

8. Campo magnético

PREPARACIÓN DE LA UNIDAD (pág. 195)

- Podemos identificar los polos norte y sur de los imanes con la ayuda de una brújula. La punta de la aguja que señala el polo Norte terrestre constituye el polo norte de la aguja imantada. Por tanto, como los polos distintos se atraen, si acercamos la brújula a los imanes, la aguja señalará el polo sur de éstos.

- Existen diversos métodos para obtener imanes artificiales. A continuación explicamos cuatro métodos de imantación.

Imantación por frotamiento. Consiste en frotar repetidas veces la barra de acero con un imán, siempre en el mismo sentido y con el mismo extremo del imán.

Imantación por contacto. Consiste en acercar la barra de acero a un imán de modo que ambos queden en contacto.

Imantación por influencia. Consiste en aproximar la barra de acero a un imán sin que lleguen a tocarse.

Imantación por corriente eléctrica. Consiste en enrollar un hilo de cobre alrededor de la barra de acero procurando que las espiras estén bastante próximas, y conectar los extremos del hilo conductor a los polos de una pila.

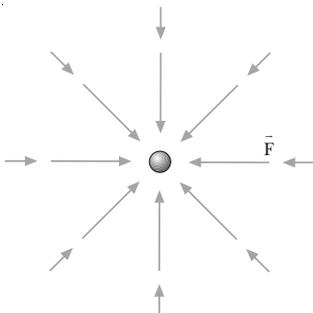
- Datos: $Q = 150 \text{ C}$; $t = 1 \text{ min} = 60 \text{ s}$

La intensidad de corriente eléctrica es la carga que atraviesa una sección por unidad de tiempo.

$$I = \frac{Q}{t} = \frac{150 \text{ C}}{60 \text{ s}} = 2,5 \text{ A}$$

- Decimos que existe un campo de fuerzas en un lugar del espacio si, al colocar en él un cuerpo de prueba, éste queda sometido a una fuerza.

Para representar esquemáticamente un campo de fuerzas en una región del espacio se dibujan las líneas de campo. Éstas se trazan de modo que el vector intensidad de campo es tangente a las líneas de campo en cada punto y tiene el mismo sentido que éstas. Además, se trazan de forma que la densidad de las líneas de campo sea proporcional a la intensidad del campo.



- a) Datos: $m = 40 \text{ kg}$; $|\vec{g}| = g = 1,6 \text{ N/kg}$

Una masa de 40 kg en un campo gravitatorio de $1,6 \text{ N/kg}$ experimenta una fuerza:

$$F = m g = 40 \text{ kg} \cdot 1,6 \text{ N/kg} = 64 \text{ N}$$

- b) Datos: $q = 125 \mu\text{C} = 1,25 \cdot 10^{-4} \text{ C}$;

$$|\vec{E}| = E = 3 \cdot 10^{-6} \text{ N/C}$$

Una masa de $125 \mu\text{C}$ en un campo eléctrico de $3 \cdot 10^{-6} \text{ N/C}$ experimenta una fuerza:

$$F = q E = 1,25 \cdot 10^{-4} \text{ C} \cdot 3 \cdot 10^{-6} \text{ N/C} = 3,75 \cdot 10^{-10} \text{ N}$$

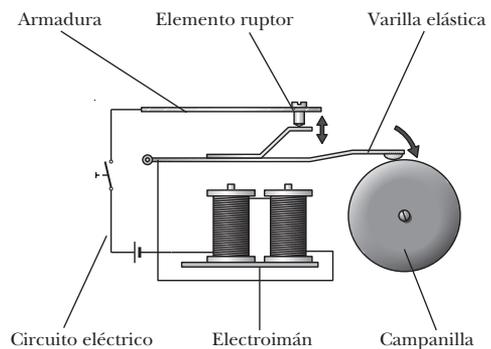
- Respuesta sugerida:

- Un timbre está constituido por un circuito eléctrico con un interruptor, un electroimán, una armadura de hierro dulce, una varilla elástica, una campanilla y un tornillo o elemento raptor.

Un altavoz está constituido por un imán, una o dos bobinas, una membrana vibratoria y un pabellón acústico.

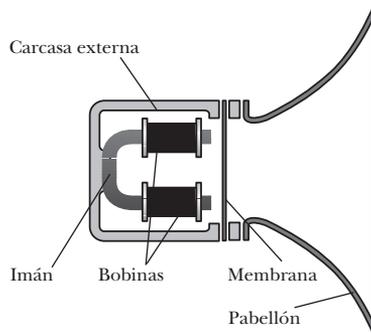
- **Timbre**

Cuando se cierra el circuito eléctrico pulsando el interruptor, una corriente eléctrica circula a través del electroimán, que atrae entonces a su armadura. La armadura está unida a la varilla elástica que, al desplazarse, golpea la campanilla produciendo el sonido. El elemento raptor hace que el electroimán se desactive cada vez que atrae a la varilla.



Altavoz

La corriente variable que circula por la bobina hace variar el flujo magnético y, por tanto, también hace variar la fuerza de atracción sobre la membrana, provocando las vibraciones de ésta. La vibración se transmite a las partículas de aire adyacentes y de esta manera se genera el sonido. El altavoz está provisto de un pabellón para mejorar el rendimiento acústico.



1. MAGNETISMO (pág. 197)

1. Al romper un imán en dos o más trozos obtenemos varios imanes porque el magnetismo de los materiales es debido a la orientación de los dipolos magnéticos de su interior. El movimiento de los electrones alrededor del núcleo atómico genera un campo magnético. Aunque rompamos un imán, en cada uno de los nuevos trozos sigue habiendo electrones en movimiento que generan el campo magnético correspondiente y con la misma orientación.

Para determinar con una brújula los polos norte y sur de un imán, es necesario tener en cuenta que la punta de la aguja que señala el polo Norte terrestre constituye el polo norte de la aguja imantada. Por tanto, como los polos distintos se atraen, la aguja señalará el polo sur del imán.

2. La experiencia que sirvió de base para la teoría electromagnética fue la experiencia de Oersted (1777–1851). Oersted descubrió que una corriente eléctrica desviaba la aguja imantada de una brújula. Esto significa que la corriente eléctrica genera un campo magnético.
3. Las propiedades magnéticas de los imanes naturales tienen su origen en el movimiento de los electrones alrededor del núcleo del átomo. Como los electrones son cargas eléctricas, podemos entender su movimiento alrededor del núcleo como una corriente eléctrica que, tal como demostró Oersted, generará un campo magnético. De esta forma, cada átomo es equivalente a un pequeño imán o dipolo magnético. Este hecho es común a todos los materiales. En los imanes naturales los dipolos están orientados en un mismo sentido y suman sus efectos, mientras que en la mayor parte de los materiales están orientados al azar y sus efectos se cancelan.
4. El imán atrae a los objetos de hierro, pero no a los de cobre o aluminio. El imán no atrae a cualquier tipo de metal, sólo atraerá aquellos materiales cuyos dipolos atómicos puedan orientarse según el campo magnético del imán.

2. ESTUDIO DEL CAMPO MAGNÉTICO (págs. 199, 201, 203, 205, 206, 207 y 209)

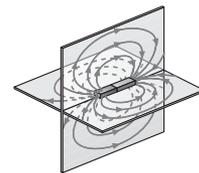
5. La fuerza magnética que actúa sobre una carga eléctrica depende del valor de la carga eléctrica, de la velocidad

con que ésta se mueve, del valor del campo magnético y de la orientación de la velocidad respecto al campo magnético.

Sí. Cuando la carga eléctrica se mueve en la dirección del campo magnético, no actúa ninguna fuerza sobre ella.

6. Un campo magnético se describe mediante el vector campo magnético o inducción magnética, \vec{B} . La inducción magnética es la fuerza que actúa sobre una carga de 1 C que se desplaza con una velocidad de 1 m/s perpendicularmente a \vec{B} .

El campo magnético se representa con las líneas de inducción magnética, tangentes en cada punto al vector inducción magnética. La densidad de líneas en una región es proporcional al módulo del campo magnético en dicha región.



7. Las líneas de inducción magnética, al igual que las de campo eléctrico, cumplen estas condiciones:
 - El vector campo, \vec{B} , es tangente a las líneas de inducción en cada punto del espacio y tiene el mismo sentido que éstas.
 - La densidad de líneas de inducción es una región proporcional al módulo de \vec{B} en dicha región.

Las líneas de inducción magnética, a diferencia de las de campo eléctrico:

- No tienen principio ni fin. Salen del polo norte del imán y entran por el polo sur, continuando su recorrido por el interior del imán hasta cerrar la línea.
- Otra diferencia esencial es que las fuerzas magnéticas no son tangentes a las líneas de inducción, como en el caso del campo eléctrico, sino perpendiculares en cada punto al campo magnético.

