

(...) vi (...) a esa joven en la que jamás había pensado más de tres segundos consecutivos. Y de pronto descubrí en ella (...), un encanto dulce, una lánguida atracción...

Todos ustedes han tenido sueños singulares, ¿verdad?(...)

(...) Sin saber qué hacer, me vestí y fui a verla... todo mi sueño se hizo realidad (...)

-¿Qué conclusión saca de esto?-preguntó una voz.

-(...) Llego a la conclusión de una coincidencia, ¡por Dios!

-Todo lo que usted quiera-concluyó uno de los comensales- ¡pero si no cree en el magnetismo después de esto, es usted un ingrato, mi querido señor!

Magnétisme, Guy de Maupassant

CONTENIDOS

- Imanes
- Fenómenos magnéticos
- Campo magnético
- Campo magnético y cargas en movimiento
- Inducción electromagnética
- Ley de Faraday
- Propiedades magnéticas de la materia
- Magnetismo terrestre

11

ELECTROMAGNETISMO

El electromagnetismo es la parte de la física que estudia los fenómenos eléctricos y magnéticos. En otras épocas se creía que estos fenómenos eran esencialmente distintos pero, en la actualidad, se sabe que ambos se encuentran unidos en una única interacción fundamental llamada electromagnética.

En 1820, el físico y químico danés Hans Christian Oersted (1777-1851) realizó un descubrimiento sorprendente: una corriente eléctrica podía desviar la aguja magnética de una brújula que se encontrara próxima al cable de conducción. Sus observaciones motivaron una serie de investigaciones que permitieron organizar la teoría electromagnética y englobar en ella un gran número de fenómenos que hasta ese momento se habían explicado parcialmente. Algunos de ellos serán tratados en el presente capítulo.

Se analizarán en primer término los conceptos generales de magnetismo para relacionarlos luego con algunos temas de electricidad del capítulo anterior.

Se verá que la fuerza eléctrica y la fuerza magnética son distintas manifestaciones de una misma interacción fundamental, y que ambas tienen su explicación en la constitución íntima de la materia.

Existen registros de que en la Antigüedad tanto los chinos como los griegos conocían los imanes naturales. En una región del Asia Menor conocida como Magnesia, abundaban unas piedras negras que tenían la misteriosa propiedad de atraer al hierro, y de conferirle idénticas propiedades. Del nombre de la región proviene el término **magnetismo**, y así se denomina en la actualidad a la rama de la física que se ocupa de estos fenómenos.

La interacción electromagnética es la que explica la formación de estructuras de escala humana, es decir los cuerpos de tamaño menor que el planetario. Sin embargo, la naturaleza de las fuerzas eléctricas y magnéticas mostró ser más difícil de interpretar que la fuerza gravitatoria.



Es posible encontrar referencias a brazaletes, anillos y talismanes magnéticos en relatos de magia y brujería de la Edad Media, así como en modernas propagandas, donde se ofrece una variada gama de productos con supuestas propiedades terapéuticas o con la capacidad de influir en el destino humano. Una curiosa referencia histórica, con la que es posible ilustrar lo dicho, es el método llamado *mesmerismo*, nombrado así por su creador Franz Antón Mesmer (1733-1815). Este médico austriaco formuló la teoría del magnetismo animal según la cual las enfermedades, en particular las nerviosas, correspondían a un desequilibrio en la circulación de un fluido magnético. Este fluido, vinculado con los imanes, en teoría emanaba del brillo de los ojos, y al llevar a los pacientes al estado de sonambulismo, éstos mejoraban mediante el equilibrio en la circulación del hipotético fluido magnético. Sus seguidores recibieron el nombre de magnetizadores y, algunas opiniones sostienen que sus trabajos tuvieron el mérito de instalar la fase experimental de la psicoterapia.

Con la revolución científica de la modernidad y el desarrollo de la experimentación como herramienta metodológica, el magnetismo se convirtió en una disciplina científica. Su organización comenzó a partir de los trabajos de Gilbert (1544-1603). En su libro *De magnete* expone que la Tierra misma es un gran imán, y lo prueba con una esfera magnetizada y pequeños imanes que simulan brújulas. Gilbert llegó a sostener que el magnetismo es el motivo que explica la rotación terrestre y los movimientos planetarios en general. En el contexto de las revolucionarias consecuencias de la teoría copernicana del universo, algunos pensadores supusieron que los trabajos de Gilbert sobre el magnetismo deberían encuadrarse en la búsqueda de la construcción de una nueva física. Como ya se vio en el capítulo 1, en esta época comenzó a estructurarse esta disciplina científica, principalmente a partir de los trabajos de Galileo y Newton.

La teoría electromagnética se completó con la importante integración teórica que constituyen las ecuaciones de James Clerk Maxwell (1831-1879), que será retomada en el capítulo siguiente.

En algunos países, como el Japón, se han diseñado trenes de levitación magnética como el que se observa en la fotografía. Estos trenes aprovechan los efectos magnéticos de la corriente eléctrica para avanzar sin rozar las vías, lo que les permite alcanzar velocidades muy altas, además de disminuir el desgaste de las piezas, las pérdidas de energía por calor, y el ruido.

Imanes

La ciencia del magnetismo realizó importantes progresos experimentales en la Edad Media. En el año 1269, Petrus Peregrinus de Maricourt, cruzado francés del que se desconocen la fecha de nacimiento y de muerte, escribió en su libro *Epistola de magnete* un comentario acerca del uso, común en la época, de brújulas flotantes. También describió un nuevo diseño con la aguja sostenida sobre un pivote. Sus trabajos fueron muy reconocidos en su tiempo y pueden considerarse como precursores de la metodología científica moderna.



Brújula inglesa.

Brújula china.

La **pedra imán**, también conocida como **magnetita** o **calamita**, es un imán natural que, desde el punto de vista químico, es un óxido de hierro. Un poco después del año 1000 ya se usaba en la navegación una aguja de hierro, previamente frotada contra una piedra imán, que se orientaba al norte cuando se la dejaba libre, por ejemplo al flotar sobre un recipiente con agua. Recién después de la publicación de los trabajos de Gilbert se relacionó este hecho con otro imán natural: el planeta Tierra. Este investigador utilizó como diseño experimental una esfera magnetizada que llamó *terrella*, o pequeña Tierra. Al mover una aguja magnetizada alrededor de la *terrella* mostrando que siempre apuntaba en dirección norte-sur, le probó a la reina Isabel I de Inglaterra que con la Tierra ocurría lo mismo, aunque a mayor escala, y por esa razón las brújulas marcaban esa misma dirección.

De esta relación geográfica toman los nombres norte y sur, las dos zonas de máxima atracción, o polos magnéticos, que presentan todos los imanes. El polo norte de cualquier imán es el que, orientado libremente, señala aproximadamente al norte geográfico. La interacción entre los polos es análoga a la interacción entre las cargas eléctricas, en el sentido de que polos de igual nombre se repelen, mientras que los de nombre contrario se atraen.

Otra similitud importante se basa en que las fuerzas magnéticas, como las eléctricas, dependen de la inversa de los cuadrados de la distancia.

Charles Coulomb, utilizando una versión de la balanza de torsión adaptada a las acciones magnéticas, encontró una ley empírica que permitía relacionar la intensidad de la fuerza magnética de atracción y repulsión con la distancia que separa los polos que interactúan.

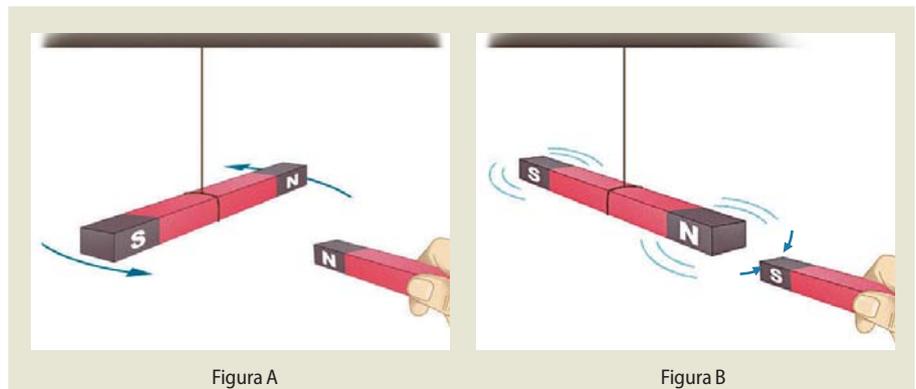


Figura A

Figura B

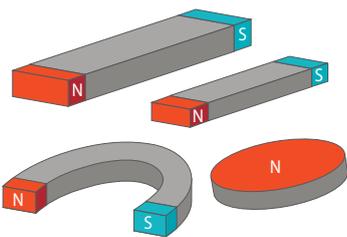
Existe una diferencia importante entre los fenómenos magnéticos y los eléctricos: si bien es posible que un cuerpo adquiera carga eléctrica de uno u otro signo, no se puede lograr que un cuerpo tenga solo una clase de polo magnético. No existe el monopolio magnético ni está prevista su existencia dentro de la teoría electromagnética actual. Si se corta un imán recto que tiene en sus extremos un polo norte y otro sur, cada una de las partes presenta ambos polos nuevamente. Aunque se siga fragmentando el imán, con la intención de separar ambos polos, se vuelven a obtener nuevos imanes con la presencia tanto de un polo norte como de uno sur.

Esto se explica por la particular estructura de los imanes, que pueden considerarse como un conjunto de pequeños dipolos magnéticos. Estos dipolos pueden estar organizados en regiones llamadas dominios magnéticos. En estas zonas, que pueden tener distintas formas y tamaños, existe una organización local de los dipolos, de tal manera que hay en cada una de ellas un polo norte y sur resultante. De la orientación similar o diferente de los dominios magnéticos del material depende que el cuerpo se manifieste como imán o no lo haga.

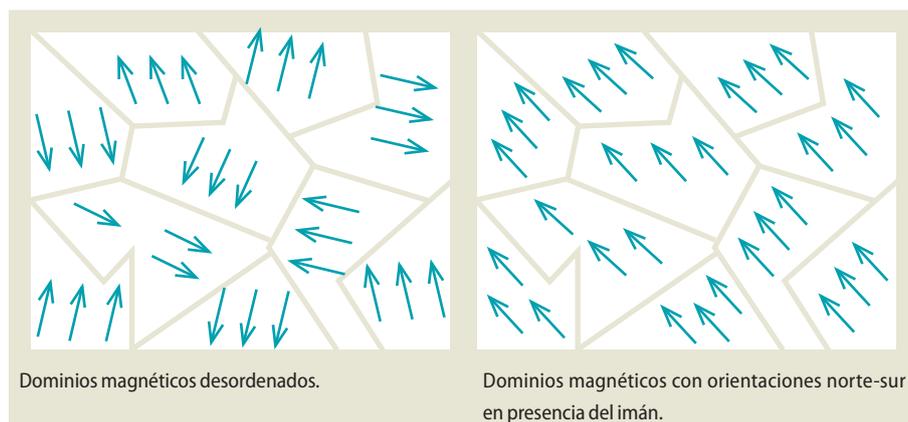


ACTIVIDADES

1. ¿Cuáles de los siguientes imanes elegirían para realizar la experiencia representada en las figuras A y B de esta página? ¿Por qué?



La presencia de dominios magnéticos en la estructura de algunos pocos materiales también explica por qué un imán puede conferirle sus propiedades a un trozo de hierro no magnetizado y no a otros materiales. Este hecho constituye una diferencia importante entre los fenómenos eléctricos y los magnéticos, y llevó a considerarlos en un comienzo como esencialmente distintos. El ámbar frotado adquiere la propiedad de atraer varios materiales, mientras que la magnetita parecía atraer solo al hierro, además de conferirle a éste sus propiedades. Este material, como algunos otros, tiene en su estructura dominios magnéticos que están, en un principio, desordenados. Es decir que las orientaciones norte-sur de los dipolos apuntan en direcciones distintas y aleatorias.



