplazamiento de las cargas. Esto se debe a que los portadores de carga sentirán una fuerza

potencial, se puede saber de qué signo son los portadores de carga al observar el signo del potencial.

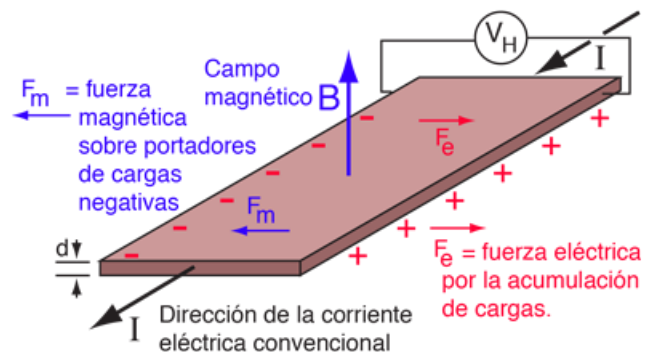


Fig. 1. Diagrama del efecto Hall. Imagen tomada de <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/magnetic/Hall.html>

Bien!

La derivación teórica del efecto Hall es sencilla, requiriendo únicamente mecánica clásica. Sea un material conductor plano posicionado perpendicular a un campo magnético, como se muestra en la figura 1, a través del conductor surge una corriente eléctrica, cuyos portadores sentirán la fuerza (1), acumulándose en uno de los extremos del material. Esto genera un campo eléctrico, el cual contrarrestará al magnético hasta llegar al equilibrio, lo cual ocurrirá cuando

$$\vec{F}_{elec} = \vec{F}_{magn} \quad (2)$$

usa \noindent

$$\vec{F} = q \vec{v} \times \vec{B} \quad (1)$$

donde q es la carga, \vec{v} la velocidad de los portadores, y \vec{B} el campo magnético. Esta fuerza ocasionará que los portadores se desvíen de su trayectoria en dirección perpendicular a su movimiento, juntándose en uno u otro extremo del material, dependiendo de su signo, y dejando una carencia de cargas de su signo del otro lado. Midiendo la diferencia de

o bien

$$qE = qv_d B \quad (3)$$

donde se ha escrito todo en forma escalar. A v_d se le conoce como velocidad de deriva y está dada por

$$v_d = \frac{I}{qNA} \quad (4)$$

donde I es la corriente, q la carga, N el número de portadores de carga, y A el área. Por otro lado, en un conductor plano como el de la figura 1, el potencial es

$$\Phi = Ed \quad (5)$$

donde d es la distancia, siendo esta en este caso el ancho del conductor. Despejando entonces E de la ecuación 3 y multiplicando por d

$$\Phi = Ed = v_d B d \quad (6)$$

Sustituyendo (4) considerando que el área es $A = td$, con t el espesor del conductor,

$$\Phi = \frac{IB}{Nqt} = R_H IB \quad (7)$$

o bien, si \vec{v} y \vec{B} no son perpendiculares entre sí,

$$\Phi = R_H IB \sin(\theta) \quad (8)$$

donde θ es el ángulo entre \vec{v} y \vec{B} , y a $R_H = \frac{1}{Nq}$ se le conoce como el coeficiente de Hall. De esta manera es entonces posible medir un campo magnético, o bien, conocer el signo de los portadores de carga al observar el signo de Φ .

Para terminar, se puede mencionar una aplicación médica que se le puede dar al efecto Hall. Mediante un aparato llamado flujómetro electromagnético, es posible inducir el efecto Hall en un vaso sanguíneo, ya que la sangre carga iones que actúan como portadores de carga. Al hacer esto, se puede obtener la velocidad de deriva mediante (6), o bien, se puede incluso saber si la arteria tiene un bloqueo, utilizando el hecho de que un fluido cambia su velocidad al cambiar el área por la que fluye.

Aquí falta un párrafo en donde se explique muy brevemente, qué es lo que se estudiará en este trabajo. Aun cuando se haya dicho en el abstract.

También se puede dar una estructura por secciones del trabajo.

2. DESARROLLO

El material ocupado fue el siguiente

- Caja de control
- Electroimán

- 2 multímetros modelo MUL-600
- Multímetro modelo MUL-500
- Punta Hall
- Imán permanente de ferrita
- Fuente de voltaje y de corriente
- Soporte
- Nuez graduada
- 2 nueces sin graduar
- Flexómetro
- Goma de borrar

Se realizaron en total 5 experimentos diferentes:

1. El montaje de este experimento fue el siguiente: se conectó la fuente de corriente a uno de los multímetros MUL-600, el cual a su vez se conectó al electroimán para producir un campo magnético. La corriente que alimentaba al electroimán se midió con el multímetro MUL-600 en Amperes (A) porque los medidores de la misma fuente no funcionaban bien.

