

MEDICIÓN DEL CAMPO MAGNÉTICO GENERADO POR UNA BOBINA DE HELMHOLTZ

¹Vanzetti Santiago Rubén

¹Facultad de Matemática, Astronomía, Física y Computación (FaMAF) – Universidad Nacional De Córdoba –
Av. Medina Allende s/n , Ciudad Universitaria, Córdoba, Argentina

En este trabajo se reúnen el proceso para la identificación de campo magnético residual, la caracterización de bobinas y la medición del campo magnético generado por una bobina de Helmholtz en configuración anti-Helmholtz para producir un campo lineal en una región del espacio

Palabras clave: bobina de Helmholtz, campo magnético.

I. INTRODUCCIÓN

En muchas situaciones es necesario poder producir un campo magnético uniforme o lineal en una región del espacio. Para esto, se utiliza el dispositivo llamado bobina de Helmholtz, que está formado por dos bobinas circulares, iguales y coaxiales separadas por una distancia.

En este artículo se tratará una configuración de este dispositivo en la cual cada bobina genera un campo igual y opuesto, con lo que se obtendrá un campo magnético que puede considerarse lineal en una región del espacio. Esta configuración es llamada anti-Helmholtz. Se discutirán consideraciones para lograr una buena puesta a punto del instrumento. Además, se abordará el proceso de caracterización de una bobina, la identificación de campo residual y cómo proceder para evitar sus efectos; procedimientos que serán de gran utilidad tener en cuenta al momento de generar un campo magnético lineal.

II. MÉTODOS

Identificación del campo magnético residual y orientación del dispositivo

Antes de realizar las mediciones se encendieron todos los dispositivos necesarios para la experiencia, y que pueden llegar a generar un campo, como por ejemplo fuentes de poder, computadoras y demás dispositivos electrónicos. Para poder reconocer la dirección del campo magnético residual (lo que será útil más adelante) se hizo uso de una brújula. Luego se colocó la bobina de Helmholtz de tal forma que el eje que pasa por el centro de ambas bobinas (eje z) sea perpendicular a la dirección a la que apunta la brújula. De este modo se minimizan los efectos del campo residual a la hora de usar el dispositivo.

Después de orientar la bobina se colocó una sonda Hall marca “Pasco” modelo “PS-2112” sobre un riel que pasa por el centro de ambas bobinas. Se ajustó, de tal forma que el sensor esté sobre el eje central de la bobina; para lo que se utilizó regla, nivel y, para marcar el centro, cinta.

Usando, el software “Pasco Capstone” se midió el valor del campo residual. Este campo tiene pequeñas variaciones en el tiempo, por lo que, para medir su valor

se tomaron medidas cada 0.05 segundos por unos segundos y se tomó la media.

Caracterización de cada bobina

Para caracterizar cada bobina se necesita el valor de su radio y la cantidad de vueltas del cable. Para poder obtener estos valores de una manera precisa se realizó un ajuste no lineal del campo magnético con respecto a la posición según la ecuación (1).

$$B(L) = \frac{A}{\left[a^2 + (L - z_0)^2\right]^{\frac{3}{2}}} + B_r \quad (1)$$

En esta expresión a es el radio de la bobina, z_0 es su posición en sobre el riel, B_r es el valor del campo residual medido, y el valor de A está dado por la ecuación (2)

$$A = \frac{\mu_0 a^2 I n}{2} \quad (2)$$

Donde μ_0 es la permeabilidad magnética del vacío; I es la corriente que pasa por la bobina y n es el número de vueltas. Es necesario ingresar valores iniciales para estos cuatro parámetros. La posición sobre el riel se midió utilizando una regla que se encuentra sobre este y el campo residual obtuvo siguiendo el procedimiento relatado en la sección anterior.

Para conseguir el radio de la bobina, se utilizó un hilo, con el cual se envolvió la bobina y luego se estiró para medir la circunferencia exterior con una cinta métrica. Después, se repitió el proceso, pero con una copia del tubo donde se encuentra montada la bobina, obteniendo su circunferencia exterior, que es equivalente a la circunferencia interior de la bobina. Con estos valores se calcularon los radios exterior e interior de la bobina y se hizo un promedio. Este radio medio es una estimación que se hace para el ajuste, ya que para el modelo que se tuvo en cuenta la bobina no tiene ancho ni grosor.