En presencia del imán, los dominios magnéticos se orientan y, de esta manera, el material resulta también magnetizado. Normalmente, este ordenamiento se pierde cuando se aleja el imán original, aunque puede suceder que permanezca. Este hecho, además de otros factores, depende de la llamada **dureza magnética** del material. Si el cuerpo permanece magnetizado, se obtiene un imán artificial. Existen otros procedimientos para la obtención de imanes artificiales que se analizarán más adelante.

El hierro llamado dulce normalmente vuelve al estado caótico, mientras que el acero frecuentemente permanece magnetizado. Otros elementos además del hierro presentan estas mismas propiedades, por lo que son conocidos como **ferromagnéticos**. Ellos son el cobalto, el níquel y algunos otros pertenecientes al grupo de los designados químicamente como tierras raras. También son ferromagnéticas algunas aleaciones de estos elementos con otros metales.

Es posible hacer perder a un imán sus propiedades magnéticas, por ejemplo por efecto del aumento de su temperatura. De acuerdo con lo analizado en el capítulo 8, esto puede entenderse como un aumento en el promedio de energía cinética de las partículas del material. La agitación microscópica puede tener el efecto de desordenar la estructura, desde el punto de vista magnético. La temperatura a la cual pierden su efecto magnético varía en los distintos materiales y se llama temperatura de Curie, ya que fue Pierre Curie el primero en registrar el fenómeno. Por ejemplo, el hierro pierde sus propiedades ferromagnéticas a los 770 °C. Los imanes permanentes más comunes están hechos de una aleación de aluminio, níquel y cobre llamada **alnico**, que resiste altas temperaturas. También son muy usados los imanes denominados **cerámicos** por sus propiedades físicas. Son de bajo costo y es posible fabricarlos de variadas formas. Algunos están compuestos por un conglomerado de partículas ferromagnéticas aglutinadas por alta presión y temperatura. Otros, por hierro, bario y estroncio. Actualmente existen dos tipos de imanes de tierras raras: los de neodimio-hierro-boro y los de samario-cobalto. Son imanes muy poderosos que necesitan ser producidos en hornos de alto vacío. Debido a los efectos térmicos comentados anteriormente, los imanes de neodimio-hierro-boro requieren temperaturas de trabajo que no excedan los 80 °C y los de samario-cobalto, los 350 °C aproximadamente.

Pérdida de las propiedades magnéticas a la temperatura de Curie

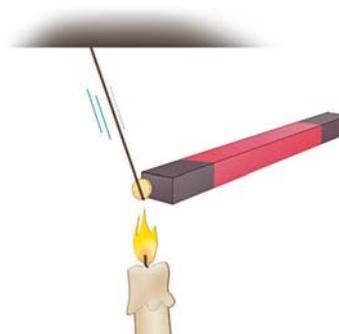
Materiales

Aritos magnéticos que se venden como adorno, y son pequeños imanes de tierras raras.

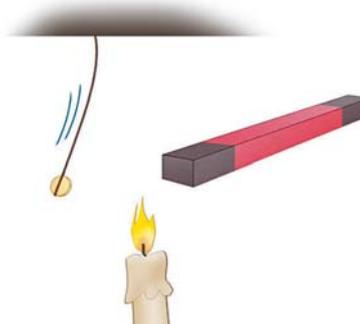
Hilo metálico o cadenita. Imán de cerámica o alnico. Fuente de calor, como por ejemplo, una vela.

Procedimiento

1. Cuelguen a modo de péndulo uno o varios de estos aritos magnéticos, usando el hilo metálico o la cadenita.
2. Con el otro imán atraigan al péndulo para que quede separado de la vertical y justo debajo de la fuente de calor.



3. ¿Qué observan cuando alcanza la temperatura adecuada?



Campo magnético

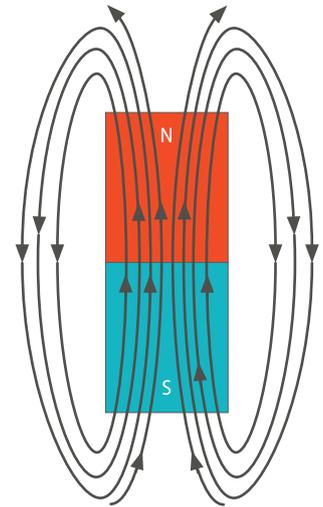
Se llama **trampas magnéticas** a unos dispositivos diseñados para extraer residuos de minerales ferromagnéticos de múltiples productos comerciales como alimentos, aceites lubricantes, plásticos, etc. Se utilizan para esto potentes imanes, normalmente cerámicos, que rodean a unos tubos por los que circula el material del que se desea extraer estas partículas.

El espacio que rodea a un imán es el asiento de un campo magnético, de la misma manera que se analizó para fenómenos gravitatorios y eléctricos. Éste queda determinado en cada punto por el **vector inducción magnética**, cuyo símbolo es \vec{B} .

El **campo magnético** también puede ser representado por unas líneas imaginarias que se llaman líneas de inducción magnética. Se dibujan de tal manera que, imaginando una superficie cualquiera en el campo, el número de líneas que atraviesan cada unidad de superficie es directamente proporcional a la intensidad del vector \vec{B} . Se puede interpretar que su intensidad es alta cuando las líneas están muy juntas.

La no existencia del monopolo magnético determina que las líneas de inducción magnética sean cerradas: por convención, salen del norte y van hacia el sur en el exterior del imán, para cerrar su recorrido yendo del sur hacia el norte por dentro del imán.

La dirección del vector inducción es en todo momento tangente a estas líneas y su sentido sigue la convención indicada para las líneas de inducción. En el apartado siguiente se dará una definición más precisa del vector \vec{B} .



Obtención de espectros magnéticos

Se llama espectro magnético a una manera de visualizar los campos magnéticos a partir de la orientación en él de pequeñas limaduras de hierro, las que pueden considerarse como pequeñas brújulas. Ellas se ordenan formando líneas que representan las líneas de inducción del campo. Es muy fácil obtener espectros magnéticos. Resultan también muy útiles para visualizar cómo varía la influencia del imán en las distintas zonas de su campo.

Materiales

Distintos imanes. Limaduras de hierro. Un trozo de cartulina o papel blanco.

Procedimiento

1. Coloquen cada uno de los imanes debajo del papel blanco, en cualquier posición.

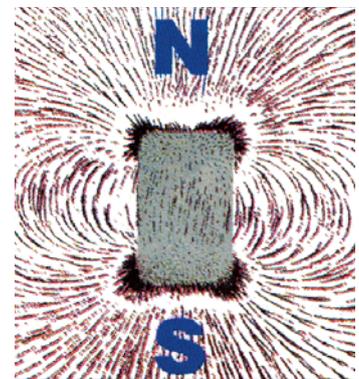
2. Espolvoreen, sobre la hoja, en forma pareja, las limaduras de hierro. Observarán que se forma el espectro magnético correspondiente a una sección en particular del campo del imán.

3. Localicen la ubicación de los polos.

4. Repitan la experiencia con distintas ubicaciones de un imán, con imanes distintos, y con varios de ellos colocados unos cerca de otros. Una vez que localicen los polos de cada imán, puede resultar interesante colocar un par de ellos con los polos de igual nombre próximos, y luego con los polos contrarios enfrentados.

5. En cuanto se retira el imán, las limaduras se desordenan. Si les interesa conservar su orientación,

pueden fijarlas con algún procedimiento. Una sugerencia puede ser cubrir la hoja de cartulina con cola vinílica algo diluida, para que las limaduras puedan nadar hasta orientarse y luego quedar atrapadas cuando la cola vinílica se seca.



A partir de los espectros, se puede visualizar el campo magnético y, en particular, la ubicación de los polos.

Campo magnético y cargas en movimiento

Si una carga eléctrica se coloca en reposo en un campo magnético, no opera sobre ella ninguna fuerza debida a este campo. Sin embargo, si la carga atraviesa el campo magnético con una cierta velocidad, experimenta una desviación lateral, que pone en evidencia la acción de una fuerza sobre ella. Esta fuerza de interacción magnética permite asociar a la carga en movimiento un campo magnético propio. La interacción de este campo propio con el externo genera la fuerza de origen magnético que actúa sobre ella.

La intensidad de la fuerza que desvía lateralmente la carga eléctrica puede calcularse a partir de la trayectoria que sigue la carga. Toma su valor máximo cuando la dirección de la velocidad es perpendicular a la del vector \vec{B} en el punto en el que la carga ingresa al campo, mientras que la fuerza es nula si las direcciones coinciden.

Si se supone que se puede medir el valor de la fuerza máxima de desviación lateral, que se denotará como F_{\perp} y el valor de la velocidad V con que la carga eléctrica ingresa al campo magnético, es posible definir la **intensidad del vector inducción magnética** en ese punto como:

$$B = \frac{F_{\perp}}{q \cdot V}$$

donde B es la intensidad del vector inducción magnética, F_{\perp} es el valor de la fuerza máxima de la desviación lateral, V la velocidad con la que la carga ingresa al campo, y q el valor de la carga del cuerpo en movimiento.

La unidad del Sistema Internacional de Unidades para la inducción magnética es llamada **tesla**, cuyo símbolo es T y se define como:

$$1 \text{ tesla} = 1 \frac{\text{newton}}{\text{coulomb} \cdot \frac{\text{metro}}{\text{segundo}}} \quad \text{es decir} \quad T = \frac{\text{N}}{\text{C} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}}}$$

Es muy común reemplazar $\frac{\text{C}}{\text{s}}$ por A (ampere) con lo cual $T = \frac{\text{N}}{\text{A} \cdot \text{m}}$.

La expresión general que permite relacionar estas magnitudes requiere el uso de una operación especial entre vectores: el producto vectorial. De esta manera, es posible expresar en forma general la fuerza de interacción magnética \vec{F} de la siguiente manera:

$$\vec{F} = q \cdot \vec{V} \times \vec{B} \quad \text{y} \quad |\vec{F}| = q \cdot |\vec{V}| \cdot |\vec{B}| \cdot \text{sen}(\alpha)$$

donde \vec{V} es el vector velocidad, \vec{B} es el vector inducción magnética y α el ángulo entre los vectores \vec{V} y \vec{B} .

La dirección de \vec{F} es perpendicular a las de los otros vectores y su sentido puede determinarse siguiendo la **regla del tirabuzón**: es decir que, suponiendo un tirabuzón apoyado sobre la carga y haciéndolo girar desde el vector \vec{V} hacia el vector \vec{B} , avanzaría en el sentido de la fuerza.

En las deducciones anteriores se supuso que la carga que ingresaba al campo era positiva. Una carga negativa experimenta una fuerza opuesta a la de una positiva, lo cual se expresa colocando un signo menos a su valor en la ecuación. Es importante destacar que el producto vectorial no es conmutativo.

Si una partícula cargada se mueve en una región del espacio donde, además de un campo magnético, hay un campo eléctrico capaz de interactuar con el propio, la fuerza resultante sobre ella es la combinación de las interacciones eléctricas y magnéticas, cuya expresión es la llamada **relación de Lorentz**, en honor a Henry Lorentz (1853-1928).

El **producto vectorial** entre dos vectores $\vec{u} = (u_1; u_2; u_3)$ y $\vec{v} = (v_1; v_2; v_3)$ es un nuevo vector que se define como:

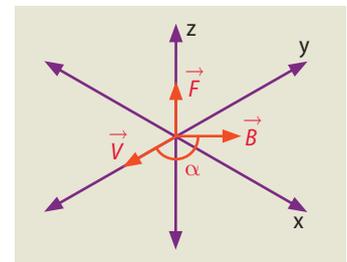
$$\vec{u} \times \vec{v} = (u_2 v_3 - u_3 v_2; u_3 v_1 - u_1 v_3; u_1 v_2 - u_2 v_1)$$

Algunas de sus propiedades son:

■ $\vec{u} \times \vec{v}$ es perpendicular a \vec{u} y a \vec{v} .