8. Resultados:

Las limaduras se orientan alrededor del hilo formando circunferencias centradas en éste, siguiendo las líneas de inducción magnética del campo generado por la corriente que circula por el hilo. Las circunferencias son más claras cerca del hilo, donde el campo magnético es más intenso.

9. Las líneas de inducción magnética son tangentes al campo magnético en todo punto, mientras que el campo magnético es siempre perpendicular al elemento de corriente que lo genera. Por tanto, las líneas de inducción magnética de una corriente eléctrica no pueden ser paralelas a la corriente.

10. Datos: $R = 32 \text{ cm} = 0,32 \text{ m}$; $I = 2 \text{ A}$

Calculamos la inducción magnética en el centro de la espira utilizando la expresión hallada en el ejemplo 1 (pág. 201) del libro del alumno:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2R} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1} \cdot 2 \text{ A}}{2 \cdot 0,32 \text{ m}} = 3,9 \cdot 10^{-6} \text{ T}$$

11. Datos: $a = 30 \text{ cm} = 0,3 \text{ m}$; $B = 4,2 \cdot 10^{-6} \text{ T}$

Calculamos la intensidad de corriente eléctrica que genera este campo utilizando la expresión hallada en el ejemplo 2 (pág. 201) del libro del alumno para el campo generado por una corriente rectilínea indefinida:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi a}; \quad I = \frac{2\pi a B}{\mu_0} = \frac{2\pi \cdot 0,3 \text{ m} \cdot 4,2 \cdot 10^{-6} \text{ T}}{4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1}}$$

$$I = 6,3 \text{ A}$$

12. Teorema de Ampère:

La circulación del campo magnético sobre cualquier curva cerrada C es igual al producto de la permeabilidad, μ_0 , por la intensidad de corriente eléctrica, I_C , que atraviesa la superficie limitada por la curva cerrada C .

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I_C$$

La principal utilidad del teorema de Ampère es el cálculo del campo magnético o inducción magnética generado por una corriente en sistemas con una geometría apropiada, como en el caso del solenoide.

13. Datos: $N = 350$ espiras; $l = 24 \text{ cm} = 0,24 \text{ m}$; $I = 2 \text{ A}$

Para determinar la inducción magnética en el interior del solenoide utilizamos la expresión deducida en el ejemplo 3 (pág. 203) del libro del alumno:

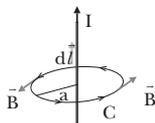
$$B = \mu_0 \frac{N}{l} I = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1} \frac{350}{0,24 \text{ m}} 2 \text{ A}$$

$$B = 3,7 \cdot 10^{-3} \text{ T}$$

14. Se define como **circulación del campo magnético** la integral, a lo largo de cierta trayectoria, del producto escalar del vector inducción magnética, \vec{B} , por el elemento de trayectoria $d\vec{l}$.

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{l}$$

15. Las líneas de inducción magnética generadas por una corriente rectilínea indefinida deben ser, por simetría, circunferencias centradas en el hilo conductor.



Para aplicar el teorema de Ampère escogemos como trayectoria una circunferencia de radio a centrada en el hilo.

El campo magnético será paralelo al elemento de trayectoria $d\vec{l}$ a lo largo de toda la trayectoria. Además, como la circunferencia se mantiene a una distancia constante del conductor, la intensidad del campo magnético será constante a lo largo de toda la trayectoria. Entonces, la circulación del campo magnético será:

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{l} = B \oint_C dl = B 2\pi a$$

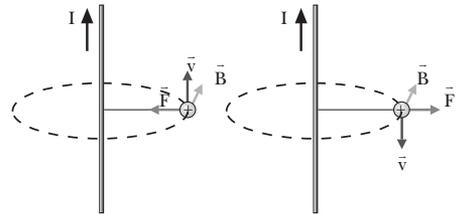
Aplicando el teorema de Ampère:

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I; \quad B 2\pi a = \mu_0 I; \quad B = \frac{\mu_0 I}{2\pi a}$$

16. Un electrón debe entrar en un campo magnético uniforme moviéndose en una dirección paralela al vector inducción magnética \vec{B} para que el campo magnético no ejerza ninguna fuerza sobre él. Como la fuerza de Lorentz es proporcional al producto vectorial de la velocidad por el campo magnético, si estos vectores son paralelos, la fuerza es nula.

17. a) Si una carga eléctrica positiva se mueve paralelamente a un hilo conductor, como el campo magnético es perpendicular al hilo (las líneas de inducción magnética son circunferencias centradas en el hilo), la velocidad de la carga y el campo magnético serán perpendiculares en todo momento. Por tanto, la fuerza que experimentará la carga será máxima y orientada en la dirección de la recta que une la carga con el hilo conductor.

- b) Según el sentido de la corriente, la fuerza acercará la carga hacia el conductor o la alejará de él. Si la carga se mueve en el mismo sentido que la corriente, la fuerza atraerá la carga hacia la corriente. En cambio, si la corriente y la velocidad de la carga tienen sentidos contrarios, la fuerza alejará la carga del conductor.



18. Datos: $q = +e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$; $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$; $B = 0,2 \text{ T}$; $v = 3 \cdot 10^7 \text{ m/s}$; $\alpha = 90^\circ$

- a) Calculamos la fuerza mediante la ley de Lorentz:

$$\vec{F} = q(\vec{v} \times \vec{B}); \quad F = q v B \sin \alpha$$

$$F = +1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 3 \cdot 10^7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot 0,2 \text{ T} \cdot \sin 90^\circ$$

$$F = 9,6 \cdot 10^{-13} \text{ N}$$

b) Hallamos el radio de la órbita circular que describe:

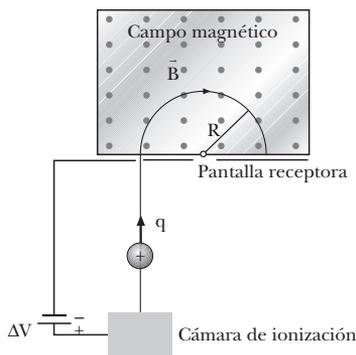
$$R = \frac{m v}{q B} = \frac{1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \cdot 3 \cdot 10^7 \text{ m/s}}{+1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 0,2 \text{ T}} = 1,6 \text{ m}$$

19. La principal aplicación del espectrómetro de masas consiste en identificar los diferentes isótopos de un mismo elemento y determinar su abundancia en la naturaleza. Al tener todos los isótopos la misma carga pero diferente masa, al penetrar perpendicularmente en un campo magnético describen órbitas circulares de distinto radio. Si somos capaces de medir los radios de las órbitas, podremos determinar la relación masa-carga de los distintos isótopos.

20. Para determinar la masa de los diferentes isótopos de un elemento químico que inciden sobre la pantalla de un espectrómetro de masas, es necesario medir el radio, R , de la órbita circular que describen a partir de los puntos de la pantalla sobre los que inciden. Entonces, conociendo el elemento químico de que se trata, relacionamos la masa del isótopo, m , con la carga eléctrica del elemento, q , el campo magnético del espectrómetro, B , y la diferencia de potencial aplicada, ΔV :

$$\frac{m}{q} = \frac{R^2 B^2}{2\Delta V}$$

21.



22. El selector de velocidades se introduce entre la fuente de iones y el campo magnético. Su función es conseguir que todos los iones que penetran en el campo magnético lo hagan con la misma velocidad, y determinar esta velocidad con exactitud.

El selector de velocidades consiste en una región en la que existen un campo magnético y un campo eléctrico perpendiculares entre sí y perpendiculares a su vez a la dirección del movimiento de los iones. Una ranura detiene a los iones que son desviados de su trayectoria, de esta manera sólo atraviesan la ranura los iones con una velocidad determinada, aquéllos para los que las fuerzas eléctrica y magnética se compensan:

$$\vec{F}_{\text{magn}} + \vec{F}_{\text{electr}} = 0$$

$$e v B = e E; \quad v = \frac{E}{B}$$

23. El ciclotrón es un dispositivo que permite acelerar partículas (protones y neutrones) hasta conseguir velocidades muy altas. Estas partículas se utilizan en la producción de materiales radiactivos con aplicaciones médicas.

El ciclotrón consiste en dos recipientes metálicos semicirculares o *des*, D_1 y D_2 , colocados perpendicularmente a un campo magnético. En el centro de las *des* existe una fuente de iones. Debido a la presencia del campo magnético, los iones se mueven en circunferencias por dentro de las *des*. En el momento en que el ion pasa de una *de* a la otra, se aplica entre ambas una diferencia de potencial adecuada para acelerar la partícula. Ésta, al ganar velocidad, describe órbitas de radio cada vez mayor. La diferencia de potencial se va alternando para que tome el valor adecuado en el momento exacto en que la partícula pasa de una *de* a la otra. Cuando el radio de la trayectoria es igual al radio de las *des*, la partícula adquiere su velocidad máxima y sale del ciclotrón.

