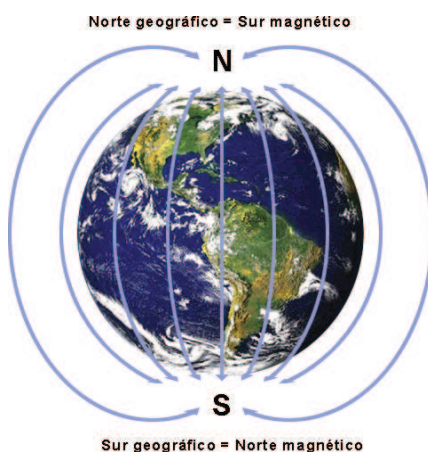


TEMA 3: CAMPO MAGNÉTICO E INDUCCIÓN MAGNÉTICA

4. CARGAS ELÉCTRICAS EN MOVIMIENTO. CAMPOS MAGNÉTICOS



Los antiguos griegos observaron que ciertos minerales de hierro, como la magnetita, tienen la propiedad de atraer pequeños trozos de hierro. En estado natural, la propiedad la muestran el hierro, el cobalto, el manganeso y muchos compuestos de estos metales. **NO está relacionada con la gravedad, ya que NO la poseen todos los cuerpos, y parece concentrarse en ciertos lugares del mineral.** Aparentemente tampoco está relacionada con la interacción eléctrica, ya que ni las bolas de corcho ni los trozos de papel son atraídos por tales minerales. Por tanto, a esta propiedad física se la denominó **magnetismo**. El nombre se deriva de la antigua ciudad del Asia Menor, Magnesia, en donde según la tradición, fue observado por primera vez el fenómeno por un pastor. Las regiones de un cuerpo donde parece concentrarse el magnetismo se conocen como polos magnéticos, y un cuerpo magnetizado se conoce como imán. La Tierra misma es un imán.

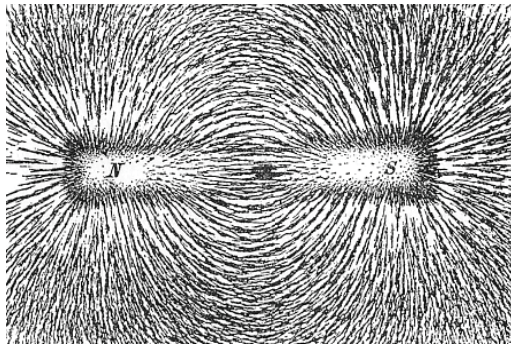
Las propiedades de los polos magnéticos eran semejantes a las de las cargas eléctricas. Así,

- → Existen polos magnéticos de DOS clases. Arbitariamente se los designa como norte y sur. Éstos se atraen entre sí si son de distinto tipo, y se repelen al serlo de signo contrario
- → La fuerza de interacción entre los polos varía con el cuadrado de la distancia que los separa.

No existen los "monopolos" magnéticos: es decir, los polos magnéticos no pueden aislarse: si partimos un imán en trozos, cada uno de ellos se convierte en un nuevo imán con sus DOS polos opuestos. La búsqueda del posible monopolo magnético es tarea de la física actual.

Sin embargo, existe una principal diferencia entre la interacción eléctrica y la magnética, y es que si ya sabemos que existen dos clases de cargas eléctricas, pudiendo hablar individualmente de cada una de ellas (positiva/negativa), no existen los "monopolos" magnéticos: es decir, los polos magnéticos no pueden aislarse: si partimos un imán en trozos, cada uno de ellos se convierte en un nuevo imán con sus DOS polos opuestos. Sin embargo, a pesar

de esta diferencia, para describir las acciones que se ponen de manifiesto entre imanes, seguiremos un proceso análogo al llevado a cabo con las cargas eléctricas: imaginaremos que todo imán "crea" a su alrededor un campo magnético, que se pondrá de manifiesto al situar allí otro imán.



En el año 1600, William Gilbert descubrió la razón de que la aguja de una brújula se oriente por sí misma en dirección definida: la Tierra es un imán permanente. Puesto que el polo norte de la aguja de una brújula se ve atraído hacia el polo geográfico norte de la Tierra, este polo norte geográfico de la Tierra, es en realidad, un polo magnético sur.

4.1. Los fenómenos magnéticos NO son independientes de la carga eléctrica.

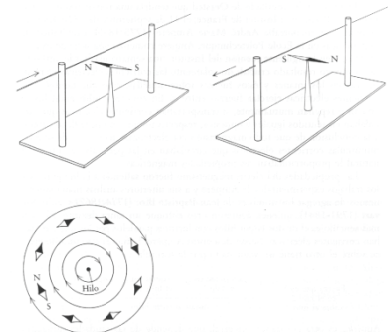
La primera evidencia que señaló la idea de que el magnetismo debía estar íntimamente relacionado con los fenómenos eléctricos fue realizada por el físico danés **Oersted** en 1919 (en la foto).

Oersted situó una brújula en las cercanías de un hilo conductor. Al hacer circular una corriente eléctrica continua por el hilo, la brújula se orientó perpendicularmente al hilo. Cuando cesaba la corriente, la brújula volvía a su posición original.



Esta experiencia puso de manifiesto que las corrientes eléctricas (cargas en movimiento) producen sobre la brújula los mismos efectos que se observan al acercarse a ésta un imán. Parece, por tanto, que las cargas eléctricas en movimiento producen los mismos efectos que los imanes, o dicho de otro modo: las cargas eléctricas en movimiento crean un campo magnético a su alrededor. Otras pruebas experimentales a favor de esta idea están en la observación de que al situar dos hilos paralelos y hacer circular por ellos una corriente de elevada intensidad, aparecen fuerzas de atracción o de repulsión, según el sentido de la corriente que circula por ellos. Esta fuerza entre los conductores sólo aparece cuando circula corriente por ellos.

La interacción magnética, por lo tanto, es el resultado de la existencia de una propiedad de la materia ya explicada: la carga. Sin embargo, es necesario que esas cargas estén en movimiento para que tal interacción magnética aparezca. Según esto, los imanes naturales se explican admitiendo que en su interior se producen corrientes eléctricas, debidas al movimiento de los electrones, orientados del mismo modo en todos los átomos. La suma de sus efectos da como resultado el campo magnético que se observa en las cercanías del imán.



Como el campo eléctrico, el campo magnético también puede ser descrito con la ayuda de las líneas de fuerza. Las líneas de fuerza del campo magnético pueden visualizarse de un modo muy simple: basta poner sobre un papel unas limaduras de hierro, y debajo de él, un imán. Rápidamente, las limaduras se orientan según las líneas de fuerza. Esas líneas de fuerza magnéticas, son cerradas (a diferencia de las líneas de fuerza del campo eléctrico): parten del polo norte y terminan en el sur (por convenio), y en cada punto de esas líneas magnéticas, el vector campo magnético es tangente a él.

5. INTERACCIÓN MAGNÉTICA. ESTUDIO DEL CAMPO MAGNÉTICO.

Sin tener presente por ahora, el origen del campo magnético, vamos a imaginar una zona del espacio en donde existe un campo magnético uniforme que representaremos por el vector **B**.

Si la carga q está en reposo, el campo magnético no ejerce ninguna acción sobre ella. Sin embargo, si se mueve con cierta velocidad, aparece sobre ella una fuerza **F**.

EXPERIMENTALMENTE se observa que:

- **F** es proporcional a la carga, y su sentido se invierte si cambiamos el signo de la carga.
- **F** es proporcional al módulo de la velocidad con que la carga se mueve.
- **F** es perpendicular al vector velocidad, y su módulo depende de la dirección de la velocidad, de forma que:

A) existe una dirección del movimiento para la que la fuerza es nula.

B) la fuerza alcanza su valor máximo cuando la carga se mueve en una dirección perpendicular a la anterior.

La fuerza magnética es siempre perpendicular a la velocidad de la carga.

La interacción magnética, caracterizada por la fuerza, resulta ser siempre perpendicular a la velocidad, esto es, transversal al movimiento de la carga y, por lo tanto, modifica sólo el sentido de la velocidad, dejando inalterado el módulo de la misma.

Sin embargo, es necesario recordar el carácter relativo del movimiento. En efecto, dependiendo del sistema de referencia, los movimientos pueden ser percibidos, o no, de modo diferente según los observadores. Si este hecho lo trasladamos a las cargas móviles, es fácil entender que "los campos magnéticos, y sus efectos, sean relativos".

Igual que hicimos con el campo eléctrico, podemos asignar a cada punto del espacio un valor del campo magnético; su acción sobre la carga testigo será la fuerza que acabamos de estudiar.

Por convenio, se admite que la dirección del campo magnético es aquella en que la fuerza que actúa sobre la carga resulta ser nula.