■ $|\vec{u} \times \vec{v}| = |\vec{u}| \cdot |\vec{v}| \cdot \text{sen} \alpha$, donde α es el ángulo comprendido entre \vec{u} y \vec{v} .

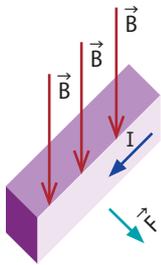
■ $\vec{u} \times \vec{v} \neq \vec{v} \times \vec{u}$ es decir, el producto vectorial no es conmutativo.



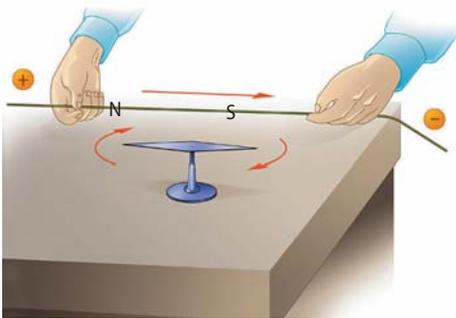
2. Una partícula α cuya carga eléctrica positiva es de $3,2 \cdot 10^{-19}$ C penetra con una velocidad de módulo $2 \cdot 10^4$ m/s a una región en la que hay un campo magnético perpendicular a su trayectoria cuyo módulo es 0,1 T. Calculen el valor de la fuerza que actúa sobre ella y realicen un esquema que represente una posible orientación de la velocidad, el campo magnético y la fuerza.

3. Hagan un esquema en el que se indique la velocidad de un electrón y alguna posible orientación de los vectores campo eléctrico y campo magnético para que la fuerza total sobre el pueda ser cero.

4. ¿Cuál es el módulo de la fuerza ejercida sobre un alambre de 1 m de largo por el que corre una corriente de 10 A, si el ángulo entre él y el campo magnético de 2 T en el que se encuentra es de 30° ?



El sentido de la fuerza que experimentaría el alambre sería saliente respecto de esta página.



Aplicaciones de la fuerza de interacción magnética

Después de ser acelerado por un campo eléctrico, un electrón ($q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C) alcanza una velocidad cuyo módulo vale el 10% de la velocidad de la luz. Si ingresa a un campo magnético de 1,5 T perpendicular a la dirección de su velocidad, ¿cuánto vale el módulo de la fuerza que experimenta?

La velocidad del electrón es el 10 % de la velocidad de la luz, por lo tanto
 $|\vec{V}_e| = 0,1 \cdot c = 0,1 \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} = 3 \cdot 10^7 \text{ m/s}$

Como además $\vec{F} = q \cdot \vec{V} \times \vec{B}$, se tiene que $|\vec{F}| = q \cdot |\vec{V}| \cdot |\vec{B}| \cdot \text{sen}(\alpha)$, donde α es el ángulo entre \vec{V} y \vec{B} que, como son perpendiculares es de 90° . Luego:

$$|\vec{F}| = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 3 \cdot 10^7 \text{ m/s} \cdot 1,5 \text{ T} \cdot \text{sen } 90^\circ = 7,2 \cdot 10^{-12} \text{ N}$$

El módulo de la fuerza es entonces de $7,2 \cdot 10^{-12}$ N.

Magnetismo y corriente eléctrica

En el capítulo 10 se explicó que la corriente eléctrica implica cargas en movimiento en un conductor. Es esperable, entonces, que un campo magnético ejerza también una fuerza lateral sobre un cable por el que circula una corriente eléctrica, así como lo hace sobre una carga eléctrica individual y en movimiento respecto de él.

Esta fuerza se calcula a partir de la expresión:

$$\vec{F} = I \cdot \vec{l} \times \vec{B}$$

en la que \vec{F} es la fuerza de origen magnético que actúa sobre un conductor de largo l por el que circula una corriente eléctrica de intensidad i cuando se lo coloca en un campo magnético de inducción \vec{B} .

Esta fórmula puede considerarse análoga de $\vec{F} = q \cdot \vec{V} \times \vec{B}$, analizada en el apartado anterior.

En este análisis, la correspondencia a nivel macroscópico se establece llamando \vec{l} al vector que representa, en su módulo y dirección, una longitud de un tramo recto de alambre, siendo su sentido el de la corriente i que circula por él.

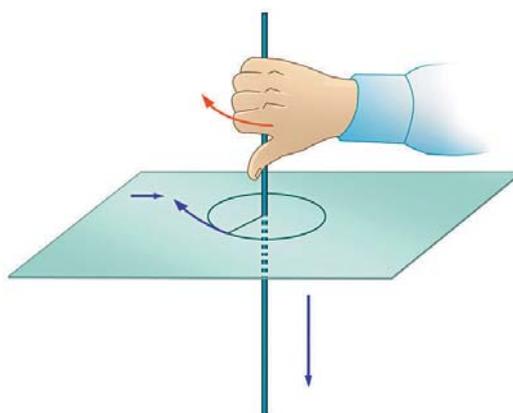
El primero en notar la relación entre la corriente eléctrica y el magnetismo fue Christian Oersted (1777-1851) cuando, en 1820, se encontraba con sus alumnos realizando algunos experimentos con corrientes eléctricas. Ellos observaron que la aguja de una brújula que estaba cerca se movía tomando una orientación distinta de la geográfica cada vez que la llave del circuito se cerraba, es decir cuando circulaba corriente.

Oersted difundió el fenómeno observado y las explicaciones que encontraba para este efecto. El francés André Marie Ampère pensó que la atracción que se observaba en la brújula también podría experimentarla otro cable conductor de corriente que se encontrara próximo. Realizó una serie de experimentos en los que demostró que corrientes de igual sentido determinaban una atracción entre los cables, mientras que corrientes de sentidos contrarios provocaban una repulsión entre ellos. Calculó también, a partir de cuidadosas mediciones, que la fuerza entre dos conductores rectos y paralelos dependía inversamente de la distancia entre ambos y directamente de la intensidad de corriente que circulaba por ellos.

Estos fenómenos muestran que existe una relación fundamental entre las interacciones eléctricas y las magnéticas. Dicho de otro modo, existen dos **fuerzas** asociadas a la electricidad: la **eléctrica** y la **magnética**. Esta última supone la presencia de un campo magnético que se genera cada vez que una carga está en movimiento.

Por lo tanto, alrededor de todo cable por el que circula corriente, existe un campo magnético de líneas circulares que rodean al conductor. El vector \vec{B} asociado a este campo es, como ya se dijo, tangente a las líneas, y su sentido se determina por la *regla de la mano derecha*.

Ampere interpretaba las interacciones como acciones a distancia, por lo que no consideraba la presencia de un campo de fuerzas. Usando campos eléctricos y magnéticos, James Clerk Maxwell redefinió sus resultados. En 1864, este científico generalizó la relación entre las interacciones eléctricas y magnéticas en ecuaciones donde también aparecía la velocidad de la luz, y probó su naturaleza electromagnética. La importancia de sus trabajos como resumen teórico de importantes teorías físicas hasta el momento independientes, será retomada en el capítulo siguiente.



El pulgar apunta en el sentido de la corriente y el resto de los dedos apunta en el sentido del vector inducción magnética.



5. ¿Qué fuerza magnética experimenta un cable recto que transporta una corriente eléctrica de 1,5 A, cuando se encuentra en un campo magnético cuyo módulo es $5 \cdot 10^{-5} \text{ T}$ y su dirección y sentido son coincidentes con I?



Comprobación de la fuerza magnética sobre una corriente

Con elementos sencillos es posible realizar algunas experiencias que repiten las observaciones de Oersted y Ampère.

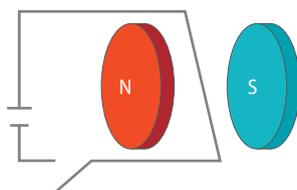
Materiales

Un par de imanes bastante potentes, por ejemplo los de aritos magnéticos o un imán en herradura. Un alambre o cable monopolar. Cuatro pilas de 1,5 V cada una conectadas en serie. Una hoja de papel blanco. Limaduras de hierro.

Procedimiento

1. Construyan un circuito con las pilas como fuente y el alambre como conductor. Conviene que el alambre sea algo largo, para aumentar la resistencia eléctrica, y de buena flexibilidad. Hagan un corte en el cable que pueda funcionar como llave interruptora. Hay que tratar de conectar las pilas el menor tiempo posible, ya que podríamos dañarlas por la conexión en cortocircuito.

2. Acomoden el diseño de manera que una cierta porción del cable pase por el campo formado por dos imanes con sus polos enfrentados. La siguiente figura esquemática puede orientar su trabajo, pero sería muy conveniente que discutan y acuerden sus propios diseños e incorporen las variaciones que crean convenientes.



3. Cierren la llave y observen la desviación lateral del cable.

4. Una vez que logren hacer funcionar el dispositivo, realicen las siguientes actividades.

- En un esquema del circuito, dibujen los vectores, \vec{I} , \vec{B} y \vec{F} .
- Respondan: ¿qué esperan observar si invierten el sentido de circulación de la corriente?

c. Inviertan la conexión de los cables en la batería para verificar su respuesta a la pregunta anterior. Anoten sus conclusiones.

5. Armen dos circuitos con dos pilas en serie en cada uno como fuente. Comprueben las observaciones de Ampère con respecto a las fuerzas de atracción y repulsión entre cables conductores de corriente. Redacten un informe con sus observaciones.

6. Atraviesen la hoja de papel con uno de los alambres de los circuitos del punto anterior y obtengan el espectro del campo a su alrededor rociando limaduras de hierro. Pueden fijar el espectro obtenido, como se realizó en la actividad de la página 212. Puede resultar interesante perforar un solo papel con los cables de ambos circuitos y observar el espectro del campo resultante, para corrientes paralelas y antiparalelas.

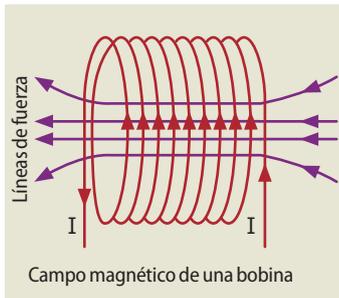
Definición del ampere

El sistema internacional de medidas (SI) tiene 7 unidades fundamentales, es decir que se definen en forma independiente mediante patrones o experimentos específicos.

Entre ellas hay una que proviene del electromagnetismo, el **ampere**. Para definir el ampere se recurre a la experiencia de la fuerza entre dos conductores paralelos.

Un ampere es el valor de la corriente que fluye en dos conductores paralelos, distanciados un metro entre sí, en el vacío, que produce una fuerza entre ambos conductores (a causa de sus campos magnéticos) de $2 \cdot 10^{-7}$ N/m.

Es decir que, cuando por dos conductores paralelos y colocados en el vacío a un metro de distancia, circula una intensidad de corriente de un ampere, se atraen o repelen, según los sentidos de las corrientes, con una fuerza de veinte millones de newton por cada metro de longitud.



El campo magnético de un solenoide es similar al producido por un imán recto. Una de sus caras, de la que salen las líneas de fuerza, actúa como polo norte y la otra, como polo sur.

Campo magnético en bobinas

A partir de las observaciones y resultados teóricos de Oersted y Ampère, los efectos magnéticos de la corriente se constituyeron en el método más simple para la obtención de campos magnéticos poderosos.

Un enrollamiento de cable conductor constituye una **bobina** y permite, por una disposición espacial determinada, la obtención de campos magnéticos importantes. Una bobina como la que se muestra en la figura se denomina **solenoides**.

