

7. CAMPO MAGNÉTICO.

Desarrollamos la unidad de acuerdo con el siguiente hilo conductor:

1. *¿Qué relación existe entre los fenómenos eléctricos y los fenómenos magnéticos? Las fuentes del magnetismo.*
 - 1.1. *El magnetismo de los imanes. Campo magnético creado por una barra imán.*
 - 1.2. *La experiencia de Oersted. Campo magnético creado por una corriente eléctrica rectilínea.*
 - 1.3. *Campo magnético creado por una corriente eléctrica circular. Espiras, solenoides y electroimanes.*
 - 1.4. *Explicación del magnetismo natural. Comportamiento de los materiales bajo la acción de un campo magnético.*
 - 1.5. *¿Por qué no es conservativo el campo magnético? Ley de Ampère.*
 - 1.6. *Campo magnético creado por una carga eléctrica en movimiento.*
 2. *¿Cómo se explica la interacción entre cargas eléctricas en movimiento?*
 - 2.1. *Fuerza magnética sobre una carga móvil. Fuerza de Lorentz*
 - 2.1.1. *Movimiento de partículas cargadas dentro de un campo magnético uniforme.*
 - 2.2. *Fuerza magnética sobre una corriente eléctrica. Ley de Laplace.*
 - 2.2.1. *Fuerza entre corrientes eléctricas rectilíneas paralelas. Definición de amperio.*
 - 2.2.2. *Fuerza sobre una espira de corriente.*
- APÉNDICE: El campo magnético terrestre.

1. ¿QUÉ RELACIÓN EXISTE ENTRE LOS FENÓMENOS ELÉCTRICOS Y LOS FENÓMENOS MAGNÉTICOS? LAS FUENTES DEL MAGNETISMO.

1.1. EL MAGNETISMO DE LOS IMANES. CAMPO MAGNÉTICO CREADO POR UNA BARRA IMÁN.

Los primeros fenómenos magnéticos de los que se tiene noticia se sitúan en la antigua Grecia, hace más de 2.500 años, y están relacionados con la propiedad del mineral magnetita (Fe_3O_4), “la piedra imán”, de atraer a pequeños trozos de hierro y de transferir al hierro sus propiedades atractivas.

No obstante, fueron los chinos quienes, hacia el siglo X, utilizaron las primeras brújulas para orientarse en la dirección Norte-Sur; consistían en un recipiente lleno de agua en el que flotaba un trozo de madera o corcho portando una aguja de magnetita (*figura 1*) o un simple hilo del que colgaba la aguja de magnetita. Los árabes introdujeron el uso de la brújula en Europa occidental y en el siglo XIII era de uso común entre navegantes. Llamaron polo norte de la brújula al extremo de la aguja que apunta al Norte geográfico (sur magnético, ver apéndice 1).

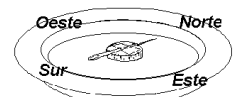


Figura 1

El primer estudio sistemático de los fenómenos eléctricos y magnéticos lo realizó el médico inglés William Gilbert (1544-1603) que diferenció los dos tipos de fenómenos y consideró que la Tierra actuaba como un potente imán esférico. Experimentando con barras imán se observó que el efecto magnético es más intenso en los extremos, llamados polos norte y polo sur en analogía a la aguja imantada de la brújula. Al acercar dos barras imán se observa que se repelen si se enfrentan polos del mismo nombre y que se atraen si se acercan polos de distinto nombre (*figura 2*).

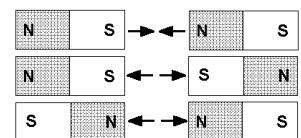


Figura 2

El inglés John Michell (1724-1793) demostró que la fuerza de interacción entre dos imanes es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia. Esto indujo a Charles A. De Coulomb (1736-1806) a extender su ley de la interacción electrostática a la interacción entre imanes, asignando a la materia una nueva propiedad llamada polo magnético.

El comportamiento de los polos magnéticos se parece al de las cargas eléctricas en ciertos aspectos, pero existe una diferencia de suma importancia. Podemos tener cargas eléctricas aisladas, pero no polos magnéticos aislados. Los electrones y los protones son entidades por sí mismos; un cúmulo de electrones no precisa estar acompañado de un cúmulo de protones. Sin embargo, un polo norte magnético no puede existir sin un polo sur; el polo norte y el polo sur de un imán son como las dos caras de una misma moneda; constituyen un dipolo magnético (*figura 3*).



Cada vez que se rompe un imán, aparecen polos norte y sur en cada uno de los trozos. Incluso cuando los polos tienen un espesor de un átomo siguen teniendo dos polos; esto sugiere que los propios átomos son imanes.

Figura 3

Como se hizo en gravitación y electricidad, se considera que el espacio que rodea un imán ha sufrido una deformación a la que llamamos **campo magnético**. Este campo magnético se pone de manifiesto por el efecto orientador sobre una aguja imantada. Las líneas de campo magnético son en cada punto tangentes a las agujas

imantadas orientadas y pueden visualizarse con ayuda de limaduras de hierro distribuidas alrededor de un imán (figura 4). Muchas características del campo magnético se deducen a partir de estas representaciones gráficas.

Fuera de la barra imán el campo está dirigido del polo norte al polo sur. De la misma manera que en el campo electrostático, podemos considerar la proximidad entre las líneas de campo como una medida de la intensidad del campo magnético: en las zonas en las que las líneas del campo están próximas, el campo magnético es más intenso que en las zonas en las que las líneas de campo están separadas. A lo largo de una dirección, si las líneas de campo divergen, significa que el campo se debilita y si convergen, ocurre lo contrario.

Una de las diferencias fundamentales que existe entre el campo eléctrico y el campo magnético es que las líneas de campo magnético siempre son cerradas. Podemos considerar que las líneas de campo eléctrico creadas por una carga se abren hasta el infinito; sin embargo, en el campo magnético no puede producirse esta situación debido a que un polo norte no existe separado de un polo sur (siempre tenemos un dipolo magnético).

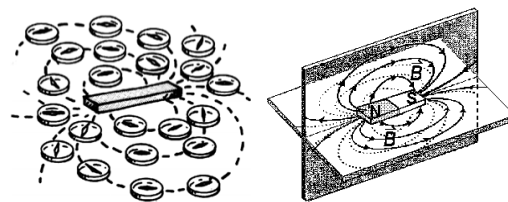
1.2. LA EXPERIENCIA DE OERSTED. CAMPO MAGNÉTICO CREADO POR UNA CORRIENTE ELÉCTRICA RECTILÍNEA.

A pesar de las similitudes existentes entre los fenómenos electrostáticos (interacción entre cargas estáticas) y los magnetostáticos (interacción entre imanes estáticos), fueron considerados realidades completamente independientes, al no detectarse conexión entre cargas eléctricas e imanes. La conexión entre magnetismo y electricidad tuvo que esperar a que fuera posible mantener corrientes eléctricas. Entonces, hacia 1820, el físico danés Hans Cristian Oersted puso de manifiesto que una corriente eléctrica era capaz de desviar una aguja imantada y, por tanto, inducía o creaba un campo magnético (figura 5). Quedó claro que si antes no se había detectado relación entre electricidad y magnetismo era porque siempre se había trabajado con cargas estáticas.

Para estudiar el campo magnético creado por un hilo conductor rectilíneo podemos colocar a su alrededor un gran número de agujas imantadas que nos indiquen en cada punto la dirección del campo magnético. Se comprueba que a una distancia del conductor pequeña respecto a su longitud, existe un patrón de líneas de campo consistente en circunferencias centradas en el conductor, contenidas en planos perpendiculares al mismo (figura 6). Cuando el sentido de la corriente se invierte, las agujas dan media vuelta, mostrando que el sentido del campo magnético también se invierte. Para determinar cual es el sentido de las líneas de campo a partir del sentido de la corriente se utiliza la regla de Maxwell, regla de la mano derecha o de avance de un tornillo en su giro: cogiendo el hilo conductor con la mano derecha y extendiendo el dedo pulgar en el sentido de circulación de la corriente, el sentido de los demás dedos es el que nos indica el sentido de las líneas de campo.

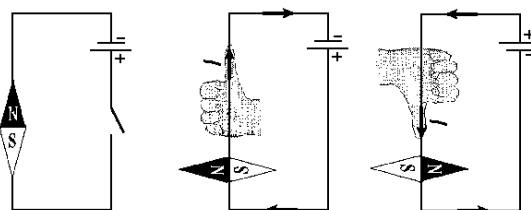
La dirección del campo magnético creado por una corriente rectilínea es tangente a la línea de campo en el punto considerado y su sentido el de la línea de campo. En cuanto al módulo, es lógico pensar que en su valor influirán tres factores: la intensidad de la corriente I que circula por el conductor (unidad SI: amperio (A)), la distancia r al conductor desde el punto considerado, y el medio en que realizamos la experiencia. La dependencia concreta del módulo de \vec{B} queda establecida por la ley de Biot y Savart: $B = \frac{\mu}{2\pi} \frac{I}{r}$, donde el término $\mu/2\pi$ da cuenta de la influencia del medio, recibiendo μ el nombre de permeabilidad magnética (en el vacío toma el valor: $\mu_0=4\pi \cdot 10^{-7} \text{ TmA}^{-1}$, en medios materiales puede tomar valores mayores, menores o iguales al del vacío; su valor va a determinar el comportamiento diferenciado de los materiales frente a campos magnéticos externos (ver apartado 1.4 de esta unidad)).

Una consecuencia de lo aquí comentado es la necesidad de procurar que los tendidos eléctricos estén alejados de los núcleos poblados, para prevenir posibles efectos sobre la salud de los campos magnéticos.



El campo magnético se representa mediante el vector \vec{B} que en cada punto es tangente a la línea de campo. La definición de \vec{B} , así como de su unidad SI, tesla (T), se introduce más adelante, al estudiar la fuerza magnética.

Figura 4



Por cuestiones históricas, el sentido convencional de la corriente eléctrica es el que seguiría una carga positiva.

Oersted colocó una brújula bajo un hilo conductor horizontal alineado con la dirección norte-sur de la brújula (dirección del magnetismo terrestre). Si por el hilo conductor no circula corriente eléctrica, la aguja indica su habitual dirección norte. Al hacer pasar una corriente continua por el hilo conductor, la aguja deja de apuntar al norte y se desvía en la dirección este-oeste (¡perpendicular al hilo!), de forma análoga a como lo haría en presencia de un imán natural. Si la corriente continua circula en sentido opuesto o si se coloca la brújula sobre el hilo conductor, la desviación tiene lugar en sentido contrario.

