

# PRÁCTICA NÚMERO 5: Generación de un campo eléctrico y magnético.

## **Integrantes**

Atayde Aranda Aldo

Basile Álvarez Tomás Ricardo

Gallegos Salgado Jessica Andrea

Velázquez Martínez Jonathan Israel

## **Resumen**

En esta práctica se observará y se comprobará que una corriente eléctrica, inducida a un material conductor en un medio dieléctrico genera un campo magnético, y este campo magnético influye en su entorno, reacomodando a los objetos cercanos en su dirección. Gracias a este reacomodo se reafirma el concepto y la existencia de “líneas de campo”, las cuales sirven para imaginar y modelar el movimiento de cargas eléctricas dentro de un campo.

El conocimiento de las líneas de campo también sirve para conocer el sentido del campo magnético. Gracias a esto y a las herramientas matemáticas, podemos hacer deducciones interesantes y servibles para el conocimiento humano, como lo es el campo magnético generado por la tierra. Lo cual nos puede ayudar a modelar movimientos celestes cercanos a la tierra, interacción de las ondas que se dirigen a la tierra, entre otras cosas.

## **Introducción**

### **◆ Campos eléctricos**

Se define al campo eléctrico como la fuerza eléctrica por unidad de carga.

$$E = \frac{F}{q} \Rightarrow F = Eq$$

Para cargas puntuales, los campos se dirigen de manera radial, hacia adentro en el caso de una carga negativa y hacia afuera en el caso de una carga positiva. Las fuerzas eléctricas actúan a través del espacio y producen un efecto, aún cuando no exista contacto físico entre los objetos que interactúan. **[1]**

Gracias a la Ley de Coulomb, podemos pensar en las interacciones entre las cargas. El campo eléctrico se introdujo como un intermediario entre las cargas, es decir, en el caso de dos cargas, la primera establece un campo eléctrico y la segunda carga interactúa con este campo eléctrico (de la primera carga) **[2]**

Por lo tanto la ecuación de campo eléctrico para una carga puntual es:

$$E = k \frac{q}{r^2} \hat{r} \quad \text{Ecuación 1} \quad \text{con } k = 8.99 \times 10^9 \text{ Nm}^2\text{C}^{-2}$$

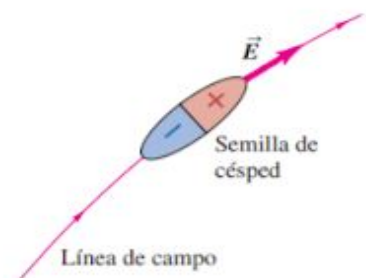
Ahora bien, hablaremos de las **líneas de campo eléctrico** puesto que son fundamentales para los experimentos de esta práctica.

El concepto de campo eléctrico es un tanto elusivo debido a que ningún campo eléctrico puede verse directamente. Para visualizarlos, las líneas de campo eléctrico son de gran ayuda y los hace parecer más reales. Una línea de campo eléctrico es una curva imaginaria trazada a través de una región del espacio, de modo que es tangente en cualquier punto que esté a la dirección del vector del campo eléctrico en dicho punto. [3]

Las líneas de campo eléctrico muestran la dirección en cada punto, y su espaciamiento da una idea general de la magnitud de en cada punto. Donde es fuerte, las líneas se dibujan muy cerca una de la otra, y donde es más débil se trazan separadas. En cualquier punto específico, el campo eléctrico tiene dirección única, por lo que sólo una línea de campo puede pasar por cada punto del espacio. En otras palabras, las líneas de campo nunca se cruzan. [3]

Una forma muy efectiva de identificar las líneas de campo eléctrico es colocando aceite alrededor de un conductor con una carga, posteriormente se colocan pequeñas semillas.

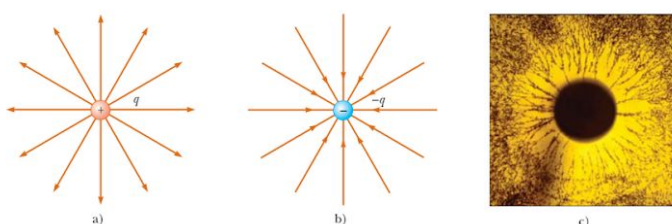
Tales semillas son aislantes eléctricamente neutros; sin embargo, el campo eléctrico de los dos alambres cargados provoca su polarización; en las moléculas de cada semilla, hay un ligero desplazamiento de las cargas positivas y negativas, como vemos en la **Imagen 1**. El extremo cargado positivamente de cada semilla de césped es atraído en la dirección del campo y el extremo de cada semilla cargado negativamente es atraído en dirección opuesta al campo. De ahí que el eje largo de cada semilla de césped tienda a orientarse en forma paralela al campo eléctrico, en la dirección de la línea de campo que pasa por la posición que ocupa la semilla. [3]