Los campos magnéticos alrededor de cada sección de cable se suman vectorialmente para dar un campo relativamente estable y de expresión simple en el interior de la bobina. En el exterior, el campo de inducción \vec{B} creado por un solenoide es similar al de un imán. La longitud del solenoide debe ser mucho mayor que el diámetro de una de sus vueltas o espiras, para generar un campo uniforme en su interior.

Si el solenoide se dobla en forma de rosca, se llama **toroide**, que es como una bobina sin extremos. En este caso, la expresión que se aplica para calcular el campo magnético de inducción es:

$$B = \mu_0 \cdot \frac{n I}{L}$$

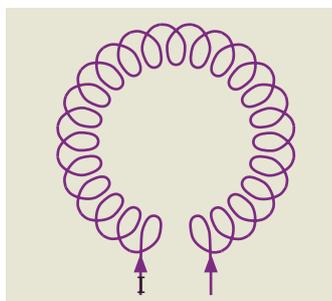
donde n es el número de vueltas o espiras de la bobina, L es su longitud, I es la corriente circulante, y μ_0 es una constante llamada **permeabilidad magnética del vacío** cuyo valor es $4 \pi \cdot 10^{-7} \frac{T \cdot m}{A}$.

Esta ecuación, que resulta exacta para un toroide, puede utilizarse con alguna aproximación para el cálculo del vector inducción magnética en el interior de un solenoide recto.

Aplicaciones del campo magnético en bobinas

Un solenoide rectilíneo tiene una longitud de 50 cm y está constituido por 400 espiras por las que circula una corriente de 1,5 A. ¿Cuánto vale el módulo del vector inducción magnética en su interior?

$$\text{Como } B = \mu_0 \cdot \frac{n I}{L}, \text{ entonces: } B = 4 \pi \cdot 10^{-7} \frac{T \cdot m}{A} \cdot \frac{400 \cdot 1,5 A}{0,5 m} \Rightarrow B = 1,5 \cdot 10^{-3} T.$$



En un toroide en el que el arrollamiento del conductor eléctrico por el que circula la corriente está rodeándolo totalmente, el campo magnético es de módulo constante y su dirección es tangente a las líneas de campo que son circunferencias con centro en el centro del toroide.



6. Una bobina atravesada por una corriente de 2 A tiene en su interior una inducción magnética de valor 10^{-2} T. ¿Cuántas espiras tiene, si su largo es 30 cm?

Permeabilidad magnética

Si en el interior o núcleo del solenoide se coloca un material determinado, cambian los efectos magnéticos de manera significativa con respecto al solenoide vacío. Por ejemplo, si se coloca un núcleo de hierro en un solenoide, la magnitud del campo magnético en su interior es mucho mayor. En esas condiciones, la expresión para \vec{B} toma la forma:

$$B = \mu \cdot \frac{nI}{L}$$

donde la nueva constante μ equivale a $\mu_0 \cdot \mu_r$, es decir, $\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$.

El valor μ_r se llama **permeabilidad magnética del material relativa al vacío**.

La permeabilidad puede interpretarse como la relativa facilidad con que un determinado material permite que lo atraviesen las líneas de campo magnético.

Algunos valores de permeabilidad relativa son:

Mineral	Cobalto	Níquel	Hierro común	Hierro puro	Supermallory (aleación de hierro y níquel)
Valor de permeabilidad relativa (μ_r)	250	600	$6 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^5$	10^6

Estos valores solo son indicativos, ya que la permeabilidad relativa de los materiales ferromagnéticos es variable.

Vector intensidad del campo magnético

Hasta el momento, el campo magnético ha sido caracterizado por el vector \vec{B} de inducción magnética. Este vector toma su medida a partir de la influencia de un campo magnético sobre un material magnético, sobre una carga, o sobre una corriente eléctrica. Es posible asignar al campo un vector que se llama \vec{H} , o vector intensidad del campo magnético, independiente del medio en el cual induce efectos magnéticos. Este vector está relacionado con \vec{B} de la siguiente manera:

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H}$$

En esta expresión se usa la permeabilidad magnética del medio material que está sometido a la acción de un campo magnético de intensidad \vec{H} .

Histéresis

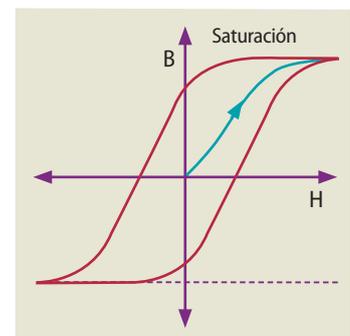
La relación entre los dos vectores magnéticos, \vec{B} y \vec{H} , adquiere en algunos casos una forma sencilla debido a que μ es un valor constante. Éste es el caso del vacío, en el cual $\mu = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{T \cdot m}{A}$, y donde la representación gráfica de esta relación en ejes B, H es una recta. Por el contrario, en los materiales ferromagnéticos como el hierro, la relación entre B y H es más complicada. Si se dibujan las curvas experimentales de la relación entre B y H, llamadas **curvas de histéresis**, se advierte que los materiales ferromagnéticos conservan un valor de campo magnético de inducción \vec{B} distinto de cero, aun cuando el campo externo \vec{H} que lo indujo se haga nulo, es decir que, sin estímulo externo, se comportan como imanes.

La siguiente figura representa lo que se conoce como un **ciclo de histéresis** para un material en particular, por ejemplo hierro.

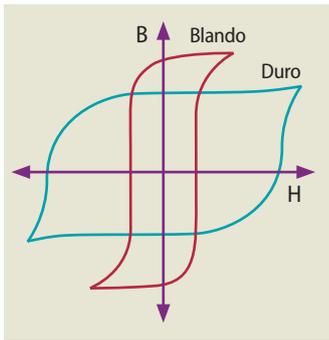
Los materiales de alta remanencia son utilizados para la fabricación de imanes permanentes; un ejemplo son las ferritas, que se emplean para almacenar información en los discos rígidos de las computadoras.



Disco rígido.



Ciclo de histéresis del hierro.



Ciclo de histéresis de materiales blandos y duros.

La pieza inicial de hierro, que no está magnetizada, comienza a recibir la influencia de un campo magnético externo y variable, de valor H . A medida que éste crece, también lo hace B . Al alcanzar un cierto valor, no aumenta más. Cuando el campo externo comienza a disminuir, también disminuye la inducción magnética B . Es posible notar que, aun cuando H se hace nulo, existe un valor de B remanente. Cuando H continúa variando hasta tomar un sentido opuesto al original, B llega a hacerse nulo. Finalmente, cuando se reinicia el proceso, el material alcanza nuevamente el valor de campo inducido máximo, que es llamado valor de saturación.

Según su ciclo de histéresis, los materiales son llamados duros o blandos. Estos últimos se imantan y desimantan fácilmente, mientras que los otros no. Las curvas de histéresis de materiales blandos y duros se muestran en la figura.

Aplicaciones de la permeabilidad magnética

¿En cuánto cambiará el resultado del problema resuelto en la página 216 si se le coloca al solenoide un núcleo de níquel?

En lugar de $B = \mu_0 \cdot \frac{nI}{L}$ es necesario considerar ahora $B = \mu \cdot \frac{nI}{L}$.
Como $\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$ y para el caso del níquel $\mu_r = 600$, por lo tanto $B = 9 \cdot T$.



Construcción de un electroimán

Un electroimán está constituido por un material ferromagnético alrededor del cual se enrolla un cable por el que circula corriente. Es un imán no permanente, es decir que las acciones magnéticas que es capaz de inducir se producen solo cuando circula corriente por el conductor que lo rodea. Según la dureza del material, puede transformarse en un imán relativamente permanente. El objetivo de esta actividad es obtener un electroimán y verificar experimentalmente los campos magnéticos inducidos en bobinas.

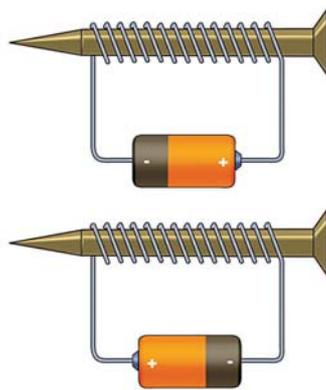
Materiales

Cable monopolar (con la cubierta aislante). Una pieza de acero o hierro que pueda usarse como núcleo (puede ser un tornillo grueso tipo bulón, o un clavo). Una o varias pilas. Algunos clips metálicos. Limaduras de hierro. Una hoja de papel o cartulina blanca.

Procedimiento

1. Es necesario formar un circuito eléctrico como indica la figura.

Pueden cambiar el diseño, por ejemplo, agregarle para mayor comodidad algo que sirva como llave interruptora. Para obtener el electroimán, deben colocar el núcleo en la bobina. Antes de realizar la experiencia, lean las actividades propuestas para que el diseño que elaboren permita realizarlas a todas.



2. Verifiquen su funcionamiento acercándolo a los clips metálicos. Deben ser atraídos cuando el circuito está cerrado y se deben soltar cuando se interrumpe la corriente.

3. Analicen las variaciones en el campo magnético inducido cuando colocan el núcleo en la bobina y cuando no lo hacen. Para esto pueden servir las limaduras de hierro y la hoja, ya que, como han hecho anteriormente, permiten visualizar el campo a través de la formación del espectro.

4. Escriban un informe donde conste el diseño del electroimán, con las eventuales modificaciones que hayan considerado pertinentes, y registren sus observaciones respecto de su funcionamiento y de las variaciones en los campos magnéticos inducidos por la bobina con su núcleo y sin él.

5. Investiguen distintas aplicaciones de electroimanes y elaboren un breve resumen de por lo menos una de ellas (ejemplos: utilización de relays, grúas, parlantes, etc.). Si lo desean, pueden intentar cambiar el material del núcleo de la bobina por otro. ¿Cualquier material sirve para esta experiencia?

Motor eléctrico

El objetivo de la presente actividad es que construyan un dispositivo muy sencillo con el que puedan comprender el funcionamiento de un motor eléctrico.

Materiales

Cable monopolar con su cubierta aislante (puede ser el de bobinar motores, aunque también sirven otros similares). Trozos de telgopor. Imanes potentes (por ejemplo los de aritos magnéticos). Dos o tres pilas. Un trozo de alambre o palito para hacer de eje del motor.

Construcción

La construcción del diseño requiere algún cuidado ya que es necesario que una pieza gire. Al estar apoyada sobre un eje, puede ocurrir que el rozamiento impida que se observe el efecto. Por otra parte, los circuitos eléctricos requieren siempre tener la precaución de que los contactos estén correctamente ensamblados.

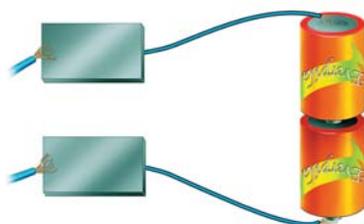
Partes del motor

a. El cable se enrolla formando una bobina, llamada **bobinado o rotor**, ya que es la pieza destinada a rotar. Pueden construir este bobinado con una sola espira o con varias, para potenciar el efecto, pero debe tener un eje. Pueden enrollar la espira sobre una base construida con el



telgopor, de sección rectangular para mayor simplicidad. Deben enrollar el cable como muestra la figura, dejando los extremos libres y pelados, que se llaman **delgas**. En la mayoría de los motores reales, para mejorar su funcionamiento, se colocan varias bobinas. Cada una termina en un par de delgas. A su conjunto se lo llama **colector**.