Para obtener el parámetro A se usó el radio medio, una estimación de la cantidad de vueltas que podría tener la bobina, y la corriente utilizando un multímetro marca “Uni-t” modelo “UT39E+”, cada vez que se tomó una

medida del campo y la longitud (utilizados para hacer el ajuste), se tomó una medida de la corriente, y luego se tomó el promedio de estos valores.

Antes de tomar las medidas del campo magnético, posición y corriente, se armó el circuito que se muestra en la Fig. 1. Utilizando el multímetro se configuró una fuente marca “Uni-t” modelo “UTP3315TFL” a corriente constante, para que, durante las mediciones, el campo no varíe por efectos de la temperatura. En este caso, para las bobinas usadas es recomendado no superar 1A de corriente, por lo que se tuvo en cuenta al momento de configurar la fuente.

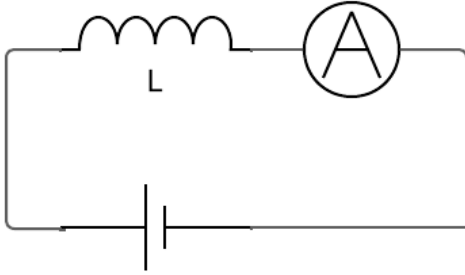


Figura 1. Circuito para medir el campo magnético en una bobina.

Una vez configurado el circuito se comienza a medir el campo magnético utilizando el magnetómetro de Hall. En este proceso hay varias consideraciones a tener en cuenta, se deben tomar varias mediciones para poder realizar el ajuste, en este caso se tomaron entre 20 y 30 mediciones; las cuales se tomaron en ambos lados de la bobina. También, se deben tomar las medidas suficientemente cerca de la bobina, ya que el campo magnético decae rápidamente.

Para medir el valor del campo en una posición, se registró con el sensor y se tomaron valores cada 0.05 segundos durante unos segundos, así se obtuvieron cientos de valores que se promediaron; este promedio es el valor medido del campo magnético en la posición. El campo puede llegar a variar mucho, si se consideró necesario se volvió a tomar la medida.

Luego de tomar todas las mediciones se procesaron los datos utilizando “Python”, se realizó un ajuste según la ec. 1, y se analizaron los residuos del ajuste. A partir, de los parámetros obtenidos del ajuste (con un intervalo de confianza del 95%), se consigue el valor del radio a , y usando la ec. 2 se calcula el valor del número de vueltas que tiene la bobina, teniendo en cuenta que los parámetros a y A están correlacionados.

Este proceso se repite con la otra bobina, consiguiendo así caracterizar ambas bobinas. Para poder generar un campo lineal ambas bobinas deben poder ser consideradas iguales, por lo que antes de realizar la configuración anti-Helmholtz se hizo una comparación de los números de vueltas y los radios.

Configuración anti-Helmholtz y obtención de un campo con gradiente constante

La configuración anti-Helmholtz consiste en hacer circular igual corriente en dos bobinas ideales (sin ancho ni grosor) iguales, en sentido contrario, de tal forma que se generen campos magnéticos iguales, produciendo por superposición un campo magnético según la siguiente expresión extraída de la guía de laboratorio¹:

$$\vec{B}(z) = \frac{\mu_0 n I a^2}{2} \left\{ \frac{1}{[a^2 + (z-d/2)^2]^{3/2}} - \frac{1}{[a^2 + (z+d/2)^2]^{3/2}} \right\} \hat{k} \quad (3)$$

En la expresión se considera un sistema de coordenadas con centro en el punto medio entre ambas bobinas. Si se desarrolla esta expresión en serie de Taylor centrado en 0, las derivadas pares son nulas. Y se puede demostrar que existe una separación d_0 que anula la derivada tercera, por lo que se puede considerar que el campo es lineal alrededor de $z=0$. Se puede probar que:

$$d_0 = \sqrt{3}a \quad (4)$$

Si bien se supone que ambas bobinas son iguales, y se analizó que ambos radios y números de vueltas obtenidos son comparables para calcular el valor de la separación entre las bobinas se usó un promedio de los radios obtenidos con los ajustes.