**Imagen 1.** Polarización semilla.

Algunos ejemplos de líneas de campo son los siguientes:

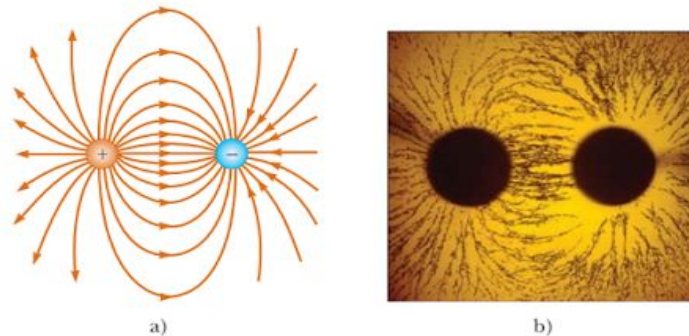
- Carga puntual



**Imagen 2.** Líneas de campo eléctrico de cargas puntuales.

En el caso de una carga puntual positiva, las líneas son radiales hacia afuera (a), mientras que para las negativas, son radiales hacia adentro (b).

- Dipolo eléctrico

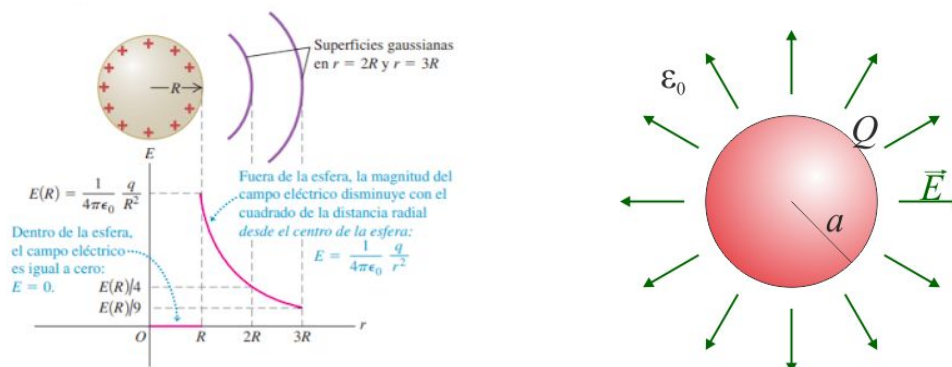


**Imagen 3.** Líneas de campo eléctrico de un dipolo eléctrico.

En (a) vemos que las líneas de campo eléctrico que generan dos cargas puntuales de igual magnitud pero signo opuesto (dipolo eléctrico) salen de la carga positiva para entrar a la carga negativa. El número de líneas que sale es igual al número que entra.

En (b) se pueden ver pequeñas partículas (semillas) suspendidas en aceite que se alinean con el campo eléctrico. Experimentalmente se toman a los conductores empleados como cargas puntuales. [1]

- Esfera cargada

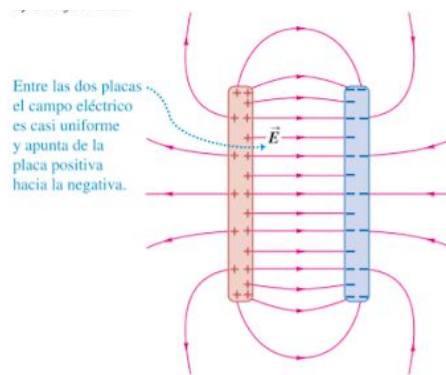


**Imagen 4.** Cálculo y líneas del campo eléctrico de una esfera conductora con carga positiva.

En el caso de una esfera conductora uniformemente cargada, tenemos que el campo fuera de la esfera es el mismo que si toda la carga estuviera concentrada en el centro de la esfera.