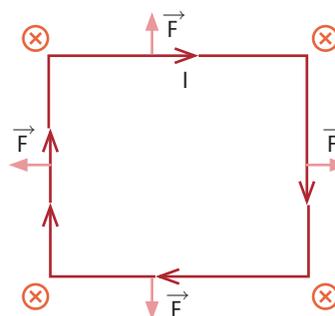
b. La bobina (o simplemente la espira) tiene que poder hacer contacto eléctrico con dos terminales conectadas a los polos de las pilas conectadas en serie. Estos contactos se llaman **escobillas**.



c. Se debe proveer al diseño de un campo magnético externo, a fin de que en su interacción con la corriente que circula por la espira aporte la fuerza suficiente para hacerla girar. Esto puede lograrse con la ubicación de los polos enfrentados de dos imanes que constituyen el **campo** del motor. En algunos motores, este campo es provisto por un electroimán.

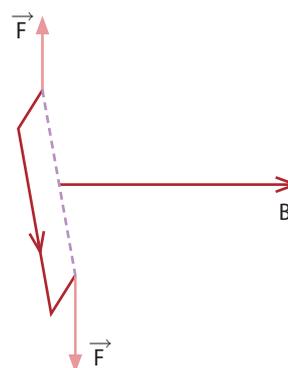
Funcionamiento

Al circular la corriente por la bobina, las fuerzas sobre de los cables son diferentes:



Se usa el símbolo: \otimes para indicar un campo magnético perpendicular entrante y \ominus para un campo magnético perpendicular saliente respecto del plano de la hoja.

De acuerdo con lo analizado en apartados anteriores, la fuerza sobre los cables cuando se inclina la espira es:



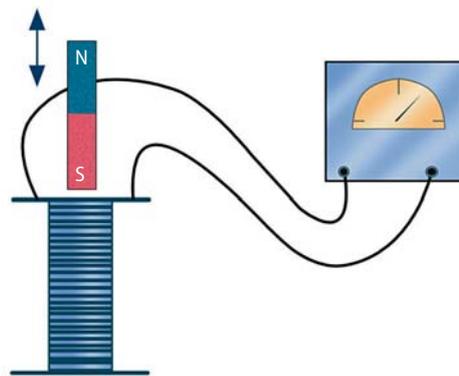
De esta manera se explica el giro, que también tiene el efecto de desconectar las delgas de las escobillas. Podrían realizarse los arreglos como para que al girar las delgas, toquen a las escobillas de manera tal que las fuerzas que se ejercen en la parte superior y la inferior permitan continuar la rotación. Normalmente, es difícil lograr giros continuos en estos prototipos experimentales tan simples. Sin embargo, puede resultar interesante que discutan los arreglos para mejorar las condiciones y lograr un funcionamiento más o menos regular.

■ No solo en conductores finos como los cables se generan corrientes por inducción electromagnética. Como queda demostrado luego de la experiencia de Faraday, también se producen corrientes en conductores con forma de placas o láminas. Es el caso del llamado **freno magnético**. Una placa de material conductor, cobre por ejemplo, oscila libremente si está colgada a modo de péndulo, pero deja de hacerlo cuando se la ubica entre los polos de un imán. Se frena en una posición distinta de la vertical debido a la acción del campo magnético sobre la corriente inducida. La fuerza de frenado es proporcional al campo, a la velocidad del péndulo y a la conductividad del material del cual está hecha la placa oscilante. El freno magnético se aplica a automóviles y bicicletas fijas, por ejemplo. Este mecanismo consiste en algunos pequeños imanes colocados alrededor de una bobina que gira a cierta velocidad. Controlando la distancia entre ella y los imanes, es posible controlar la velocidad de giro. La fuerza que frena la bobina será mayor cuando se reduzca la distancia entre ella y los imanes.

Inducción electromagnética

Los trabajos de Oersted y Ampère resultaron decisivos en el progreso de la teoría electromagnética. Después de quedar probado que se podía producir magnetismo mediante corrientes eléctricas, se especuló que tal vez fuera posible producir electricidad a partir del magnetismo. Ya se comentó en el capítulo anterior la importancia que tuvo la pila inventada por Volta, en cuanto a proveer un dispositivo alternativo a las limitadas máquinas electrostáticas, y además, de ser capaz de producir corriente eléctrica en forma continua. Resultaba muy alentador pensar que, como finalmente quedó demostrado, era posible obtener una corriente eléctrica mediante algún mecanismo que incluyera a los imanes.

En 1831, el norteamericano Joseph Henry (1797-1878) publicó sus descubrimientos acerca de la inducción eléctrica: la aparición de corriente eléctrica en una bobina mediante el movimiento de un imán que entraba y salía de ella. Casi al mismo tiempo, Michael Faraday, en Europa, descubría independientemente el método para transformar magnetismo en electricidad. La corriente se generaba en un disco de cobre que giraba entre los polos de un imán en herradura. Un alambre estaba unido al centro del disco y otro lo tocaba en el borde por medio de una escobilla.



Al mover el imán cerca o dentro de la bobina, se produce una corriente eléctrica que es detectada por el amperímetro.

Con un instrumental sencillo pueden repetirse las observaciones de Henry y Faraday, resumidas en los siguientes párrafos.

Si el imán no se mueve, el amperímetro marca, como es lógico, la ausencia de corriente. Cuando el imán comienza a moverse con su polo norte dirigiéndose hacia la bobina, la aguja del amperímetro se desvía, marcando la presencia de corriente eléctrica. Cuando el imán se retira, la aguja también se desvía, pero marcando una corriente en sentido contrario.

Si el experimento se repite enfrentando a la cara de la bobina un polo sur, los resultados son similares, aunque los sentidos de circulación se cambian respecto del primer caso. Como el movimiento es relativo, es indistinto mover el imán o la bobina.

Es posible interpretar, como hizo Faraday, que la bobina barre las líneas de campo magnético en su movimiento, y la rapidez con que lo hace determina el valor de la diferencia de potencial asociada a la circulación de corriente en la bobina.

La corriente que empieza a circular en el cable implica la aparición de una diferencia de potencial eléctrico ΔV , llamado también **fuerza electromotriz inducida**, que depende de la rapidez con la que el alambre corta las líneas de campo magnético. La fuerza electromotriz inducida es mayor cuanto más rápido sea el movimiento.

Por otra parte, cuanto mayor sea el número de espiras de la bobina, mayor es también el valor de la fuerza electromotriz inducida. A medida que se aumenta el número de espiras, se hace más difícil el movimiento relativo, ya que la corriente inducida también produce campos magnéticos asociados que se oponen al movimiento del imán y agregan una fuerza contra la cual se debe ejercer trabajo. Por lo tanto, puede verse cómo, una vez más, se cumple el principio de conservación de la energía.

Ley de Faraday

Faraday actuaba guiado por una increíble imaginación e intuición que quizás haya cultivado en su formación científica autodidacta. Su idea de las líneas de campo resultó por demás fecunda, en particular en la interpretación de la inducción electromagnética.

Para evaluar la rapidez con que la espira metálica corta las líneas de campo magnético, es necesario definir una magnitud llamada **flujo magnético** que se designa con la letra Φ . Es un valor proporcional al número de líneas de campo que atraviesa una determinada superficie. El cálculo del flujo del vector de inducción magnética \vec{B} resulta simple para el caso de un campo uniforme que atraviesa una sección perpendicular S :

$$\Phi = B \cdot S$$

La unidad del flujo magnético en el sistema internacional se llama **weber** y se define como $Wb = T \cdot m^2$. A partir de esta magnitud es posible enunciar la llamada **Ley de la inducción de Faraday**, la cual enuncia:

La fuerza electromotriz (fem) inducida es proporcional a la rapidez con la cual cambia el flujo magnético que atraviesa el circuito eléctrico.

Simbólicamente:

$$fem = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

donde $\Delta\Phi$ indica el cambio del flujo magnético en un intervalo de tiempo Δt .

La **fuerza electromotriz (fem)** es la magnitud física definida como la razón entre la energía que aporta una fuente de energía eléctrica y el valor de carga que atraviesa la fuente. Su unidad es el volt (equivalente a la razón entre 1 joule de energía por cada coulomb de carga).

En una pila, parte de la energía entregada se disipa como calor en la resistencia propia de la pila y el resto corresponde a la diferencia de potencial entre los bornes, por lo que, cuando está conectada, esta tensión es algo menor que su fem.

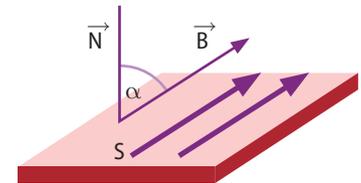
Si en lugar de una sola espira se tuviera un número n de ellas, haciendo la salvedad de que deberían estar tan apretadas que los flujos magnéticos que atraviesan cada una de ellas pueden considerarse idénticos, se tendría:

$$fem = - n \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

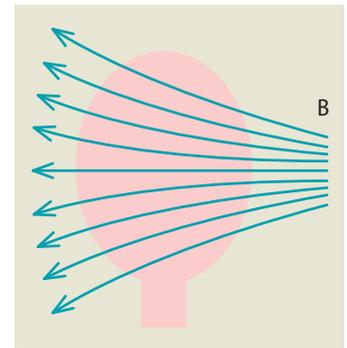
Esta ecuación puede aplicarse con buena aproximación a solenoides y toroides. El signo menos en la Ley de la inducción de Faraday indica que la corriente que circularía produciría efectos magnéticos tendientes a anular el cambio en el flujo magnético. Puede comprenderse mejor su significado a partir de la llamada **Ley de Lenz**. Con fundamento en el principio de conservación de la energía, esta ley afirma que: *la corriente inducida tiene un sentido tal que se opone a la causa que la produce.*

La corriente inducida tiene asociado un campo magnético que se opone a la variación del flujo de \vec{B} . Al mover el imán, hacia la bobina o alejándose de ella, siempre habrá que trabajar en contra de una fuerza.

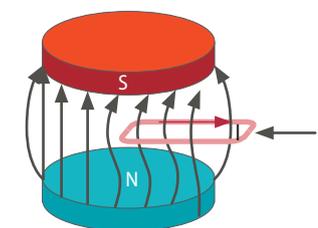
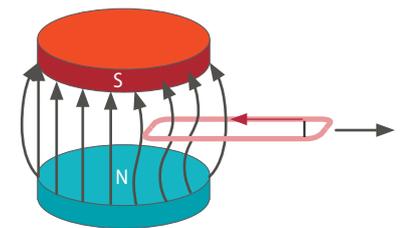
■ Cuando el campo magnético y la superficie no son perpendiculares, el flujo magnético se define como el producto entre el módulo de \vec{B} , la superficie S y el coseno del ángulo que forma el campo con la normal a la superficie.



$$\Phi = |\vec{B}| \cdot S \cdot \cos \alpha$$



Líneas de inducción.



Este esquema representa una espira arrastrando las líneas de campo y la indicación de la corriente inducida.

Los artefactos eléctricos aclaran entre sus especificaciones técnicas si su funcionamiento requiere corriente alterna o continua. Cuando necesitan una fuente de corriente continua, normalmente funcionan con una pila o batería, o en su defecto, mediante unos aparatos que transforman la corriente domiciliaria, que es alterna, en continua. Estos transformadores también adaptan la diferencia de potencial a la que pueden conectarse según las distintas necesidades.

Este trabajo es equivalente al calentamiento que aparece por efecto Joule, asociado a la resistencia del circuito cuando circula corriente, es decir, cuando está cerrado. El agente que varía el flujo magnético trabaja y entrega energía al circuito. El principio de la conservación de la energía prueba, una vez más, ser uno de los pilares fundamentales de la física.

Generadores eléctricos

Los primeros motores eléctricos fueron construidos pocos años después del descubrimiento de la inducción electromagnética.

El ingeniero alemán Hermann de Jacobi construyó en 1839 un gran motor eléctrico para el zar de Rusia Nicolás I, quien lo utilizó para mover la rueda de una embarcación para la diversión de algunos de sus invitados.