A su vez se conectó la caja de control a la punta Hall, la cual se colocó en el centro del electroimán para medir el voltaje Hall con un multímetro MUL-600 en milivolts (mV), conectado a la caja de control. La punta Hall se mantuvo en su lugar mediante un soporte y una nuez graduada. Por último se conectó el multímetro MUL 500 a la caja de control para medir la corriente que la caja alimentaría a la punta Hall en miliAmperes (mA). EL montaje experimental se muestra en la Figura 2.

En este experimento se fijó la corriente de control I_C en 3 valores distintos. Se midió el voltaje Hall V_H en la barra para 6 valores de la corriente de alimentación del electroimán I_A , estos últimos siendo tomados aproximadamente cada $0.20 A$. Para cada valor de I_C , se midieron I_A y V_H tres veces. Esto último se logró al colocar a I_A en un valor arbitrario después de cada medición. De esta misma manera se obtuvieron también las mediciones repetidas en los demás experimentos.

2. El montaje de este experimento fue igual que el del experimento 1, y el procedimiento fue muy parecido. Aquí, se fijó la corriente de alimentación I_A en 5 valores distintos. Para cada uno, se midió el voltaje Hall V_H en la barra para 6 valores de la corriente de control I_C , estos últimos siendo tomados aproximadamente cada $8 mA$. Para cada valor de I_A , se midieron I_C y V_H tres veces.

3. El montaje fue nuevamente el mismo. Se mantuvieron las corrientes de alimentación y de control fijas, y se rotó a la punta Hall dentro del electroimán. Esto fue posible gracias a que la nuez le permitía girar y, como estaba graduada, medir el ángulo de inclinación de la punta. Cada 15° de inclinación, se tomaron tres mediciones del voltaje Hall, y esto se repitió desde el ángulo 0° hasta 360° .

4. El montaje para este experimento fue el siguiente: se utilizó un flexómetro cuya punta se pegó a un imán en barra para fijarlo de forma perpendicular a este y que quedara así horizontal, y la punta Hall se movió a lo largo del flexómetro, manteniéndola en posición vertical. El flexómetro se colocó sobre nueces para evitar que la cinta presentara curvatura. El montaje se muestra en la figura 3. La goma de borrar se colocó para evitar que el flexómetro se moviera. Empezando en la posición $X = 0\text{cm}$ y terminando en $X = 30\text{cm}$, cada tres centímetros se tomaron 5 mediciones del voltaje Hall.

Para la segunda parte de este experimento se colocó al flexómetro a lo largo del plano del imán, con el cero en uno de los bordes (figura 4). En esta ocasión no fue necesario colocar la goma ya que la punta del flexómetro se pudo encajar en uno de los agujeros de la nuez. En la primera parte no se pudo hacer esto porque la punta debía ir pegada al imán, ya que ahí se definió el cero de la distancia. Las mediciones se realizaron de manera idéntica a la primera parte, pero de dos cm en dos cm de $X = 0\text{cm}$ a $X = 16\text{cm}$.

5. El montaje fue nuevamente el mismo que en los experimentos 1-3. En esta ocasión, se mantuvieron fijas I_A e I_C y se movió la barra Hall perpendicular al campo magnético del electroimán (i.e. hacia 'adentro' y 'afuera' de este). Una de las placas del electroimán estaba graduada y podía medir la distancia X a la que penetraba la punta, con el cero en el centro de la placa. Cada 1cm se tomaron 5 mediciones del voltaje Hall.