Posteriormente, se separaron las bobinas según la distancia calculada y se armó un circuito similar al exhibido en la Fig. 1, solo que con ambas bobinas colocadas en serie, de tal forma que la corriente en una bobina pase en sentido contrario al de la otra bobina. Se configuró la fuente a corriente constante, y de igual forma que como se hizo con las bobinas individualmente, se mide el campo magnético generado por la configuración anti-Helmholtz. Estas mediciones se tomaron en distintas posiciones sobre el eje central, en el espacio entre las bobinas y fuera de este, para poder realizar el ajuste y analizar el comportamiento del campo magnético en esta situación. Es recomendado tomar muchas medidas para lograr un buen ajuste.

Después, se procesaron los datos y se realizó un ajuste según la ecuación (5). Utilizando “Python” se obtuvo el gradiente del campo en el eje z (eje que pasa por el centro de ambas bobinas).

$$B(L) = \frac{A_1}{[a_1^2 + (L-z_{01})^2]^{3/2}} - \frac{A_2}{[a_2^2 + (L-z_{02})^2]^{3/2}} + B_r \quad (5)$$

III. RESULTADOS

Caracterización de las bobinas

Los valores de circunferencia, radio, radio medio, corriente, posición inicial y campo residual obtenidos para cada bobina se pueden ver en la Tabla 1.

Tabla 1: Valores de los parámetros iniciales de ajuste y mediciones utilizadas para su cálculo.

	Bobina 1	Bobina 2
Circ. ext.	$(41,6 \pm 0,1)\text{cm}$	$(41,3 \pm 0,1)\text{cm}$
Circ. int.	$(34,8 \pm 0,1)\text{cm}$	$(34,8 \pm 0,1)\text{cm}$
Radio ext.	$(6,62 \pm 0,02)\text{cm}$	$(6,57 \pm 0,02)\text{cm}$
Radio int.	$(5,54 \pm 0,02)\text{cm}$	$(5,54 \pm 0,02)\text{cm}$
Radio medio	$(6,08 \pm 0,02)\text{cm}$	$(6,06 \pm 0,02)\text{cm}$
Corriente	$(0,784 \pm 0,001)\text{A}$	$(0,880 \pm 0,002)\text{A}$
Posición inicial	$(14,3 \pm 0,1)\text{cm}$	$(30,0 \pm 0,1)\text{cm}$
Campo magnét. res.	$(-1 \pm 3)\text{G}$	$(-1 \pm 3)\text{G}$
Parámetro A	3642 G cm^3	4061 G cm^3

Las mediciones del campo magnético generado por la primera bobina se pueden observar en la Fig. 2, y los valores medidos del campo medido en la segunda bobina se puede ver en la Fig 3.

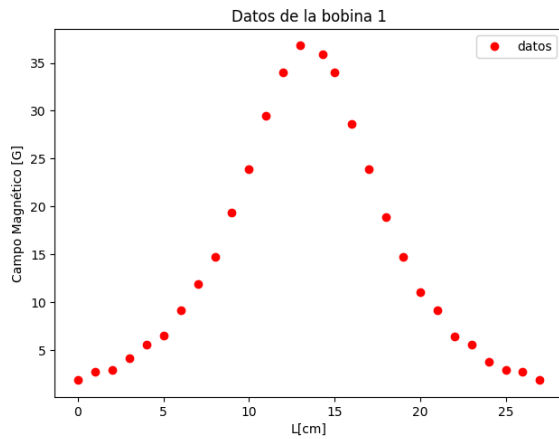


Figura 2. Mediciones tomadas del campo magnético (medido en Gauss), sobre el eje central, de la primera bobina.