Algunos europeos y norteamericanos, inspirados en los diseños de Henry y Faraday construyeron prototipos de lo que hoy se llama un generador eléctrico. Pero fue recién en 1863 cuando el científico italiano Antonio Pacinotti (1841-1912) presentó su **dinamo**, un generador eléctrico que aplica principios similares a los que se utilizan actualmente, que vino a reemplazar de alguna manera a las pesadas pilas inventadas por su compatriota Volta.

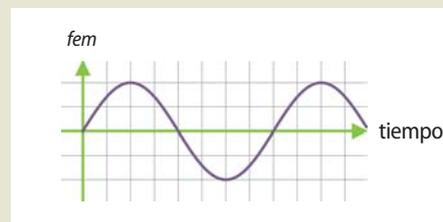
Un generador eléctrico es, en esencia, un motor eléctrico que convierte energía mecánica en eléctrica, así como éste convierte energía eléctrica en mecánica.

Corriente alterna

Retomando el diseño del motor simple de la página 219, es posible ahora analizar su uso como generador de corriente.

Cuando la espira gira en presencia de un campo magnético, hay una variación en el flujo del vector inducción magnética, y por lo tanto comienza a circular por ella una corriente eléctrica debido a la presencia de una fem inducida, de acuerdo con la Ley Faraday.

En este caso, la variación del flujo en razón del tiempo no es tan simple, debido a que por la rotación cambia permanentemente el ángulo entre la espira y el vector de inducción magnética \vec{B} . Si el bobinado gira con velocidad angular constante, la variación de la fem inducida según el tiempo responderá al siguiente gráfico.



Al hacer girar el bobinado en un campo magnético, se genera una fem inducida como la que se representa en la figura.

En el gráfico se puede apreciar que, así como cambia la fem inducida, las corrientes inducidas cambian de valor y de sentido de circulación en forma periódica.

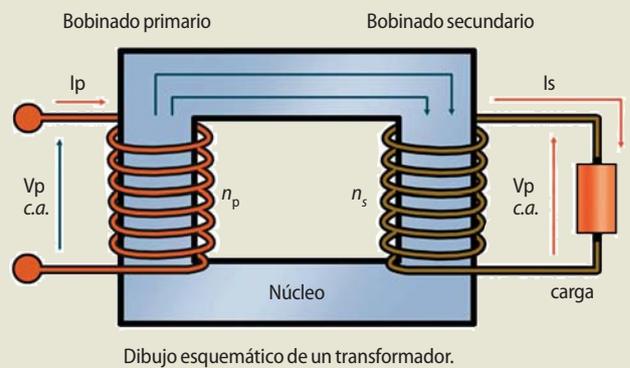
En nuestro país, la corriente alterna cambia su magnitud y sentido de circulación cumpliendo 50 ciclos cada segundo, es decir con una frecuencia de 50 hertz.

Los generadores de electricidad en una planta productora que utiliza combustibles fósiles, o en una central hidroeléctrica, presentan diseños mucho más complejos que los analizados en este apartado. La simplificación es un intento por explicar los principios físicos relacionados con su funcionamiento. La aplicación de un prototipo experimental a la atención de las necesidades de una sociedad en general requiere del manejo de muchas variables y es, en todos los casos, un problema complejo e interdisciplinario.

Transformadores

Una de las ventajas de la corriente alterna sobre la continua es la posibilidad de transportarla a grandes distancias utilizando altos valores de tensión y bajos valores de intensidad de corriente. Como la resistencia de los cables de conducción es muy alta, ya que deben cubrir largos trayectos, habría muchas pérdidas de energía por efecto Joule si no se utilizaran transformadores, los cuales permiten aumentar o disminuir la diferencia de potencial alterna, sin variar su frecuencia.

Su funcionamiento se basa en los efectos de inducción entre dos bobinas que tienen un núcleo común, normalmente de hierro, como se muestra en la figura.



Una de las bobinas está conectada a una fuente eléctrica y se denomina **bobina de alimentación** o **primaria**. La otra bobina se llama **bobina de salida** o **secundaria**.

Si la corriente de la bobina de alimentación fuera continua, entonces la única variación en el flujo magnético capaz de inducir una *fem* en la segunda bobina tendría lugar en el momento en que se cierra o se abre el circuito.

Cuando la corriente es alterna, las variaciones de flujo son constantes, y por lo tanto se produce una *fem* inducida en la bobina de salida que tiene los mismos ciclos que la corriente alterna de la bobina de alimentación.

La relación entre los voltajes de ambas bobinas es simple, y tiene que ver con el número de vueltas de cada una:

$$\frac{\Delta V_e}{\Delta V_s} = \frac{n_e}{n_s} \quad \text{por lo tanto:} \quad \Delta V_s = \Delta V_e \cdot \frac{n_s}{n_e}$$

donde ΔV_s es el voltaje de salida, ΔV_e es el voltaje de entrada, n_s es el número de vueltas de la bobina en la salida y n_e es el número de vueltas de la bobina en la entrada.

Según lo que se requiera por su aplicación, un transformador puede:

- aumentar el voltaje de salida, para lo cual $n_s > n_e$ en la misma proporción requerida por $\Delta V_s > \Delta V_e$;
- disminuir el voltaje de salida, para lo cual $n_s < n_e$ tanto como lo requiera la relación $\Delta V_s < \Delta V_e$.

Los transformadores y la transmisión de la energía eléctrica

El funcionamiento de los grandes generadores de energía eléctrica es técnicamente muy complejo, pero básicamente funcionan como una gran dinamo. Se hace girar un bobinado en un campo magnético. Para ello se puede usar vapor de agua calentado mediante gas, derivados líquidos del petróleo, caídas de agua, viento o fisión nuclear.

Estos grandes generadores están por lo general lejos de los centros de consumo, por lo que hay que transportar la energía eléctrica grandes distancias mediante cables. Estos cables se calientan y pueden tener miles de kilómetros de largo, por lo que las pérdidas pueden ser muy grandes.

En el capítulo anterior se calculó la energía disipada en forma de calor por unidad de



Algunos transformadores, como el que vemos en la fotografía, son señalados como contaminantes, debido a un refrigerante altamente tóxico que utilizan llamado PCB, que tiene posibles efectos cancerígenos. Existen relevamientos hechos por distintas asociaciones ambientalistas respecto de la ubicación de los transformadores que todavía usarían este contaminante. Las empresas proveedoras de servicios eléctricos han tomado públicamente el compromiso de reemplazarlos.



Algunas bacterias reciben el nombre de **magnetotácticas** dado que tienen dipolos magnéticos que les sirven para orientarse y desplazarse en una dirección determinada. Estas bacterias viven en agua dulce y salada. Según una teoría, algún tipo de bacterias podrían haber creado la magnetita como producto natural de su metabolismo. Se conocen algunas bacterias que se desarrollan en ausencia de oxígeno, y que requieren para sus procesos metabólicos hierro en forma de óxido ferroso no magnético, al que convierten en magnetita. Según esta misma teoría, las capas de magnetita que cubren los grandes depósitos de hierro podrían haberse formado durante el período precámbrico, en el que estas bacterias ya estaban presentes.

tiempo en un conductor mediante la expresión: $P = R \cdot I^2$, donde R es la resistencia del cable, e I la intensidad de la corriente que circula por él; se puede entender que conviene transportar energía con baja corriente para tener menos pérdidas en el trayecto.

Por otra parte, la potencia entregada y transportada desde la central de generación se puede calcular según la expresión:

$$P = \Delta V \cdot I$$

donde ΔV es la diferencia de potencial que los técnicos llaman para estas situaciones tensión, e I la intensidad de la corriente.

Propiedades magnéticas de la materia

La razón por la cual solo algunos materiales presentan propiedades magnéticas evidentes se basa en el hecho de que sus partículas ya son pequeños imanes. El conocimiento que hoy en día se ha alcanzado acerca de la estructura íntima de la materia permite afirmar que el origen del magnetismo es el movimiento de las cargas eléctricas presentes en los átomos. Cuando las cargas eléctricas están en reposo, solo generan campo eléctrico, pero cuando se mueven, generan un campo magnético. Si el movimiento de cargas es acelerado, se produce la emisión de radiación electromagnética.

Realizando algunas simplificaciones necesarias, es decir usando el antiguo modelo orbital, en un átomo existen dos movimientos de partículas cargadas que determinan la presencia de dipolos magnéticos y que resultan significativos para los fenómenos analizados en este capítulo: el movimiento de giro de los electrones alrededor del núcleo y el movimiento de rotación de los electrones sobre sí mismos, también llamado **spin electrónico**. Es necesario insistir en que esta interpretación corresponde a una importante simplificación en el modelo atómico, con el único fin de comprender los efectos magnéticos. El giro del núcleo o spin nuclear tiene gran importancia en la técnica de diagnóstico médico llamada resonancia magnética nuclear, pero no resulta determinante en su influencia sobre las propiedades magnéticas de los distintos materiales.

Los elementos y materiales **ferromagnéticos** ya fueron mencionados al comienzo de este capítulo. Con el hierro como el más representativo, componen también este grupo el cobalto y el níquel, junto con dos elementos más raros: el gadolinio y el disprosio. En ellos cada átomo tiene dipolo magnético orbital y dipolo magnético de spin que no están compensados. Por lo tanto, en estos materiales los dipolos permanentes se alinean con el campo magnético aplicado. El reforzamiento mutuo de los dipolos produce un aumento significativo en el campo magnético, por lo que estos materiales tienen muy altos valores de permeabilidades magnéticas relativas. Los átomos se ordenan en dominios magnéticos que pueden estar en general con distintas orientaciones unos respecto de otros. Sin embargo, tienen la posibilidad de alinearse por acción de un campo externo y eventualmente conservar este orden, es decir convertirse en imanes.

Se llaman materiales **antiferromagnéticos** a aquellos que tienen dipolos magnéticos, pero se alinean en oposición unos con otros en un campo magnético, por lo que resultan solo débilmente afectados. Un material antiferromagnético es, por ejemplo, el dióxido de manganeso.

Los materiales **ferromagnéticos** son de tipo cerámico y se caracterizan por la presencia de dipolos magnéticos que se alinean en forma antiparalela con el campo, a favor y en contra de él. Como la resistencia de los dipolos para orientarse no es igual, hay una magnetización neta

y pueden proporcionar una buena intensificación del campo que se aplique. Las magnetitas, que son un óxido de hierro, y las ferritas de níquel, óxidos de hierro y níquel, son materiales ferrimagnéticos porque a su relativamente buena permeabilidad magnética unen una baja conductividad eléctrica. Se utilizan en dispositivos que necesitan combinar estas cualidades.

Existen otros materiales llamados **diamagnéticos**. En 1846, Faraday observó que una muestra de bismuto era repelida débilmente cuando se la colocaba cerca de un imán poderoso. Los materiales diamagnéticos no tienen dipolos magnéticos permanentes, ya que compensan el efecto magnético orbital de los electrones con el de su spin. Sin embargo, cuando se aplica un campo externo suficientemente importante, se nota una repulsión. El electrón, como explica la Ley de Lenz que prueba, así, su validez a nivel atómico, responde generando un campo magnético opuesto al cambio de flujo magnético experimentado.

Los materiales diamagnéticos tienen una permeabilidad relativa algo menor que la unidad (0,99995), lo cual significa que es prácticamente igual a la del vacío. Frente a la acción de un campo magnético externo, sus dipolos reaccionan orientándose en contra de él.

El diamagnetismo de los superconductores merece un comentario aparte. Se dice que ellos presentan un diamagnetismo perfecto: el efecto es tan fuerte que llega a apantallar un campo magnético externo.