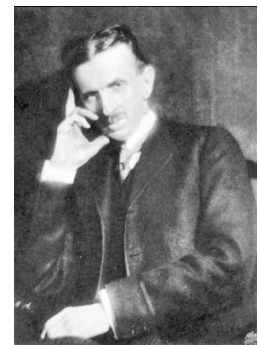
Se define el módulo del campo magnético como

$$B = \frac{F}{q \cdot v}$$

siendo **F** el módulo de la fuerza máxima medida sobre la partícula.

De acuerdo con la anterior definición, la unidad en que se mide **B** en el SI es el N.s/(C.m) y se denomina **TESLA (T)**, en honor de **Nicolai Tesla** (en la foto), de los grandes pioneros en el estudio del magnetismo. Con alguna frecuencia se utiliza otra unidad denominada **GAUSS** con la equivalencia:

$$1 \text{ tesla} = 10^4 \text{ gauss}$$



Las observaciones anteriores pueden englobarse en una sola con ayuda del concepto de producto vectorial. Así, diremos que en un punto de una región del espacio existe un campo magnético **B** si al situar en ese punto una carga que se mueve con velocidad v , aparece sobre ella una fuerza que viene dada por:

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

Si además de estar sometida la carga a la influencia de un campo magnético, lo está a la de un campo eléctrico (a la vez) la fuerza total que padecerá vendrá dada por la suma (vectorial) de ambas fuerzas, es decir

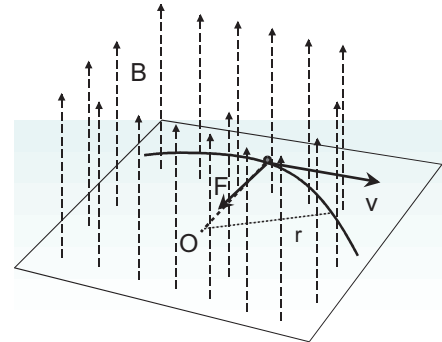
$$\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

Esta expresión se conoce como **fuerza de Lorentz**.

Hay varias diferencias importantes entre las fuerzas eléctrica y magnética, como ya puede intuirse tras esta definición:

- La fuerza eléctrica está siempre en la dirección del campo eléctrico, mientras que la magnética es perpendicular al campo.
- La fuerza eléctrica actúa sobre una partícula cargada en todo momento, mientras que la magnética sólo aparece cuando la carga se mueve de determinada manera.
- La fuerza eléctrica efectúa trabajo al desplazar la carga, mientras que la magnética asociada a un campo magnético estable NO trabaja cuando se desplaza la partícula.

Precisamente, gracias a la definición del producto vectorial que nos ayuda a definir la fuerza magnética, pueden deducirse las características vectoriales de fuerza, campo y velocidad que aparecen en la ecuación anterior relacionados (recordar la "regla del tornillo"). De este modo, resultan de sumo interés los casos en que una carga eléctrica penetra en el interior de un campo magnético uniforme (o no) y estudiar las trayectorias posibles en función del ángulo de entrada. El caso "más favorable" y fácil de interpretar es aquél en que la dirección de entrada de la carga es perpendicular a las líneas de fuerza del campo magnético (uniforme), ya que en esos casos aparecerá una fuerza perpendicular a esa trayectoria que provocará un giro de radio definido y determinable (una aceleración centrípeta). En función del signo de la carga, ésta rotará en un sentido u otro. Es decir, para este caso puede escribirse que



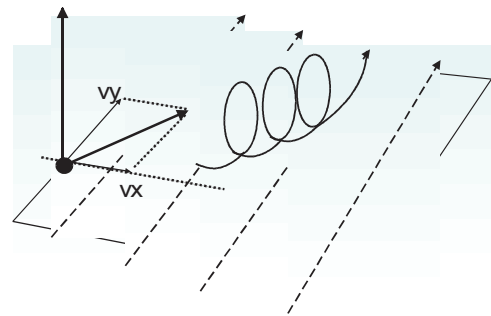
$$qvB = m \frac{v^2}{r} \Rightarrow r = \frac{mv}{qB}$$

ya como $v = \omega \cdot r$, al sustituir en lo anterior y despejar la rapidez angular de giro ω se tendrá que

$$\omega = \frac{q}{m} B$$

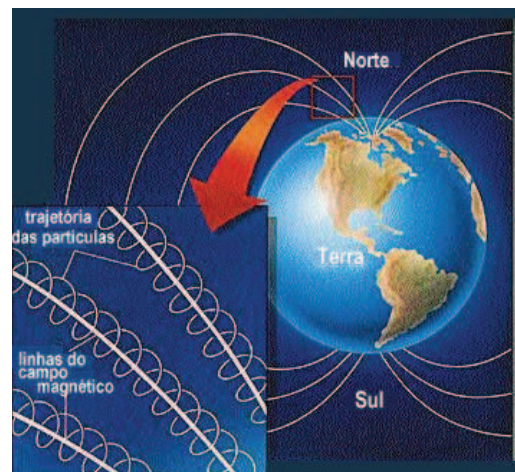
expresión que se conoce como **frecuencia ciclotrónica**.

Si la dirección de entrada NO es perpendicular a las líneas de fuerza del campo, podrá descomponerse la velocidad en sus dos componentes: una perpendicular y otra alineada con el campo, de modo que cada una producirá en efecto distinto: la componente perpendicular al campo hará que se gire el movimiento, pues aparecerá una fuerza magnética como antes, mientras que la otra componente, al estar alineada con las líneas de fuerza, no habrá aceleración (ni fuerza) de ningún tipo en esa dirección y la partícula avanzará a velocidad constante.



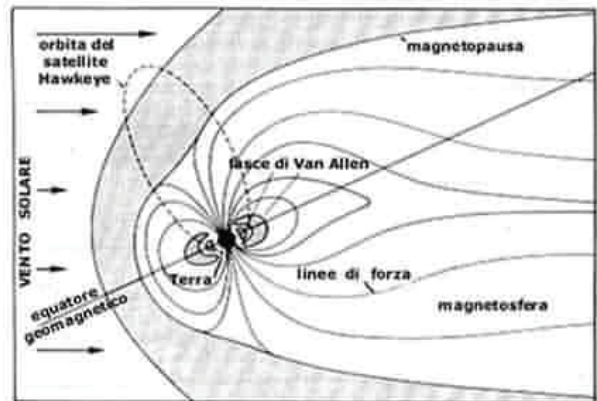
El resultado conjunto será un movimiento "compuesto" dando una trayectoria helicoidal según el signo, como se ve en el dibujo. Por tanto, la curvatura de la trayectoria de un ión en un campo magnético proporciona un medio para determinar el signo de la carga. Si además de todo esto, el campo magnético NO fuera uniforme, el movimiento de la partícula sería bastante más caótico que los anteriores.

Este tipo de situaciones es la que se produce cuando el viento solar (partículas cargadas lanzadas por el sol a gran velocidad en todas las direcciones, incluidas las de la Tierra) alcanza la magnetosfera terrestre, que en estos casos actúa de auténtico escudo protector. La zona más desprotegida del campo magnético terrestre se halla en los polos y es por ahí por donde penetran esas partículas cargadas que al chocar con las moléculas de oxígeno y nitrógeno del aire, provocan las famosas **auroras boreales**.



CINTURONES DE RADIACIÓN DE Van Allen.

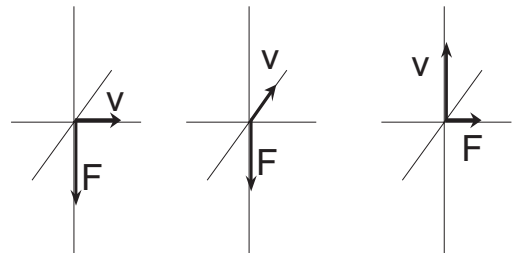
Estos cinturones de radiación son un ejemplo de partículas cósmicas cargadas que interactúan con el campo magnético terrestre. Estos cinturones están compuestos de partículas cargadas que se mueven con rapidez, principalmente electrones y protones, que están **ATRAPADOS** en el campo magnético terrestre. El cinturón interior se extiende de 800 a 4000 km sobre la superficie terrestre, mientras que el otro se extiende hasta unos 60 000 km de la Tierra. Hay pruebas de que el cinturón interior está compuesto de protones y electrones que proceden de la desintegración de los neutrones producidos en la atmósfera por la acción de los rayos cósmicos. El cinturón exterior está formado principalmente por partículas cargadas que han sido proyectadas por el Sol. La variación del número de estas partículas está asociada con la actividad solar. Su salida del cinturón de radiación es lo que causa las auroras boreales y pueden interrumpir las transmisiones de radio.



Q1. Comprobar cómo la definición de Lorentz del campo magnético cumple las observaciones experimentales anteriormente dadas.

Q2. ¿Cómo podremos saber si la fuerza que actúa sobre una carga en movimiento es de origen eléctrico o magnético?