24. La base del funcionamiento del sincrotrón es parecida a la del ciclotrón. La diferencia esencial está en que en el sincrotrón el radio de la trayectoria se mantiene constante. Esto se consigue introduciendo las partículas a gran velocidad y acelerándolas mediante un campo magnético y una frecuencia de oscilaciones variables. De este modo pueden construirse aceleradores en forma anular: sólo es necesario generar el campo magnético a lo largo de un anillo.

25. Una corriente eléctrica en un campo magnético uniforme no experimentará fuerza magnética alguna si es paralela al campo magnético. La fuerza magnética sobre un elemento de corriente es proporcional al producto vectorial del elemento de corriente por el campo. Si son paralelos, el producto vectorial es nulo y el elemento de corriente no experimenta fuerza magnética.

26. Datos: $l = 4 \text{ m}$; $I = 2,5 \text{ A}$; $B = 2 \cdot 10^{-2} \text{ T}$; $\alpha = 90^\circ$

Calculamos la fuerza que experimentará el conductor rectilíneo en presencia del campo magnético:

$$F = I l B \text{ sen } \alpha = 2,5 \text{ A} \cdot 4 \text{ m} \cdot 2 \cdot 10^{-2} \text{ T} \cdot \text{sen } 90^\circ$$

$$F = 0,2 \text{ N}$$

27. Para determinar si las corrientes eléctricas que circulan por dos hilos rectilíneos y paralelos tienen el mismo sentido o sentidos contrarios, debemos acercar los dos hilos conductores. Si se atraen, las corrientes tendrán el mismo sentido; mientras que, si se repelen, las corrientes tendrán sentidos contrarios.

28. Datos: $I_1 = 2 \text{ A}$; $I_2 = 3 \text{ A}$; $d = 12 \text{ cm} = 0,12 \text{ m}$

La fuerza es repulsiva, ya que las dos corrientes tienen sentidos contrarios. El módulo de esta fuerza por unidad de longitud es:

$$\frac{F}{l} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi d} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1} \cdot 2 \text{ A} \cdot 3 \text{ A}}{2\pi \cdot 0,12 \text{ m}}$$

$$\frac{F}{l} = 1 \cdot 10^{-5} \frac{N}{m}$$

Definición de amperio (pág. 209)

Se define el amperio para un valor de la fuerza entre corrientes igual a $2 \cdot 10^{-7}$ N porque éste es el valor de la fuerza por unidad de longitud que se ejercen dos corrientes separadas una distancia de 1 m en el vacío y tales que, por una sección del conductor, cruza una carga de 1 C por segundo. De esta forma, una corriente de 1 A corresponde a un flujo de carga a través de la sección del conductor de 1 C por segundo.

Para dos corrientes de 2 A, como la fuerza es proporcional al producto de las intensidades de las dos corrientes, la fuerza será de $8 \cdot 10^{-7}$ N.

3. COMPORTAMIENTO DE LA MATERIA EN CAMPOS MAGNÉTICOS (pág. 211)

29. Clasificación de los materiales según sus propiedades magnéticas:

- **Sustancias paramagnéticas:** tienen una permeabilidad relativa ligeramente superior a la unidad, $\mu_r \approx 1$. Entonces, $B_{\text{int}} \approx B_{\text{ext}}$. Son débilmente atraídas por un imán.
- **Sustancias diamagnéticas:** su permeabilidad relativa es ligeramente inferior a la unidad, $\mu_r \lesssim 1$. Por tanto, $B_{\text{int}} \lesssim B_{\text{ext}}$. Son débilmente repelidas por un imán.
- **Sustancias ferromagnéticas:** se caracterizan por tener una permeabilidad relativa mucho mayor que la unidad, $\mu_r \gg 1$. Por tanto, $B_{\text{int}} \gg B_{\text{ext}}$. Además, μ_r no es constante, sino que depende del campo aplicado y del estado previo de imantación del material. Estas sustancias son fuertemente atraídas por los imanes.

30. La diferencia fundamental entre un material paramagnético y otro ferromagnético es que este último está formado por pequeñas regiones, llamadas dominios magnéticos, en las que todos los dipolos atómicos están orientados en la misma dirección. Al aplicar al material un campo magnético externo, varios de sus dominios se orientan en la dirección del campo, con la totalidad de sus dipolos, por tanto el material ferromagnético se imanta. En cambio, un material paramagnético carece de dominios magnéticos, por lo que al aplicar al material un campo magnético externo sólo se orienta en la dirección del campo una pequeña fracción de los dipolos atómicos.

31. Un imán pierde sus propiedades magnéticas si se somete a temperaturas muy elevadas, porque los dipolos que, orientados paralelamente, dotan al imán de sus propiedades magnéticas, pierden su orientación con la temperatura. La temperatura aumenta la energía de los átomos, que vibran y pierden su orientación. Los dipolos quedan entonces orientados aleatoriamente y el imán pierde sus propiedades magnéticas.

32. Respuesta sugerida:

Los materiales paramagnéticos, al igual que los ferromagnéticos, tienen moléculas con momentos dipolares permanentes. En concreto, en el caso de los materiales paramagnéticos, estos dipolos no interactúan fuertemente entre sí, de forma que normalmente están orientados al azar. En presencia de un campo magnético externo, estos dipolos pueden orientarse paralelamente al campo y contribuir a incrementar su intensidad. Sin embargo, si la temperatura no es muy baja ni el campo muy intenso, el movimiento de los átomos debido a la temperatura tenderá a desorientarlos, de forma que sólo una pequeña fracción de los dipolos contribuirá al campo magnético interior.

En el caso de los materiales diamagnéticos, sus moléculas no poseen momentos magnéticos permanentes. En presencia del campo magnético externo, se induce en las moléculas un momento dipolar de sentido opuesto al campo que lo genera. De esta forma, el campo en el interior del material se ve debilitado.

Para la elaboración del informe se recomienda seguir esta estructura:

- **Introducción.** Plantea el objetivo del trabajo, la justificación del método seguido y el comentario de las causas que han motivado la selección del tema.
- **Cuerpo o desarrollo.** Describe mediante una exposición lógica y coherente el contenido del estudio, organizado en capítulos, apartados y subapartados. Conviene incluir ejemplos, dibujos fotografías, gráficos... que ilustren y completen la exposición del tema.
- **Conclusión.** Resume las principales ideas que se han ido exponiendo e incluye las impresiones personales y los juicios críticos oportunos.
- **Bibliografía.** Es la relación de los libros que se han consultado, ordenados alfabéticamente. Se deben indicar los apellidos y el nombre del autor, el título del libro, la editorial, y el lugar y la fecha de edición.

FÍSICA Y SOCIEDAD (pág. 212)

a) En cualquier lugar sobre la superficie de la Tierra las líneas de inducción del campo magnético terrestre van de Sur a Norte geográfico. El polo norte magnético coincide aproximadamente con el polo Sur geográfico, mientras que el polo sur magnético se sitúa cerca del polo Norte geográfico.

El eje magnético se mueve actualmente hacia el Oeste a razón de un grado de longitud cada 5 años. Se sabe, gracias a los estudios paleomagnéticos, que a lo largo de los últimos 2 500 millones de años el campo magnético terrestre se ha invertido una vez cada millón de años.

La intensidad del campo magnético terrestre es muy pequeña, cerca de los polos se da el valor máximo, de unos $5 \cdot 10^{-5}$ T.

- b) Se define como **declinación magnética** el ángulo que forman las direcciones Norte-Sur geográfica y Norte-Sur magnética.
- c) Respuesta sugerida:

Introducción:

Desde hace años los científicos aceptan que el campo magnético terrestre está ligado a los movimientos de la materia en el núcleo de la Tierra. El lento fluir de estos materiales produce corrientes eléctricas, las cuales inducen el campo magnético. Pero en esta teoría hay muchos problemas por resolver. La forma exacta de estos movimientos, la fuente de energía que los mantiene y la forma cómo inducen el campo magnético son todavía aspectos desconocidos. Para profundizar en este estudio, es necesario conocer las características del campo magnético terrestre en la superficie y los datos disponibles sobre la estructura interna del globo.