Walter Meissner (1882-1974) observó en 1933 que un material superconductor se convierte en diamagnético perfecto cuando se lo enfría por debajo de una temperatura particular llamada temperatura crítica. Esto explica, por ejemplo, los curiosos efectos de levitación de un imán con que se ilustra frecuentemente este fenómeno: al colocarlo sobre un superconductor enfriado, se logra que la repulsión magnética equilibre el peso del imán. Este efecto se llama **efecto Meissner**.

También existen materiales llamados **paramagnéticos**. En su átomos tienen dipolos magnéticos débiles, por lo que cuando se los somete a un campo magnético externo tienden a alinearse con él, y lo aumentan. Sin embargo, sus valores de permeabilidad magnética relativa son apenas mayores que la unidad (1,01), por lo que la densidad de flujo magnético en estos materiales es prácticamente la del vacío. Los materiales paramagnéticos orientan poco sus dipolos según el campo externo y se requieren valores muy grandes de campo para que logren alinear la mayoría de ellos. Son considerados materiales no magnéticos, ya que solo muestran estas propiedades cuando se encuentran en un campo magnético externo muy intenso. Algunos ejemplos de materiales paramagnéticos son el potasio, el oxígeno, el tungsteno y algunas tierras raras como el neodimio.

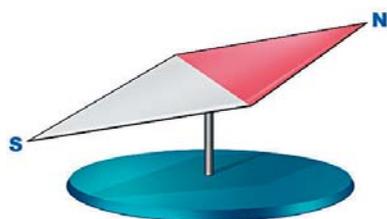
Como solo algunos pocos materiales pertenecen al grupo de los ferromagnéticos, puede decirse que la gran mayoría de los materiales son paramagnéticos o diamagnéticos.

Algunos materiales se llaman **superparamagnéticos**. Su comportamiento combina las propiedades del ferromagnetismo y del paramagnetismo. Se explica por la presencia en el material de partículas muy pequeñas que pueden orientar sus dipolos en un campo externo por debajo de cierta temperatura crítica. Sin embargo, como la interacción entre ellas es muy débil, el ordenamiento de sus dipolos no puede extenderse a todo el material. Este comportamiento resultó de mucha utilidad para la fabricación de cintas magnéticas. Cada una de las partículas con comportamiento ferromagnético dentro del material puede cambiar su orientación en una pequeña distancia dentro de la cinta. Si la orientación puede dirigirse intencionalmente, entonces es posible guardar información utilizando este hecho a modo de código. Existen actualmente investigaciones que tratan de analizar materiales superparamagnéticos con partículas de tamaño del nanómetro, lo cual optimiza los diseños de soporte magnético de la información.

El primer dispositivo para el soporte magnético de la información fue la cinta magnética. Se trata de un material plástico cubierto de un material ferromagnético. A partir de entonces, los diseños y materiales destinados a guardar información por medios magnéticos han ido cambiando hacia unidades más pequeñas y de mayor capacidad de almacenamiento. El estudio de las propiedades magnéticas de nuevos materiales es uno de los campos de mayor impacto en los cambios tecnológicos en estas aplicaciones.



Casete, dispositivo de soporte magnético de la información.



El inglés **Robert Norman** dio a conocer en 1581 un descubrimiento fundamental que realizó mientras trabajaba en la construcción de brújulas para navegación. Era sabido en su oficio que al apoyar las agujas no imantadas por su punto medio, lograban sostenerse en forma horizontal mientras que, cuando eran imantadas, el extremo norte se inclinaba un poco por debajo de la línea del horizonte. La interpretación que se daba a este hecho era que, cuando la aguja se convertía en imán, el polo norte parecía pesar más. Desde otro punto de vista, Norman supuso que esta inclinación se debía a la naturaleza de la fuerza magnética que actuaba sobre el extremo norte y hacia abajo, en relación a la Tierra. Sus observaciones, sumadas a las explicaciones de su contemporáneo Gilbert, motivaron múltiples investigaciones para medir la variación de este ángulo de inclinación según las distintas latitudes. En las latitudes sur, es este extremo de la brújula el que se encuentra deprimido.

El campo magnético terrestre

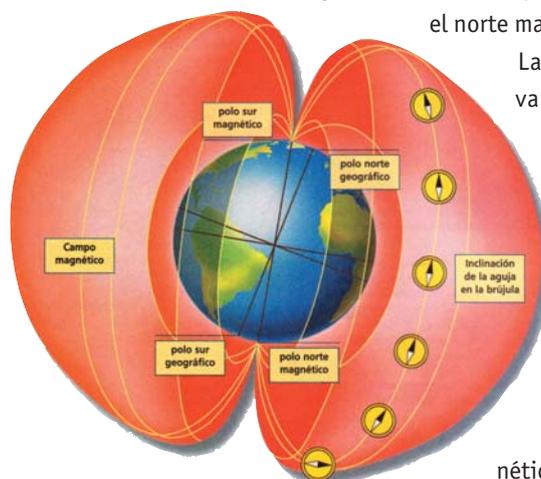
Tan antigua como los registros sobre fenómenos magnéticos básicos es la observación de que un imán alargado y pequeño puede, si se lo deja libre, orientarse hacia el norte geográfico.

Hay diversas opiniones acerca del pueblo al cual le corresponde la invención de la brújula. Algunos afirman que los chinos la conocían desde tiempos muy antiguos y que fue llevada a Europa por Marco Polo o por los árabes. Existen escritos que hacen referencia al uso de la brújula para la navegación que datan del siglo XII. Ahora bien, estos diseños eran muy rudimentarios y no había por entonces ninguna explicación para su funcionamiento de la cual se tenga constancia. La investigación sistemática sobre los fenómenos magnéticos comenzó, como se ha dicho, con los trabajos de Gilbert en el año 1600. Con su prototipo de una tierra en miniatura estableció como un hecho que el planeta era un imán natural, como probaba la orientación de las brújulas o pequeños imanes colocados en su campo.

La teoría más aceptada actualmente para explicar la presencia de polos magnéticos en nuestro planeta se conoce como **efecto dínamo**. Según ella, en la región ígnea interior de la Tierra existen corrientes de hierro en estado líquido que se mueven, debido a la rotación planetaria, en torno a un débil campo magnético ya existente. De esta manera, se genera otro campo magnético más fuerte que el original. También existen en el interior de la Tierra movimientos convectivos en el material del núcleo, los que probablemente influyen en la formación del campo magnético planetario.

Debido a que se llama polo norte de un imán a aquel que apunta en esa dirección geográfica, se entiende que en esa posición se encuentra el polo sur magnético de la Tierra.

De igual manera, en las proximidades del sur geográfico se ubica el norte magnético.



La ubicación de los polos de la Tierra varía en forma casi constante, aunque es un proceso muy lento. Es por eso que la ubicación de los polos magnéticos no coincide exactamente con su localización geográfica. La diferencia entre ambas direcciones, medida en ángulos, se llama **declinación magnética** y es actualmente de alrededor de 11° .

El desplazamiento de los polos magnéticos a lo largo de las distintas eras geológicas se conoce como **variación secular**. La evidencia de estos cambios se encuentra en los dominios magnéticos de las rocas que contienen hierro. Al enfriarse durante su formación, sus dominios tomaron la orientación del campo magnético terrestre de ese momento. Estos registros permiten la elaboración de mapas del campo magnético en las distintas épocas. Por ejemplo, muestran variaciones que en algunas etapas lo redujeron a cero para luego invertirlo. El proceso de inversión de los polos magnéticos parece ser cíclico, aunque no puede decirse con certeza cuándo sucederá la próxima inversión.

En el último siglo se ha registrado una disminución de un 10% en su valor, que es del orden de 10^{-4} T.

Magnetosfera y viento solar

El Sol tiene un movimiento de rotación, ya señalado por Galileo a partir de sus observaciones con el telescopio. Su afirmación se basó en otro descubrimiento de fundamental importancia: las **manchas solares**. Interpretó que esas manchas oscuras que aparecían y desaparecían periódicamente después de cruzar el disco solar, en realidad acompañaban el movimiento de la estrella. La rotación se cumple en forma diferencial, es decir que es más rápida en el ecuador que en los polos; y este hecho, junto con los movimientos de convección de gas a distintas temperaturas entre sus capas, es responsable de la generación y mantenimiento del campo magnético solar.

El campo magnético solar es el responsable de guiar las emisiones del llamado **plasma de viento solar**. Está formado por partículas cargadas eléctricamente, positivas y negativas, que tardan en llegar a la Tierra alrededor de 3 días.

La Tierra se encuentra dentro de la influencia del campo magnético solar, sin embargo su propio campo puede ser considerado como un escudo protector, o **magnetosfera**. La zona límite entre la influencia de los campos terrestre y solar se llama **magnetopausa**. Ella constituye una verdadera superficie de choque entre el viento solar y el escudo magnético terrestre. El plasma solar se frena y es desviado. La magnetopausa se encuentra aproximadamente a 60 000 km de la superficie del planeta en dirección hacia el Sol, y a 300 000 km en la dirección contraria.

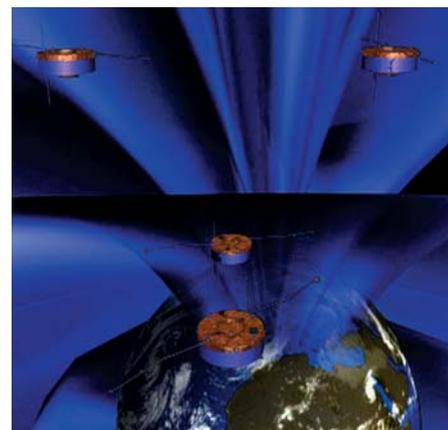
Algunas partículas cargadas que chocan contra la magnetosfera son conducidas hacia los polos de la Tierra, siguiendo las líneas de campo. Al ingresar hasta la ionósfera, interactúan con los iones presentes, principalmente nitrógeno y oxígeno. La interacción produce en ellos una absorción de energía que los lleva a un estado excitado. Al volver a su estado fundamental, emiten la energía en forma visible desde la Tierra: son las llamadas **auroras boreales**, o luces del norte. Las auroras boreales se forman en ambos polos, tanto en el norte como en el sur, y son visibles en amplias zonas próximas a ellos.

Las investigaciones han probado una cierta periodicidad en la actividad solar en cuanto a la aparición de las manchas solares: siguen ciclos de aproximadamente 11 años, entre períodos de máxima y de mínima actividad. La aparición de una mancha solar importante está asociada a la emisión de ráfagas solares.

Estas regiones de un poco más de 10 000 kilómetros de diámetro se ven oscuras, aunque son en realidad zonas más frías que otras. Se ha probado que su presencia indica también una fuerte concentración del campo magnético solar.

El aumento cíclico del número de manchas solares tiene relación con los cambios en el campo magnético solar, el cual se va reconfigurando como consecuencia de su rotación y de los movimientos del gas en su estructura.

La actividad solar se ha constituido en un foco de interés en los últimos años, ya que los efectos del viento solar no se limitan a la formación de bellas auroras boreales. Las tormentas solares son responsables, por ejemplo, de interferencias en las comunicaciones, que acarrearán múltiples inconvenientes y graves perjuicios económicos.



Esta imagen tomada por el satélite Cluster II permite observar la magnetosfera que, puede considerarse un escudo protector contra los efectos del viento solar.

En las auroras boreales como la que puede observarse en la fotografía, sacada en Michigan, Estados Unidos, la emisión de luz por parte de los iones oxígeno es verde y la de los iones nitrógeno es roja. Constituyen sin duda uno de los espectáculos más bellos de la naturaleza.