La simetría también muestra que la dirección del campo eléctrico debe ser radial. Por la misma razón, la magnitud  $E$  del campo sólo puede depender de la distancia desde el centro y debe tener el mismo valor en todos los puntos de una superficie esférica concéntrica respecto de la esfera conductora. [3]

- Plano cargado



**Imagen 5.** Líneas de campo eléctrico de dos planos paralelos cargados uniformemente.

Podemos ver que al ser planos paralelos y uniformemente cargados, el campo eléctrico es casi constante y perpendicular a ambas placas. Por lo que las líneas de campo se ven paralelas entre sí pero perpendiculares a las placas.

### ❖ Campos magnéticos

El campo magnético es un concepto introducido en la teoría electromagnética para explicar las fuerzas que aparecen entre corrientes eléctricas.

Los campos magnéticos son producidos por cargas en movimiento, es decir, por corrientes eléctricas; aunque también se pueden producir campos magnéticos con imanes permanentes.

El campo magnético en un punto dado del espacio se define a partir de la fuerza que se ejerce sobre un elemento de corriente situado en dicho punto, y se expresa en amperios por metro (A/m). [4]

Históricamente el símbolo  $B$  ha sido utilizado para representar el campo magnético. La dirección del campo magnético  $B$  en cualquier sitio es la dirección a la cual apunta la aguja de una brújula colocada en dicha posición. Igual que en el caso del campo eléctrico, es posible representar el campo magnético gráficamente utilizando líneas de campo magnético. [1]

Todo corriente eléctrica produce un campo magnético. Cuanto mayor sea la intensidad de corriente eléctrica que recorre un conductor, más elevado será el campo magnético que genere. [4]

Ahora hablaremos de las **líneas de campo magnético**.

Cualquier campo magnético se representa usando líneas de campo magnético. La idea es la misma que para las líneas de campo eléctrico. Se dibujan las líneas de modo que la línea que pasa a través de cualquier punto sea tangente al vector del campo magnético en ese punto (Imagen 6). Las líneas de campo adyacentes están cerca entre sí, la magnitud del campo es grande; donde tales líneas están separadas, la magnitud del campo es pequeña. Asimismo, debido a que la dirección en cada punto es única, las líneas de campo nunca se cruzan. [3]

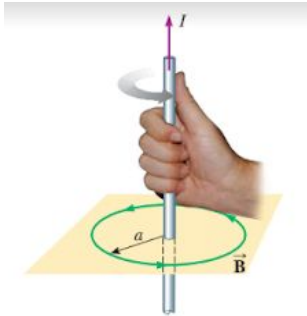


**Imagen 6.** Líneas de campo magnético de un imán permanente.

- Conductor recto delgado (Alambre)

La magnitud del campo magnético es proporcional a la corriente e inversamente proporcional a la distancia al alambre.

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi a} \quad \text{Ecuación 2}$$



**Imagen 7.** Regla de la mano para determinar dirección de campo magnético de un alambre recto con una corriente.

La imagen 7 muestra en perspectiva el campo magnético que rodea a un alambre recto y largo que conduce corriente. Debido a la simetría del alambre, las líneas de campo magnético forman círculos concéntricos con el alambre y existen en planos perpendiculares a éste. [1]

**Imagen 8** Líneas de campo magnético de un alambre recto que conduce corriente.

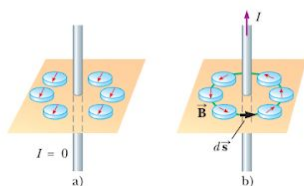


- Ley de Ampere

El descubrimiento de Oersted en 1819 del desvío de la aguja de las brújulas demuestra que un conductor que lleva una corriente produce un campo magnético.

Este efecto puede ser demostrado en el salón de clases (Imagen 9a). Se colocan muchas agujas de brújula en un plano horizontal cercano a un alambre vertical largo. Cuando no hay corriente en el alambre, todas las agujas apuntan en una misma dirección (la del campo magnético de la Tierra). Cuando el alambre conduce una corriente, intensa y estable, todas las agujas se desvían en una dirección tangente al círculo, como en la imagen 9b.

Estas observaciones demuestran que la dirección del campo magnético producido por la corriente en el alambre es consistente con la regla de la mano derecha. Cuando se invierte la dirección de la corriente, las agujas en la imagen 9b también invierten su orientación. [1]



**Imagen 9.** Desvío de agujas de brújulas por un campo magnético.

Ya que las agujas de la brújula apuntan en la dirección de  $B$ , se concluye que las líneas de  $B$  forman círculos alrededor del alambre. Por simetría, la magnitud de  $B$  es la misma en cualquier parte de la trayectoria circular centrada en el alambre y que yace en un plano perpendicular a éste. Al variar la corriente y la distancia desde el alambre, se encuentra que  $B$  es proporcional a la corriente e inversamente proporcional a la distancia al alambre, como se describe en la **Ecuación 2. [1]**

De aquí sacamos el caso general, conocido como la ley de Ampère, el cual puede enunciarse como sigue:

$$\oint B \cdot ds = \mu_0 I$$

**Ecuación 3**

- Solenoide.