Figura 5

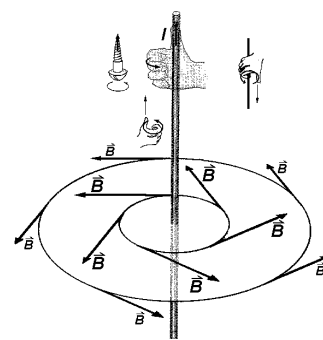


Figura 6

DATOS E INDICACIONES ÚTILES DE CARA A LA RESOLUCIÓN DE ACTIVIDADES		
Carga eléctrica elemental (e)	$1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C}$	Con una flecha aplicada a la carga se indica el movimiento de la carga positiva o negativa. El campo magnético \vec{B} se representa con una flecha cuando se dirige en el plano del papel, con \otimes cuando está dirigido hacia dentro del papel, y con \odot cuando se dirige hacia fuera.
Masa del electrón en reposo (me)	$9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$	
Masa del protón en reposo (mp)	$1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$	
Unidad de masa atómica (u)	$1/N_A = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$	
Permeabilidad magnética del vacío (μ_0)	$4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N/A}^2$	

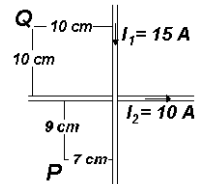
A.1. Resuelve las siguientes actividades:

A.1.1. Se tiene una aguja imantada en el campo magnético terrestre. Indica cómo se debe colocar un conductor rectilíneo e indefinido para que, al hacer pasar una corriente por él, la aguja no se desvíe. ¿Y para que la desviación sea máxima? Razona la respuesta.

A.1.2. Calcula el campo magnético creado por un conductor rectilíneo por el que circula una corriente de 4 A en todos los puntos que distan de él 20 cm. Dibuja las líneas de campo y el vector campo en esos puntos.

A.1.3. Dados los conductores de la figura, determina el campo magnético en los puntos P y Q.

A.1.4. Dos conductores rectos y paralelos, A y B, situados en el plano del suelo, distan entre sí 20 cm y están recorridos en el mismo sentido vertical y hacia arriba por sendas corrientes de 10 A y 15 A, respectivamente. Halla el campo magnético en los puntos P₁ (a 5 cm de A y 15 cm de B) y P₂ (a 10 cm de A y 10 cm de B). ¿A qué distancia de los conductores se anula el campo magnético?



1.3. CAMPO MAGNÉTICO CREADO POR UNA CORRIENTE ELÉCTRICA CIRCULAR. ESPIRAS, SOLENOIDES Y ELECTROIMANES.

Ahora podemos entender que los polos magnéticos no juegan en el campo magnético el mismo papel que desempeñan las cargas eléctricas en el campo eléctrico. Un campo eléctrico sólo puede estar producido por cargas eléctricas: la carga eléctrica es la única fuente del campo eléctrico. Por el contrario, los polos magnéticos de un imán no son la única fuente del campo magnético. Un campo magnético también puede estar producido por una corriente eléctrica, es decir, por cargas eléctricas en movimiento.

Con objeto de aumentar la intensidad del campo magnético creado por una corriente en un punto, sin tener que incrementar la intensidad de la corriente, se puede arrollar el conductor alrededor de dicho punto confiriéndole forma de espira (figura 7). De esta forma conseguimos que las líneas de campo se apiñen en el interior de la espira mientras se dispersan fuera de ellas. Así concentramos el campo magnético creado por la corriente en una región determinada. El aumento de la intensidad de campo que se consigue con una espira viene dado por un factor π , de manera que en el centro de una espira el valor del campo magnético es:

$$B = \frac{\mu I}{2 r}$$

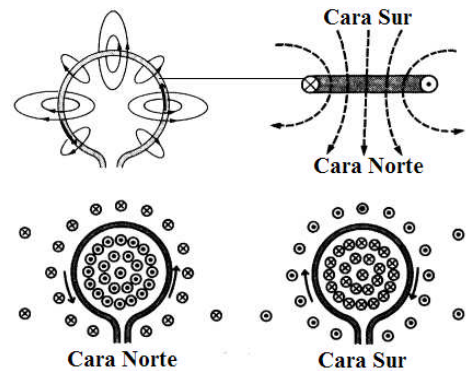
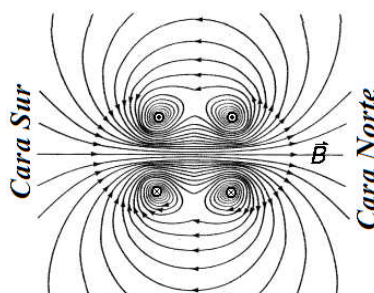


Figura 7

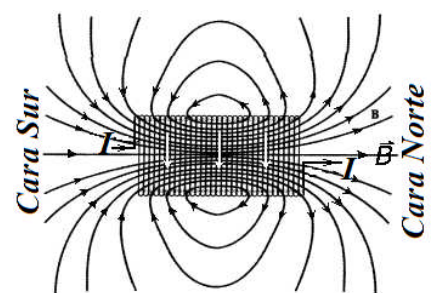
El valor del campo magnético en una zona puede hacerse todavía mayor si arrollamos el conductor en forma de hélice apretada. Este dispositivo funciona como una asociación de muchas espiras, y se conoce con el nombre de solenoides o bobina. Para entender cual es el resultado global observa el diagrama de líneas del campo magnético originado por dos espiras

(figura 8): los campos creados por cada una de las espiras en el interior de las mismas se refuerzan y dan como consecuencia unas líneas de campo prácticamente paralelas y equidistantes; entre las espiras, el campo es casi nulo y fuera de ellas el campo es mucho más débil que en el interior. La asociación de muchas espiras origina un campo magnético muy similar al de un imán de barra (figura 9): las líneas de campo magnético son perpendiculares a las espiras y su sentido es el del avance de un tornillo que gira siguiendo el sentido de la intensidad de corriente. Se habla de una “cara norte” y de una “cara sur” de la espira o de la bobina, por donde salen o por donde entran, respectivamente, las líneas de campo.



Líneas del campo magnético creado por dos espiras en un plano que las corta perpendicularmente por su centro.

Figura 8



Líneas del campo magnético creado por un solenoide en un plano que lo corta perpendicularmente por su centro.

Figura 9

La intensidad del **campo magnético en el interior del solenoide** se puede considerar constante; su valor viene dado por la expresión:

$$B = \mu \cdot I \cdot \frac{N}{L}$$

siendo N el número de espiras y L la longitud de la bobina.

Esta fórmula nos permite entender que una manera de aumentar el valor del campo magnético en el interior de un solenoide es introducir un material cuya permeabilidad magnética sea grande (una pieza de hierro u otro material ferromagnético, ver apartado 5 de esta unidad). Es este el diseño básico de lo que se conoce como **electroimán** (figura 10). Al aproximar dos electroimanes o un electroimán y una barra imán, según las caras que se aproximen o la cara y el polo que acerquemos, se manifestará entre ellos atracción o repulsión.

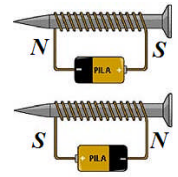


Figura 10

Los electroimanes son ampliamente utilizados en la industria: en grúas, para levantar vigas de hierro, viruta o chatarra; en frenos y embragues electromagnéticos; en motores, relés y contactores, como el timbre eléctrico; etc. En investigación científica (aceleradores de partículas, dispositivos de resonancia magnética nuclear, levitación magnética,...) se emplean electroimanes muy poderosos; usan bobinas superconductoras sin núcleo de hierro a través de las cuales fluye con facilidad una corriente eléctrica muy grande y con pocas pérdidas de calor.

A.2. Resuelve las siguientes actividades:

A.2.1. Una bobina circular consta de 600 vueltas de un hilo conductor fino enrolladas uniformemente sobre un cilindro hueco de 30 cm de longitud. a) Si por el bobinado circula una corriente de 2 A, calcula el campo magnético en el interior del electroimán. b) Si introducimos en el cilindro de la bobina un núcleo de hierro ($\mu_{Fe}=2\pi \cdot 10^{-4}$ N/A²), ¿cuál es ahora el valor del campo magnético en el interior del electroimán?

A.2.2. Una bobina de 530 vueltas tiene una longitud de 20 cm y en su interior hay un núcleo de hierro ($\mu_{Fe}=2\pi \cdot 10^{-4}$ N/A²). Este electroimán se conecta a una fuente de corriente continua que le aplica una diferencia de potencial de 10 V. Sabiendo que la resistencia de la bobina es de 50 Ω , calcula la intensidad de campo magnético en el interior del electroimán. (Recuerda la ley de Ohm: $I = \Delta V / R$).

A.2.3. El polo sur de un imán se acerca a un solenoide por el que circula una corriente continua. Si la cara de la bobina que está enfrente del imán es aquella por la que la corriente circula en sentido horario, el imán y la bobina, ¿se atraen o se repelen? Razona tu respuesta.

1.4. EXPLICACIÓN DEL MAGNETISMO NATURAL. COMPORTAMIENTO DE LOS MATERIALES BAJO LA ACCIÓN DE UN CAMPO MAGNÉTICO.

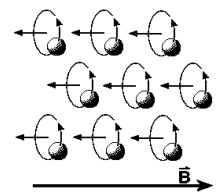
Desde el principio, la imposibilidad de separar el polo norte y el polo sur de un imán indujo a considerar que la base del magnetismo natural estaba en los constituyentes elementales de la materia: los átomos. Nuestros conocimientos actuales sobre estructura atómica no sólo han confirmado plenamente esta hipótesis de partida, sino que la han extendido a las propias partículas constituyentes de los átomos.

Hoy sabemos que el magnetismo es una propiedad intrínseca de la materia debida básicamente a dos contribuciones: la orbital, asociada a cómo se encuentra girando el electrón en torno al núcleo atómico, y la del propio electrón, asociada a su espín, a su capacidad de generar campo magnético por si mismo. En general el campo magnético creado por los electrones predomina sobre el asociado a sus orbitales.