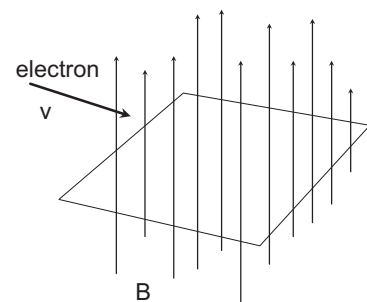
Q3. ¿Qué trayectoria seguirá una carga al penetrar en un campo magnético uniforme si se mueve con una velocidad que es perpendicular al campo? Hacer un análisis de la trayectoria seguida por esta misma partícula si penetrara en un campo uniforme con una dirección NO perpendicular, y otro análisis de entrada NO perpendicular en un campo NO uniforme.



Q4. Dibujar el vector campo magnético existente en cada uno de los siguientes casos, sabiendo que la fuerza representada es la máxima que puede actuar sobre la carga (positiva)

Q5. Un electrón, de carga $q = -1.6 \cdot 10^{-19}$ C, penetra en una región donde existe un campo magnético con una velocidad de 10^5 m/s. Calcula el valor del campo magnético si la dirección inicial del movimiento del electrón es perpendicular al campo y sobre él se ejerce una fuerza de 1 N.

Q6. Un electrón se mueve en la dirección que se indica en la figura, en el seno de un campo magnético. Señala la dirección de la fuerza que actuará sobre él y dibuja la trayectoria que seguirá. Calcula el trabajo que realiza la fuerza magnética sobre el electrón en el interior del campo. ¿Cómo se modificará el resultado si en lugar de un electrón se considera un protón?



6. CAMPOS MAGNÉTICOS CREADOS POR UNA CORRIENTE ELÉCTRICA

6.1. Campo magnético creado por una corriente RECTILÍNEA

La propia experiencia de Oersted nos proporciona una primera idea sobre la dirección y sentido del campo magnético que crea una corriente rectilínea¹. Imaginemos que colocamos alrededor de una corriente rectilínea una serie de pequeñas brújulas. Estas brújulas se alinearán en la dirección del campo magnético que crea esa corriente: perpendicular a ella. El resultado que se obtiene permite enunciar **la llamada regla de la mano derecha**, o **mejor aún: la regla del tornillo**, situando un tornillo sobre "el cable" de modo que gire en el sentido de avance de la corriente. Su giro nos dará el sentido del vector campo en el (los) punto(s) considerados

En cuanto a la magnitud del campo magnético, experimentalmente se comprueba que:

- Es proporcional a la intensidad de la corriente que circula.
- Depende del medio en el que se realiza la experiencia.
- Disminuye proporcionalmente con la distancia al conductor.

Esto se traduce en la expresión

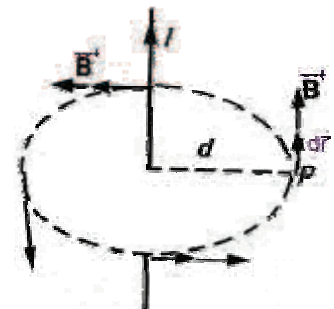
$$B = K \frac{I}{r}$$

donde K es una constante característica del medio que tiene como unidad en el SI el tesla.m/amperio, aunque se prefiere escribir k como $k = \frac{\mu}{2\pi}$, denominando μ como **permeabilidad magnética**, que en el vacío, posee un valor $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ T.m/amperio.

De esta forma, la anterior expresión puede escribirse como

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

que recibe el nombre de **ley de Biot-Savart**, en donde r representa la distancia al punto en donde se quiere determinar el campo magnético producido por la corriente Y.



Si en lugar de existir una sola corriente rectilínea hubiese varias, **el campo resultante sería la suma VECTORIAL** del campo que crea cada una de ellas.

Normalmente, se suele representar con un \oplus el campo magnético perpendicular al papel y que penetra en él. Cuando el campo magnético que se quiere representar es perpendicular, pero saliendo del papel, se escoge el símbolo \odot

Si se ha observado el pie de página anterior, o simplemente recordamos que las cargas eléctricas producen campos eléctricos y un campo magnético si ADEMÁS están en movimiento, es fácil reparar en el hecho de que ambos campos son una propiedad fundamental de la materia, y resulta más apropiado usar el término de campo electromagnético para describir la situación física que implica las cargas en movimiento. Otra propiedad fundamental es que dos observadores en movimiento relativo

Q7. Un cable conductor, recto e indefinido, por el que circula una corriente de 20 A, está situado sobre el eje OY, en el vacío. La corriente circula en el sentido de las Y positivas. Calcula el campo magnético creado por este conductor en los puntos (2,2,0), (0,0,5) y (3,0,3) admitiendo que se trabaja en el S.I.

¹En realidad este estudio requiere, para un tratamiento riguroso, del cálculo integral. Aquí vamos a exponer, fundamentalmente, un desarrollo experimental, aunque fueron los trabajos de Ampère y Laplace los que permitieron definir el campo magnético que "crea" una carga Q en movimiento mediante la expresión

$\vec{B} = K_m \frac{Q \cdot v}{r^2} \vec{u}_t \wedge \vec{u}_r$, en donde u_t y u_r son DOS vectores unitarios en la dirección de la velocidad y en la dirección de la posición del punto en el que

calculamos el campo, respectivamente, y K_m es una constante que en el SI vale 10^{-7} U.I. Frecuentemente se la suele escribir como $K_m = \mu/4\pi$ donde μ es otra

constante, denominada permeabilidad magnética del medio, y en el vacío, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ U.I., con lo que $\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{Q \cdot v}{r^2} \vec{u}_t \wedge \vec{u}_r = \mu_0 \cdot \epsilon_0 \cdot v \vec{u}_t \wedge \vec{E}$ que nos establece una relación sumamente interesante entre los campos eléctrico y magnético creados por una carga en movimiento para una $v \ll c$ (velocidad de la luz)

miden velocidades diferentes de la carga eléctrica en movimiento y, por lo tanto, también miden diferentes campos magnéticos. En otras palabras, **los campos magnéticos dependen del movimiento relativo entre la carga y el observador**. Es importante reseñar que a medida que la partícula se mueve lleva consigo sus campos eléctrico y magnético. Así, un observador que ve la partícula en movimiento mide campos eléctrico y magnético que cambian con el tiempo a medida que la partícula se acerca y se aleja del observador, pero un observador en reposo con respecto a la carga sólo mide un campo eléctrico constante. (Relatividad de los campos magnéticos)

6.2 Campo magnético creado por una espira.

Acabamos de imaginar y calcular el campo magnético producido por una corriente rectilínea. Pero, ¿qué sucede si tal corriente no es recta, esto es, ¿qué sucederá con el campo magnético si "doblamos" el hilo hasta hacerlo circular y formar así una espira?

Si tenemos presente las líneas de fuerza del campo que crea un conductor rectilíneo (y deducibles por la regla del tornillo) e imaginamos ahora "doblado" el conductor hasta obtener la espira, **cabe suponer que en el interior de ésta habrá una mayor densidad de líneas de fuerza que en el exterior**, por lo que cabe esperar que el campo magnético se refuerce en el interior y se debilite en puntos externos de la espira. De esta forma, podremos utilizar espiras para generar en su interior un campo magnético intenso.

Sin embargo, el cálculo del valor del campo en cualquier punto alrededor de la espira es un problema excesivamente complejo para este curso y aceptaremos los siguientes resultados:

- La dirección y sentido del campo magnético que crea una espira en su interior, depende del sentido de circulación de la corriente y se obtiene aplicando la regla del tornillo.
- El valor del módulo del campo en un punto P situado en el eje de la espira resulta ser

$$B = \frac{\mu}{2} I \frac{r^2}{R^3}$$

donde r es el radio de la espira y R la distancia desde cualquier elemento de corriente de la espira al punto considerado.

Por lo tanto, en el punto central de la espira, $R = r$, y quedará que

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

6.3. Campo magnético creado por un solenoide o bobina.

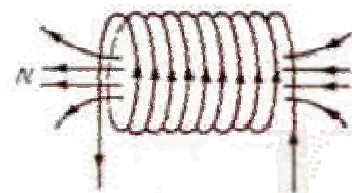
Un solenoide es, simplemente, un conjunto de espiras. Es de esperar que si en lugar de una sola espira, situamos varias, el campo magnético resultante de todas ellas sea la suma de cada uno de los campos individuales, con lo que el campo magnético se refuerza. Además, cuanto más apretadas (esto es, mayor número de espiras por unidad de longitud) se hallen las espiras, más intenso será el campo en el interior del solenoide.