Un solenoide es un alambre largo enrollado en forma de hélice. Con esta configuración, puede producirse un campo magnético razonablemente uniforme en el espacio rodeado por las vueltas del alambre —llamado interior del solenoide— cuando éste lleva una corriente.

A partir de la Ley de Ampere tenemos que el campo magnético en un solenoide está dado por:

$$B = \mu I N / L$$

**Ecuación 4**

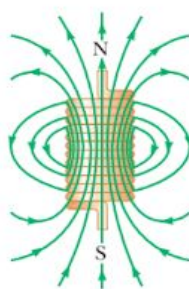
Con  $\mu$ : la permitividad eléctrica =  $4\pi * 10^{-7} \text{ Tm/A}$

I: La corriente eléctrica por el solenoide.

N: Cantidad de vueltas del solenoide

L: Longitud del solenoide

**Imagen 10.** Líneas de campo magnético en un solenoide.



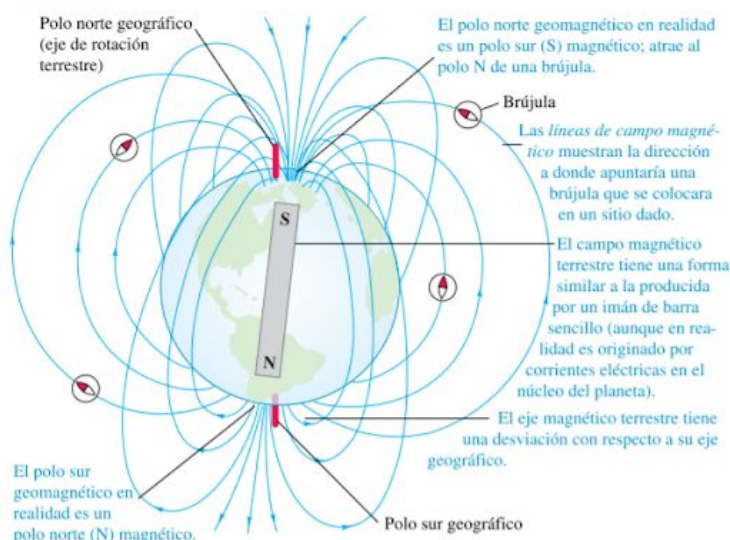


Un extremo del solenoide se comporta como polo norte del imán, y el extremo opuesto se comporta como polo sur. Conforme se incrementa la longitud del solenoide, el campo interior se vuelve más uniforme y el exterior más débil. Se obtiene un solenoide ideal, cuando las vueltas están muy apretadas y la longitud es mucho mayor que los radios de las vueltas.

- Campo magnético terrestre

La Tierra misma es un imán. Su polo norte geográfico está cerca del polo sur magnético, lo cual es la razón por la que el polo norte de la aguja de una brújula señala al norte terrestre. El eje magnético de nuestro planeta no es del todo paralelo a su eje geográfico (el eje de rotación), así que la lectura de una brújula se desvía un poco del norte geográfico. Tal desviación, que varía con la ubicación, se llama variación magnética. Asimismo, el campo magnético no es horizontal en la mayoría de los puntos de la superficie terrestre; su ángulo hacia arriba o hacia abajo se denomina inclinación magnética. En los polos magnéticos, el campo magnético es vertical. La imagen 11 es un esquema del campo magnético terrestre. Las líneas, llamadas líneas de campo magnético, muestran la dirección que señalaría una brújula que estuviera en cada sitio.

El campo, que es generado por corrientes en el núcleo fundido del planeta, cambia con el tiempo, de hecho, hay evidencia geológica que demuestra que el campo invierte por completo su dirección en intervalos de alrededor de medio millón de años. [3]



**Imagen 11.** Esquema del campo magnético terrestre.



## **Hipótesis**

### **Experimento 1: Líneas de campo eléctrico**

Como las placas se sumergirán en un medio dieléctrico lleno de granos de sorgo, las cuales tendrán una carga, al momento de inducir el voltaje en las placas, éstas adquirirán carga contraria formando un dipolo. Este dipolo generará un campo eléctrico el cual hará que los momentos eléctricos de los granos se alineen con la dirección del campo eléctrico, reacomodándose (los granos) de forma armónica respecto al campo.