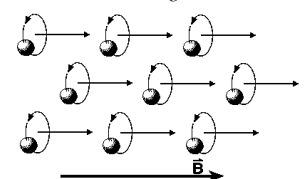
El movimiento orbital y de espín de los electrones les hace actuar como pequeñas corrientes circulares que generan campos magnéticos elementales, al modo de imanes o dipolos magnéticos. La suma vectorial de todos los dipolos magnéticos correspondientes a los electrones de una partícula (átomo, molécula o ión) constituye el dipolo magnético resultante para dicha partícula. Las partículas con electrones apareados (la inmensa mayoría) anulan sus dipolos magnéticos dando un dipolo magnético resultante nulo; las que presentan electrones desapareados (como sucede con los átomos de hierro, níquel o cobalto) manifiestan su carácter de imán elemental.

A pesar de esto, en ausencia de campo magnético exterior, la inmensa mayoría de los materiales no presentan propiedades magnéticas. Incluso aquellos materiales constituidos por partículas con dipolo magnético resultante no nulo, no manifiestan magnetismo al compensarse estos dipolos elementales por su orientación aleatoria, al azar.

Ahora bien, en presencia de campo magnético externo todo material experimenta el fenómeno de distorsión del movimiento electrónico: consiste en la aparición de un débil dipolo magnético opuesto al campo exterior en cada una de sus partículas (figura 11). Se explica en base a la *ley de Lenz* que estudiamos en la unidad siguiente. Todos los materiales terrestres se hallan sometidos al campo magnético de la Tierra, luego experimentan este fenómeno.

Distorsión del movimiento electrónico
Figura 11

Los materiales constituidos por partículas con dipolo magnético neto experimentan en presencia de campo externo, además del efecto anterior, la magnetización por alineación de sus dipolos con el campo exterior (figura 12). Este efecto es reducido por el efecto de distorsión anterior, pero en general es más intenso que aquél.

Magnetización por alineación
Figura 12

La existencia de estos dos efectos permite clasificar a los materiales por su comportamiento frente a campos magnéticos externos en tres tipos diferentes, que se caracterizan por su valor de permeabilidad magnética:

- **Materiales diamagnéticos.** Presentan magnetización sólo por efecto de distorsión del movimiento electrónico de sus partículas (figura 13.a). En ausencia de campo externo no manifiestan propiedad magnética alguna; en la cercanía de un campo externo intenso tienden a desplazarse hacia las zonas de menor intensidad (es decir, son repelidos ligeramente por los imanes). Poseen una permeabilidad magnética ligeramente inferior a la del vacío ($\mu < \mu_0$).

Constituyen la mayor parte de los compuestos químicos (H_2O , SiO_2 , $NaCl$, sustancias orgánicas,...) y sustancias elementales (H_2 , N_2 , S_8 , C , Bi , Cu , Pb , Hg , Au , Ag ,...).

- **Materiales paramagnéticos.** Presentan magnetización por alineación, efecto que supera ligeramente a la distorsión del movimiento electrónico (figura 13.b). En ausencia de campo externo no manifiestan propiedad magnética alguna; en la cercanía de un campo externo intenso tienden a desplazarse hacia las zonas de mayor intensidad (o sea, son atraídos ligeramente por los imanes).

Poseen una permeabilidad magnética ligeramente superior a la del vacío ($\mu > \mu_0$).

Pertenecen a este tipo O_2 , Sn , Al , Na , Pt , Ca , U , Cr , Mg ,...

El paramagnetismo aumenta al descender la temperatura, pues disminuye la agitación térmica y la alineación de los dipolos se realiza más fácilmente.

- **Materiales ferromagnéticos.** La magnetización por alineación es muy superior al efecto de distorsión electrónica en estos materiales (figura 13.c). Pueden presentar magnetización incluso

en ausencia de campo magnético externo; son atraídos muy intensamente por los imanes.

Poseen una permeabilidad magnética excepcionalmente alta ($\mu \gg \mu_0$).

A temperatura ambiente, son paramagnéticos Fe , Co , Ni , Gd , Dy , aleaciones de estos elementos, CrO_2 ,...

Las partículas de los materiales ferromagnéticos interactúan alineándose unas con otras, y dan lugar a agrupaciones cuyos campos magnéticos se potencian entre sí; estos cúmulos de partículas alineadas se llaman dominios magnéticos (figura 14). Cada dominio está completamente magnetizado y lo constituyen miles de millones de partículas alineadas. Los dominios tienen dimensiones microscópicas y hay un gran número de ellos en cualquier porción de material. En un material ferromagnético no imantado los dominios se encuentran orientados al azar, pero en presencia de un campo magnético exterior los dominios se orientan en la dirección y sentido del campo (bien por desplazamiento de los límites de los dominios o bien por una adecuada rotación). Al cesar el campo exterior, la imantación puede ser inestable y perderse rápidamente (magnetismo temporal, como ocurre con el hierro) o persistir en el tiempo (magnetismo permanente, como ocurre con el acero).

Por encima de una cierta temperatura crítica (punto de Curie), la agitación térmica desalinea los dominios que presentan los materiales ferromagnéticos y pasan a comportarse como paramagnéticos.

Los imanes permanentes y el proceso de imantación están presentes en numerosos dispositivos cotidianos tales como altavoces, micrófonos y en los sistemas de grabación y de lectura en cinta y en los discos de ordenador.

Se observa que el medio material influye en la intensidad de los campos eléctricos y magnéticos. Pero se observa una diferencia importante: respecto al vacío, el medio material siempre supone una disminución de la intensidad del campo eléctrico; sin embargo, respecto al vacío, puede disminuir, dejar igual o aumentar la intensidad de campo magnético.

A.3. Si es cierto que toda la materia posee diamagnetismo, ¿cómo se explica que algunos materiales sean paramagnéticos o ferromagnéticos? ¿Qué diferencias fundamentales existen entre los materiales paramagnéticos y los ferromagnéticos? ¿Cómo son afectados por la temperatura?

1.5. ¿POR QUÉ NO ES CONSERVATIVO EL CAMPO MAGNÉTICO? LEY DE AMPÈRE.

El campo gravitatorio y el campo eléctrico son campos conservativos ya que el trabajo realizado por la fuerza (gravitatoria o electrostática) es función de la posición inicial y final e independiente de la trayectoria seguida entre las dos posiciones. Es decir, que el trabajo realizado a lo largo de una trayectoria cerrada es nulo:

$$W_{\text{tray. cerrada}} = \oint \vec{F}_{\text{cons}} \cdot d\vec{r} = 0 J \cdot$$

Dado que $\vec{F}_g = m\vec{g}$ y que $\vec{F}_e = q\vec{E}$, la condición necesaria y suficiente para que un campo sea conservativo es que su circulación a lo largo de una trayectoria cerrada cualquiera sea nula: $\oint \vec{g} \cdot d\vec{r} = \oint \vec{E} \cdot d\vec{r} = 0$. También es cierto lo contrario: Si se determina que la circulación de un campo de fuerzas a lo largo de una trayectoria cerrada arbitraria es distinta de cero, se puede concluir que el campo de fuerzas no es conservativo.

Para comprobar si el campo magnético es conservativo se calcula la circulación del campo magnético \vec{B} creado por una corriente eléctrica rectilínea a lo largo de una trayectoria circular de radio r , centrada en el

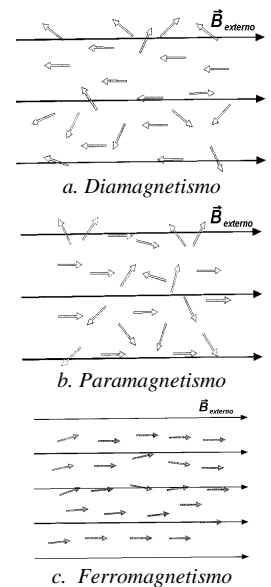


Figura 13

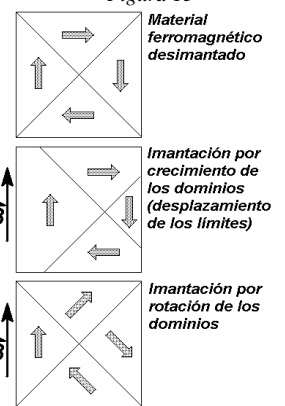


Figura 14

conductor (la distancia recorrida será $L=2\pi r$, revisar figura 6). \vec{B} en un punto cualquiera de la trayectoria circular tiene calor constante ($\frac{\mu \cdot I}{2\pi r}$) y es tangente a la línea de campo que pasa por dicho punto, es decir, posee la misma

dirección y sentido que el desplazamiento en todo el recorrido, con lo que: $\oint \vec{B} \cdot d\vec{r} = B \cdot L = \frac{\mu \cdot I}{2\pi r} \cdot 2\pi r = \mu \cdot I$. El

resultado es distinto de cero e independiente de la trayectoria circular que se considere: sólo depende de la intensidad de corriente I que genera el campo y de la permeabilidad magnética del medio en el que nos encontremos. Por consiguiente, el campo magnético no es conservativo.

La expresión $\oint \vec{B} \cdot d\vec{r} = \mu \cdot I$ es general para cualquier campo magnético creado por corrientes que sean constantes en el tiempo y para cualquier trayectoria arbitraria cerrada. Se conoce como **ley de Ampère** y **nos permite concluir que el campo magnético no es conservativo**, luego no podemos definir una magnitud escalar asociada al campo, no podemos definir una energía potencial magnética. Además, la ley de Ampère es útil para el cálculo del módulo del campo magnético en distribuciones de corriente con claras simetrías.

A.4. Considera el campo magnético creado por un cable coaxial, es decir, formado por un hilo central y una corona circular que lo rodea, por donde circulan corrientes iguales y en sentidos opuestos. Si consideramos una circunferencia de radio comprendido entre el hilo central y la corona circular, ¿cuál es el valor del campo magnético? ¿Y si consideras una circunferencia de radio mayor al de la corona circular? ¿Qué consecuencia podemos sacar de esta actividad?