Q8. Calcular el vector campo magnético producido por una espira de corriente situada en el vacío por la que circula una intensidad de 10 A y cuyo centro está situado en el punto (0,0,0) en los puntos A(0,3,0); B(0,0,0) y C(0,-2,0) si el radio de la espira es de 1 m

En un punto interior del solenoide situado sobre su eje y lo suficientemente alejado de los extremos, el campo magnético adquiere el módulo

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

donde N representa el número de espiras, y L la longitud del solenoide. Esta expresión nos confirma el hecho antes comentado de que el campo magnético aumenta "conforme más apretadas estén las espiras".



Campo magnético de un solenoide.

El aspecto que adopta el campo magnético que crea un solenoide coincide con el campo creado por un imán, por lo que en cierto sentido, puede incluso hablarse de cara norte y cara sur de un solenoide o incluso de cara norte y cara sur de una espira.

Un solenoide, por lo tanto, nos proporciona campos magnéticos intensos y prácticamente uniformes. Ese campo magnético en el interior del solenoide puede modificarse alterando el medio (ya que depende de μ). Así, si introducimos una barra de hierro entre las espiras del solenoide, al ser la permeabilidad magnética del hierro unas 2000 veces superior a la del vacío, el campo en el interior del solenoide será 2000 veces más intenso. El dispositivo que permite esto se denomina **electroimán**.

Q9. Un solenoide de 20 cm de longitud y 20 cm² de sección está formado por 100 espiras y es recorrido por una corriente de 10 A. Determinar: A) El campo magnético creado por cada una de las espiras en su centro; B) El campo creado por el solenoide en un punto de su eje suficientemente alejado de los extremos; C) El campo creado por el solenoide si se introduce en su interior una barra de hierro dulce, cuya permeabilidad magnética es 10⁻³ T.m/A

Q10. ¿Cómo se orienta una brújula al situarla en el interior de un solenoide?

Al comparar las líneas de fuerza del campo magnético producido por un imán y por un solenoide (o bobina) se observa que, cualitativamente, son iguales. Esta analogía, junto con los resultados anteriormente comentados sobre atracción y repulsión entre espiras e imanes, nos hace pensar que los imanes poseen, de algún modo, igual que las bobinas, numerosas corrientes circulares en su interior. Teniendo presente los modelos atómicos clásicos, en que los electrones

circulan alrededor del núcleo, podríamos imaginar que esas son las corrientes circulares a las que nos referimos. Pero hay otra posibilidad: considerar el espín de giro de las partículas atómicas cargadas. Hay sustancias en las que podemos admitir que el movimiento conjunto orbital de los electrones de sus muchos átomos, están de alguna manera, acoplados. De este modo, sigue en pie la idea de que las cargas eléctricas en movimiento son las creadoras de los campos magnéticos.



7. ACCIÓN DEL CAMPO MAGNÉTICO SOBRE CORRIENTES ELÉCTRICAS

Hasta aquí hemos estudiado las características del campo magnético creado por corrientes o cargas en movimiento. **Ahora nos ocuparemos de estudiar el efecto que esos campos magnéticos pueden producir en las corrientes o en las cargas móviles.** Algunas situaciones ya las hemos abordado.

7.1. Acción del campo magnético sobre una carga en movimiento.

Es repasar lo que ya se ha dicho.

Ya que la corriente más simple que podemos considerar consiste en una carga en movimiento, hemos comenzado nuestro estudio por aquí y nos ayudó a definir el propio campo magnético al hablar y establecer la denominada Fuerza de Lorentz, como fuerza que actúa sobre una carga móvil que penetra en el seno de un campo magnético:

$$\vec{F} = q \cdot \vec{v} \wedge \vec{B}.$$

La principal consecuencia que se deriva de este hecho es que al ser **la fuerza de Lorentz perpendicular a la velocidad con se mueve la carga, no modifica el módulo de la misma, sino sólo su dirección.** Por lo tanto, la trayectoria de la carga, cuando penetra en el interior del campo magnético, se verá curvada, dependiendo tal curvatura del valor del campo y de la velocidad de la partícula, como ya se ha venido comentado anteriormente. En general, para estas situaciones de trayectoria curva cerrada podremos escribir que se cumple:

$$m \frac{v^2}{r} = q \cdot v \cdot B \Rightarrow r = \frac{m \cdot v}{q \cdot B}$$

El sentido de giro dependerá del signo de la carga, y dado que F es perpendicular a v , esa fuerza NO realiza trabajo, ni introduce variaciones en la energía cinética de la carga, sólo la cambia de dirección.

Las aplicaciones prácticas de la fuerza de Lorentz son muy numerosas. Entre ellas hay que destacar **el espectrógrafo de masas**, las experiencias de Thomson para determinar la relación carga/masa del electrón, el acelerador de partículas, denominado ciclotrón, etc..

ESPECTRÓGRAFO DE MASAS. Una aplicación importante.

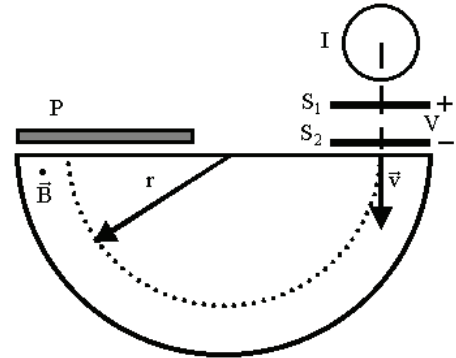
El espectrógrafo fue ideado por Aston en 1919. Se utiliza para medir la relación carga/masa de los distintos iones de los diferentes elementos químicos. Consiste en un dispositivo como el representado en la figura. Los iones emitidos por la fuente son acelerados, debido a la diferencia de potencial V que existe entre la fuente y la zona del campo magnético, de modo que penetran en la región del campo con cierta velocidad. Esta velocidad depende de la ddp (V), ya que es el campo eléctrico el que aporta la energía cinética del ión:

$$\frac{1}{2}mv^2 = q \cdot V$$

Una vez ha penetrado el ión en la región del campo magnético, su trayectoria se curvará debido a la fuerza de Lorentz, e impactará en el punto P , situado a una distancia x del lugar de entrada, tras describir una semicircunferencia cuyo radio será $r = x/2$. Se cumplirá por lo tanto que:

$$r = \frac{m \cdot v}{q \cdot B} \Rightarrow \frac{m}{q} = \frac{B^2 \cdot r^2}{2 \cdot V}$$

que nos permite determinar la relación carga/masa del ión si se conoce el campo magnético, la ddp y el radio de la curvatura.



En todos los casos citados, la carga se mueve inicialmente en dirección perpendicular al campo. Si esto no fuera así, podríamos descomponer el vector velocidad en dos componentes: una paralela al campo y otra perpendicular a él, tal y como ya se ha comentado antes. La componente paralela de la velocidad no se ve afectada por la fuerza de Lorentz, por lo que el movimiento en esa dirección será rectilíneo y uniforme, en cambio, la componente perpendicular se verá curvada. El efecto conjunto de la trayectoria será una "espiral de rizos uniformes". Si además el campo magnético no fuera uniforme, sino que, por ejemplo, aumenta en la dirección en que se mueve la carga, la curvatura de la trayectoria será más pequeña (según aumenta el campo) describiendo entonces la partícula una trayectoria helicoidal, de forma que el radio de la hélice va decreciendo.

- Q11.** Un electrón se mueve en una órbita circular de 50 cm de radio, sometido a la acción de un campo magnético uniforme, perpendicular al vector velocidad y de 10^{-3} T de intensidad. A) Calcular la velocidad del electrón y su energía cinética, expresada en eV ($1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$) B) Determinar el periodo de su movimiento orbital y la variación de energía cinética al cabo de ese periodo ($m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$, $q = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$)
- Q12.** A. Un electrón y un protón se mueven con la misma velocidad. Al penetrar en un campo magnético, ambos curvan su trayectoria en sentidos opuestos. ¿Quién curvará más su trayectoria? ¿Por qué?
 B. Determinar la fuerza magnética ejercida por el campo magnético terrestre sobre un protón de los rayos cósmicos que se mueve en el plano ecuatorial (perpendicular al campo magnético terrestre) y compararla con su peso. Datos: B cerca del ecuador $= 1,3 \cdot 10^{-5} \text{ T}$; $v_p = 10^7 \text{ m/s}$; $m_p = 1,6 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

7.2. Acción del campo magnético sobre una corriente rectilínea

Una corriente eléctrica no es más que un conjunto de cargas en movimiento, por lo que podremos ampliar nuestro estudio anterior para el caso de la acción del campo magnético sobre una corriente.

Vamos a suponer una corriente I que circula por un conductor de cierta longitud que se halla en el seno de un campo magnético uniforme B . Originalmente, el conductor forma un determinado ángulo con las líneas paralelas del campo magnético.

Como sabemos, sobre cada una de las cargas que se mueven por el conductor, actúa una fuerza cuyo módulo viene dado por $F = q.v.B \sin \alpha$, donde α es el ángulo que forman la velocidad de las cargas y el campo magnético.