### **Experimento 2: Líneas de campo magnético**

Como a la varilla de cobre se le inducirá una corriente eléctrica, por la teoría, ésta tendría que generar un campo magnético, en donde  $\text{rot}(\mathbf{B})$  es paralelo a la dirección de la corriente. Como la limadura de hierro tiene propiedades magnéticas, sus momentos magnéticos se alinearán con la dirección del campo magnético, formando espiras que parecen girar sobre la base de la barra de cobre (esto por la ley de la mano derecha).

### **Experimento 3: Campo magnético de la tierra**

Como la brújula se coloca dentro de la bobina, a la cual se le induce una corriente, la aguja de la brújula se desviará hacia la dirección del campo magnético generado, o sea, girará hacia el polo norte de la bobina.

## **Objetivos**

### **Experimento 1: Líneas de campo eléctrico**

Nuestro objetivo es generar un campo eléctrico a partir de distintas configuraciones de cargas. Posteriormente apreciar las líneas de campo que se forman al esparcir semillas pequeñas alrededor de nuestra estructura.

### **Experimento 2: Líneas de campo magnético**

Buscamos producir un campo magnético al conducir una corriente eléctrica en distintos arreglos de alambres conductores. Después observar las líneas de campo que se crearon al espolvorear limadura de hierro alrededor de los cables.

### Experimento 3: Campo magnético de la tierra

En la última parte pretendemos medir el campo magnético terrestre usando conceptos y magnitudes capaces de cuantificarse dentro del laboratorio.

## **Materiales**

### Experimento 1: Líneas de campo eléctrico

Fuente de alto voltaje 5 kV a 30 kV.

Placas metálicas de distintos grosores y tamaños.

Recipiente transparente.

Aceite de oliva.

Semillas ligeras (sorgo).

Cables de alto voltaje con conectores banana.

Soporte universal.

Cinta aislante.

Papel aluminio o lata de aluminio.

### Experimento 2: Líneas de campo magnético

Fuente de alto voltaje 5 kV a 30 kV.

Cables de alto voltaje con conectores banana.

Alambre grueso de cobre.

Soporte universal.

Base de madera con orificios.

Limadura de hierro.

Cinta aislante y hoja blanca

### Experimento 3: Campo magnético de la tierra

Brújula.

Transportador.

Bobina de 160 vueltas con su base y una ranura de 2 cm en medio.

Fuente de voltaje 5 kV a 30 kV.

Cables de alto voltaje con conectores banana.

Multímetro.

### **Procedimiento experimental**

#### Experimento 1: Líneas de campo eléctrico

1. Colocar en un recipiente el aceite de oliva. Conectar dos placas metálicas (del mismo material) a las terminales de una fuente de alto voltaje.
2. Sumergir las placas en el aceite de tal forma que no estén en contacto entre sí.
3. Ajustar el voltaje de la fuente para que se genere un campo eléctrico en las placas metálicas.
4. Esparcer gradualmente las semillas en las cercanías de las placas sumergidas y observa el patrón que forman las mismas.
5. Realizar el paso anterior pero ahora variar las configuraciones (hacerlo también con una bola de aluminio)
6. Con el aluminio generar una jaula de Faraday dentro de la pecera. Observar y reportar los patrones que forman las semillas.

#### Experimento 2: Líneas de campo magnético

1. Colocar la base de madera suspendida con la ayuda de soportes universales, de manera que se obtenga una “mesa”. Colocar la hoja blanca encima de la madera y en el centro atravesar el alambre de cobre previamente lijado de los extremos.

2. Fijar el extremo superior del alambre a una varilla saliente de un soporte universal de tal forma que queda suspendida sin tocar nada más.
3. Conectar las terminales de la fuente a los extremos del alambre tratando de mantener los cables los más alejados posible del punto donde el alambre atraviesa la mesa de madera y hacer pasar por ellos una corriente eléctrica.
4. Esparcir limadura de hierro alrededor del punto donde el alambre atraviesa la mesa de madera y observa qué sucede. Finalmente, repetir para diferentes configuraciones (varios alambres, una bobina, etc)

### Experimento 3: Campo magnético de la tierra

1. Colocar la brújula dentro de la bobina de tal forma que se pueda observar la flecha de la misma marcando al Norte y que la bobina esté orientada en dirección perpendicular al Norte magnético.
2. Conectar ambos extremos de la bobina a la fuente de alto voltaje y al multímetro.
3. Hacer pasar una corriente eléctrica por el cable de la bobina y observar cómo la aguja de la brújula se desvía debido al campo de la bobina. Medir el ángulo de desviación de la aguja respecto al norte.
4. Calcular aproximadamente el campo magnético de la tierra con éstos datos.