Fig. 2. Montaje experimental para los experimentos 1, 2, 3 y 5

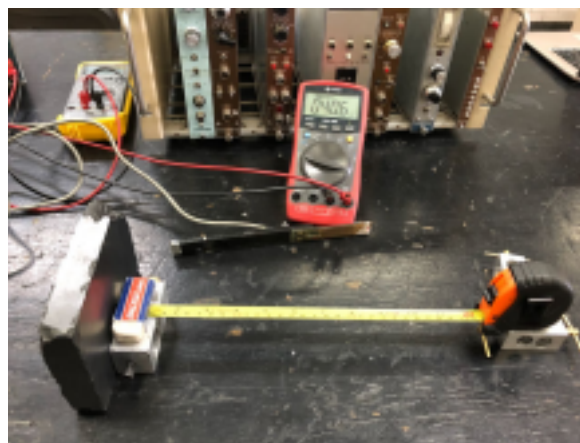


Fig. 3. Montaje experimental para la primera parte del experimento 4

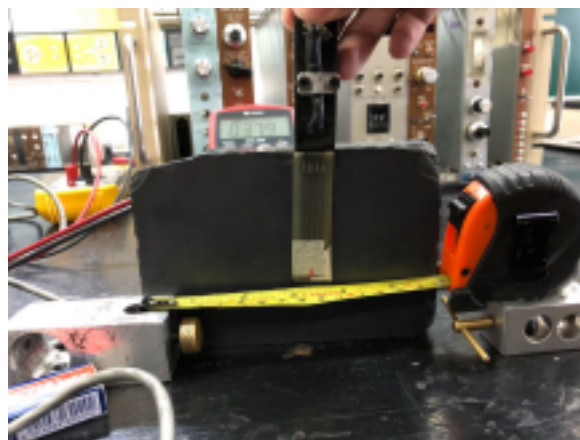


Fig. 4. Montaje experimental para la segunda parte del experimento 4

En todos los experimentos que usaron el electroimán se tuvo cuidado de que la punta Hall estuviera en el punto medio entre las dos placas de este y en el punto medio ($X = 0$) de estas para todos menos el 5.

3. RESULTADOS

A continuación se muestran las tablas para cada uno de los experimentos. Las tablas muestran los promedios de todas las mediciones tomadas, denotados mediante una línea horizontal sobre el nombre de la variable. Las cantidades que se mantuvieron constantes en cada experimento solo se midieron una vez, y por tanto no llevan la barra horizontal. Para los promedios se tomó a la desviación estándar como incertidumbre, sumada a la incertidumbre intrínseca a los aparatos de medición. Por otro lado, la incertidumbre de los valores constantes es solamente la incertidumbre de los aparatos. Las incertidumbres reportadas en los manuales de los multímetros son: $0.8\% + 3$

para el voltaje en mV del MUL-600 (V_H), $1.2\% + 3$ para la corriente en mA del MUL-500 (I_C), y $2\% \pm 10^{-8}$ para la corriente directa en A del MUL-600 (I_A). Para este último se desprecia el 10^{-8} en caso de ser este de varias órdenes de magnitud (3 o más) que el resto de la expresión. En las tablas, un Δ frente a la variable denota que es la incertidumbre.

1. Experimento 1

Se reportan las corrientes de alimentación $\overline{I_A}$ y los voltajes Hall correspondientes $\overline{V_H}$ para tres valores diferentes de la corriente de control I_C .

$\overline{I_A}$ (A)	$\Delta\overline{I_A}$ (A)	$\overline{V_H}$ (mV)	$\Delta\overline{V_H}$ (mV)
0	0	48.3	0
0.201	1.20×10^{-3}	52.9	5.74
0.406	6.00×10^{-4}	51.1	1.16×10^{-1}
0.605	1.50×10^{-3}	52.5	5.77×10^{-2}
0.799	3.80×10^{-3}	54.1	5.77×10^{-2}
10.002	6×10^{-4}	55.1	0

Tabla I. $I_C = 74.8 \pm 3.9 \text{ mA}$

$\overline{I_A}$ (A)	$\Delta\overline{I_A}$ (A)	$\overline{V_H}$ (mV)	$\Delta\overline{V_H}$ (mV)
0	0	32.1	3.2568
0.2	4.00×10^{-3}	33	3.32
0.4	9.50×10^{-3}	34	3.27
0.598	1.51×10^{-2}	35.1	3.34
0.802	1.86×10^{-2}	36.1	3.29
1.003	2.21×10^{-2}	37.2	3.30

Tabla II. $I_C = 49.9 \pm 3.6 \text{ mA}$

$\overline{I_A}$ (A)	$\Delta\overline{I_A}$ (A)	$\overline{V_H}$ (mV)	$\Delta\overline{V_H}$ (mV)
0	0	16.1	3.13
0.202	8.44×10^{-3}	16.5	3.19
0.401	9.22×10^{-3}	17	3.19
0.601	1.84×10^{-2}	17.6	3.14
0.8	2.17×10^{-2}	18.1	3.14

Tabla III. $I_C = 25 \pm 3.3 \text{ mA}$

2. Experimento 2

Se reportan las corrientes de control $\overline{I_C}$ y los voltajes Hall correspondientes $\overline{V_H}$ para cinco valores diferentes de la corriente de alimentación I_A .