Vamos a admitir que el conductor posee una sección S y una longitud L y en donde hay localizadas un determinado número de cargas por unidad de volumen, n , las cuales se mueven con igual velocidad \vec{v} . El número total de cargas que existen en un tramo del conductor de esa longitud L será: $N = n.S.L$. por lo que la fuerza total que actúa sobre ellas tendrá, de módulo:

$$F_T = N.F = N.q.v.B.\sin \alpha = n.S.L.q.v.B.\sin \alpha$$

Por otro lado, recordaremos que la intensidad de corriente quedaba definida como $I = Q/t$, por lo que $Q = I.t$. Sin embargo, si seguimos considerando nuestro elemento de conductor que posee un número n de cargas por unidad de volumen, la carga total, Q , podrá escribirse como

$$Q = q.x.S.n$$

siendo $x.S$ el volumen elemental en donde están localizadas las n cargas.

De esta forma,

$$I = \frac{q.n.S.x}{t} = q.n.S.v$$

pues x/t representa la velocidad (rapidez) con que se mueven las cargas en el conductor.

Así las cosas, la fuerza que actúa sobre el conductor tiene de módulo: $F = I.L.B \sin \alpha$, pero esta expresión se corresponde con el módulo del producto vectorial:

$$\vec{F} = I.\vec{L} \wedge \vec{B}$$

donde el vector L tiene el mismo sentido que la intensidad de corriente. Esta última expresión se conoce con el nombre de **ley de Laplace**.

Una consecuencia interesante de la expresión anterior es la atracción o repulsión que existe entre dos líneas de corriente paralelas. Ello se debe a que, como sabemos, cada una crea un campo magnético que actuará sobre la otra, y como consecuencia de la ley de Laplace, aparezca una fuerza entre ambas (sobre cada una de ellas: acción/reacción). Como resultado de estas fuerzas, las líneas se atraen o repelen según el sentido de la corriente que circula por ellas. Volveremos sobre esto un poco más adelante.

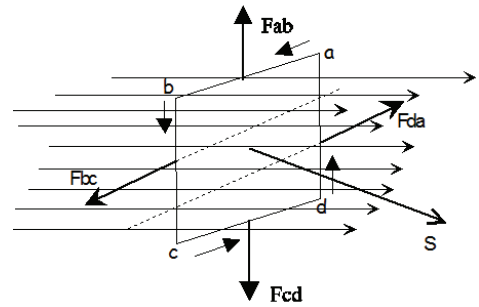
Q13. ¿Es posible que sobre un conductor rectilíneo por el que circula una corriente, situado en el interior de un campo magnético, no actúe ninguna fuerza?

Q14. Un conductor de 10 cm de longitud está situado sobre el eje OX. Por el mismo circula una corriente de 5 A, dirigida hacia las x negativas. En la región en la que se sitúa el conductor existe un campo magnético uniforme de módulo 0,01 T, dirigido según OZ, en el sentido de las z crecientes.

- A) Hallar el valor de la fuerza que actúa sobre el conductor.
- B) Igual si el campo es paralelo al plano XZ y forma un ángulo de 60° con OZ.
- C) Lo mismo si el campo tiene la dirección del eje X

7.3. Acción de un campo magnético uniforme sobre una espira rectangular de corriente. Momento magnético.

Imaginemos una espira rectangular inserta en un campo magnético uniforme y por la que circula una corriente de intensidad I . Supongamos que dos de los lados, bc y da tienen de longitud l_1 y su dirección es perpendicular a la de las líneas de fuerza del campo magnético; los otros dos lados ab y cd tienen de longitud l_2 y su dirección forma un ángulo β con una dirección perpendicular a la de las líneas del campo (ver figura).



La fuerza magnética sobre cada uno de los lados de la espira puede obtenerse **aplicado la ley de Laplace** por tratarse de corrientes rectilíneas. De esa forma, las fuerzas F_{ab} y F_{cd} sobre los lados ab y cd son del mismo módulo y dirección, pero de sentidos opuestos, por lo que su resultante es nula. Del mismo modo, las fuerzas F_{cd} y F_{da} sobre los lados bc y da también poseen el mismo módulo y opuestos sentidos, por lo que igualmente su resultante también es cero. Pero hay una diferencia muy importante con respecto a las otras dos y es que **las direcciones de F_{bc} y F_{da} son paralelas por lo que constituyen un par de fuerzas.**²

Representado por $|F|$ el módulo de cualquiera de estas dos fuerzas, el momento de dicho par vale, en módulo:

$$|\vec{M}| = |F|l_2 \sin \beta$$

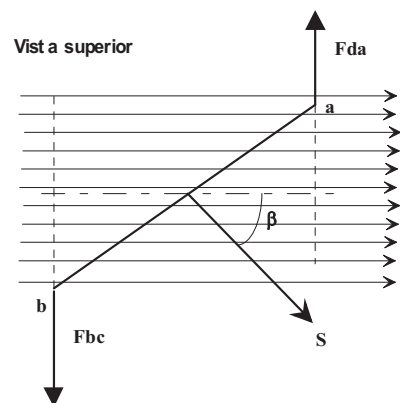
La dirección y sentido de M vienen dados por la regla del "sacacorchos" (en el caso de la figura, la dirección sería vertical y el sentido hacia arriba). Como la dirección de la corriente que circula por los lados bc y da es perpendicular a la dirección del campo, el módulo de la fuerza magnética sobre cualquiera de esos lados será:

$$|\vec{F}| = Il_1 |\vec{B}|$$

que sustituyendo en la expresión anterior:

$$|\vec{M}| = I \cdot l_1 l_2 |\vec{B}| \sin \beta \Rightarrow |\vec{M}| = IS |\vec{B}| \sin \beta$$

donde S representa la superficie de la espira. Este momento, tiende a girar la espira de modo que su plano resulta perpendicular al campo.



Si representamos la superficie S mediante un vector perpendicular a la superficie, de módulo su valor y sentido dado por la regla de la mano derecha aplicada a la corriente circulante, podremos escribir que:

$$\vec{M} = I(\vec{S} \wedge \vec{B})$$

Dado que el vector IS se lo conoce con el nombre de momento dipolar magnético, \vec{m} , podemos escribir que

$$\vec{M} = \vec{m} \wedge \vec{B}$$

Así, **el efecto del par de fuerzas de momento M sobre la espira de corriente, es provocar un giro** que tiende a orientarla de modo que se coloque perpendicularmente a la dirección de las líneas del campo magnético. En esa posición, el momento dipolar tiene la misma dirección que el campo, por lo que el momento M es cero, y como la fuerza total sobre la espira también es nula, se habrá alcanzado el equilibrio.

Aunque las ecuaciones anteriores se han obtenido para una espira rectangular, también son aplicables para espiras de cualquier otra forma. Si se trata de n espiras iguales, superpuestas y con el mismo sentido e intensidad de la corriente, los momentos de cada una de las espiras tienen el mismo módulo, dirección y sentido, por lo que el momento total se obtiene como suma de los momentos de cada una de las espiras, es decir:

$$\vec{M} = n(\vec{m} \wedge \vec{B})$$

²Cuando sobre un cuerpo actúan dos fuerzas iguales en módulo, de opuestos sentidos y direcciones paralelas, ese cuerpo tiende a girar. Esta situación frecuente se estudia en física mediante la magnitud MOMENTO. El momento, de un par de fuerzas queda definido como el producto vectorial de una de ellas por la distancia que las separa. En realidad, esta magnitud es un caso particular del MOMENTO de una fuerza respecto de un punto.