1.6. CAMPO MAGNÉTICO CREADO POR UNA CARGA ELÉCTRICA EN MOVIMIENTO.

En la medida que una corriente eléctrica la podemos concebir como un flujo de cargas, debemos admitir que toda carga eléctrica en movimiento genera un campo magnético \vec{B} . Se comprueba que las líneas del campo magnético generado por una carga eléctrica q , que se mueve con una velocidad \vec{v} (figura 15), son circunferencias perpendiculares al vector \vec{v} y con centro sobre la dirección de la velocidad; su sentido es el indicado por la regla de Maxwell o regla de la mano derecha, que coincide con el giro de un tornillo que avanza según el vector \vec{v} ; su módulo viene dado por la expresión: $B = \frac{\mu}{4\pi} \frac{q \cdot v \cdot \text{sen}\theta}{r^2}$, de donde se deduce la disminución de la intensidad de la interacción con el cuadrado de la distancia. Vectorialmente: $\vec{B} = \frac{\mu}{4\pi} \frac{q \cdot (\vec{v} \wedge \vec{u}_r)}{r^2}$

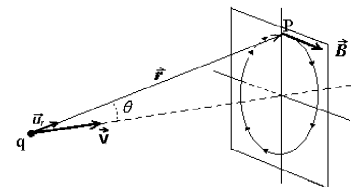


Figura 15

Observa que el campo magnético creado por una carga en un punto es nulo si no existe movimiento relativo entre la carga y el punto considerado ($v=0$), si el punto está contenido en la dirección de movimiento de la carga ($\text{sen } \theta=0$), o si el punto puede considerarse infinitamente alejado de la carga.

El campo magnético, al igual que el gravitatorio o el eléctrico, cumple el principio de superposición, por lo que el campo magnético generado en un punto por varias cargas móviles es igual a la suma vectorial de los campos magnéticos creados por cada una de ellas.

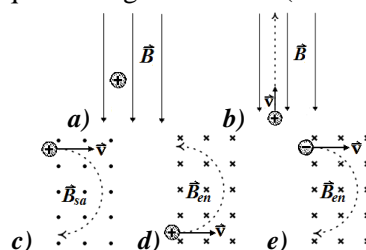
2. ¿CÓMO SE EXPLICA LA INTERACCIÓN ENTRE CARGAS ELÉCTRICAS EN MOVIMIENTO?

En todas las interacciones que conocemos los agentes que crean el campo sufren su acción. En la interacción gravitatoria el campo está creado por la masa y es la masa la que sufre la acción de la gravedad. La carga eléctrica es la fuente del campo eléctrico y soporta la acción del mismo. Por lo que respecta al magnetismo, de forma similar a como los imanes crean campo magnético y padecen sus efectos, las cargas eléctricas individuales o las corrientes eléctricas originan campo magnético y sufren su acción.

Dada la complejidad de la interacción entre cargas en movimiento (o corrientes) y campos magnéticos, sólo vamos a abordar esta cuestión en el caso que la carga se mueva (o la corriente eléctrica se encuentre) en el seno de un campo magnético constante.

2.1. FUERZA MAGNÉTICA SOBRE UNA CARGA MÓVIL. FUERZA DE LORENTZ.

Al colocar una partícula con carga eléctrica q en una región del espacio donde existe un campo magnético \vec{B} , se observan las situaciones recogidas en la figura 16. Por



Una carga eléctrica en reposo (a) o que se mueve en la dirección del campo (en el mismo sentido o en sentido opuesto, b) no es afectada por el campo magnético.

Una carga eléctrica que penetra perpendicularmente al campo experimenta un movimiento circular uniforme dentro del mismo, cambiando el sentido del movimiento si cambia el sentido del campo (c y d) o si cambia el signo de la carga (d y e).

Figura 16

tanto, se comprueba experimentalmente que:

- La fuerza magnética sobre la carga es nula si dicha carga está en reposo o si se mueve en la dirección del campo magnético \vec{B} .
- La fuerza magnética \vec{F} es perpendicular al plano determinado por la dirección de la velocidad \vec{v} y del campo \vec{B} (figura 17). Su sentido, si la carga es positiva, viene dado por la regla de Maxwell o regla de la mano derecha, que coincide con el avance de un tornillo al girar \vec{v} hacia \vec{B} por el camino más corto; si la carga es negativa, su sentido se invierte. Su módulo es directamente proporcional al valor de q , de v y B , pero depende también del seno del ángulo θ formado por las direcciones de \vec{v} y \vec{B} .

Estos resultados experimentales nos llevan a concluir que:

Cuando una carga eléctrica q se mueve con una velocidad \vec{v} en un campo magnético \vec{B} , el vector fuerza magnética \vec{F} que actúa sobre la carga, conocido como fuerza magnética o fuerza de Lorentz ¹, viene dado por: $\vec{F} = q \cdot (\vec{v} \wedge \vec{B})$. En módulo: $F = |q| \cdot v \cdot B \cdot \text{sen}\theta$

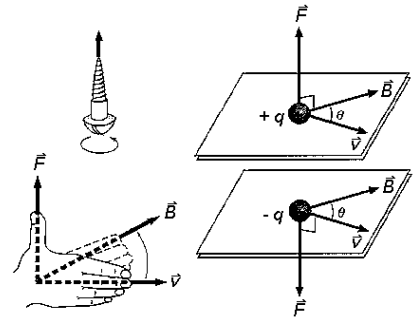


Figura 17

Observa que a diferencia de lo que ocurría en los campos gravitatorio y eléctrico, el vector fuerza magnética no es paralelo o antiparalelo al vector campo; es perpendicular; por tanto, las líneas de campo magnético no son líneas de fuerza.

Para el caso de una carga eléctrica q que entra con velocidad \vec{v} en dirección perpendicular al campo magnético \vec{B} , el módulo de la fuerza magnética queda: $F = q \cdot v \cdot B$, expresión similar a las empleadas para calcular el módulo de la fuerza gravitatoria ($F = m \cdot g$) o eléctrica ($F = q \cdot E$) y denota que, en el caso del campo magnético, el agente activo es la carga en movimiento.

Despejando el valor del campo en la expresión de la fuerza de Lorentz se deduce que la unidad de campo magnético en el SI, **tesla** ($T = \frac{N \cdot s}{C \cdot m} = \frac{N}{A \cdot m}$). Un tesla representa el campo magnético que actúa en un punto del

espacio cuando una carga de 1 C, que se mueve perpendicularmente al campo con una velocidad de 1 m/s, experimenta una fuerza de 1 N. Es una unidad bastante grande (cuadro 1); por ello, a veces se utiliza una unidad denominada **gauss** (G), cuya relación con tesla es la siguiente: $1 \text{ G} = 10^{-4} \text{ T}$. Campos magnéticos superiores a 10 T son muy difíciles de producir, pues las fuerzas magnéticas resultantes romperían los imanes en pedazos o los aplastarían.

Cuadro 1. Campos magnéticos en la naturaleza (T)	
En una sala blindada magnéticamente	10^{-14}
Interior del cerebro humano (debido a impulsos nerviosos)	10^{-13}
En el espacio interestelar	10^{-10}
Campo magnético terrestre	10^{-5} (0,1 G)
Imán de barra	10^{-2}
Imanes potentes	0,1 - 0,5
Grandes electroimanes industriales	1 - 2
Imanes superconductores	5

Si una partícula cargada se mueve en una región en la que actúan un campo eléctrico \vec{E} y otro magnético \vec{B} , estará sometida a dos fuerzas que, en virtud del principio de superposición, podemos suponer que actúan independientemente. De ese modo, actuará sobre ella una fuerza total: $\vec{F} = \vec{F}_{\text{eléctrica}} + \vec{F}_{\text{magnética}} = q \cdot (\vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{B})$, fuerza conocida como **fuerza de Lorentz generalizada**.

A.5. Resuelve las siguientes actividades:

A.5.1. Dar la dirección y el sentido de la fuerza magnética en cada uno de los casos representados en la figura adjunta.

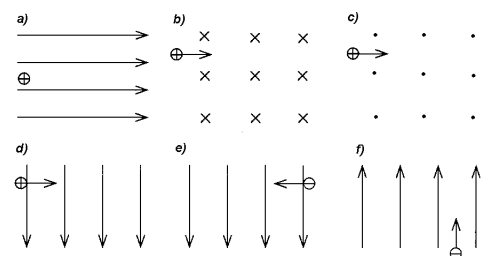
A.5.2. En cierta región del espacio, existe un campo magnético de $0,01 \vec{j}$ T. Calcula la fuerza que actuará sobre un electrón que penetre en esa región, moviéndose con una velocidad de $10^4 \vec{i}$ m/s.

A.5.3. Un protón se mueve con una rapidez de $8 \cdot 10^6$ m/s a lo largo del eje X. Entra en una región donde existe un campo de 2 T, dirigido de tal forma que forma un ángulo de 60° con el eje X y está en el plano XY. ¿Qué fuerza magnética actúa sobre el protón?

A.5.4. Un electrón penetra en una región en la que existe un campo magnético con una velocidad de 10^5 m/s. Calcula el valor del campo si la dirección inicial del electrón es perpendicular al campo y sobre él se ejerce una fuerza de 10^{-12} N.

A.5.5. ¿Cómo deben ser las direcciones y sentidos de un campo eléctrico \vec{E} y otro magnético \vec{B} uniformes para que la fuerza resultante sobre una carga con velocidad \vec{v} sea cero? ¿Cuál ha de ser la relación entre sus módulos? Razona la respuesta.

A.5.6. Un electrón entra con una velocidad constante $10\vec{j}$ m/s en una región del espacio en la que existe un campo eléctrico uniforme $20\vec{k}$ N/C y un campo magnético uniforme $B_0\vec{j}$ T. Despreciando el campo gravitatorio: a) Dibuja las fuerzas que actúan sobre el electrón



¹ Recibe este nombre en honor al físico holandés Hendrik Lorentz (1853-1928), investigador incansable en el campo del electromagnetismo.

(dirección y sentido), en el instante en que entra en la región en que existen campos eléctrico y magnético. b) Calcula el valor de B_0 para que el movimiento del electrón sea rectilíneo y uniforme.

2.1.1. MOVIMIENTO DE PARTÍCULAS CARGADAS DENTRO DE UN CAMPO MAGNÉTICO UNIFORME.

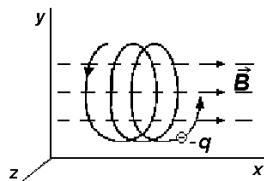
Una característica importante de la fuerza magnética \vec{F} que actúa sobre una partícula de masa m y carga q que se mueve en el seno de un campo magnético uniforme \vec{B} es que su dirección siempre es perpendicular a la velocidad de la partícula \vec{v} . La fuerza magnética sólo modifica la dirección de la velocidad, pero no su módulo. Se comporta como una fuerza centrípeta que proporciona a la partícula una aceleración normal de valor:

$a = a_c = \frac{q}{m} \cdot v \cdot B \cdot \text{sen}(\vec{v}, \vec{B})$. La fuerza magnética no realiza trabajo sobre la partícula y la energía cinética de ésta no se ve afectada.