$\overline{I_C}$ (A)	$\Delta\overline{I_C}$ (A)	$\overline{V_H}$ (mV)	$\Delta\overline{V_H}$ (mV)
8.5	3.10	5.5	3.04
16	3.19	10.4	3.14
32	3.50	20.8	3.27
48	3.81	31.2	3.40
64	3.83	41.6	3.39
80	4.41	52.1	3.72

Tabla IV. $I_A = 0.16 \pm 3.2 \times 10^{-3} \text{ A}$

$\overline{I_C}$ (A)	$\Delta\overline{I_C}$ (A)	$\overline{V_H}$ (mV)	$\Delta\overline{V_H}$ (mV)
8.5	3.10	5.6	3.04
16	3.19	10.7	3.09
32	3.38	21.3	3.17
48	3.58	32	3.26
64	3.77	42.7	3.40
80.1	4.64	53.5	3.92

Tabla V. $I_A = 0.321 \pm 6.42 \times 10^{-3} \text{ A}$

$\overline{I_C}$ (A)	$\Delta\overline{I_C}$ (A)	$\overline{V_H}$ (mV)	$\Delta\overline{V_H}$ (mV)
8.4	3.10	5.8	3.05
16	3.25	10.9	3.09
32.2	3.44	22	3.18
48	3.81	32.8	3.42
64	4.17	43.8	3.56
80.6	4.07	55.1	3.50

Tabla VI. $I_A = 0.482 \pm 9.64 \times 10^{-3} \text{ A}$

$\overline{I_C}$ (A)	$\Delta\overline{I_C}$ (A)	$\overline{V_H}$ (mV)	$\Delta\overline{V_H}$ (mV)
8.4	3.16	5.9	3.10
16	3.19	11.2	3.09
32	3.44	22.5	3.18
48	3.78	33.7	3.42
64.2	3.92	45	3.46
80.4	4.17	56.4	3.51

Tabla VII. $I_A = 0.64 \pm 1.28 \times 10^{-2} \text{ A}$

$\overline{I_C}$ (A)	$\Delta\overline{I_C}$ (A)	$\overline{V_H}$ (mV)	$\Delta\overline{V_H}$ (mV)
8.4	3.16	6	3.11
16	3.19	11.5	3.09
32	3.38	23	3.24
48.3	3.98	34.6	3.38
64.2	4.00	46.1	3.54
80.2	4.17	57.7	3.63

Tabla VIII. $I_A = 0.8 \pm 1.6 \times 10^{-2} \text{ A}$

En estos casos, donde las tablas son similares, basta con poner una tabla representativa y las demás se pueden poner en un anexo.

Entiendo que no hay mucho que decir sobre las tablas, pero siempre es bueno poner un pie de tabla un poco más extenso. Algunas revistas prefieren un encabezado de tabla a un pie, pero eso nomás para que lo sepas.

3. Experimento 3

Se reportan el ángulo de inclinación de la barra θ y el voltaje Hall correspondiente $\overline{V_H}$. La mínima escala de la nuez graduada con la que se midió θ es de 15° , por lo que todos los ángulos tienen una incertidumbre de 7.5° .

θ (grados) $\pm 7.5^\circ$	\overline{V}_H (mV)	$\Delta \overline{V}_H$ (mV)
0	40.3	3.32
15	41.2	3.33
30	42.3	3.34
45	43.1	3.34
60	43.8	3.41
75	44.2	3.35
90	44.3	3.35
105	44.2	3.41
120	43.7	3.41
135	43.1	3.34
150	42.2	3.34
165	41.3	3.33
180	40.3	3.38
195	39.4	3.42
210	38.6	3.37
225	37.9	3.36
240	37.3	3.30
255	36.9	3.30
270	36.8	3.29
285	36.9	3.35
300	37.2	3.30
315	37.8	3.36
330	38.4	3.31
345	39.2	3.41
360	40.3	3.32

Tabla IX. $I_C = 64 \pm 7.6 \times 10^{-2} mA$, $I_A = 0.6 \pm 1.2 \times 10^{-2} A$

Lo mismo acá. Con una tabla representativa basta.
Si llenas un artículo de puras tablas, el lector se desvalancea.

Por otro lado, si alguna de estas gráficas se puede graficar (como es el caso en varias y que veo que pones en la sección de análisis), entonces basta con poner la gráfica. Y, de hecho, en una sola gráfica se pueden poner esas tablas que tienen parámetros similares (como lo hiciste). Así haces menos extenso el artículo y mucho más legible.

4. Experimento 4

MORALEJA: SI PUEDES GRAFICAR, NO PONGAS TABLA.

Se reportan la posición X de la barra, así como el voltaje Hall \overline{V}_H . Todas las mediciones de X tienen la misma incertidumbre de $0.05cm$ ya que la mínima escala del flexómetro usado es de $1mm$.

X (cm) $\pm 0.05cm$	\overline{V}_H (mV)	$\Delta \overline{V}_H$ (mV)
0	43.1	6.67
3	42.3	6.66
6	41.5	6.66
9	41.1	3.33
12	40.9	3.33
15	40.8	3.41
18	40.8	3.37
21	40.7	3.33
24	40.7	3.33
27	40.6	3.32
30	40.6	3.32

Tabla X. Valores obtenidos alejando la barra perpendicularmente del plano del imán, con X la distancia de separación entre los dos objetos (fig. 3). $I_C = 64 \pm 7.6 \times 10^{-2} mA$.