Cuerpo o desarrollo:

El módulo y la dirección del campo magnético terrestre son variables a lo largo de la superficie. El valor máximo se da cerca de los polos y es de 0,3 gauss. Su dirección es, en promedio, Norte-Sur, pero presenta ligeras variaciones. Estas inhomogeneidades hacen pensar que el campo está formado por remolinos irregulares. Por otra parte, desde que se estudia el campo magnético terrestre, su intensidad ha ido decreciendo y sus remolinos desplazándose hacia el Oeste a razón de unos 90 metros por día. Además, los estudios paleomagnéticos indican que el campo ha ido invirtiendo su sentido aproximadamente cada millón de años.

En cuanto a la estructura del planeta, sabemos que existe un núcleo interno sólido, de unos 1 220 km de radio, y un núcleo externo fluido (3 485 km de radio). El movimiento de esta parte fluida del interior de la Tierra puede ser el origen de su campo magnético.

El principal problema con el que se encuentran los geofísicos es la imposibilidad de obtener datos sobre el campo magnético en el núcleo y sobre sus variaciones. Por ejemplo, se cree que deben existir importantes campos toroidales cuyas líneas son paralelas a las superficies esféricas centradas en el núcleo y, por ello, indetectables.

Por ahora, el modelo más aceptado sobre el origen del campo magnético es el de la dinamo automantenida. Según este modelo, algún campo magnético inicial (el campo que llena la galaxia sería suficiente) generó corrientes eléctricas en el material en movimiento. Estas corrientes, a su vez, empezaron a inducir un campo magnético. Una vez iniciado el proceso, el mismo campo magnético mantiene las corrientes, y viceversa. Parece claro que el movimiento del material está regido por los efectos conjuntos de la gravedad, la rotación y los movimientos radiales debidos a las diferencias de densidad como consecuencia de diferencias de temperatura y composición.

Para estudiar la posible forma de las corrientes, se construyen modelos teóricos y experimentales. En estos modelos se observa que el movimiento del material está confinado en un cilindro paralelo al eje de rotación. En concreto, el flujo dentro de esta región forma largos rodillos paralelos, cuyo diámetro crece con la viscosidad del material. Además, dentro de estos rodillos el material se mueve hacia abajo en el hemisferio Norte y hacia arriba en el hemisferio Sur, siendo el movimiento horizontal en el plano ecuatorial. Los modelos experimentales no pueden reproducir los campos magnéticos, pero la teoría indica que el campo generado sería creciente con el tiempo. A partir de cierto valor crítico, las fuerzas ejercidas por el campo magnético sobre el material son tales que el flujo sigue un movimiento horizontal único a gran escala y genera un campo magnético intenso y toroidal.

Algunos puntos que los modelos no explican son las inversiones temporales del sentido del campo y el origen de la energía que mantiene el movimiento del material, contrarrestando los efectos de la viscosidad y del mismo campo magnético. En los modelos experimentales la fuente de energía es un gradiente de temperatura entre el centro de la esfera y el exterior. En la Tierra, dicho gradiente de temperatura podría mantenerse gracias a la presencia de elementos radiactivos en el núcleo, al calor liberado en el proceso de solidificación del núcleo y a la energía gravitatoria liberada en los movimientos radiales del material fluido.

Conclusión:

En resumen, parece claro que el origen del campo magnético terrestre está relacionado con el movimiento del material fluido en el núcleo de la Tierra. La forma de dichas corrientes puede simularse mediante modelos experimentales o teóricos, pero quedan muchas preguntas por contestar. El estudio del interior del planeta es difícil y sólo puede obtenerse información mediante métodos indirectos. Los modelos pueden ajustar más o menos el campo observado, pero es complicado saber si reproducen adecuadamente el núcleo terrestre.

Bibliografía:

«Origen del campo magnético terrestre», Ch. R. Carrigan, D. Gubbins, *Investigación y ciencia*, abril 1979, pág. 82.

RESOLUCIÓN DE EJERCICIOS Y PROBLEMAS

(págs. 214 y 215)

33. Datos: $R = 32 \text{ cm} = 0,32 \text{ m}$; $I = 4 \text{ A}$

Calculamos el campo magnético en el centro del conductor en forma de semicircunferencia haciendo uso de la expresión hallada en el problema resuelto 1 (pág. 276) del libro del alumno:

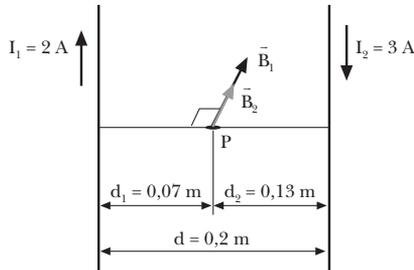
$$B = \frac{\mu_0 I}{4R} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1} \cdot 4 \text{ A}}{4 \cdot 0,32 \text{ m}} = 3,9 \cdot 10^{-6} \text{ T}$$

34. Datos: $R = 40 \text{ cm} = 0,4 \text{ m}$; $B = 2 \cdot 10^{-6} \text{ T}$

Calculamos la intensidad de corriente que circula por el conductor en forma de semicircunferencia haciendo uso de la expresión hallada en el problema resuelto 1 (pág. 214) del libro del alumno para el campo magnético en el centro de un conductor en forma de semicircunferencia:

$$B = \frac{\mu_0 I}{4R}; \quad I = \frac{4RB}{\mu_0} = \frac{4 \cdot 0,4 \text{ m} \cdot 2 \cdot 10^{-6} \text{ T}}{4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1}} = 2,5 \text{ A}$$

35. Datos:



En el punto P, los campos magnéticos creados por las dos corrientes tienen la misma dirección, perpendicular al plano que contiene los dos hilos, y el mismo sentido, ya que son corrientes de sentidos opuestos, como se observa en la figura.

Calculamos la inducción magnética creada en el punto P por cada uno de los hilos:

$$B_1 = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi d_1} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1} \cdot 2 \text{ A}}{2\pi \cdot 0,07 \text{ m}} = 5,7 \cdot 10^{-6} \text{ T}$$

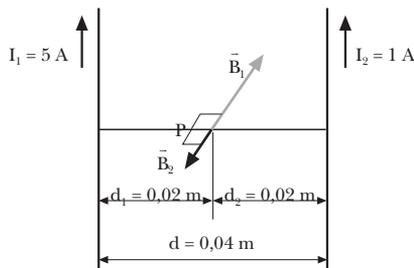
$$B_2 = \frac{\mu_0 I_2}{2\pi d_2} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1} \cdot 3 \text{ A}}{2\pi \cdot 0,13 \text{ m}} = 4,6 \cdot 10^{-6} \text{ T}$$

La inducción magnética resultante es la suma vectorial de \vec{B}_1 y \vec{B}_2 . Como estos vectores tienen la misma dirección y sentido, el módulo del campo magnético resultante será la suma de los módulos de \vec{B}_1 y \vec{B}_2 :

$$B = B_1 + B_2 = 5,7 \cdot 10^{-6} \text{ T} + 4,6 \cdot 10^{-6} \text{ T}$$

$$B = 1,0 \cdot 10^{-5} \text{ T}$$

36. Datos:



En el punto P, los campos magnéticos creados por las dos corrientes tienen la misma dirección, perpendicular al plano que contiene los dos hilos, y sentidos opuestos, ya que las corrientes tienen el mismo sentido, como se observa en la figura.

Calculamos la inducción magnética creada en el punto P por cada uno de los hilos:

$$B_1 = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi d_1} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1} \cdot 5 \text{ A}}{2\pi \cdot 0,02 \text{ m}} = 5 \cdot 10^{-5} \text{ T}$$

$$B_2 = \frac{\mu_0 I_2}{2\pi d_2} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1} \cdot 1 \text{ A}}{2\pi \cdot 0,02 \text{ m}} = 1 \cdot 10^{-5} \text{ T}$$

La inducción magnética resultante es la suma vectorial de \vec{B}_1 y \vec{B}_2 . Como estos vectores tienen la misma dirección y sentidos opuestos, el módulo del campo magnético resultante será la diferencia de los módulos de \vec{B}_1 y \vec{B}_2 :

$$B = B_1 - B_2 = 5 \cdot 10^{-5} \text{ T} - 1 \cdot 10^{-5} \text{ T} = 4 \cdot 10^{-5} \text{ T}$$