PROBLEMAS DE SÍNTESIS

1. ¿En qué dirección ha de moverse un electrón en el interior de un campo magnético para que la fuerza que éste ejerce sobre él sea nula? ¿Y un protón?
2. Determinar la rapidez con que se mueve un electrón en el interior de un campo magnético de 1 T dirigido hacia las X crecientes, si sobre el mismo actúa una fuerza que resulta ser la máxima posible, de módulo 10⁻¹⁰ N. Tal fuerza está dirigida hacia las Z decrecientes.
3. Por un conductor recto y muy largo circula una corriente de 100 A. Calcula el campo magnético que crea en puntos situados a 10, 20, y 100 cm de distancia del centro del conductor.
4. Determinar el campo magnético que crea en su centro una espira cuadrada de 3 m de lado, (situada en el vacío) por la que circula una corriente de 1 A. La espira está situada en el vacío. Considerar cada lado como un conductor recto e indefinido.
5. Un alambre recto e indefinido, situado en el vacío y por el que circula una corriente, crea en un punto a 10 cm del mismo, un campo magnético de 6.10⁻⁵ T. Calcular la intensidad de corriente que circula por el alambre.
6. SELECTIVIDAD, JUNIO DE 1996 (Andalucía)
Dada la ecuación $\mathbf{F} = q \cdot \mathbf{E}$, a) indicar qué fenómeno físico representa y qué significa cada símbolo. b) escribir una ecuación análoga para el campo gravitatorio, indicando también el significado de cada símbolo.
7. Con intención de determinar el campo magnético (uniforme) que existe en una zona del espacio, se lanza un electrón con una velocidad de 2.10⁸ m/s en diferentes direcciones, observándose lo siguiente:
 - * Cuando se mueve en el sentido de las Y crecientes, el electrón no se desvía.
 - * Cuando se mueve en el sentido de las Z crecientes, la fuerza sobre el electrón es de 10⁻⁹ N dirigida hacia las X positivas.Determina: A) el valor del campo magnético, indicando su dirección y sentido;
B) El valor de la fuerza que actúa sobre el electrón, cuando se mueva en el sentido de las X crecientes.
8. Un electrón se mueve en una órbita circular de 50 cm de radio, sometido a la acción de un campo magnético uniforme, perpendicular al vector velocidad y de 10⁻³ T de intensidad. Calcula: A) la velocidad del electrón y su energía cinética, expresada en eV; B) el periodo de su movimiento orbital. (1 eV = 1,6.10⁻¹⁹ J)
9. Un electrón que se mueve en el sentido positivo del eje OX con una velocidad de 25000 m/s penetra en una región en la que existe un campo magnético de 5 T dirigido en el sentido negativo del eje OZ. Calcular: a) aceleración (vector) del electrón; b) radio de la órbita descrita y periodo orbital. (Buscar los datos necesarios)
10. Un electrón con velocidad de 10⁴ ms⁻¹ en el sentido positivo del eje OX penetra en una región en la que existe un campo magnético de 0,5 T en el sentido positivo del eje OZ. Calcular: a) la ddp necesaria para que el electrón adquiera la energía cinética inicial; b) campo eléctrico que hay que aplicar para que el electrón mantenga rectilínea su trayectoria (Sol.: a) 284 μ V; b) 5000 j N/C)
11. Por una espira rectangular de 10 x 20 cm, situada en el plano XY, circula una corriente de 5 A en el sentido horario. Se aplica un campo magnético de 2 T dirigido en el sentido positivo del eje OY. Calcular: a) la fuerza magnética sobre cada lado de la espira; b) momento sobre la espira.
12. Uno de los procedimientos para separar los isótopos ²³⁵U y ²³⁸U se basa en la diferencia en el radio de sus trayectorias en un campo magnético. Suponer que átomos de U simplemente ionizados parten de una fuente común y se mueven perpendicularmente a un campo magnético uniforme. Encontrar la máxima separación de los haces cuando el radio de curvatura del haz de ²³⁵U es de 0,5 m en un campo de 1,5 T: a) si las energías son las mismas; b) si las velocidades son las mismas (Suponer que las masas atómicas, expresadas en uma, coinciden con sus respectivos números másicos).
13. Un electrón parte del reposo y es acelerado por una ddp de 100 V. Si, con la velocidad que adquiere, penetra en un campo magnético perpendicularmente a la dirección del campo, ¿qué radio de órbita describirá? El campo magnético es de 5 gauss.

14. Una carga positiva de 5 mC se mueve con una velocidad dada por la expresión

$$\vec{v} = 5\vec{i} - 5\vec{k}$$

en el interior de un campo magnético

$$\vec{B} = \vec{i} + 2\vec{j} - \vec{k}$$

Deducir la fuerza que actúa sobre dicha carga.

15. Calcular la fuerza que ejerce sobre un conductor rectilíneo de 0,15 m de longitud, un campo magnético perpendicular a él, de $1,2 \cdot 10^{-4}$ T, siendo 5 A la intensidad de corriente que lo recorre.

16. Por un conductor recto, dirigido a lo largo del eje OY, circula en el sentido positivo de ese eje, una intensidad de corriente de 20 A. Calcular la fuerza que el campo magnético

$$\vec{B} = 2\vec{i} + 3\vec{k}$$

ejerce, por unidad de longitud, sobre dicho conductor.

17. La energía cinética de un electrón vale $6 \cdot 10^{-16}$ J. Ese electrón penetra perpendicularmente a las líneas de inducción de un campo magnético de 0,004 T. Determina el radio de la trayectoria que describe el electrón.

18. En un mismo punto de un campo magnético dejamos en libertad un protón y un electrón, dotados con la misma velocidad, perpendicular a las líneas del campo. Deducir la relación que existe A) entre los radios de las órbitas que describen; B) entre los periodos de las mismas.

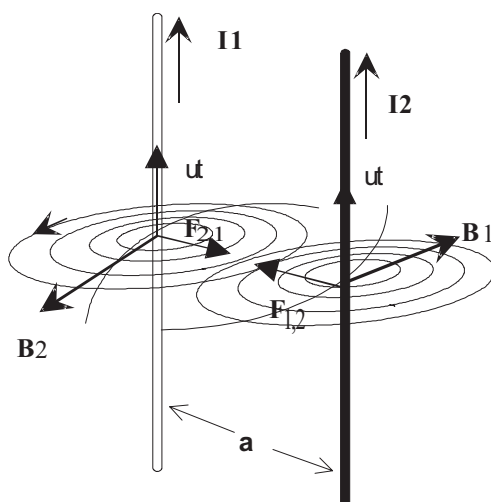
19. Una bobina está formada por 100 espiras de alambre, cada una de 3 cm de radio. Por ella circula una corriente de 2 A y está situada en el interior de un campo magnético uniforme de 0,01 T. Determinar el valor del momento del par de fuerzas que actuará sobre la bobina en los siguientes casos: A) cuando el momento magnético de la bobina forme un ángulo de 0° con la dirección del campo; B) cuando el ángulo sea de 60° ; C) cuando forme 90° .

20. Calcula el valor del par máximo que se ejerce sobre una bobina formada por 1000 espiras de 0,5 cm de radio, por la que circula una corriente de 1 A, al situarla en el interior de un campo magnético uniforme de 0,1 T.

21. (SELECTIVIDAD LOGSE. JUNIO DE 1999) Dos partículas cargadas se mueven con la misma velocidad v , al aplicarles un campo magnético perpendicular a esa velocidad, se desvían en sentidos contrarios y describen trayectorias circulares de radios distintos. A) ¿Qué se puede decir de las características de estas partículas? B) Si en vez de aplicarles un campo magnético se les aplica un campo eléctrico paralelo a su trayectoria, indica razonadamente, cómo se mueven las partículas.

22. DE SELECTIVIDAD. JUNIO 2001. Una partícula cargada penetra en un campo eléctrico uniforme con una velocidad perpendicular al campo. A) Describa la trayectoria seguida por la partícula y explique cómo cambia su energía; B) Repita el apartado anterior si en vez de ser un campo eléctrico fuera un campo magnético.

8. FUERZA MAGNÉTICA ENTRE DOS CORRIENTES RECTILÍNEAS INDEFINIDAS



En una ocasión se señaló que una de las experiencias que confirma que el magnetismo tiene su origen en cargas eléctricas en movimiento, era el de hacer circular corrientes conductoras paralelas y observar el efecto de atracción o repulsión que se produce entre ellos.

Ahora vamos a conocer más a fondo ese efecto en el caso de corrientes rectilíneas. Para ello, consideremos dos conductores rectilíneos muy largos y paralelos, de longitudes L_1 y L_2 y por los que circulan corrientes de intensidades I_1 e I_2 , respectivamente y separadas una distancia a . Como por el conductor rectilíneo L_1 circula una corriente de intensidad I_1 , ese conductor crea un campo magnético cuya intensidad en un punto situado a cierta distancia a viene dada, según vimos, por la expresión

$$B_1 = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi a}$$

cuya dirección es, como sabemos, tangente a la circunferencia de radio a y cuyo sentido es el que indica la punta de los dedos de la mano derecha.

Este campo magnético ejerce una fuerza sobre la corriente I_2 que circula por el conductor L_2 cuyo valor, como sabemos, es:

$$\vec{F}_{21} = I_2 \vec{L}_2 \wedge \vec{B}_1 = I_2 L_2 (\vec{u}_t \wedge \vec{B}_1)$$

cuya dirección es perpendicular tanto a \vec{B}_1 como a L_2 , que a su vez, son perpendiculares entre sí, y su sentido es hacia el conductor L_1 . (Ver figura anterior).

El módulo de esta fuerza vale, por lo tanto, $F = I_2 L_2 B_1$, y sustituyendo el valor del módulo del campo:

$$|\vec{F}| = I_2 L_2 |\vec{B}_1| = I_2 L_2 \frac{\mu_0 I_1}{2\pi a}$$

El valor de la fuerza por unidad de longitud $\vec{f}_{21} = \vec{F}_{21}/L_2$ para ese conductor es:

$$\vec{f}_{21} = \vec{F}_{21}/L_2 = \frac{I_2 L_2 \frac{\mu_0 I_1}{2\pi a}}{L_2} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi a} \text{ (N/m)}$$

Resulta fácil deducir que, por cada unidad de longitud del conductor L_1 , actúa otra fuerza \vec{f}_{12} cuyo módulo y dirección coinciden con los de \vec{f}_{21} pero en sentido opuesto.