Aceleradores de partículas

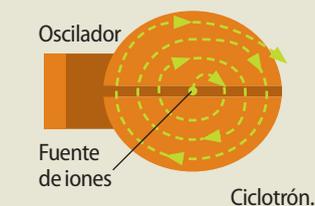
EL ESTUDIO DE LA ESTRUCTURA ÍNTIMA DE LA MATERIA, LA PRODUCCIÓN DE NUEVOS MATERIALES Y OTROS MUCHOS CAMPOS DE LA INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA DEPENDEN DE LA CAPACIDAD DE CONTAR CON PARTÍCULAS PEQUEÑAS QUE, VIAJANDO A GRAN VELOCIDAD, IMPACTAN A MODO DE VERDADEROS PROYECTILES SOBRE LA ESTRUCTURA QUE SE DESEA ESTUDIAR.

Las partículas cargadas pueden ser aceleradas por fuerzas eléctricas, cuya expresión es

$$\vec{F} = q \cdot \vec{E}$$

El método para acelerar cargas requería trabajar con diferencias de potencial muy altas, lo cual traía muchas dificultades experimentales. Por este motivo, en 1932, Ernest Lawrence puso por primera vez en funciones un acelerador de partículas llamado *ciclotrón*, con el que logró comunicar energías cinéticas muy altas a protones. Un ciclotrón requiere una fuente de iones, que provee las partículas cargadas que serán aceleradas por él. La aceleración en los protones se logra por la acción de una diferencia de potencial relativamente baja, de por ejemplo 10^5 V, pero que actúa en forma repetida gracias a la presencia de campos magnéticos que desvían la carga y la hacen atravesar el campo eléctrico una y otra vez.

El diseño esquemático de un ciclotrón es el que muestra la figura. Es indispensable que el acelerador se encuentre en un tanque de vacío, ya que de otra manera las partículas aceleradas chocarían con otras



presentes en el medio. Allí se ubican las llamadas *des* del acelerador. Estos objetos de cobre forman parte de un oscilador eléctrico que establece una diferencia de potencial a través del hueco entre las des. Este oscilador hace que el sentido de la diferencia de potencial cambie varios millones de veces por segundo. Las des se encuentran dentro de un campo magnético de alrededor de 1,6 T, producido por un potente electroimán, que debe considerarse saliente respecto del plano del dibujo. Para comprender el funcionamiento, puede suponerse que un protón sale de la fuente de iones y es acelerado hacia la des que tiene enfrente. Dentro de ella, a modo de jaula de Faraday, la estructura metálica la protege de la acción de campos eléctricos. El campo magnético que crea el electroimán provoca una desviación en su trayectoria, curvándola y haciéndola salir de la des a la que había ingresado. El radio de esta

trayectoria obedece a la ecuación:

$$r = \frac{m \cdot V}{q \cdot B}$$

donde m es la masa de la partícula, V su velocidad, q su carga y B el vector inducción magnética.

Al salir el protón de la placa de la primera des, es necesario que encuentre una inversión en la diferencia de potencial original entre las placas para que se acelere hacia la que tiene enfrente. Esta inversión la logra el oscilador. El radio de la trayectoria es proporcional a la velocidad de la partícula, por lo que en cada giro éste es mayor, aunque tarda lo mismo. El tiempo que tarda un ión en completar un giro cuando es desviado por un campo magnético tiene una expresión independiente de la velocidad:

$$T = \frac{2 \cdot \pi \cdot m}{q \cdot B}$$

La clave del funcionamiento del ciclotrón está en ajustar el oscilador a las características de cada partícula que se desea acelerar. De esta manera, cuando la partícula completa una cierta cantidad de ciclos, emerge del acelerador a altísimas velocidades.

Luego de la lectura del texto indiquen:

- ¿cuáles son las características de la partícula que resultan significativas para ajustar el oscilador de un ciclotrón?;
- busquen datos acerca de las velocidades que se logran con los actuales aceleradores de partículas y para qué disciplina científicas resultan útiles;
- ¿cuál estiman que es el tamaño que puede tener un acelerador de partículas? ¿Por qué?



IDEAS BÁSICAS DE LA UNIDAD

- Las **fuerzas eléctricas y magnéticas** constituyen una única interacción fundamental llamada **electromagnética**.
- La piedra magnetita y el planeta Tierra son imanes naturales.
- Los polos norte y sur de los imanes toman su nombre de la dirección geográfica a la que se orientan libremente en el campo magnético terrestre.
- No existen monopolos magnéticos.
- La **Ley de Faraday** indica que la fuerza electromotriz inducida es directamente proporcional a la rapidez con que varía el flujo magnético a través del circuito.
- Los **materiales ferromagnéticos** presentan en su estructura dominios magnéticos con una alineación particular de campo magnético.
- El campo magnético está caracterizado por dos vectores: \vec{B} , llamado **inducción magnética** y \vec{H} , llamado **intensidad de campo magnético**.
- Los **solenoides** y los **toroides** son conductores enrollados de tal manera que se potencia el efecto de inducción magnética. Pueden tener o no un núcleo ferromagnético.
- En un **motor eléctrico** se convierte energía eléctrica en mecánica, y en un **dinamo** o generador se convierte energía mecánica en eléctrica.
- Existen materiales que por sus propiedades magnéticas se denominan **paramagnéticos** y **diamagnéticos**.
- El **campo magnético terrestre** se explica por el efecto dinamo: corrientes de partículas de hierro cargadas en el interior ígneo del planeta. La magnetosfera constituye una protección frente a las partículas del viento solar.

Fórmulas

$$\vec{F} = q \vec{V} \times \vec{B}$$

Fuerza magnética

$$\vec{F} = i \cdot \vec{l} \times \vec{B}$$

Fuerza sobre un conductor en un campo magnético

$$B = \mu \cdot \frac{nI}{L}; \mu = \mu_0 \cdot \mu_r$$

Campo magnético en el interior de un solenoide

$$fem = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

Fuerza electromotriz inducida. Ley de Faraday

ACTIVIDADES DE INTEGRACIÓN

1. ¿En qué sentido podría afirmarse que el polo norte de un imán señala al polo sur de la Tierra?

2. ¿Por qué las brújulas necesitan haber sido magnetizadas para señalar al norte terrestre y en cambio las limaduras de hierro lo necesitan para señalar el norte de un imán?

3. ¿Existe fuerza magnética entre los polos de un imán?

4. ¿Por qué un imán puede atraer unos clips metálicos y no unos plásticos?

5. ¿Por qué la agitación térmica puede hacer perder las propiedades magnéticas a un imán?

6. ¿Siempre que una carga eléctrica ingresa a un campo magnético experimenta una desviación lateral?

7. ¿Qué es más conveniente para lograr el mayor efecto magnético en el interior de una bobina: apretar, o estirar las espiras?

8. Una carga eléctrica que experimenta una aceleración en la misma dirección y sentido de su velocidad, ¿ha recibido la acción de un campo eléctrico, o de uno magnético?

9. ¿Por qué es más difícil retirar un imán de dentro de una bobina cuando tiene muchas espiras que cuando tiene pocas?

10. ¿Por qué cuando se introduce un imán en una bobina la corriente circula en un sentido y, cuando se retira, en otro?

11. ¿Por qué un transformador solo funciona con corriente alterna?

12. ¿Sobre qué bases es posible afirmar que el campo magnético estuvo invertido en varias oportunidades en el pasado del planeta?

13. En cada uno de los siguientes casos indiquen qué sentido tiene la fuerza magnética. Recuerden que \otimes indica el campo hacia adentro de la hoja y \ominus indica el campo hacia afuera de la hoja.

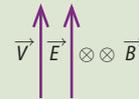
a. \vec{V} \longrightarrow $\ominus \ominus \ominus \vec{B}$

b. $\uparrow \vec{V}$ $\otimes \otimes \otimes \vec{B}$

c. $\otimes \vec{B}$ $\longrightarrow \vec{V}$

d. $\ominus \vec{B}$ $\longrightarrow \vec{V}$

14. ¿Cuánto vale la fuerza total que actúa sobre una partícula cargada positivamente que ingresa a una región del espacio en la cual existen un campo eléctrico y uno magnético con los valores que se indican en la figura? La masa de la partícula vale $9 \cdot 10^{-31}$ kg; su carga $-1,6 \cdot 10^{-19}$ C; $|\vec{E}| = 3$ N/C; $|\vec{B}| = 4 \cdot 10^{-2}$ T; $\vec{V} = 5 \cdot 10^4$ m/s.



15. ¿Cuánto valdrá el campo magnético en el interior de una bobina de 300 vueltas acomodadas de tal manera que el largo total es de 40 cm? La corriente que circula por ella es de 1,2 A y no se le coloca núcleo.

16. ¿Cuánto valdrá el campo en la bobina anterior si se le coloca un núcleo de un material cuya permeabilidad relativa es 1000?

17. Una bobina de 100 espiras cerradas de 4 cm de diámetro se mueve en relación a un campo magnético de tal manera que su flujo disminuye a razón de $4 \cdot 10^{-5}$ Wb cada 0,05 segundos. ¿Cuánto vale la fem inducida?

18. Una bobina formada por 10 espiras cuadradas de 10 cm de lado está ubicada de tal manera que un campo magnético de 0,2 T resulta perpendicular a ella. Gira en 0,1 segundo hasta ponerse paralela al campo, por lo que el flujo se hace cero. Calculen la fuerza electromotriz inducida durante el giro.

19. El flujo en una bobina de 400 vueltas que se mueve en un campo magnético cambia de $1,4 \cdot 10^{-2}$ weber a $0,4 \cdot 10^{-2}$ weber en 0,05 segundos. ¿Cuánto vale su fem inducida?

20. Se dispone de una bobina que se puede mover barriendo las líneas del campo magnético terrestre. ¿Cuáles serían las condiciones experimentales para lograr que un amperímetro conectado a la bobina registre alguna lectura?

21. ¿Cómo cambia la fem inducida por la bobina del ejercicio 20. si se aumenta al doble la velocidad con que gira la bobina?

22. Se desea transformar la tensión de 220 V de la red domiciliaria a 110 V requerida por un aparato. ¿Cómo sería la relación entre el número de vueltas de la bobina de entrada y de salida en el transformador que habría que utilizar para que el aparato funcionara adecuadamente?

AUTOEVALUACIÓN

Determinen si las siguientes afirmaciones son verdaderas (V) o falsas (F). Justifiquen en cada caso.

- 1 Los únicos imanes naturales son la magnetita y el planeta Tierra.
- 2 Una corriente eléctrica puede ser inducida por un imán en movimiento.
- 3 La fuerza eléctrica y la fuerza magnética provienen del mismo tipo de interacción.
- 4 No es posible aislar un polo magnético.
- 5 Un imán puede perder sus propiedades magnéticas si se lo calienta demasiado.
- 6 Un imán puede atraer un trozo de hierro solo si éste está magnetizado.
- 7 Según la trayectoria en la que se desvía una partícula en un campo magnético, es posible conocer el signo de su carga.
- 8 Las líneas de fuerza del campo magnético sostenido por un imán apuntan hacia el sur fuera del imán y hacia el norte dentro del imán.
- 9 Mediante un espectro magnético, es posible ubicar los polos de un imán.
- 10 Si una carga tiene una velocidad paralela al campo \vec{B} en el que se mueve, no se desvía.
- 11 Entre dos cables por los que circula corriente puede haber atracción o repulsión.
- 12 Como la Tierra es grande, su campo magnético tiene un valor muy alto.
- 13 Es posible desviar un haz de electrones mediante un campo magnético.
- 14 Un electroimán es una clase de material magnético.
- 15 No existen muchos materiales paramagnéticos.
- 16 La corriente eléctrica inducida en una bobina tiene el mismo sentido tanto cuando se introduce en ella un imán como cuando se lo retira.
- 17 La fuerza electromotriz inducida depende de la rapidez con que cambia el flujo magnético.
- 18 Una brújula siempre se alinea con un cable por el que circula corriente.
- 19 Una bobina no genera campo magnético si no tiene un núcleo ferromagnético.
- 20 Las manchas solares tienen relación con turbulencias en el campo magnético solar.