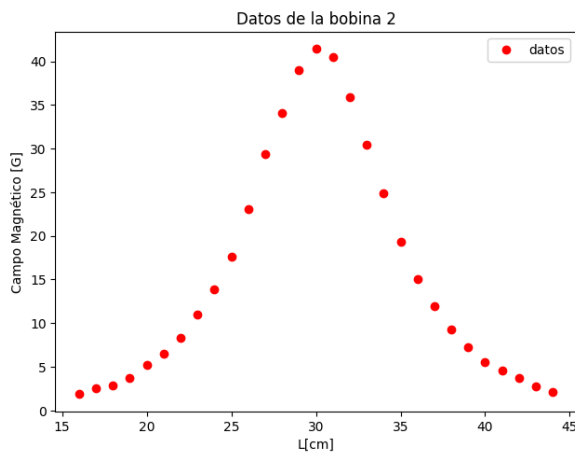


Figura 3. Mediciones tomadas del campo magnético (medido en Gauss), sobre el eje central, de la segunda bobina.

Luego, los parámetros que se consiguieron realizando el ajuste, con un intervalo de confianza del 95% se expresan en la tabla 2.

Tabla 2: valores de los parámetros adquiridos a través del ajuste para ambas bobinas con un intervalo de confianza del 95%.

	Bobina 1	Bobina 2
Radio (a)	$(6,1 \pm 0,1)\text{cm}$	$(6,08 \pm 0,09)\text{cm}$
Parámetro A	$(8700 \pm 500) \text{ G cm}^3$	$(9700 \pm 400) \text{ G cm}^3$
Posición inicial (z_0)	$(13,46 \pm 0,03)\text{cm}$	$(30,17 \pm 0,03)\text{cm}$
Campo magnét. res.	$(-0,7 \pm 0,3)\text{G}$	$(-0,5 \pm 0,3)\text{G}$

A partir de estos parámetros se calculó el valor del número de vueltas (n) de cada bobina. Para la bobina 1 se obtuvo $n_1=(470 \pm 30)$ vueltas, y para la bobina dos se tiene que $n_2=(460 \pm 20)$.

Configuración anti-Helmholtz y obtención de un campo con gradiente constante

Usando los valores de los radios conseguidos por el ajuste de los datos (ver Tabla 2), se calculó un promedio a partir del cual se dedujo la distancia de separación a la que se deben colocar las bobinas, $d_0= (10,6 \pm 0,2) \text{ cm}$. Los parámetros iniciales medidos, necesarios para realizar el ajuste de los datos se pueden ver en la Tabla 3.

Tabla 3: Parámetros iniciales medidos en la configuración anti-Helmholtz.

Valores de los parámetros	
Posición de la bobina 1 (z_{01})	$(24,7 \pm 0,1)\text{cm}$
Posición de la bobina 2 (z_{02})	$(35,3 \pm 0,1)\text{cm}$
Campo magnét. res. (B_r)	$(-1 \pm 3)\text{G}$

Las mediciones del campo magnético para la configuración anti-Helmholtz se pueden observar en la Fig. 4. Por otro lado, el comportamiento del gradiente del campo magnético sobre el eje central en esta configuración se puede observar en la Fig. 5.

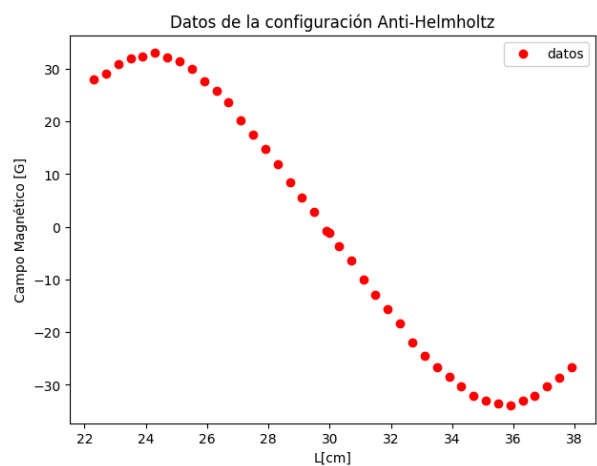


Figura 4. Campo magnético en la configuración anti-Helmholtz.