37. Datos: $m_p = m_n = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$;

$$q_p = +e = +1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C};$$

$$q_n = 0; \Delta V = 2 \cdot 10^3 \text{ V}; B = 0,4 \text{ T}$$

- a) El incremento de energía cinética de la partícula alfa es igual a su pérdida de energía potencial eléctrica:

$$\frac{1}{2} m v^2 = q \Delta V \Rightarrow v = \sqrt{\frac{2q \Delta V}{m}}$$

Para calcular la velocidad de la partícula alfa hallamos primero su masa y su carga:

$$q = 2q_p + 2q_n = 2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} = 3,2 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

$$m = 2m_p + 2m_n = 4m_p = 4 \cdot 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

$$m = 6,68 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

Entonces, la velocidad de la partícula alfa al penetrar en el campo magnético será:

$$v = \sqrt{\frac{2q \Delta V}{m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 3,2 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 2 \cdot 10^3 \text{ V}}{6,68 \cdot 10^{-27} \text{ kg}}}$$

$$v = 4,4 \cdot 10^5 \text{ m/s}$$

- b) Determinamos el radio de la circunferencia que describe la partícula α a partir de la velocidad y el campo magnético:

$$R = \frac{m v}{q B} = \frac{6,68 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \cdot 4,4 \cdot 10^5 \text{ m/s}}{3,2 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 0,4 \text{ T}}$$

$$R = 0,023 \text{ m} = 2,3 \text{ cm}$$

38. Datos: $R = 0,9 \text{ m}$; $B = 0,4 \text{ T}$

- a) Calculamos la masa y la carga del ion $^3\text{H}^+$:

$$q = 1q_p + 1q_n = +e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

$$m = 1m_p + 1m_n = 2m_p = 2 \cdot 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

$$m = 3,34 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

Hallamos la velocidad del ion a partir del radio de la órbita circular que describe y del campo magnético:

$$R = \frac{m v}{q B}; \quad v = \frac{q B R}{m} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 0,4 \text{ T} \cdot 0,9 \text{ m}}{3,34 \cdot 10^{-27} \text{ kg}}$$

$$v = 1,72 \cdot 10^7 \text{ m/s}$$

Determinamos la energía cinética del ion:

$$E_c = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{2} \cdot 3,34 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \cdot (1,72 \cdot 10^7 \text{ m/s})^2$$

$$E_c = 4,9 \cdot 10^{-13} \text{ J}$$

- b) El incremento de energía cinética que ha experimentado el ion es igual a su pérdida de energía potencial eléctrica. Por tanto:

$$E_c = E_p = q\Delta V; \quad \Delta V = \frac{E_c}{q} = \frac{4,9 \cdot 10^{-13} \text{ J}}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}}$$

$$\Delta V = 3,1 \cdot 10^6 \text{ V}$$

39. Datos: $R = 0,6 \text{ m}$; $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$;
 $q_p = +e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$; $B = 1,5 \text{ T}$

- a) La condición para que se produzca resonancia es que la frecuencia del oscilador eléctrico coincida con la frecuencia de la partícula acelerada en el ciclotrón:

$$f = \frac{eB}{2\pi m_p} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 1,5 \text{ T}}{2\pi \cdot 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}} = 2,3 \cdot 10^7 \text{ Hz}$$

- b) Cuando los protones adquieren su velocidad máxima salen del ciclotrón, siendo el radio de su órbita igual al radio de las *des* del ciclotrón. Por tanto:

$$v_{\max} = \frac{eBR}{m_p} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 1,5 \text{ T} \cdot 0,6 \text{ m}}{1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}}$$

$$v_{\max} = 8,6 \cdot 10^7 \text{ m/s}$$

40. Datos: $R = 0,9 \text{ m}$; $f = 1,7 \cdot 10^6 \text{ Hz}$

- a) Calculamos la masa y la carga del ion ${}^2\text{H}^+$:

$$q = 1q_p + 1q_n = +e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

$$m = 1m_p + 1m_n = 2m_p = 2 \cdot 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

$$m = 3,34 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

Hallamos el campo magnético en el interior del ciclotrón a partir de la frecuencia de resonancia:

$$f = \frac{qB}{2\pi m}$$

$$B = \frac{2\pi m f}{q} = \frac{2\pi \cdot 3,34 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \cdot 1,7 \cdot 10^6 \text{ Hz}}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}}$$

$$B = 0,2 \text{ T}$$

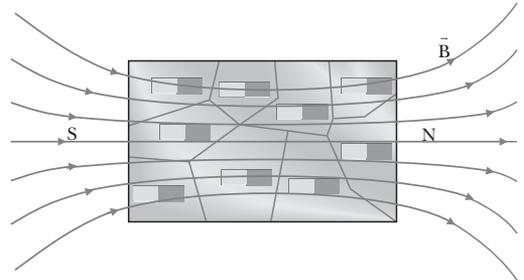
- b) Cuando los deuterones adquieren su velocidad máxima salen del ciclotrón, siendo el radio de su órbita igual al radio de las *des* del ciclotrón. Por tanto:

$$v_{\max} = \frac{eBR}{m} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 0,2 \text{ T} \cdot 0,9 \text{ m}}{3,34 \cdot 10^{-27} \text{ kg}}$$

$$v_{\max} = 8,6 \cdot 10^6 \text{ m/s}$$

EJERCICIOS Y PROBLEMAS (págs. 216 y 217)

41. Las propiedades de un imán se deben a la presencia en su interior de pequeñas regiones llamadas dominios, en las que todos los dipolos atómicos tienen la misma orientación. Estos dipolos están orientados paralelamente, definiendo así un eje magnético en el material. De esta manera los extremos del imán se constituyen en dos polos magnéticos diferentes (norte y sur). El campo magnético es aquí más intenso y las propiedades magnéticas del imán, más acusadas.



42. Una carga eléctrica en reposo y otra carga en movimiento no producen la misma perturbación en el espacio. Una carga en reposo sólo genera a su alrededor un campo eléctrico. En cambio, un carga en movimiento genera un campo eléctrico y un campo magnético.

43. Si conocemos la forma de las líneas de inducción magnética y la dirección de movimiento de una carga eléctrica, podemos determinar la dirección de la fuerza que actuará sobre ella. La ley de Lorentz establece que esta fuerza será proporcional al producto vectorial de la velocidad por el campo magnético. Por tanto, como las líneas de inducción magnética indican en cada punto la dirección del campo magnético, sabemos que la fuerza que experimentará la carga será perpendicular a su velocidad y a las líneas de inducción magnética.

44. Campo magnético creado por un hilo rectilíneo indefinido por el que circula una corriente de intensidad I a una distancia a del hilo: $B = \frac{\mu_0 I}{2\pi a}$.

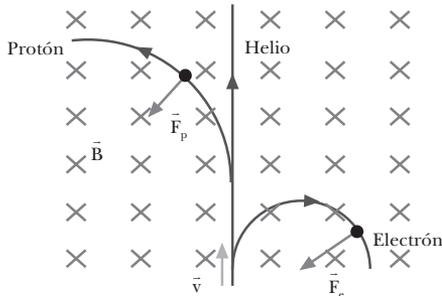
Campo magnético creado por una espira circular de radio R por la que circula una corriente de intensidad I en su centro: $B = \frac{\mu_0 I}{2R}$.

Campo magnético creado por un solenoide con N espiras, de longitud l , por el que circula una corriente de intensidad I en su interior: $B = \mu_0 \frac{N}{l} I$.

45. a) Supongamos un electrón, un protón y un átomo de helio que penetran en un campo magnético uniforme con la misma velocidad y en la misma dirección, perpendicular al campo.

El radio de la órbita circular que describe cada partícula es proporcional a su masa e inversamente proporcional a su carga. El átomo de helio, al ser neutro,

no experimenta desviación alguna. El electrón y el protón tienen la misma carga, pero de signos opuestos. Por esta razón se desvían en sentidos opuestos. Además, el protón tiene una masa mayor. Por eso, el radio de la órbita del protón es mayor que el de la del electrón.



b) La aceleración centrípeta, gracias a la cual estas partículas describen una trayectoria circular, es:

$$a_c = \frac{F_c}{m} = \frac{q v B}{m}$$

La aceleración del átomo de helio es nula, pues su carga neta es cero. Puesto que las cargas eléctricas del protón y del electrón son iguales en valor absoluto y la masa del electrón es unas dos mil veces menor que la del protón, el electrón adquiere una aceleración que será unas dos mil veces mayor.

El aumento de la energía cinética es proporcional al valor de la fuerza que actúa sobre cada partícula. Por ello, sobre el átomo de helio, por ser su carga nula, no actúa ninguna fuerza y su energía cinética se mantiene constante. El protón y el electrón experimentan fuerzas iguales, pero en sentidos opuestos. Por tanto, su energía cinética aumenta con la distancia recorrida a razones iguales.