El movimiento que describe una partícula cargada al penetrar en el campo magnético depende del ángulo θ formado por las direcciones de \vec{v} y \vec{B} :

- En el caso general de que la partícula penetra oblicuamente en el campo, describe un movimiento helicoidal, de radio

$$r = \frac{m \cdot v}{q \cdot B \cdot \text{sen}\theta} \text{ y período } T = \frac{2\pi}{B \cdot \text{sen}(\vec{v}, \vec{B})} \cdot \frac{m}{q} \text{ (figura 18).}$$



Considera el vector velocidad suma de dos componentes: una paralela al campo (constante, al no ser afectada por el campo) y otra perpendicular al mismo (que varía constantemente en dirección). Ambas determinan simultáneamente la trayectoria helicoidal.

Figura 18

- En el caso particular de que la partícula penetra en línea con el campo ($\theta = 0^\circ$ o $\theta = 180^\circ$), su velocidad no es afectada, continuando con movimiento rectilíneo y uniforme, si no actúa ninguna otra fuerza sobre ella.

- En el caso especial de que la partícula penetra perpendicularmente al campo ($\theta = 90^\circ$) describe un movimiento circular uniforme, que se puede aprovechar para separar partículas cargadas (figura 19). En este caso: $F_m = F_c$; $q \cdot v \cdot B = m \cdot \frac{v^2}{r}$; de donde: $r = \frac{m \cdot v}{q \cdot B}$.

Se observa que la rapidez angular ($\omega = \frac{v}{r} = B \cdot \frac{q}{m}$), la frecuencia ($\nu = f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{B}{2\pi} \cdot \frac{q}{m}$) y el período ($T = \frac{1}{\nu} = \frac{2\pi}{B} \cdot \frac{m}{q}$) son independientes del radio de la trayectoria y de la velocidad de la partícula cargada; sólo dependen de la relación carga/masa de la partícula y del módulo del campo magnético.

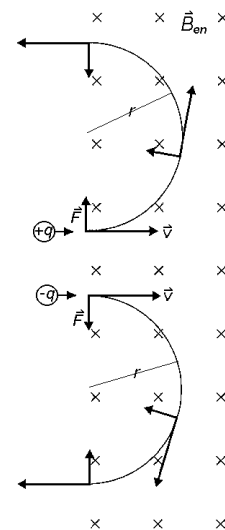


Figura 19

Mediante variaciones conjuntas de campos eléctricos y magnéticos se puede controlar el movimiento de partículas cargadas, hecho que tiene múltiples aplicaciones en dispositivos como el selector de velocidades y el espectrómetro de masas, en los aceleradores no lineales de partículas (ciclotrón y otros tan comunes como el tubo de rayos catódicos de un televisor), etc. (cuadro 2).

A.6. Resuelve las siguientes actividades:

A.6.1. Da una respuesta concisa a las siguientes cuestiones: a) Si un chorro de electrones atraviesa una región del espacio y no se desvía, ¿se puede afirmar que en esa región no hay campo magnético? b) Observando la trayectoria de una partícula con carga eléctrica se puede deducir si la fuerza que actúa procede de un campo eléctrico o de un campo magnético. ¿Por qué?

A.6.2. Determina el radio y el período de la órbita que describe un protón que, moviéndose a 100.000 m/s, penetra en una zona con un campo magnético de 0,1 T de magnitud, dirigido perpendicularmente a la velocidad del protón.

A.6.3. Un electrón penetra en un campo magnético de 10 T con una velocidad de 10^5 m/s, de modo que forma un ángulo de 30° con la dirección del campo. Deduce el radio y el período de la trayectoria helicoidal que describe el electrón.

A.6.4. Un protón, inicialmente en reposo, es acelerado por una diferencia de potencial de $8 \cdot 10^6$ V, penetrando luego en dirección perpendicular en un campo magnético uniforme de 0,4 T. Calcula: a) La velocidad del protón al llegar al campo magnético. b) El radio de la órbita descrita por el protón. c) El tiempo que invierte el protón en recorrer una órbita completa.

A.6.5. Un electrón parte del reposo y es acelerado por una diferencia de potencial de 100 V. Con la rapidez que adquiere, penetra en un campo magnético de 5 G perpendicularmente a la dirección del campo. ¿Qué radio de órbita describirá? ¿Cuántas vueltas dará en 0,05 s?

A.6.6. En un mismo punto de un campo magnético \vec{B} dejamos en libertad un protón y un electrón, dotados ambos de la misma velocidad, perpendicular a las líneas del campo. Deduce la relación existente entre: a) los radios, y b) los períodos de las órbitas que describen.

A.6.7. Una partícula, de carga $3,2 \cdot 10^{-19}$ C y masa $6,7 \cdot 10^{-27}$ kg, entra con una velocidad $v \vec{i}$ m/s en una zona de 2 m de ancha con campo magnético uniforme $-B \vec{k}$ T. a) ¿Qué tipo de partícula podría ser esta carga? ¿Qué trayectorias describe dentro del campo? (Dibuja un esquema). b) Si $B = 10^{-3}$ T, ¿cuál es la velocidad mínima que debe tener la partícula para que atraviese toda la zona? c) Si cambiamos el

signo de la carga, ¿qué cambiaría de las trayectorias descritas por la partícula? ¿Cuál sería ahora la velocidad mínima para que atraviese toda la zona?

Cuadro 2. Aplicaciones de las variaciones de campos eléctricos y magnéticos.

A) EL SELECTOR DE VELOCIDADES Y EL ESPECTRÓMETRO DE MASAS.

El dispositivo conocido como selector de velocidades se fundamenta en que la fuerza magnética que desvía una partícula cargada podría ser compensada por una fuerza eléctrica de igual magnitud y de sentido contrario. Pero ello ambos campos (eléctrico y magnético) deben ser perpendiculares entre sí (recuerda que la fuerza magnética es siempre perpendicular al campo, mientras que la eléctrica es paralela al mismo). Según la *figura 1*, si la carga es positiva, la fuerza eléctrica estará dirigida hacia arriba y la magnética lo estará hacia abajo; ambas fuerzas se compensarán cuando: $q \cdot E = q \cdot v \cdot B$, por lo que: $v = \frac{E}{B}$. Esto quiere decir que, al fijar unos valores de E y B , se determina también una cierta velocidad (independiente de la masa y de la carga de la partícula); sólo las partículas que lleven esa velocidad atravesarán en línea recta sin desviarse.

Joseph John Thomson (1856-1940) utilizó en 1.897 el selector de velocidades en un tubo de rayos catódicos (*figura 2*) para medir la relación entre la carga y la masa del electrón: $\frac{q_e}{m_e} = \frac{E^2}{2 \cdot \Delta V \cdot B^2}$ (¿cómo llegó a esta igualdad?). Thomson, al comprobar que todas

las partículas procedentes del cátodo C tenían la misma relación carga/masa, independientemente del material con el que se construyera el cátodo, llegó a la acertada conclusión de que esas partículas debían ser un constituyente fundamental de la materia.

Posteriormente, siguiendo las ideas de Thomson, William Aston (1877-1945) construyó en 1.919 el primer espectrómetro de masas, modificado y mejorado después por Kenneth Bainbridge (1904-1996) para obtener un registro gráfico (espectrógrafo de masas, *figura 3*). Con un selector de velocidades conseguimos que un haz de isótopos ionizados (iones de un mismo elemento, mismo Z , con distinta masa, distinto A) penetre en una zona bajo la acción de un campo magnético perpendicular a su trayectoria. Puesto que la carga y la velocidad de los isótopos coincide, el radio de la circunferencia que describen ($r = \frac{m \cdot v}{q \cdot B}$) sólo es función de su masa, dejando distintos registros

gráficos en la placa.

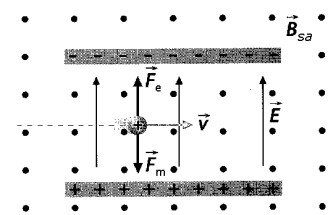


Figura 1

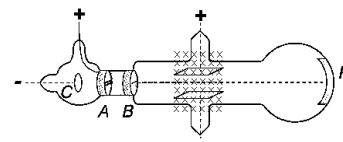


Figura 2

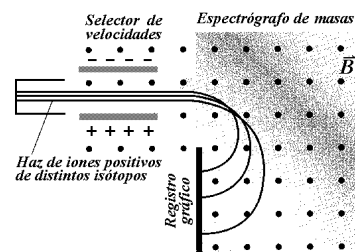


Figura 3

B) EL CICLOTRÓN Y OTROS ACELERADORES DE PARTÍCULAS.

Los aceleradores de partículas son fundamentales en el campo de la Física nuclear y la física de las altas energías. Los aceleradores lineales de partículas presentan grandes dificultades experimentales asociadas a los intensos campos eléctricos. El ciclotrón y los actuales aceleradores de partículas no lineales evitan estas dificultades por medio de la aceleración múltiple de los iones hasta alcanzar elevadas velocidades sin el empleo de altos voltajes.

El ciclotrón inventado en 1.932 por el físico norteamericano Ernest O. Lawrence (1901-1958) fue el primer acelerador de partículas cargadas que operó con campos magnéticos y con el que se consiguieron energías elevadas (del orden de 1 MeV); hoy en día siguen utilizándose en la producción de radioisótopos para aplicaciones médicas. El ciclotrón se basa en el hecho de que el período de la trayectoria circular que describe una partícula cargada en un campo magnético uniforme no depende de

la velocidad de aquella, ni del radio de la órbita: $T = \frac{2 \cdot \pi}{B} \cdot \frac{m}{q}$

Las partículas se mueven en el interior de dos recipientes metálicos semicirculares denominados *des* (debido a su forma, *figura 4*). Los recipientes están contenidos en una cámara de vacío (para que las partículas no pierdan energía y no sean dispersadas en choques con las moléculas del aire), en el interior de un campo magnético proporcionado por un electroimán. Las *des* se mantienen a una diferencia de potencial ΔV que se alterna conforme transcurre el tiempo, lo que crea un campo eléctrico oscilante en el espacio comprendido entre las dos *des*.