El resultado obtenido indica que **dos corrientes rectilíneas paralelas del mismo sentido se atraen** con una fuerza que, por unidad de longitud, es directamente proporcional al producto de sus intensidades e inversamente proporcional a la distancia que las separa. Si las corrientes son "antiparalelas", tal fuerza será de repulsión (estudiar esta situación).

- Q15.** Por un cable de longitud indefinida y horizontal, circula una corriente de 100 A. Se coloca paralelamente a él y por encima, un alambre de densidad lineal 8 g/m por el que circula una corriente de 20 A ¿A qué altura quedará suspendido este alambre por la repulsión magnética? (Despreciar la sección de los alambres).
- Q16.** Un topógrafo está utilizando una brújula 7 m por debajo de una línea de alta tensión que lleva una corriente de 100 A. 1) ¿Alterará esta corriente la lectura de la brújula? ¿En qué caso?; 2) En el supuesto de que la alterara, determinar el ángulo que desviará la brújula, suponiendo que la línea de corriente tuviera dirección NS y que la componente horizontal del campo magnético terrestre sea 0,2 gauss aproximadamente. (Suponer la experiencia en el vacío)
- Q17.** Calcula la fuerza que se ejercen entre sí dos cables de conducción eléctrica que transportan 1500 A, (a una ddp cte. de 10^5 V), entre dos postes separados 50 m si la distancia entre los cables es de 1 m.

8.1. Definición Internacional de Amperio.

Suele ser bastante frecuente definir las distintas magnitudes eléctricas tomando como base la carga. Sin embargo, en el Sistema Internacional de unidades, la carga eléctrica NO es magnitud fundamental, sino la intensidad de corriente. La definición de amperio, que es la unidad de intensidad de corriente en el S.I., se basa en el efecto de atracción (o repulsión) entre corrientes rectilíneas paralelas:

Amperio es la intensidad de una corriente eléctrica rectilínea e indefinida que ejerce una fuerza de $2 \cdot 10^{-7}$ N sobre cada metro de otra corriente igual y paralela, situadas ambas en el vacío y separadas 1 metro.

Si en la última ecuación despejamos la permeabilidad magnética μ_0 y tomamos $I_1 = I_2 = 1$ A, la distancia $a = 1$ metro y $f = 2 \cdot 10^{-7}$ N/m, resultará:

$$\mu_0 = \frac{2\pi a |\vec{f}|}{I_1 I_2} = \frac{2\pi \cdot 2 \cdot 10^{-7} \text{ m} \frac{\text{N}}{\text{m}}}{1 \text{ A}^2} = 4\pi 10^{-7} \text{ N/A}^2$$

que es el valor ya conocido para la permeabilidad magnética en el vacío.

9. FLUJO MAGNÉTICO y CORRIENTES ALTERNAS.

De la misma manera a como se hizo con el campo eléctrico (e incluso con el gravitatorio) podemos definir el concepto de **flujo de un campo magnético a través de una superficie**, que de acuerdo con lo entonces hablado, quedará definido como:

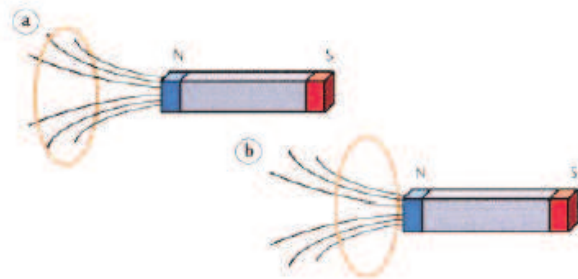
$$\Phi = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S}$$

La **unidad de flujo magnético es el weber (wb)**. Un weber es el flujo de un campo magnético uniforme de un Tesla a través de una superficie de un metro cuadrado colocada perpendicularmente a la dirección de las líneas del campo.

$$\text{Wb} = \text{T} \cdot \text{m}^2 = \text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \text{C}^{-1} = \text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{A}^{-1}$$

De esta definición resulta claro que $1 \text{ T} = 1 \text{ wb}/1 \text{ m}^2$ con lo que la intensidad del campo magnético se puede expresar también en Wb/m^2 en lugar de T.

Según el **teorema de Gauss** visto para el campo eléctrico, el flujo de un campo eléctrico a través de una superficie cerrada era igual al cociente q/ϵ . Sin embargo, en el campo magnético no "hay unidades magnéticas individuales", por lo que se admite como postulado fundamental que **el flujo del campo magnético a través de cualquier superficie CERRADA es siempre nulo**.



Por lo tanto, la ecuación para el flujo magnético puede terminarse así:

$$\Phi = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$$

que será la ecuación equivalente al teorema de Gauss del campo eléctrico.

Siguiendo con nuestro desarrollo, ya se ha apuntado que el magnetismo tiene su causa en corrientes eléctricas en movimiento. Podremos ahora preguntarnos si es posible generar una corriente eléctrica a partir de un campo magnético.

Hacia 1830, el inglés **Michael Faraday** (1791-1867) y el norteamericano **Joseph Henry** (1797-1878) descubrieron casi simultáneamente y de forma independiente el **fenómeno de la inducción electromagnética**: los campos magnéticos, bajo ciertas condiciones, son capaces de generar corrientes eléctricas, por lo tanto, campos eléctricos.

En principio, todo el trabajo de Henry y Faraday iba dirigido a detectar corrientes eléctricas en un circuito. El aparato que se utiliza para ello es el galvanómetro³.

Si en las cercanías de un imán en reposo hay una espira (o una bobina) a la que se la ha conectado un galvanómetro, éste no detecta el paso de corriente mientras se mantienen inmóviles ambos elementos: espira e imán; y esto independientemente de la superficie de la espira, de la "potencia" del imán y de las distancias relativas entre ambos. Esto indica, por lo tanto, que **la mera presencia de un campo magnético estático NO genera corriente eléctrica**.

En cambio, si manteniendo en reposo la espira acercamos el imán, el galvanómetro registra una corriente en la espira al desviarse su aguja del cero; si ahora alejamos el imán, la aguja del galvanómetro vuelve a desviarse pero ahora hacia el otro lado de la escala. Esto significa que **la corriente que circula por la espira al mover el imán tiene un sentido que depende de que lo acerquemos o lo alejemos de la espira** (En realidad, también depende de que el polo del imán que acerquemos sea el N ó el S).

³El fundamento del galvanómetro tiene también su origen en el efecto magnético sobre muchas espiras superpuestas (bobina). En esencia, consiste en una bobina que se enrolla alrededor de un núcleo de hierro que puede girar sobre un eje y que se encuentra en el seno de un campo magnético. Unida al eje hay una aguja que puede señalar sobre una escala y un resorte elástico, que cuando no circula corriente por la bobina, mantiene la aguja sobre una determinada posición de la escala (cero). Cuando la bobina es recorrida por una corriente, el momento producido por el campo magnético, tiende, como sabemos, a situarla perpendicularmente a la dirección de las líneas del campo, pero eso significa que el resorte se retuerce. Cuando se igualan el momento magnético de la bobina con el momento elástico del resorte, se alcanza la situación de equilibrio y la aguja señala la correspondiente posición en la escala.

Si mantenemos en reposo el imán y movemos la espira, se registra también una corriente, en forma análoga a la que se producía al mover el imán.

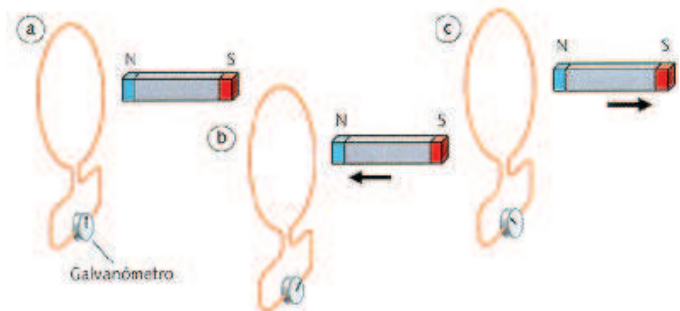
Si sustituimos el imán por otra bobina recorrida por una corriente y la dejamos en reposo respecto a la espira detectora (la conectada al galvanómetro), NO se registra corriente alguna, pero si acercamos o alejamos la bobina con corriente, igual que antes, el galvanómetro registra paso de corriente.

Estos efectos de corriente en el galvanómetro, no se producen si estando móviles los elementos participantes (espira e imán o bobina) éstos mantienen fijas sus distancias relativas (recordar el carácter relativo del movimiento).