X (cm) $\pm 0.05cm$	\overline{V}_H (mV)	$\Delta \overline{V}_H$ (mV)
0	39.8	6.69
2	44.9	3.36
4	43.8	3.35
6	43.4	3.35
8	43.3	3.35
10	43.4	3.60
12	43.8	3.40
14	45.4	3.42
16	39.8	3.37

Tabla XI. Valores obtenidos moviendo la barra a lo largo del plano del imán, con X la posición de la barra tomando un borde del imán como el cero (fig. 4). $I_C = 64 \pm 7.6 \times 10^{-2} mA$.

5. Experimento 5

Se reportan la distancia de la barra Hall del centro del electroimán Y , donde $Y = 0$ está justo en el punto medio de este último, y el voltaje Hall correspondiente \overline{V}_H para corrientes de alimentación I_A y de control I_C constantes. La incertidumbre de Y es de $0.5cm$ ya que la mínima escala de la graduación del electroimán es de $1cm$

X (cm) $\pm 0.5cm$	\overline{V}_H (mV)	$\Delta \overline{V}_H$ (mV)
0	44.4	3.40
1	44.4	3.41
2	44.5	3.40
3	44.5	3.40
4	44.3	3.41
5	43.7	3.44

Tabla XII. $I_C = 64 \pm 7.6 \times 10^{-2} mA$, $I_A = 0.6 \pm 1.2 \times 10^{-2} A$

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

1. Experimento 1

En la Figura 5 se grafican los datos de las Tablas I-III con su respectivo ajuste lineal dado por las siguientes funciones:

$$\begin{aligned} f_1(x) &= (5.56316 \pm 1.606)x + (49.5397 \pm 0.9756) \\ f_2(x) &= (5.11476 \pm 0.07527)x + (32.0234 \pm 0.04565) \\ f_3(x) &= (2.56096 \pm 0.06495)x + (16.0349 \pm 0.03934) \end{aligned}$$

Todas las gráficas y sus respectivos ajustes fueron realizados con el software *gnuplot*.

Únicamente en el caso de que los valores de la Tabla sean fundamentales (como cuando calculas el valor de alguna(s) constantes), y aparte se vean mejor graficados, se ponen ambas cosas. De otra forma, como en corridas de mediciones similares (como acá) y cuando lo que importa es el comportamiento (si es lineal o algo así), mejor sólo la gráfica.

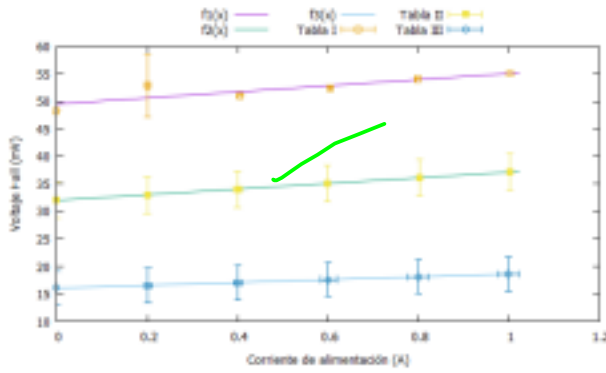


Fig. 5. Comportamiento del voltaje Hall en el experimento 1. La función $f_i(x)$ corresponde a la tabla i-ésima.

De la gráfica 1 se observa una relación lineal entre las variables I_A y V_H . Para cada valor de I_C se observan además dos diferencias entre las rectas. La primera es la ordenada al origen: al disminuir I_C , disminuye también esta ordenada. Nótese además que ninguna de estas ordenadas es cero. La razón de esto es la acción del campo magnético de la Tierra. En las tablas I a III se puede ver que, para $I_A = 0$, V_H tiene un valor mayor que cero, siendo esta la ordenada. El hecho de que disminuya el valor del voltaje en cero al disminuir la corriente I_C que alimenta a la punta Hall está en acuerdo con el comportamiento predicho por la ecuación (7), donde B es, en este caso, el campo magnético terrestre, al cual es V_H directamente proporcional.

La segunda diferencia entre rectas es su pendiente, la cual disminuye al disminuir la corriente I_C . Esto está nuevamente en acuerdo con (7), donde en este caso la constante es la corriente I , mientras que el campo magnético B varía. Se concluye entonces que existe una relación lineal entre el voltaje Hall y la corriente de alimentación, y por tanto el campo magnético del electroimán.