## **Resultados y análisis**

### **Experimento 1: Líneas de campo eléctrico**

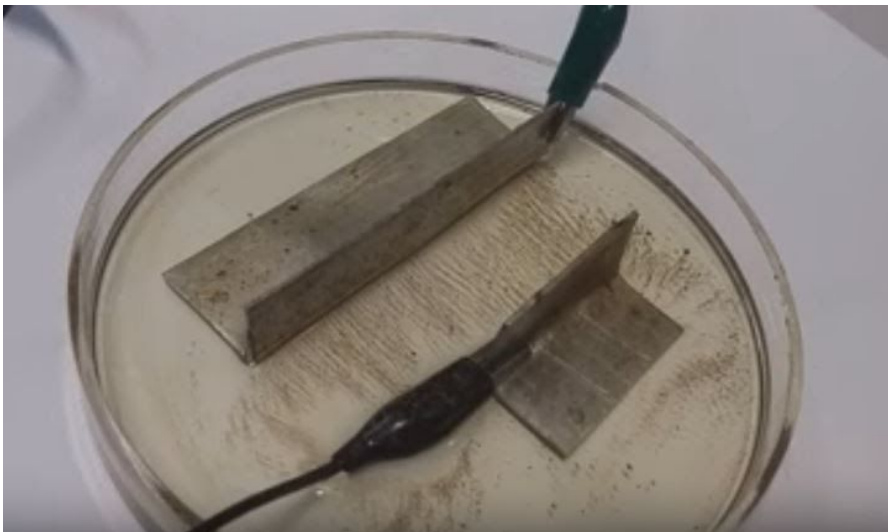
Al generar un campo eléctrico en la pecera con aceite, las semillas se polarizan y por esta razón se alinean con el campo eléctrico. De esta forma, es posible visualizar las líneas de campo eléctrico a partir de las semillas. Así, se obtienen los siguientes patrones para distintas configuraciones de las cargas eléctricas.



**Imagen 12:** Campo eléctrico bola de Aluminio



**Imagen 13:** Campo eléctrico dos terminales



**Imagen 14:** Campo eléctrico de dos placas paralelas



**Imagen 15:** Campo eléctrico, carga y Jaula de Faraday

### Experimento 2: Líneas de campo magnético

Como se mencionó en el marco teórico, una corriente eléctrica genera un campo magnético a su alrededor. Como el hierro es un imán permanente, este campo magnético atrae a la limadura de hierro que se acomoda siguiendo las líneas de campo magnético. Esto nos permite visualizar las líneas de campo magnético para distintas configuraciones.