Las partículas cargadas, tales como protones, procedentes de una fuente S situada en el centro, son aceleradas por la diferencia de potencial establecida a través del hueco entre las *des* del ciclotrón. Esta diferencia de potencial alterna su signo con un periodo igual al periodo del movimiento circular de la partícula, el cual es constante: independiente del radio de la trayectoria descrita y de la velocidad de la partícula. Así, cuando las partículas llegan de nuevo al hueco entre las *des*, la diferencia de potencial ha cambiado de signo y vuelven a acelerarse describiendo un círculo mayor. Este proceso se repite de forma que las partículas cargadas se desplazan cada vez más de prisa en una trayectoria en espiral hasta que llega a la periferia de una de las *des*, por donde saldrá tangencialmente con velocidad máxima.

No obstante, el ciclotrón tiene limitaciones técnicas (no puede operar a elevadas energías: se producen desajustes de frecuencia debido a los efectos relativistas; se precisan electroimanes de inmenso tamaño para guiar las partículas en la trayectoria circular). Estas dificultades se solucionan en los actuales aceleradores de partículas, los sincrociclotrones y los sincrotrones, utilizados como colisionadores de partículas o simplemente, como "linternas" gigantes capaces de producir radiación electromagnética, desde luz visible hasta los rayos X, que pueda ser empleada para realizar experimentos de muy

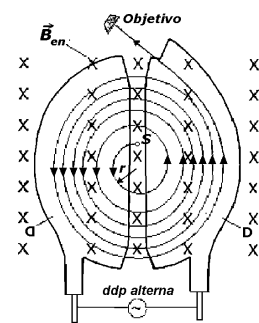


Figura 4

diversa índole.

A.6.8. Un ión $^{58}\text{Ni}^+$, de $9,62 \cdot 10^{-26}$ kg de masa, se acelera desde el reposo a través de una zona del espacio con una diferencia de potencial de 3.000 V, y a continuación entra en otra zona donde únicamente existe un campo magnético uniforme de 0,12 T, perpendicular al plano de su trayectoria y dirigido hacia arriba. Determina: a) la velocidad del ión tras su aceleración; b) el radio de curvatura de la trayectoria del ión en la zona del campo magnético; c) el nuevo radio si se tratara del ión $^{60}\text{Ni}^+$, con una relación de masas de 60/58 con respecto al $^{58}\text{Ni}^+$. ¿Qué utilidad tendría el dispositivo indicado?

A.6.9. Dos isótopos de masas $19,91 \cdot 10^{-27}$ kg y $21,59 \cdot 10^{-27}$ kg, cargados con una sola carga positiva, son acelerados hasta que adquieren una velocidad constante de $6,7 \cdot 10^5$ m/s. Seguidamente se les hace atravesar una región de campo magnético uniforme de 0,85 T, cuyas líneas de campo son perpendiculares a la velocidad de las partículas. Determina la relación entre los radios de la trayectoria que describe cada isótopo y la separación entre los isótopos cuando han descrito una semicircunferencia.

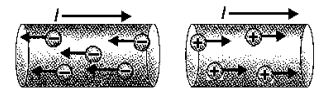
A.6.10. Un electrón se mueve en una región sin ningún campo de fuerzas con una velocidad de $10^8 \vec{i}$ m/s, y llega a un punto P en que entra en una región con un campo magnético uniforme $-B\vec{k}$ T. a) ¿Qué debe valer B para que el electrón vuelva a la primera región por un punto Q situado a 30 cm de P? (Dibuja un esquema de lo que ocurre). b) Si duplicamos el valor de B, ¿a qué distancia de P volvería el electrón a la primera región?

A.6.11. Un ciclotrón que acelera protones posee un campo magnético de 1,5 T. Determina con qué frecuencia debe alternar la diferencia de potencial establecida entre sus des.

A.6.12. Un electrón que se mueve horizontalmente en un tubo de rayos catódicos de un TV con una velocidad de $3,2 \cdot 10^6$ m/s entra en una región de 1 mm de longitud horizontal en la que existe un campo magnético uniforme de 10 mT, también horizontal pero perpendicular a la velocidad inicial del electrón. Determina: a) La fuerza que el campo magnético ejerce sobre el electrón, en módulo, dirección y sentido. b) La desviación experimentada por el electrón respecto a su trayectoria original al final del tubo y el ángulo de desviación. c) La disposición más sencilla de dos placas conductoras paralelas entre sí en el tubo, y la diferencia de potencial eléctrico entre ambas para que el campo eléctrico generado contrarreste el campo magnético.

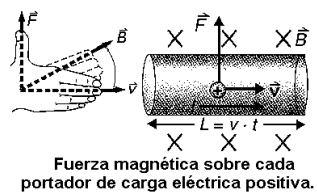
2.2. FUERZA MAGNÉTICA SOBRE UNA CORRIENTE ELÉCTRICA. LEY DE LAPLACE.

En un conductor por el que no pasa corriente eléctrica, el movimiento de los electrones es al azar, y al situarlo en la influencia de un campo magnético la fuerza magnética resultante es nula. Pero si por el conductor pasa una intensidad de corriente (figura 20), entonces los electrones se mueven en un sentido determinado y la fuerza magnética resultante ya no es nula.

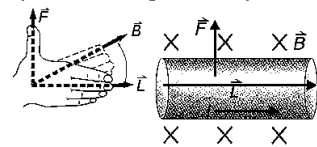


Por convenio, la intensidad de corriente que pasa por un conductor tiene sentido contrario al de los portadores de carga. Podemos considerar que los portadores de carga tienen signo positivo y que se mueven con una velocidad \vec{v} en el sentido de la intensidad de corriente I.

Figura 20



Fuerza magnética sobre cada portador de carga eléctrica positiva.



Acción de un campo magnético sobre un conductor con corriente eléctrica.

Figura 21

En un conductor rectilíneo de longitud L , atravesado por una corriente de intensidad I y bajo la acción de un campo magnético \vec{B} (figura 21), dado que la carga eléctrica q que circula por un conductor es $q = I \cdot t$, podemos afirmar que la fuerza magnética que actúa sobre el conductor rectilíneo es, en módulo: $F = I \cdot t \cdot v \cdot B \cdot \text{sen} \theta = I \cdot L \cdot B \cdot \text{sen} \theta$, y vectorialmente: $\vec{F} = I \cdot (\vec{L} \wedge \vec{B})$ (ley de Laplace), donde \vec{L} es un vector de módulo la longitud del hilo (L) y de dirección y sentido el de la intensidad de la corriente eléctrica I , que coincide con el sentido de la velocidad \vec{v} de los portadores de carga eléctrica positivos.

A.7. Resuelve las siguientes actividades:

A.7.1. Un alambre recto horizontal transporta una corriente de 16 A de oeste a este en el campo magnético terrestre en un lugar donde \vec{B} es paralelo a la superficie, apunta hacia el norte y tiene un valor de 0,4 G. a) Calcula la fuerza magnética sobre 1 m de ese alambre. b) Si la masa de ese trozo de alambre es de 50 g, ¿qué corriente debe transportar para quedar suspendido de forma que su peso sea compensado por la fuerza magnética?

A.7.2. Una varilla conductora de 200 g de masa y 40 cm de longitud es recorrida por una corriente de 2 A de intensidad. Si la varilla está apoyada en una superficie horizontal de coeficiente de rozamiento 0,3, ¿cuál debe ser el módulo y dirección del campo magnético para que comience a deslizarse la varilla sobre el suelo?

A.7.3. Un alambre de 20 cm de longitud transporta una corriente de 1 A según la dirección del eje X. a) Si el conductor está inmerso en un campo magnético de 1 G orientado en el plano XY y formando un ángulo de 30° con el eje X, ¿qué fuerza actúa sobre el alambre? b) Sin variar la intensidad del campo, ¿qué podemos hacer para que la fuerza sobre el alambre sea máxima?, ¿cuál será el valor de esta fuerza máxima?

2.2.1. FUERZA ENTRE CORRIENTES ELÉCTRICAS RECTILÍNEAS PARALELAS. DEFINICIÓN DE AMPERIO.

El resultado anterior se puede emplear para calcular la fuerza magnética que dos corrientes se ejercen entre sí. Supongamos dos conductores rectilíneos paralelos, separados una distancia d , por los que circulan corrientes

eléctricas de intensidades I_1 e I_2 (figura 22). Cada corriente eléctrica origina un campo magnético (según la ley de Biot y Savart) en el que se halla inmersa la otra corriente, por lo que cada conductor experimenta una fuerza magnética que, por la ley de acción y reacción, debe ser igual en módulo y dirección, aunque de sentido opuesto. En efecto, en módulo: $F_{21} = I_1 \cdot L \cdot B_2 = I_1 \cdot L \cdot \frac{\mu \cdot I_2}{2\pi \cdot d} = \frac{\mu}{2\pi} \cdot \frac{I_1 \cdot I_2}{d} \cdot L$; $F_{12} = I_2 \cdot L \cdot B_1 = I_2 \cdot L \cdot \frac{\mu \cdot I_1}{2\pi \cdot d} = \frac{\mu}{2\pi} \cdot \frac{I_1 \cdot I_2}{d} \cdot L$; $F_{21} = F_{12}$; como se observa en la figura determinan atracción entre los conductores cuando las corrientes circulan en el mismo sentido, y repulsión entre los conductores si las corrientes circulan en sentidos opuestos.

El módulo de la fuerza magnética por unidad de longitud entre dos corrientes paralelas vale: $\frac{F}{L} = I_2 \cdot B_1 = I_1 \cdot B_2$

$= \frac{\mu}{2\pi} \cdot \frac{I_1 \cdot I_2}{d}$. La existencia de esta fuerza magnética nos permite definir el *amperio* (A) como unidad de intensidad de corriente eléctrica en el SI: un *amperio* es la intensidad de corriente que circulando por dos conductores paralelos e indefinidos separados 1 m, en el vacío, da lugar a una fuerza entre ellos de $2 \cdot 10^{-7}$ N por metro de longitud de conductor. Esta definición de amperio hace que la permeabilidad magnética del vacío sea exactamente de $4\pi \cdot 10^{-7}$ N/A².