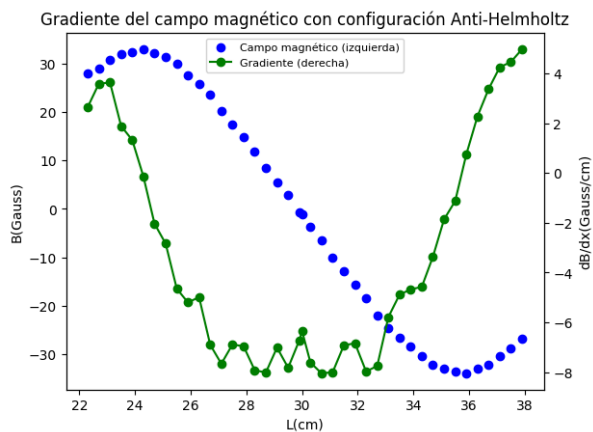


Figura 5. Gradiente y campo magnético en configuración anti-Helmholtz.

Los parámetros obtenidos en el ajuste del campo magnético con respecto a la posición en la configuración anti-Helmholtz se encuentran expresados en la Tabla 4.

Tabla 4: parámetros obtenidos en el ajuste de los datos en la configuración anti-Helmholtz.

Valores de los parámetros	
Radio de la bobina 1	$(5 \pm 1)\text{cm}$
Radio de la bobina 2	$(6,7 \pm 0,8)\text{cm}$
Parámetro A_1	$(5000 \pm 4000)\text{Gcm}^3$
Parámetro A_2	$(13000 \pm 8000)\text{Gcm}^3$
Posición z_{01}	$(24,6 \pm 0,8)\text{cm}$
Posición z_{02}	$(35,5 \pm 0,2)\text{cm}$
Campo magnét. res.	$(0 \pm 10)\text{G}$

IV. DISCUSIÓN

Como se dijo anteriormente para poder lograr una buena configuración anti-Helmholtz se requiere que ambas bobinas sean iguales, por lo que se realizó la caracterización. Si se observan los valores de los números de vueltas y de los radios, se puede considerar que las bobinas si son iguales; aunque es importante aclarar que esto conlleva cierto error, por lo que puede que no sean exactamente iguales, lo que podría traducirse en que el campo generado en la configuración no sea del todo lineal.

También, hay que notar que los valores del campo cuando se midió en cada bobina, sí se ajusta al modelo matemático (ver figuras 2 y 3, y ec. 1). Por otro lado, la mayoría de los parámetros obtenidos a partir de los ajustes son comparables con aquellos medidos directamente (ver Tablas 1 y 2). Pero, el valor de la posición de la primera bobina no se corresponde con el valor medido directamente, esto se lo atribuyo a que la bobina tiene un cierto espesor por lo que si se tiene en cuenta esto el valor obtenido por el ajuste si tiene sentido. Vale la pena aclarar que los valores del parámetro “A” no se correlacionan con los entregados por los ajustes ya que para calcular estos parámetros iniciales se supuso que las

bobinas tienen 200 vueltas, suposición nada cercana a la realidad, esto no tiene mucha importancia en el resultado final, ya que se trata de un parámetro inicial requerido para comenzar el ajuste de los datos.

Con respecto a los valores de los parámetros obtenidos en el ajuste realizado para la configuración anti-Helmholtz, se puede ver que la mayoría de ellos se corresponden con los valores previamente calculados. En el caso del radio de la bobina 1, valor que difiere, por muy poco, del calculado en la caracterización (ver Tabla 1). Esto puede ser debido a que el ajuste se hizo con menos datos de los necesarios para la cantidad de parámetros del modelo. Esto lo argumento, pues se puede observar en todos los valores de los parámetros (ver Tabla 4) que estos son mucho menos precisos que los conseguidos con ajustes anteriores. A pesar de esto, los valores de campo medidos se corresponden al modelo funcional (ver Figura 4 y ec. 3), y se puede decir que el gradiente se comporta de manera constante entre los 27 y 33 centímetros (ver Figura 5). Esto se puede asegurar, ya que el magnetómetro utilizado para realizar las mediciones del campo tiene una incertidumbre asociada de $\pm 3\text{G}$, y el gradiente varía 2 Gauss sobre centímetro en el rango mencionado.

V. REFERENCIAS

- 1 - “ Física Experimental III, Trabajo de Laboratorio n°2: Bobina de Helmholtz”, (s/f), https://famaf.aulavirtual.unc.edu.ar/pluginfile.php/54082/mod_resource/content/1/Lab2_%202024%20.pdf.