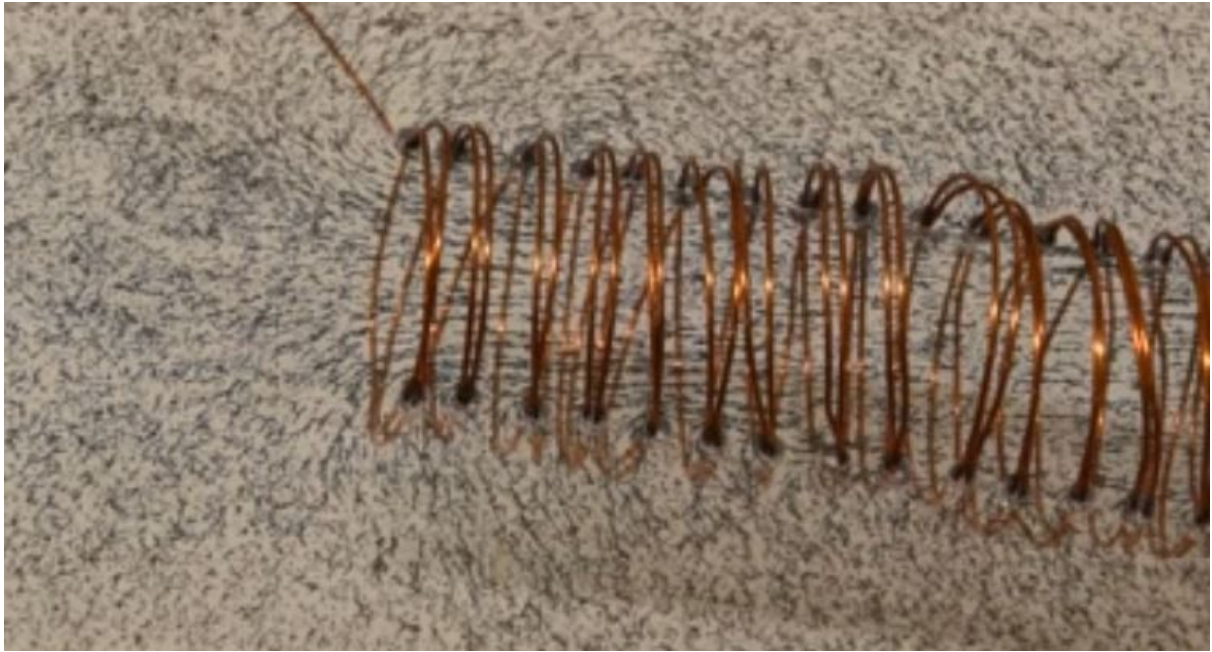


**Imagen 16:** Campo magnético un cable



**Imagen 17:** Campo magnético dos cable





**Imagen 18:** Campo magnético de un solenoide

### Experimento 3: Campo magnético de la tierra

Como se menciona en el marco teórico, la tierra genera un campo magnético que apunta hacia el polo norte magnético y que hace que la aguja de una brújula se acomode en esta dirección. Si se genera un campo magnético constante de magnitud conocida en la dirección ortogonal al campo de la tierra, se puede calcular el campo magnético de la tierra a partir de la deflexión de la aguja de la brújula.

Como se menciona en el marco teórico (y se puede observar en la imagen 17), un solenoide genera un campo magnético constante y cuya magnitud se obtiene a partir de la ley de Ampere y viene expresada por la **Ecuación 4** del marco teórico.

$$B = \mu I N / L$$

Con  $\mu$ : la permitividad eléctrica =  $4\pi * 10^{-7} \text{ Tm/A}$

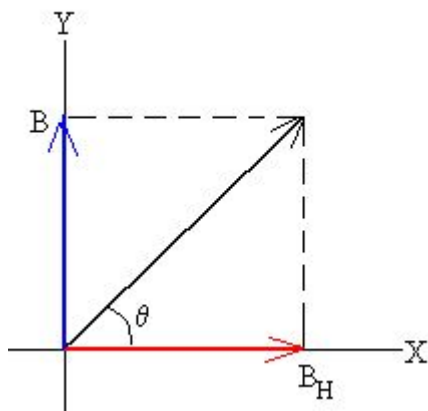
I: La corriente eléctrica por el solenoide.

N: Cantidad de vueltas del solenoide

L: Longitud del solenoide

Así, con el solenoide posicionado en la dirección oeste-este, se genera un campo de magnitud constante en esta dirección que deflexa la aguja de una brújula. De esta manera, la aguja se encuentra en presencia de dos campos magnéticos perpendiculares; el de la tierra y el del solenoide.





Si llamamos  $\theta$  al ángulo de la aguja respecto a la dirección este,  $B$  el campo de la tierra y  $B_H$  el campo del solenoide. Observamos por la imagen 18 la siguiente relación:

$$B = B_H \tan \theta \quad , \text{ entonces}$$

$$B = \mu I N / L \tan \theta$$

**Imagen 19:** Campos magnéticos sobre la aguja

Y así es posible medir el campo magnético de la tierra a partir de puras magnitudes que se pueden medir en el laboratorio.

Además, usando propagación de errores, el error de la medida se calcularía como:

$$B \pm \Delta B = \mu I N / L \tan \theta \pm \mu N \frac{L (I \sec^2(\theta) \Delta \theta + \Delta I \tan(\theta)) + I \tan(\theta) \Delta L}{L^2}$$

De esta forma, podemos calcular el campo magnético de la tierra usando datos recopilados por el Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico [5] en CU, el cual se obtuvo:

$$I = 0.0172 \pm 0.0001 \text{ A}$$

$$N = 160$$

$$L = 0.120 \pm 0.0005 \text{ m}$$

$$\theta = 0.786 \pm 0.0088 \text{ rad}$$

Entonces,

$$B \pm \Delta B = 0.288 \pm 0.00079 \text{ Gauss}$$

## **Observaciones y Conclusiones**

### **Experimento 1: Líneas de campos eléctricos**

Como se observa en las imágenes, en cada uno de los arreglos, las semillas se polarizan y se alinean con las líneas de campo eléctrico. Permittiéndonos observar las líneas de campo.