46. El ciclotrón es un dispositivo que permite acelerar partículas hasta adquirir velocidades muy altas. En el momento en que la partícula o ion pasa de una *de* a la otra, se aplica entre ambas una diferencia de potencial adecuada para acelerar la partícula. Ésta, al ganar velocidad, describe órbitas de radio cada vez mayor. La diferencia de potencial se va alternando para que tome el valor adecuado en el momento exacto en que la partícula pasa de una *de* a la otra. Cuando el radio de la trayectoria es igual al radio de las *des*, la partícula adquiere su velocidad máxima y sale del ciclotrón.
47. La fuerza que ejerce un campo magnético sobre una corriente eléctrica no puede ser nunca paralela a la corriente. La fuerza que actúa sobre cada punto del conductor es proporcional al producto vectorial del elemento de corriente por el campo magnético. Por tanto, la fuerza es perpendicular a la corriente en cualquier punto del conductor.
48. Dos hilos conductores rectos y paralelos se atraen si las corrientes que circulan por ellos tienen el mismo senti-

do. Los mismos hilos se repelerán si las corrientes que circulan por ellos tienen sentidos opuestos.

49. Las sustancias ferromagnéticas se caracterizan por tener una permeabilidad relativa mucho mayor que la unidad, $\mu_r \gg 1$. Por tanto, $B_{int} \gg B_{ext}$. Además, μ_r no es constante, sino que depende del campo aplicado y del estado previo de imantación del material. Estas sustancias son fuertemente atraídas por los imanes. Su comportamiento se debe a que un material ferromagnético está formado por pequeñas regiones, llamadas dominios magnéticos, en las que todos los dipolos atómicos están orientados en la misma dirección. En presencia de un campo magnético externo, estos dominios se orientan paralelamente a B_{ext} y contribuyen al campo interno, de forma que $B_{int} \gg B_{ext}$.
50. Datos: $R = 10 \text{ cm} = 0,1 \text{ m}$; $I = 4 \text{ A}$

Calculamos la inducción magnética en el centro de la espira:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2R} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1} \cdot 4 \text{ A}}{2 \cdot 0,1 \text{ m}} = 2,5 \cdot 10^{-5} \text{ T}$$

51. Datos: $a = 28 \text{ cm} = 0,28 \text{ m}$; $B = 3 \cdot 10^{-6} \text{ T}$

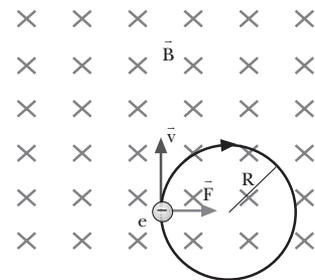
Calculamos la intensidad de corriente eléctrica que genera este campo:

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

$$I = \frac{2\pi a B}{\mu_0} = \frac{2\pi \cdot 0,28 \text{ m} \cdot 3 \cdot 10^{-6} \text{ T}}{4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1}} = 4,2 \text{ A}$$

52. Datos: $q = -e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$; $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$; $B = 3 \cdot 10^{-3} \text{ T}$; $v = 1,6 \cdot 10^6 \text{ m/s}$; $\alpha = 90^\circ$

a)



b) Hallamos el radio de la órbita circular que describe:

$$R = \frac{m v}{q B} = \frac{9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \cdot 1,6 \cdot 10^6 \text{ m/s}}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 3 \cdot 10^{-3} \text{ T}}$$

$$R = 3,0 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

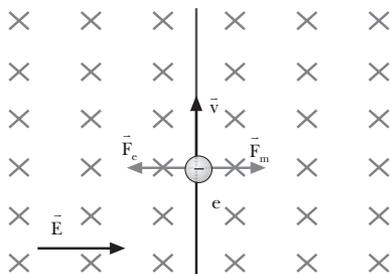
Si se tratara de un protón, la partícula describiría la curva en el otro sentido (sentido antihorario) y con un radio mayor, ya que R es proporcional a la masa y ésta es mayor para el protón.

- c) Si queremos que el electrón describa un MRU, debemos superponer un campo eléctrico perpendicular al campo magnético y a la trayectoria del electrón, de forma que la fuerza eléctrica sobre el electrón sea igual pero de sentido opuesto a la fuerza que ejerce el campo magnético.

$$F_m = q v B; \quad F_e = qE$$

$$q v B = qE; \quad E = vB = 1,6 \cdot 10^6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot 3 \cdot 10^{-3} \text{ T}$$

$$E = 4,8 \cdot 10^3 \text{ N/C}$$



53. Datos: $m_p = m_n = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$;
 $q_p = +e = +1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$;
 $q_n = 0$; $\Delta V = 5 \cdot 10^3 \text{ V}$; $B = 0,25 \text{ T}$

- a) El incremento de energía cinética de la partícula alfa es igual a su pérdida de energía potencial eléctrica:

$$\frac{1}{2} m v^2 = q \Delta V \Rightarrow v = \sqrt{\frac{2q \Delta V}{m}}$$

Para calcular la velocidad de la partícula alfa hallamos primero su masa y su carga:

$$q = 2q_p + 2q_n = 2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} = 3,2 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

$$m = 2m_p + 2m_n = 4m_p = 4 \cdot 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

$$m = 6,68 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

Entonces, la velocidad de la partícula alfa al penetrar en el campo magnético será:

$$v = \sqrt{\frac{2q \Delta V}{m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 3,2 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 5 \cdot 10^3 \text{ V}}{6,68 \cdot 10^{-27} \text{ kg}}}$$

$$v = 6,9 \cdot 10^5 \text{ m/s}$$

- b) Determinamos el radio de la circunferencia que describe la partícula alfa a partir de la velocidad y el campo magnético:

$$R = \frac{m v}{q B} = \frac{6,68 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \cdot 6,9 \cdot 10^5 \text{ m/s}}{3,2 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 0,25 \text{ T}}$$

$$R = 0,058 \text{ m} = 5,8 \text{ cm}$$

54. Datos: $l = 3,5 \text{ m}$; $I = 4 \text{ A}$; $B = 2 \cdot 10^{-2} \text{ T}$; $\alpha = 90^\circ$

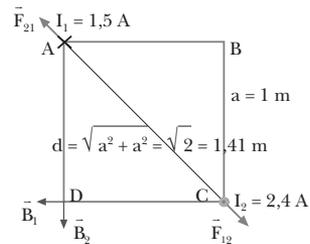
Calculamos la fuerza que experimentará el conductor rectilíneo en presencia del campo magnético:

$$F = I l B \sin \alpha = 4 \text{ A} \cdot 3,5 \text{ m} \cdot 2 \cdot 10^{-2} \text{ T} \cdot \sin 90^\circ$$

$$F = 0,28 \text{ N}$$

55. Datos: $I_1 = 1,5 \text{ A}$; $I_2 = 2,4 \text{ A}$; $l = 1 \text{ m}$

a)



- b) El campo magnético en el punto D será la suma vectorial del campo creado por cada uno de los hilos. Hallamos el módulo del campo que genera en D cada uno de los hilos:

$$B_1 = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi a} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1} \cdot 1,5 \text{ A}}{2\pi \cdot 1 \text{ m}}$$

$$B_1 = 3 \cdot 10^{-7} \text{ T}$$

$$B_2 = \frac{\mu_0 I_2}{2\pi a} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1} \cdot 2,4 \text{ A}}{2\pi \cdot 1 \text{ m}}$$

$$B_2 = 4,8 \cdot 10^{-7} \text{ T}$$

Las dos contribuciones son perpendiculares. Por tanto, el módulo del campo magnético total será:

$$B = \sqrt{B_1^2 + B_2^2} = \sqrt{(3 \cdot 10^{-7} \text{ T})^2 + (4,8 \cdot 10^{-7} \text{ T})^2}$$

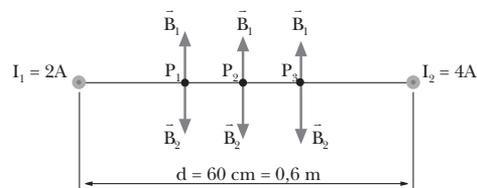
$$B = 5,7 \cdot 10^{-7} \text{ T}$$

La fuerza que se ejercen los hilos es repulsiva, ya que las dos corrientes tienen sentidos opuestos. El módulo de esta fuerza por unidad de longitud es:

$$\frac{F}{l} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi d} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1} \cdot 1,5 \text{ A} \cdot 2,4 \text{ A}}{2\pi \cdot 1,41 \text{ m}}$$

$$\frac{F}{l} = 5,1 \cdot 10^{-7} \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

56. Datos:



- a) En el punto P_1 los campos magnéticos creados por los dos hilos tienen la misma dirección, perpendicular al plano que contiene los dos hilos, y sentido contrario, ya que son corrientes con el mismo sentido.