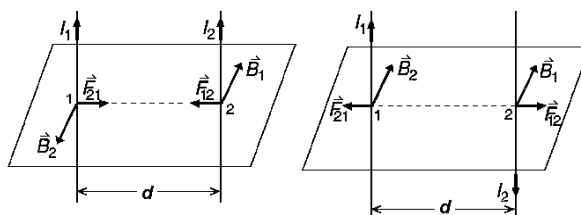


Figura 22

Definido el amperio como unidad fundamental de medida (dada la dificultad experimental que supone medir cargas con precisión), el *culombio* resulta ser la cantidad de carga que atraviesa en un segundo una sección de conductor por la que circula una intensidad de un amperio.

La unidad de campo magnético, el *tesla*, también se puede definir en función de la intensidad de corriente: un campo magnético es de un *tesla* cuando una corriente de un amperio, perpendicular a su dirección, experimenta por cada metro de longitud una fuerza de un newton.

2.2.2. FUERZA SOBRE UNA ESPIRA DE CORRIENTE.

Consideramos una espira de alambre rectangular por la que circula una corriente que se encuentra en un campo magnético uniforme \vec{B} paralelo al plano de la espira y perpendicular a dos de sus lados (figura 23). En aquellos segmentos donde la corriente es paralela o antiparalela al campo, las fuerzas son nulas, pero sobre los lados de la espira donde el campo es perpendicular a la corriente las fuerzas son iguales y opuestas, lo que provoca el giro de la espira hasta que su plano sea perpendicular al campo magnético. La intensidad del momento del par de fuerzas depende del tamaño de la espira, de la intensidad de la corriente que circula por ella y de la intensidad del campo magnético en el que se encuentra.

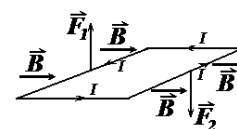


Figura 23

Voltímetros y amperímetros analógicos, en los que la lectura se muestra por la desviación de una aguja sobre una escala, se basan en el funcionamiento de un galvanómetro, que mide el momento del par de fuerzas ejercido por un campo magnético sobre una bobina por la que circula corriente (figura 24). La bobina está montada de manera que pueda girar alrededor de su eje en un campo magnético radial; el resorte se opone la giro de la bobina de forma que el ángulo que ésta consiga girar es una medida de la intensidad del momento del par de fuerzas que actúa sobre ella; así se puede medir la intensidad de la corriente que circula por la bobina. Un galvanómetro se puede calibrar para medir tanto intensidades de corriente como diferencias de potencial.

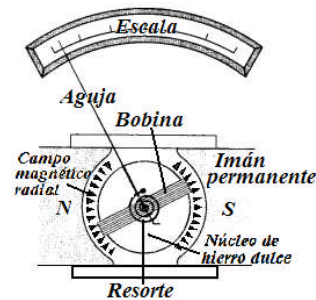


Figura 24

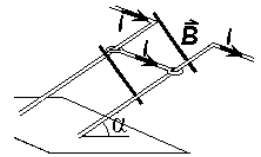
A.8. Para concluir el tema, resuelve las siguientes actividades:

- A.8.1. Recoge en un cuadro las analogías y diferencias que encuentres entre el campo eléctrico y el campo magnético.
- A.8.2. ¿Es posible poner en movimiento una carga en reposo mediante un campo eléctrico? ¿Y mediante un campo magnético?
- A.8.3. Un electrón se mueve en una región en la que están superpuestos un campo eléctrico $\vec{E} = (3\vec{i} + 4\vec{j})$ V/m y un campo magnético $\vec{B} = 0,4\vec{k}$ T. a) Determina, para el instante en que la velocidad del electrón es $\vec{v} = 20\vec{i}$ m/s, la fuerza que actúa sobre el electrón y la aceleración que experimenta. b) Sin modificar el campo magnético, ¿cuál debe ser el campo eléctrico para que el electrón atraviese la región sin modificar su velocidad?
- A.8.4. Un electrón (${}^0_1e^-$), un protón (${}^1_1H^+$), un deuterón (${}^2_1H^+$), y una partícula α (${}^4_2He^{+2}$) son acelerados por una misma diferencia de potencial. Entran por un mismo punto y en la misma dirección y sentido en una región del espacio donde existe un campo magnético uniforme y perpendicular a la dirección de movimiento de las partículas. Calcula: a) La relación entre sus energías cinéticas y entre sus velocidades en el momento de penetrar en el campo. b) Si el radio de la trayectoria descrita por el protón es de 0,1 m, ¿qué separación guardan entre sí las partículas implicadas después de describir cada una de ellas una semicircunferencia? (Considera que, de forma aproximada, la masa del deuterón es el doble de la masa del protón y que la masa de la partícula α es cuatro veces la masa del protón).

A.8.5. Un protón sale despedido de un ciclotrón después de describir una semicircunferencia de 70 cm de radio. Si el campo magnético dentro de las *des* es de 0,3 T, determina la frecuencia de la diferencia de potencial alterna que se aplica entre las *des* para acelerar al protón. Calcula la velocidad del protón a la salida del ciclotrón y su energía cinética expresada en eV.

A.8.6. ¿Qué le ocurriría a un muelle si fuese recorrido por una corriente eléctrica de gran intensidad y el rozamiento del muelle con el suelo fuese despreciable?

A.8.7. Una varilla conductora de longitud 20 cm y masa 10 g puede deslizarse sin rozamiento entre dos railes paralelos que forman un ángulo de 30° sobre la horizontal (*figura adjunta*). Este circuito está inmerso en un campo magnético uniforme \vec{B} perpendicular al plano de los dos railes. Si hacemos circular una corriente eléctrica de intensidad $I = 1$ A, en el sentido indicado, determina el valor y sentido del campo magnético para que la varilla se mantenga en reposo.



A.8.8. Se tienen dos hilos conductores muy largos, rectilíneos y paralelos, separados 75 cm. Por el hilo 1 circula una corriente de 2 A dirigida verticalmente hacia arriba. Calcula la intensidad de corriente que circula por el hilo 2, y su sentido, sabiendo que en un punto en línea con los conductores, a 1 m del conductor 1 y 25 cm del conductor 2, el campo magnético resultante es nulo. En las condiciones anteriores, determina la fuerza por unidad de longitud (módulo, dirección y sentido) que ejercen los dos hilos entre sí.

A.8.9. Se dispone de un solenoide de longitud 20 cm y 600 espiras, con una resistencia eléctrica de 12 Ω , en cuyo interior se coloca un núcleo de hierro ($\mu_{Fe} = 2\pi \cdot 10^{-4}$ N/A²). Halla: a) El valor de la diferencia de potencial necesaria para generar un campo magnético de 0,5 T en su interior. b) El valor del campo magnético en su interior si, manteniendo la diferencia de potencial, se saca del solenoide el núcleo de hierro. c) La trayectoria que seguiría una partícula cargada dentro del solenoide si penetra paralelamente a su eje.

A. Final. Realiza un resumen de las ideas más importantes aprendidas en esta unidad, así como un cuadro con las ecuaciones y fórmulas que has manejado a lo largo de la misma.

APÉNDICE: EL CAMPO MAGNÉTICO TERRESTRE.

La Tierra puede considerarse como un gigantesco imán cuyo polo sur magnético se halla cercano al Norte geográfico (*figura A.1*). Por eso, el polo norte de la aguja imantada de una brújula apunta aproximadamente al Norte geográfico y se puede utilizar como instrumento de orientación. Se llama declinación magnética a la desviación que presenta la aguja magnética con relación a la dirección N-S geográfico.

El magnetismo terrestre tiene su origen en el núcleo del planeta, esencialmente compuesto de hierro y níquel, materiales ferromagnéticos. El núcleo, de unos 3.500 km de radio, consta de una esfera interna sólida de unos 1.200 km de radio (a pesar de sus 5.500 °C, se mantiene sólida por las altas presiones). Dicha esfera sólida está rodeada por el núcleo exterior, una zona fluida debido a las altas temperaturas y menores presiones, donde los materiales ferromagnéticos experimentan movimientos de convección, intensificados por la rotación terrestre, que generan gigantescas corrientes eléctricas; estas corrientes, alrededor del núcleo sólido de Fe-Ni, producen un intenso campo magnético análogo al de una barra imán, que se prolonga miles de kilómetros hacia el espacio exterior.

El vector campo magnético terrestre varía con la latitud en valor e inclinación: de los 31 μ T en dirección paralela a la superficie terrestre, en el ecuador magnético, a los 62 μ T (el doble) en dirección perpendicular a la superficie terrestre, en los polos magnéticos. En nuestra latitud, el campo magnético terrestre vale unos 40 μ T y presenta una inclinación magnética de unos 60° respecto a la superficie terrestre.

La marca de la evolución del campo magnético terrestre la encontramos en las lavas ricas en magnetita que se orientan en el sentido del campo durante su enfriamiento. Es lo que se observa en las dorsales oceánicas, donde ciertas bandas de lava enfriada indican que los polos magnéticos se han invertido varias veces a lo largo de la historia de la Tierra (ello se debe a que la esfera sólida del núcleo interno no gira a la misma velocidad que el núcleo externo fluido). La observación de este paleomagnetismo ha contribuido a asentar la teoría de la deriva de los continentes. Localmente, el campo acusa ciertas variaciones debido a la presencia de grandes masas de minerales ferromagnéticos a poca profundidad bajo la corteza terrestre.

A distancia de la Tierra, en el espacio, el campo terrestre engendra el escudo magnético de la “magnetosfera”. Este escudo desvía las partículas cargadas del viento solar que, al penetrar por los polos magnéticos, provocan las auroras boreales.

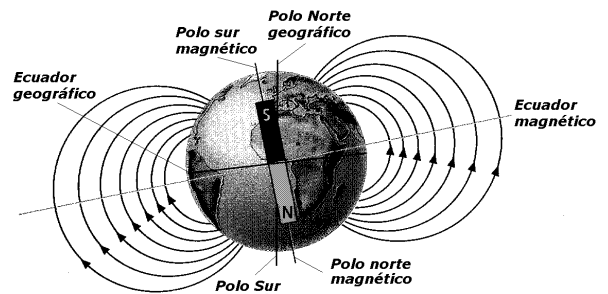


Figura A.1.

¡APROVECHA LAS NUEVAS TECNOLOGÍAS!

Aprovecha los recursos informáticos recogidos en soporte digital, en la Web del Departamento y en la Web personal de los autores. Te facilitarán el estudio y la comprensión de los conocimientos tratados en esta unidad.

SOLUCIONES A LAS ACTIVIDADES PLANTEADAS EN LA UNIDAD.