Nótese, sin embargo, que los valores de la tabla I se alejan más que los de las otras dos tablas de un comportamiento lineal; dos de los valores se alejan más allá de sus incertidumbres del ajuste lineal, y un tercer valor tiene una incertidumbre más grande de lo usual. Esto sin mencionar que el resto de los datos tienen incertidumbres más pequeñas que las de sus equivalentes en las demás tablas, y que las incertidumbres de la pendiente y la ordenada al origen son mayores en por lo menos una orden de magnitud. La razón exacta de estas anomalías se desconoce, pero como los datos de las tablas II y III sí se comportan como se esperaba, se atribuyen las fallas de la tabla I a errores humanos en el procedimiento experimental de esas medidas en particular.

2. Experimento 2

En la Figura 6 se grafican los datos de las Tablas IV-VIII con su respectivo ajuste lineal:

$$f_4(x) = (0.64938 \pm 0)x + (-0.000368274 \pm 0)$$

$$\begin{aligned} f_5(x) &= (0.68 \pm 0)x + (-0.18 \pm 0) \\ f_6(x) &= (0.671053 \pm 0)x + (0.163158 \pm 0) \\ f_7(x) &= (0.697368 \pm 0)x + (0.0421053 \pm 0) \\ f_8(x) &= (0.723684 \pm 0)x + (-0.0789474 \pm 0) \end{aligned}$$

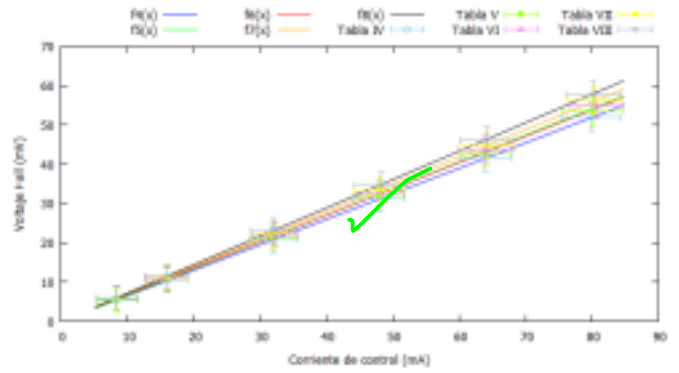


Fig. 6. Comportamiento del voltaje Hall en el experimento 2. La función $f_i(x)$ corresponde a la tabla i-ésima

De la gráfica 2 se observa un comportamiento similar al obtenido en el experimento 1, i.e. las pendientes incrementan al incrementar el valor de la corriente constante I_A , y se muestra una relación de proporcionalidad lineal entre las variables V_H y I_A . Sin embargo, aquí todas las rectas parecen converger en el origen, lo cual tienen sentido, ya que, si $I_C = 0$, entonces no hay corriente que pueda responder al campo magnético. Nótese además que estos datos son sumamente precisos; los ajustes a las rectas son exactos, con incertidumbres cero para la pendiente y la ordenada al origen. De los resultados de los experimentos 1 y 2 en conjunto se concluye entonces que el voltaje Hall está en relación de proporcionalidad directa con tanto I_C como I_A , pudiéndose escribir una relación de la forma exacta de la ecuación (7), sustituyendo B por I_A , siendo las dos directamente proporcionales entre sí.

EXPERIMENTO 1: Aquí faltó algo importante. En el manual venía cómo era la relación lineal (medio aproximada porque era una gráfica) entre B y la corriente I_A . Había que hacer este cambio, para obtener la ecuación de calibración entre V y B . Y, de hecho, de esta forma se podía calcular Nqt , con lo que sabrían de que material es.

También lo que se podía hacer era medir el cambio independientemente con un Gaussmetro y de esta manera hacer la calibración.

3. Experimento 3

En la siguiente figura se grafican los datos de la Tabla IX con su respectivo ajuste a una función armónica. Nótese que el argumento de la función seno está transformado de grados a radianes, debido a que *gnuplot* requiere que los argumentos se den en esas unidades.:

$$f_9(x) = (3.75374 \pm 0.03529) \sin\left(\frac{2\pi}{360}x\right) + (40.428 \pm 0.02445)$$

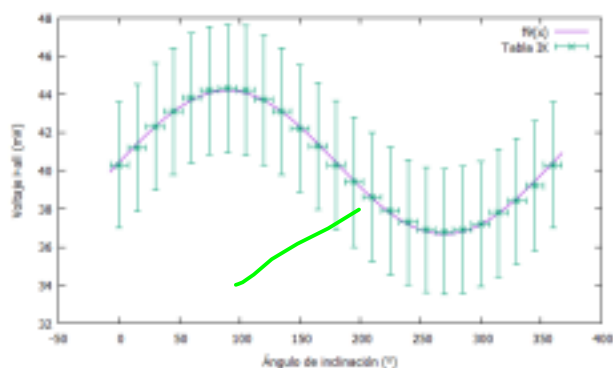


Fig. 7. Comportamiento del voltaje Hall en el experimento 3.