Calculamos la inducción magnética creada en el punto P_1 por cada uno de los hilos:

$$B_1 = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi d_1} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1} \cdot 2 \text{ A}}{2\pi \cdot 0,2 \text{ m}}$$

$$B_1 = 2 \cdot 10^{-6} \text{ T}$$

$$B_2 = \frac{\mu_0 I_2}{2\pi d_2} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1} \cdot 4 \text{ A}}{2\pi \cdot 0,4 \text{ m}}$$

$$B_2 = 2 \cdot 10^{-6} \text{ T}$$

La inducción magnética resultante es la suma vectorial de \vec{B}_1 y \vec{B}_2 . Como estos vectores tienen la misma dirección y sentidos opuestos, el módulo del campo magnético resultante será la diferencia de los módulos de \vec{B}_1 y \vec{B}_2 :

$$B = B_2 - B_1 = 2 \cdot 10^{-6} \text{ T} - 2 \cdot 10^{-6} \text{ T} = 0 \text{ T}$$

- b) Calculamos la inducción magnética creada en el punto P_2 por cada uno de los hilos:

$$B_1 = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi d_1} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1} \cdot 2 \text{ A}}{2\pi \cdot 0,3 \text{ m}}$$

$$B_1 = 1,3 \cdot 10^{-6} \text{ T}$$

$$B_2 = \frac{\mu_0 I_2}{2\pi d_2} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1} \cdot 4 \text{ A}}{2\pi \cdot 0,3 \text{ m}}$$

$$B_2 = 2,7 \cdot 10^{-6} \text{ T}$$

Como los vectores \vec{B}_1 y \vec{B}_2 tienen la misma dirección y sentidos opuestos, el módulo del campo magnético resultante será la diferencia de los módulos de \vec{B}_2 y \vec{B}_1 :

$$B = B_2 - B_1 = 2,7 \cdot 10^{-6} \text{ T} - 1,3 \cdot 10^{-6} \text{ T}$$

$$B = 1,4 \cdot 10^{-6} \text{ T}$$

- c) Calculamos la inducción magnética creada en el punto P_3 por cada uno de los hilos:

$$B_1 = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi d_1} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1} \cdot 2 \text{ A}}{2\pi \cdot 0,4 \text{ m}}$$

$$B_1 = 1,0 \cdot 10^{-6} \text{ T}$$

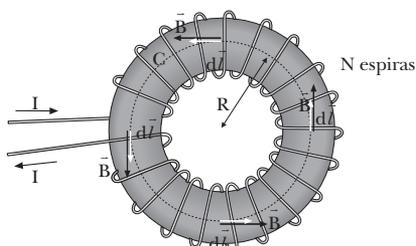
$$B_2 = \frac{\mu_0 I_2}{2\pi d_2} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1} \cdot 4 \text{ A}}{2\pi \cdot 0,2 \text{ m}}$$

$$B_2 = 4,0 \cdot 10^{-6} \text{ T}$$

La inducción magnética resultante es la suma vectorial de \vec{B}_1 y \vec{B}_2 . Como estos vectores tienen la misma dirección y sentidos opuestos, el módulo del campo magnético resultante será la diferencia de los módulos de \vec{B}_2 y \vec{B}_1 :

$$B = B_2 - B_1 = 4 \cdot 10^{-6} \text{ T} - 1 \cdot 10^{-6} \text{ T} = 3 \cdot 10^{-6} \text{ T}$$

57. Datos:



- a) Dada la geometría del toroide, podemos suponer que, a lo largo de la circunferencia que pasa por el centro de todas las espiras, el campo magnético es siempre perpendicular al plano de la espira. Por tanto, el campo será siempre tangente a dicha circunferencia. Además, su valor será constante sobre la circunferencia por razones de simetría.

Entonces, para aplicar el teorema de Ampère, tomamos la circunferencia de radio R que pasa por el centro de todas las espiras del toroide.

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{l} = \oint_C B dl = B \oint_C dl = B 2\pi R = 2\pi R B$$

Por otro lado, la intensidad que atraviesa la superficie circular delimitada por la curva C es el producto del número de espiras del toroide por la intensidad que circula por ellas. Por tanto, aplicando el teorema de Ampère:

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I_C; \quad 2\pi R B = \mu_0 N I; \quad B = \frac{\mu_0 N I}{2\pi R}$$

- b) Para un toroide de 300 espiras, por las que circula una intensidad de 4 A, a 20 cm del centro:

$$B = \frac{\mu_0 N I}{2\pi R} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1} \cdot 300 \cdot 4 \text{ A}}{2\pi \cdot 0,2 \text{ m}}$$

$$B = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ T}$$

58. Datos: $l = 50 \text{ cm} = 0,5 \text{ m}$; $N = 500$; $I = 2 \text{ A}$

- a) Hallamos el campo magnético en el interior del solenoide:

$$B = \mu_0 \frac{N}{l} I = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1} \cdot \frac{500}{0,5 \text{ m}} \cdot 2 \text{ A}$$

$$B = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ T}$$

- b) Determinamos el campo magnético en el interior de la barra de hierro dulce situada en el centro del solenoide, sabiendo que la permeabilidad relativa del hierro dulce es $\mu_r = 1500$:

$$B_{\text{int}} = \mu_r B_{\text{ext}} = 1500 \cdot 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ T} = 3,75 \text{ T}$$

59. Datos: $\Delta V = 25000 \text{ V}$; $R = 0,4 \text{ m}$;

$$q = +e = +1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}; \quad m_p = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

- a) El incremento de energía cinética del protón es igual a su pérdida de energía potencial eléctrica:

$$\frac{1}{2} m v^2 = q \Delta V \Rightarrow v = \sqrt{\frac{2q \Delta V}{m}}$$

Entonces, la velocidad del protón al penetrar en el campo magnético será:

$$v = \sqrt{\frac{2q \Delta V}{m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 2,5 \cdot 10^4 \text{ V}}{1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}}}$$

$$v = 1,5 \cdot 10^6 \text{ m/s}$$

Hallamos la inducción magnética a partir del radio de la órbita circular que describe el protón y de su velocidad:

$$R = \frac{m v}{q B}$$

$$B = \frac{m v}{q R} = \frac{1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \cdot 2,2 \cdot 10^6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 0,4 \text{ m}}$$

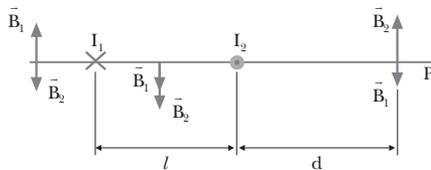
$$B = 5,7 \cdot 10^{-2} \text{ T}$$

b) Si la inducción magnética tuviera un valor doble al anterior, la velocidad del protón no variaría; en cambio, el radio de la trayectoria sería ahora:

$$R' = \frac{m v}{q B'} = \frac{m v}{q 2B} = \frac{R}{2} = \frac{0,4 \text{ m}}{2}$$

$$R' = 0,2 \text{ m} = 20 \text{ cm}$$

60. Datos: $I_1 = 2I_2$, I_1 e I_2 con sentidos contrarios.



Debido a su carácter vectorial, el campo magnético resultante sólo puede anularse en el plano que contiene los dos hilos conductores, ya que sólo en este plano los campos generados por los dos conductores son paralelos.

En cualquier punto situado entre los dos conductores rectilíneos, el campo magnético creado por cada una de las dos corrientes tiene la misma dirección, perpendicular al plano que contiene los dos hilos, y el mismo sentido, ya que son corrientes con sentidos contrarios. Por tanto, no se puede anular en ningún punto situado entre los dos conductores.

Como el campo magnético es proporcional a la intensidad e inversamente proporcional a la distancia, debe anularse en los puntos del plano que contiene a los dos hilos que estén a una distancia d del segundo conductor, menor que la distancia que los separa del primer conductor.

Calculamos la inducción magnética creada en un punto P situado a una distancia d del segundo conductor. Llamaremos l a la separación entre los dos hilos, de forma que el primer hilo dista $d + l$ del punto donde calculamos el campo:

$$B_1 = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi (d+l)} = \frac{2\mu_0 I_2}{2\pi (d+l)} = \frac{\mu_0 I_2}{\pi (d+l)}$$

$$B_2 = \frac{\mu_0 I_2}{2\pi d}$$

La inducción magnética resultante es la suma vectorial de \vec{B}_1 y \vec{B}_2 . Como estos vectores tienen la misma dirección y sentidos opuestos en el punto P, el módulo del campo magnético resultante será la diferencia de los módulos de \vec{B}_1 y \vec{B}_2 . Imponiendo la condición de que el campo total sea nulo, determinamos la posición del punto P respecto al segundo conductor:

$$0 = B = B_1 - B_2 = \frac{\mu_0 I_2}{\pi (d+l)} - \frac{\mu_0 I_2}{2\pi d}$$

$$B = \frac{2\mu_0 I_2 d - \mu_0 I_2 (d+l)}{2\pi d (d+l)} = \frac{\mu_0 I_2 (d-l)}{2\pi d (d+l)} = 0$$

$$\mu_0 I_2 (d+l) = 0; \quad d = l$$

Es decir, el campo magnético resultante se anula en los puntos situados en el plano que contiene los dos hilos y a una distancia del segundo conductor igual a la separación entre los dos hilos.