A.1.1: En base a la ley de Biot y Savart, para que la aguja no se desvíe debemos colocar el conductor rectilíneo e indefinido perpendicularmente a la aguja, y para que la desviación sea máxima debemos colocar el conductor paralelo a la aguja.

A.1.2: $4 \cdot 10^{-6}$ T

A.1.3: $6,51 \cdot 10^{-5}$ T (en P) y 10^{-5} T (en Q), dirigidos perpendicularmente al plano del papel y hacia dentro.

A.1.4: $2 \cdot 10^{-5}$ T, dirigido perpendicularmente al plano del papel y hacia dentro; 10^{-5} T, dirigido perpendicularmente al plano del papel y hacia fuera; en un punto situado a 8 cm de A y 12 cm de B.

A.2.1: $5,03 \cdot 10^{-6}$ T, orientado perpendicularmente al plano de las espiras; 2,51 T, orientado perpendicularmente al plano de las espiras.

A.2.2: 0,33 T, orientado perpendicularmente al plano de las espiras.

A.2.3: Se repelen, pues esa cara de la bobina se comporta como polo sur.

A.3: En algunos materiales, además del efecto de distorsión del movimiento electrónico presentan el efecto de alineamiento de sus dipolos elementales, más intenso que aquél, lo que ocasiona el fenómeno del paramagnetismo o ferromagnetismo. En los materiales paramagnéticos el efecto de alineación es muy débil y sólo se manifiesta en presencia de un campo magnético externo; en los materiales ferromagnéticos el efecto es muy intenso y sus dipolos, una vez alineados, permanecen cierto tiempo en alineación, aunque el campo externo desaparezca. En los materiales para- y ferromagnéticos un aumento de la temperatura debilita las propiedades magnéticas, debido a que el aumento de la agitación térmica impide o dificulta la alineación de los dipolos elementales.

A.4. Aplicando la ley de Ampère ($\oint \vec{B} \cdot d\vec{r} = \mu \cdot I$), se deduce que el campo a distancias entre el hilo central y la corona circular responde al campo creado por una corriente eléctrica a su alrededor ($B = \frac{\mu \cdot I}{2\pi r}$), donde las líneas de campo son circunferencias concéntricas en el hilo central y situadas en planos

perpendiculares al mismo. Al considerar una circunferencia de radio mayor a la corona circular, la intensidad total que atraviesa esta superficie es nula (ya que la intensidad que atraviesa el hilo central se cancela con la intensidad que atraviesa la corona), con lo que la ley de Ampère nos lleva a afirmar que el campo es nulo en el exterior del cable coaxial. La consecuencia es que el campo magnético, al igual que el eléctrico, puede apantallarse, cosa que no ocurre con el campo gravitatorio.

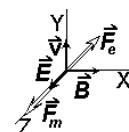
A.5.1: a) $\vec{F} = 0$ N (la carga no se mueve); b) \vec{F} en el plano del papel y hacia arriba; c) \vec{F} en el plano del papel y hacia abajo; d) \vec{F} perpendicular al plano del papel y hacia dentro; e) \vec{F} perpendicular al plano del papel y hacia dentro; f) $\vec{F} = 0$ N (al ser paralelos \vec{v} y \vec{B})

A.5.2: $-1,60 \cdot 10^{-17} \vec{k}$ N

A.5.3: $2,22 \cdot 10^{-12} \vec{k}$ N

A.5.4: 62,5 T

A.5.5: Atendiendo a las relaciones entre la fuerza y el campo en cada caso, se concluye que el campo \vec{E} y el campo \vec{B} deben ser perpendiculares entre sí. Por ejemplo, para una carga que se mueve en la dirección positiva del eje OX, si el campo \vec{E} se dirige en la dirección positiva del eje OY, el campo \vec{B} debe dirigirse en la dirección del eje OZ y en el sentido positivo, si la carga es positiva, o en el sentido negativo de dicho eje, si la carga es negativa. La relación entre los módulos debe cumplir: $E = v \cdot B$.



A.5.6: Figura adjunta; 2 T

A.6.1: a) No, puede que el chorro de electrones haya penetrado paralelamente al campo. b) Sí, ya que aunque ambos campos hacen que la partícula experimente movimientos acelerados, el campo eléctrico modifica el módulo de la velocidad, mientras que el campo magnético no modifica este módulo.

A.6.2: 10^{-2} m; $6,56 \cdot 10^{-7}$ s

A.6.3: $1,14 \cdot 10^{-7}$ m; $7,15 \cdot 10^{-12}$ s

A.6.4: a) $3,92 \cdot 10^7$ m/s; b) 1,02 m; c) $1,64 \cdot 10^{-7}$ s

A.6.5: $6,75 \cdot 10^{-2}$ m; 14 vueltas

A.6.6: $r_p/r_e = T_p/T_e = m_p/m_e = 1.833,15$

A.6.7: a) partícula α (${}^4_2\text{He}^{+2}$); describe circunferencias de radio dependiente del valor de la velocidad; b) 95.522,4 m/s; c) describiría la misma circunferencia pero en sentido opuesto; la misma velocidad que antes.

A.6.8: a) 10^3 m/s; b) 0,50 m; c) 0,51 m; sirve para separar isótopos.

A.6.9: $r_1/r_2 = 0,92$; $1,66 \cdot 10^{-2}$ m

A.6.10: a) $3,80 \cdot 10^{-3}$ T; b) 0,15 m

A.6.11: $4,57 \cdot 10^7$ Hz

A.6.12: a) $5 \cdot 10^{-15}$ N, fuerza vertical y central o radial; b) 33,3°; c) 32.000-d V)

A.7.1: $6,4 \cdot 10^{-4} \vec{k}$ N; 12.262,5 A (esta actividad pone de manifiesto que, en un circuito ordinario, la fuerza magnética es insignificante frente a la fuerza gravitatoria).

A.7.2: 0,735 T en dirección perpendicular a la varilla conductora y en sentido opuesto a la fuerza de rozamiento.

A.7.3: a) $10^{-5} \vec{k}$ N; b) cambiar la orientación del campo magnético, de forma que sea perpendicular al alambre; $2 \cdot 10^{-5}$ N.

A.8.1: ¡IMPORTANTE QUE TENGAS CLARA ESTA CUESTIÓN!

Analogías:

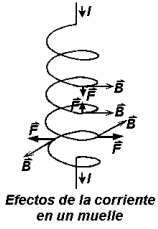
- Ambos campos son originados por cargas eléctricas.
- La interacción, ya sea eléctrica o magnética, puede ser atractiva y repulsiva.
- La interacción, ya sea eléctrica o magnética, depende del medio a través del cual tenga lugar. Consecuencia de esto, ambos campos se pueden apantallar.
- Los dipolos, ya sean eléctricos o magnéticos, si tienen libertad para moverse, se orientan en el sentido del campo.

Diferencias:

- Las cargas en reposo sólo originan campos eléctricos. Las cargas en movimiento originan campos eléctricos y pueden originar campos magnéticos.
- Las cargas eléctricas, en reposo o movimiento, pueden existir por separado, pero toda carga eléctrica en movimiento lleva asociado un dipolo magnético elemental inseparable. Consecuencia de esto, las líneas de campo eléctrico son abiertas (hay fuentes y sumideros), mientras que las líneas de campo magnético son cerradas.
- El campo eléctrico creado por una carga puntual (o el gravitatorio) es radial o central, mientras que el campo magnético creado por una carga puntual en movimiento es perpendicular a la vez a la dirección radial y a la dirección del movimiento de la carga. Consecuencia de esto, las líneas de campo y de fuerza eléctricas llevan la misma dirección, mientras que las líneas de campo y de fuerza magnéticas son siempre perpendiculares entre sí.
- El campo eléctrico (o el gravitatorio) es conservativo (su circulación a lo largo de una trayectoria cerrada es nula), mientras que el campo magnético no es conservativo (su circulación a lo largo de una trayectoria cerrada no es nula); por tanto, no podemos definir para cada punto del espacio un potencial escalar.
- La intensidad de la interacción eléctrica es mayor en el vacío que en cualquier otro medio material, mientras que la intensidad de la interacción magnética puede ser en un medio material mayor o menor que en el vacío.
- La intensidad de la interacción eléctrica es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia, mientras que la intensidad de la interacción magnética depende, además de la distancia, de la orientación.
- Un campo eléctrico, variable o no, crea un campo magnético, mientras que, como veremos en el siguiente tema, sólo un campo magnético variable es capaz de crear un campo eléctrico variable.

A.8.2: Sí. No. ¡Razona!

A.8.3: a) $1,60 \cdot 10^{-19} \cdot (-3 \vec{i} + 4 \vec{j})$ N; $1,76 \cdot 10^{11} \cdot (-3 \vec{i} + 4 \vec{j})$ m/s; b) $8 \vec{j}$ V/m.



A.8.4: a) $E_{c\ e} = E_{c\ p} = E_{c\ D} = E_{c\ \alpha}/2$; $v_{\alpha} = v_D = v_p / \sqrt{2} = 1,65 \cdot 10^{-2} \cdot v_c$; b) Separación de cada partícula al e^- : $e-p = 20,467$ cm; $e-D = 28,751$ cm; $e-\alpha = 57,036$ cm.

A.8.5: $9,15 \cdot 10^6$ Hz; $2,01 \cdot 10^7$ m/s; 2,11 MeV

A.8.6: Cada dos espiras consecutivas del muelle representan dos corrientes paralelas del mismo sentido, por lo que aparecen fuerzas atractivas entre ellas; esto implica que el muelle, en su conjunto, se encoge. Por otra parte, debido a que en una misma espira las corrientes son diametralmente opuestas, actúa una fuerza que ensancha las espiras del muelle. En resumen, el muelle se encoge y se ensancha (*figura adjunta*).

A.8.7: 0,25 T, orientado perpendicularmente al plano de los raíles y hacia dentro.

A.8.8: 0,5 A, de sentido opuesto a la que circula por el hilo 1; $2,66 \cdot 10^{-7}$ N/m, en línea con el segmento que une los hilos y dirigida hacia fuera de los hilos (repulsión).

A.8.9: a) 3,2 V; b) 10^{-3} T, orientado perpendicularmente al plano de las espiras; c) trayectoria recta y con velocidad constante, al ser nula la fuerza magnética sobre la partícula cargada.

A. Final. Trabajo personal.