De la gráfica tres se concluye, entonces, que el voltaje Hall presenta comportamiento senoidal al girar la corriente respecto al campo magnético. La función seno obtenida se encuentra 'alzada' 40.428 ± 0.02445 unidades, lo cual corresponde al valor del voltaje Hall cuando la punta se encuentra perpendicular al campo del electroimán y únicamente siente los efectos del campo magnético de la Tierra. Si se quitara el campo terrestre, entonces se tendría un seno centrado en el eje de las abscisas. Se obtiene finalmente

$$V_H = k I_C I_A \sin(\theta) \quad (9)$$

Comparando con la ecuación (8), se observa que la constante k debe contener no solo al coeficiente Hall R_H , sino que además debe incluir las constantes que aparecen en la relación entre el campo magnético B y la corriente I_A , en este caso, como el campo magnético proviene de un electroimán, estas serían el número de vueltas del cable alrededor del núcleo ferromagnético y la permeabilidad de este último.

4. Experimento 4

En la Figura 8 se grafican los datos de la Tabla X con su respectivo ajuste a una función hiperbólica. No se ha considerado el primer dato de la tabla, donde $X = 0 \text{ cm}$, ya que ahí se tiene una singularidad en la función:

$$f_{10}(x) = \frac{(5.72438 \pm 0.1843)}{x} + (40.4411 \pm 0.02419)$$

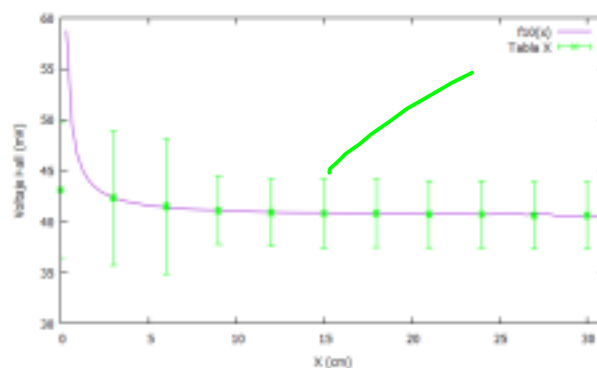


Fig. 8. Comportamiento del voltaje Hall en la parte 1 del experimento 4.

Se observa una relación de proporcionalidad inversa entre la distancia y el voltaje Hall, y por tanto (ya que $I_C = \text{cte}$) entre la distancia y el campo magnético. Este comportamiento está en acuerdo con la ley de Biot-Savart

$$\vec{dB} = \frac{\mu_0 I d\vec{L} \times \hat{r}}{r^2} \quad (10)$$

donde \vec{dB} es el campo magnético (infinitesimal), μ_0 es la permeabilidad del espacio libre, I es la corriente que ocasiona el campo, $d\vec{L}$ es un infinitésimo de longitud en la fuente del campo magnético, y \hat{r} es un vector unitario apuntando de la fuente al punto donde se evalúa el campo magnético, siendo r la distancia entre estos. Como se observa, el campo magnético debe decaer como $\frac{1}{r}$, comportamiento que se ha reproducido en el experimento 4, excepto por el punto $X = 0$, donde el campo tiene una singularidad.

La figura 9 muestra los resultados obtenidos en la segunda parte del experimento 4. En este caso, el ajuste de los datos se hizo mediante interpolación de Lagrange, la cual ajusta un polinomio a una serie de datos. Los puntos de la tabla pueden ser perfectamente ajustados por un polinomio de grado 8 $g_{11}(x)$ (ya que se tienen 9 puntos, suficientes para determinar todos los parámetros de un polinomio tal), con una incertidumbre de 0 % en todos los parámetros de ajuste. Sin embargo, se ha decidido interpolar con un polinomio de sexto grado, cuya incertidumbre más alta es de 9.399 %, simplemente porque la incertidumbre sigue siendo aceptablemente pequeña y es el menor grado que da el mejor ajuste de datos. Se han graficado también polinomios de grado 4, 6 y 8. La función de sexto grado es

$$f_{11}(x) = (-9.93924 \times 10^{-5} \pm 9.212 \times 10^{-6})x^6 + (0.00471575 \pm 0.0004433)x^5 + (-0.0870025 \pm 0.008053)x^4 + (0.78794 \pm 0.06826)x^3 + (-3.58633 \pm 0.2669)x^2 + (7.19994 \pm 0.3931)x + (39.798 \pm 0.143)$$

Poner los ajustes lineales o polinómicos en general de esta forma, no es correcta.