61. Respuesta sugerida:

Introducción:

André-Marie Ampère realizó, a principios del siglo XIX, las primeras investigaciones sistemáticas sobre los campos magnéticos generados por corrientes eléctricas. Los primeros experimentos los llevó a cabo en 1820 motivado por la célebre experiencia del danés Hans Christian Oersted.

Cuerpo o desarrollo:

Oersted observó que una aguja imantada se movía si se situaba cerca de un hilo por el que circulara corriente. Ampère repitió el experimento y advirtió que la orientación de la aguja dependía también del campo magnético terrestre. Para neutralizarlo, Ampère utilizó diversos imanes y comprobó que, efectivamente, la aguja se movía debido al campo generado por la corriente eléctrica, hasta formar un ángulo recto con el hilo. A partir del comportamiento de la aguja imantada, inventó el galvanómetro, instrumento para detectar y cuantificar la intensidad de corrientes eléctricas.

A este experimento siguieron otros que llevaron a Ampère a formular la hipótesis que defendería toda su vida: que los campos magnéticos están generados por corrientes circulares. Se cree que corroboró esta hipótesis construyendo una pila circular, la cual generaba un campo magnético simétrico.

El siguiente experimento que realizó consistía en hacer circular corriente en el mismo sentido por dos hélices de hilos de cobre. En contra de las expectativas de Ampère, las dos hélices se atraían. Más adelante se daría cuenta de que la atracción era ejercida por los hilos rectos de los extremos, y realizaría un nuevo experimento. Para neutralizar el efecto de los extremos, hizo pasar el extremo superior del hilo por el centro de la hélice. En este caso, tal como esperaba, las hélices se repelían. Efectuó el mismo experimento con dos espirales, con el mismo resultado satisfactorio que en el caso de las hélices.

Una vez aceptada la hipótesis de que las corrientes circulares son las generadoras del campo magnético, se planteó la siguiente pregunta: en los imanes naturales y en los materiales imantados, ¿las corrientes generadoras fluyen por todo el cuerpo o son pequeñas corrientes en el seno de cada molécula? Era ya conocido que una aguja colocada en el centro de una bobina por la que circulara corriente

adquiría una imantación transitoria. Pero este campo, ¿se debía a corrientes que fluían alrededor del eje de la aguja o eran corrientes moleculares? Para responder a esta cuestión, Ampère colocó un anillo de cobre en el centro de una bobina, concéntrico con ésta. Era de esperar que, si la imantación se debía a corrientes a lo largo de todo el cuerpo, el anillo se imantara, como la aguja. Ampère acercó al anillo una barra imantada y observó que no existía imantación alguna, de esta manera comprobó la hipótesis de las corrientes moleculares. Posteriormente, repitió el experimento con un potente imán en vez de la barra imantada, y observó que repelía la espira. Curiosamente, Ampère no dio importancia a esta observación. De hecho, sin saberlo, había observado la inducción electromagnética de una corriente eléctrica sobre otra.

En los últimos años de su vida, Ampère dejó a un lado la ciencia y se dedicó a la filosofía. En este campo trató teorías sobre la unificación del conocimiento humano como reflejo de la unidad de la mente divina.

Conclusión:

Los experimentos de Ampère fueron de los primeros sobre la relación entre el campo magnético y las corrientes eléctricas. La unificación de las dos interacciones es el primer paso hacia las teorías de unificación, según las cuales todas las interacciones de la naturaleza no son más que diferentes manifestaciones de una única interacción.

Bibliografía:

«André-Marie Ampère», L. P. Williams, *Investigación y ciencia*, marzo 1989, pág. 82.

COMPRUEBA LO QUE HAS APRENDIDO (pág. 217)

1. Es imposible separar los polos de un imán. Al romper un imán en dos o más trozos obtenemos varios imanes, cada uno con sus dos polos. El magnetismo de los materiales es debido a la orientación de los dipolos magnéticos de su interior. El movimiento de los electrones alrededor del núcleo atómico genera un campo magnético. Aunque rompamos un imán, en cada uno de los nuevos trozos sigue habiendo electrones en movimiento que generan el campo magnético correspondiente y con la misma orientación.

2. Las líneas de inducción magnética son...

La respuesta correcta es la **b**.

Las líneas de inducción magnética son siempre cerradas.

3. Datos: $a = 10 \text{ cm} = 0,1 \text{ m}$; $I = 4 \text{ A}$

Calculamos la inducción magnética creada por el conductor indefinido a una distancia de 10 cm :

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi a} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1} \cdot 4 \text{ A}}{2\pi \cdot 0,1 \text{ m}}$$

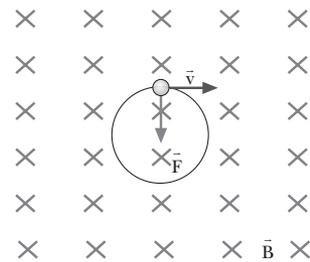
$$B = 8 \cdot 10^{-6} \text{ T}$$

4. La fuerza magnética que actúa sobre una carga en movimiento depende del valor de la carga eléctrica, del campo magnético, de la velocidad de la carga y del ángulo que forman la velocidad de la carga y el vector inducción magnética.

Para que no actúe ninguna fuerza sobre una carga que se mueve por un campo magnético, la velocidad de ésta debe ser paralela al campo, ya que la fuerza es proporcional al producto vectorial de la velocidad por el campo.

5. Datos: $q = -e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$; $m = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$; $B = 0,05 \text{ T}$; $E_c = 2,4 \cdot 10^3 \text{ eV}$

a)



b) Determinamos la velocidad a partir de la energía cinética, sabiendo que $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$.

$$E_c = \frac{1}{2} m v^2; \quad v = \sqrt{\frac{2E_c}{m}}$$

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot 2,4 \cdot 10^3 \text{ eV} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J/eV}}{9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}}}$$

$$v = 2,9 \cdot 10^7 \text{ m s}^{-1}$$

Calculamos la fuerza magnética que actúa sobre el electrón:

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

$$|\vec{F}| = F = q v B \sin 90^\circ$$

$$|\vec{F}| = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 2,9 \cdot 10^7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot 0,05 \text{ T}$$

$$|\vec{F}| = 2,3 \cdot 10^{-13} \text{ N}$$

Hallamos el radio de la órbita y la frecuencia angular:

$$R = \frac{m v}{q B} = \frac{9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \cdot 2,9 \cdot 10^7 \text{ m/s}}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 0,05 \text{ T}}$$

$$R = 3,3 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 3,3 \text{ mm}$$

$$\omega = 2\pi f = \frac{q B}{m} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 0,05 \text{ T}}{9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}}$$

$$\omega = 8,8 \cdot 10^9 \text{ s}^{-1}$$

Determinamos el período a partir de la frecuencia angular:

$$T = \frac{1}{f} = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{8,8 \cdot 10^9 \text{ s}^{-1}} = 7,1 \cdot 10^{-10} \text{ s}$$

6. Datos: $l = 5 \text{ m}$; $I_1 = 3 \text{ A}$; $I_2 = 6 \text{ A}$; $d = 4 \text{ cm} = 0,04 \text{ m}$

Como los hilos son mucho más largos que la separación que hay entre ellos, podemos suponer que la fuerza que se ejercen es la misma que si fueran conductores rectilíneos indefinidos. Calculamos el módulo de esta fuerza por unidad de longitud:

$$\frac{F}{l} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi d} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1} \cdot 3 \text{ A} \cdot 6 \text{ A}}{2\pi \cdot 0,04 \text{ m}}$$

$$\frac{F}{l} = 9 \cdot 10^{-5} \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

Como la longitud de los conductores es de 5 m, la fuerza que éstos se ejercen mutuamente es $F = 5 \text{ m} \cdot 9 \cdot 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{m}^{-1} = 4,5 \cdot 10^{-4} \text{ N}$.

La fuerza es atractiva, ya que las dos corrientes tienen el mismo sentido.

7. Para construir un imán permanente se puede utilizar el acero. Es un material ferromagnético en el que la presencia de un campo magnético externo induce la orientación de los dominios paralelamente al campo magnético. Esta ordenación persiste incluso después de eliminar el campo magnético externo. De esta forma se obtiene un imán permanente.

Para la construcción de un imán temporal se puede utilizar el hierro dulce. También es un material ferromagnético, pero en este caso los dominios orientados pierden su orientación al eliminar el campo externo, de forma que sólo actúa como un imán en presencia de un campo externo.