En la imagen 12 se observa un campo que sale de la bola cargada de aluminio, y que se atenúa con la distancia a la bola. Además, las líneas de campo tienen únicamente una componente radial, lo cual coincide con el campo eléctrico que genera una esfera cargada.

En la imagen 13, las terminales funcionan como cargas puntuales (una positiva y una negativa). Se observa como las líneas de campo salen de una carga y entran a la otra y coincide con el campo para un dipolo.

Por otro lado, en la imagen 14, se observa que el campo generado entre las dos placas es perpendicular a ambas y aproximadamente de valor constante.

Por último, en la imagen 15, se coloca un objeto cargado a la izquierda y un cilindro conductor a la derecha. Se observa como la carga genera un campo eléctrico, sin embargo, en el interior del cilindro no hay líneas de campo. Esto se debe a que el cilindro, al ser un conductor, actúa como una jaula de Faraday y contrarresta los campos externos en su interior.

En conclusión, utilizar las semillas flotando en aceite es un método muy útil para visualizar los campos eléctricos de cualquier configuración de cargas y así poder estudiarlos con mayor facilidad.

### **Experimento 2: Líneas de campos magnéticos**

Como se observa en los resultados, se puede visualizar con facilidad el campo magnético generado por las corrientes utilizando la limadura de hierro.

En las imágenes 16 y 17 se observa como los alambres con corriente eléctrica generan campos magnéticos a su alrededor. Además, las líneas de campo son circunferencias concéntricas centradas en el cable, las cuales se atenúan conforme la distancia al cable es mayor.

En la imagen 18 se observa el campo generado por un solenoide. Se puede notar como en su interior el campo es constante y paralelo a la dirección del solenoide. Además, en el exterior la limadura de hierro no se acomoda hacia ninguna dirección, lo que sugiere que en esta zona el campo es nulo.

### Experimento 3: Campo magnético de la tierra

Como se muestra en los resultados, es relativamente sencillo obtener el campo magnético de la tierra utilizando una fuente que genere un campo magnético constante y la deflexión de la aguja de una brújula.

La exactitud de la medida dependerá de cómo se haya generado el campo magnético constante (en este caso con un solenoide) y de qué tan fiel sea la medida de su intensidad. Para esto es importante utilizar un solenoide con la mayor cantidad de vueltas por unidad de longitud, para así poder asegurar que el campo magnético que genera sigue la **Ecuación 4**  $B = \mu I N / L$  y sea válida usarla.

Además, utilizando los datos del Modelo Magnético Mundial y una calculadora que aproxima el valor del campo terrestre en cualquier punto [6], se obtiene que el valor real del campo terrestre en la localización de la facultad de ciencias es de aproximadamente 0.27337 Gauss.

Por lo tanto, podemos calcular el error porcentual entre el valor real y el valor a obtenido en nuestro experimento:

$$\frac{|0.27337 - 0.288|}{0.27337} = 5.35\%$$

Lo que indica que se obtuvo una medida bastante cercana a la real y que el método utilizado es correcto.

## **Bibliografía**

**[1]** Serway, R. & Jewett, J. (2009). *Física para ciencias e ingeniería con Física moderna*, Vol. 2 (7ª ed.). México: Cengage Learning.

**[2]** Resnick R. (1999). *Física*, Vol. 2. México: Compañía Editorial Continental

**[3]** Zemansky S, Freedman Y. (2009). *Física universitaria con Física moderna*, Vol. 2 (12ª ed.). México: Addison-Wesley.

**[4]** Campos eléctricos y magnéticos. (2001). Recuperado 6 abril, 2020, de <https://ocw.unican.es/pluginfile.php/1926/course/section/2221/lectura8.pdf>

**[5]** Medición del campo magnético de la Tierra. (s.f.). Recuperado 7 abril, 2020, de <https://sites.google.com/site/fisicacontics/actividades/medicion-del-campo-magnetico-de-la-tierra>

**[6]** Magnetic Field Calculators. (s.f). Recuperado 7 abril, 2020, de <https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/calculators/magcalc.shtml#igrfwmm>