1. No dicen nada.

2. Las cifras significativas no son usadas correctamente.

3. No tienen unidades. No es claro quién es x y quién es $f(x)$, aunque lo diga el texto, la ecuación debe ser más clara.

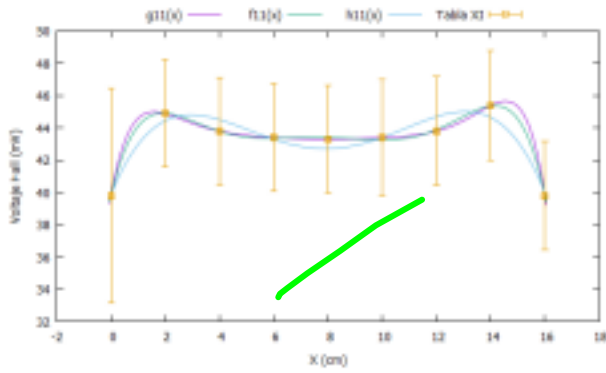


Fig. 9. Comportamiento del voltaje Hall en la parte 2 del experimento 4. Las tres curvas corresponden a polinomios de grado 4 (h), 6 (f) y 8 (g).

Se observa un mínimo local en el punto medio del imán (alrededor de $X = 8\text{ cm}$). El comportamiento es simétrico en ambas direcciones de este mínimo, manteniéndose relativamente constante cerca de este, pero mostrando un crecimiento al alejarse la punta Hall del punto medio, alcanzando un máximo menos de dos centímetros antes de llegar al borde. En estos dos puntos, ocurre una aparente discontinuidad, después de la cual el voltaje decae bruscamente a valores incluso menores que el mínimo en el punto medio del imán hasta llegar a los bordes en $X = 0\text{ cm}$ y $X = 16\text{ cm}$. De esto se concluye que el campo magnético es una función simétrica alrededor de su punto medio, y que además se puede tratar como una función constante cerca del centro del imán, creciente al alejarse de este y hasta aproximarse a los bordes, donde comienza a decrecer.

El ajuste del experimento 5 se hizo de manera similar al de la segunda parte del 4. Los datos pueden ser perfectamente ajustados por un polinomio de grado 5 $g_{12}(x)$ o parcialmente por uno de grado 3 $f_{12}(x)$ como se muestra en la Figura 9. Bajo los mismos argumentos del experimento 4 se ha decidido

graficar a la tabla XII por $f_{12}(x)$:

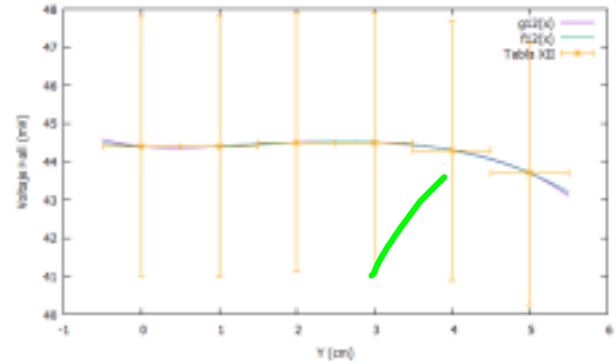


Fig. 10. Comportamiento del voltaje Hall en el experimento 5. Las dos curvas corresponden a polinomios de grado 3 (f) y 5 (g).

Los resultados del experimento 5, mostrados en la figura 10, corroboran los resultados de la segunda parte del experimento 4. Se muestra el comportamiento de solo un lado del electroimán, i.e. solo se muestra el comportamiento en una dirección del punto medio. Nuevamente se tiene un comportamiento casi constante cerca del centro, que se vuelve creciente (aunque con una pendiente más pequeña que en el experimento 4) hasta acercarse al borde, donde empieza a decrecer.

5. CONCLUSIONES

Se logró demostrar experimentalmente la ecuación que gobierna al efecto Hall, así como al comportamiento de la ecuación de Biot-Savart cuando varía la distancia. Se mapearon además los campos magnéticos de un sistema no ideal, i.e. de uno finito donde se presentan bordes. Los datos obtenidos se ajustaron a las gráficas esperadas dentro de sus respectivas incertidumbres, excepto por un caso que se atribuyó a errores humanos.

REFERENCIAS

- [1] Feynman, Richard P. et. al. *The Feynman Lectures on Physics*, Tercera Edición, Ed. Addison-Wesley, 1966.
- [2] Serway, Jewett, *Electricidad y magnetismo*, Sexta Edición, Ed. Thomson, México, 2005.
- [3] Olmo, Nave *Efecto Hall* <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/magnetic/Hall.html>, Consultado el 23 de Agosto de 2018