Si mantenemos fijas las distancias relativas entre los elementos, hacemos rotar la espira detectora, el imán, la bobina con corriente, o ambos, también se genera corriente.

Hay otro caso interesante en donde se detecta paso de corriente en el galvanómetro que la controla. Es aquél en que estando ambos elementos en reposo (bobina conectada al galvanómetro y bobina productora del campo), la intensidad de la corriente que recorre la bobina varía con el tiempo (por ejemplo, al conectar o desconectar el generador). En ese caso, se genera una corriente en la espira detectora, sin que haya sido preciso ningún tipo de movimiento.

A las corrientes que se generan debido a las condiciones anteriores, se les conoce con el nombre de **corrientes inducidas**, y al conjunto de estos fenómenos que acabamos de ver, se los denomina **fenómenos de inducción**, que demuestran que los campos magnéticos, bajo ciertas circunstancias son capaces de generar corrientes eléctricas.



9.1. Origen de la corriente inducida. Ley de Henry-Faraday.

La genialidad de los trabajos de Henry-Faraday consistió, en parte, en percatarse del hecho común a todas las experiencias anteriores. No es sólo el hecho de la existencia del campo magnético para explicar la existencia de la corriente inducida, sino que en todos los casos anteriores, **hay una variación del flujo magnético** con el tiempo, a través del circuito en el que aparecen esas corrientes.

En nuestro caso, si consideramos como superficie la de la espira detectora, podemos apreciar, cómo en todas las situaciones antes comentadas, se produce una variación del número de líneas que cruzan la espira, y por lo tanto, una variación del flujo a su través.

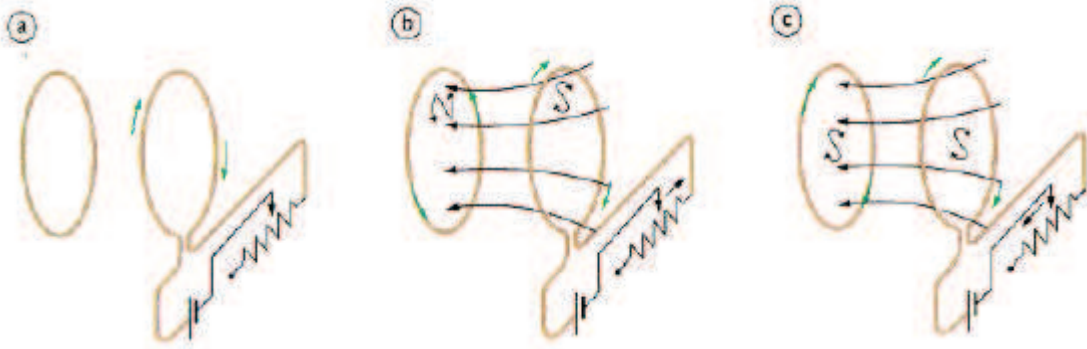
Cuando no existe el movimiento relativo entre el campo y la espira detectora, la variación del flujo se produce al conectar o desconectar el circuito que genera el campo. De este modo, el flujo se altera por modificarse el campo **B**.

Cualitativamente, la ley de Henry Faraday puede enunciarse diciendo que siempre que el flujo magnético a través de un circuito varíe con el tiempo, aparecerán en él corrientes inducidas.

Para cuantificar la ley de Henry-Faraday, ha de conocerse el valor de la corriente inducida, la cual varía dependiendo de la resistencia eléctrica de la espira. Por ese motivo, resulta más conveniente caracterizar la corriente por **la fuerza electromotriz**. De esta forma, la ley de Henry-Faraday (también conocida a veces como ley de Lenz-Faraday) para la inducción electromagnética puede enunciarse de la siguiente forma:

“En todo circuito cerrado atravesado por un flujo de campo magnético variable con el tiempo, se induce una fuerza electromotriz cuyo valor es igual y de signo opuesto a la derivada del flujo con respecto al tiempo”

$$\varepsilon = - \frac{d\Phi}{dt}$$



9.2. Sobre el sentido de la fem inducida: ley de Lenz.

El estudio cuidadoso de las experiencias de inducción anteriores, llevadas a cabo por Henry y Faraday, pone de manifiesto que **el valor de la corriente inducida depende de la rapidez con que se varíe el flujo**, y que el sentido en que esa corriente recorre la espira es diferente si el flujo del campo magnético a través de esa espira crece o disminuye. En todos los casos, se observa que **el sentido de la corriente inducida es tal que se opone siempre a la variación del flujo** del campo inductor a través de la espira; por tanto, si la variación del flujo es positiva, el sentido de la corriente es negativa y a la inversa. **El propio signo negativo de la ley de Faraday indica** cuál debe ser el sentido de la corriente inducida. Sin embargo, fue Lenz quien en 1834 describió dicho sentido de otro modo al enunciar la ley que lleva su nombre:

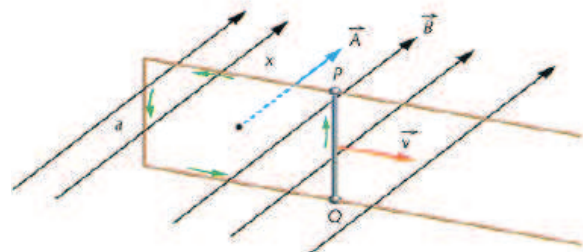
"El sentido de la corriente inducida es tal, que se opone a la causa que la produce"

Así sin más, la definición es demasiado concisa y precisa aclararse. Para ello imaginemos una situación como la representada en la última figura. Al acercarse el imán a la espira, el flujo a través de ésta aumenta, ya que es mayor el número de líneas de fuerza que la cruzan. La ley de Lenz viene a decirnos que la corriente inducida en la espira ha de tener un sentido tal que se oponga a ese aumento de flujo. Como sabemos, al circular la corriente inducida por la espira detectora, ésta crea a su vez un campo magnético. Bien, pues ese campo magnético creado ha de ser de tal naturaleza que **SU FLUJO** contrarreste el aumento de flujo debido al acercamiento del imán.

Así pues, **la ley de Lenz se reduce a afirmar que la corriente inducida tiende a mantener la situación establecida**. Si intentamos aumentar el flujo a través de un circuito, se induce una corriente que tiende a hacer disminuir el flujo.

La genialidad de los trabajos de Henry-Faraday consistió, en percatarse del hecho común a todas las experiencias de inducción. No es sólo el hecho de la existencia del campo magnético para explicar la existencia de la corriente inducida, sino que en todos los casos, hay una variación del flujo magnético con el tiempo, a través del circuito en el que aparecen esas corrientes.

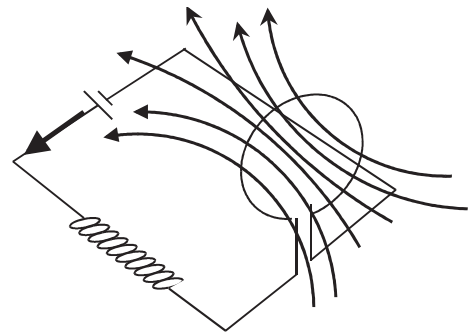
Q18. En la figura, se ha representado una espira rectangular con un lado móvil situada en el interior de un campo magnético uniforme como se ve en la figura. Deduce el sentido de la corriente inducida cuando se desplaza el lado móvil en la forma indicada.



9.3. Autoinducción

Hasta aquí hemos venido contemplando situaciones en las que existían dos circuitos (o un imán y un circuito): uno genera el campo magnético y en el otro se inducen las corrientes al variar el flujo que lo cruza. Sin embargo, es posible detectar fenómenos de inducción utilizando un único circuito.

Veamos qué sucede en un circuito como el representado en la figura. La corriente que circula por el circuito, genera un campo magnético en la zona de su alrededor. Si por alguna razón variamos la intensidad de corriente (p.e. al encenderlo o apagarlo) también se modificará el campo magnético y consiguientemente el flujo que cruza la espira, según la ley de Faraday, lo que induce una corriente en el propio circuito. A esa corriente se la denomina **corriente autoinducida** y al fenómeno causante de ella, **AUTOINDUCCIÓN**.



Supongamos que el circuito de nuestro ejemplo está provisto de un interruptor que inicialmente se halla abierto, por lo que no circula ninguna corriente por el mismo. En el momento en que cerramos el interruptor, el valor de la corriente varía hasta alcanzar cierto valor I que de acuerdo con la ley de Ohm, resulta valer $I = \varepsilon / R$, donde ε es la fem de la pila (de resistencia interna despreciable).

Ahora bien, **mientras la corriente varía desde cero hasta que alcanza su valor máximo** dado por ε/R , el campo magnético que crea varía, por lo que se autoinduce una corriente que, según la ley de Lenz, ha de oponerse a la causa que la origina. Ya que esa causa es un aumento de la intensidad, la corriente autoinducida se opondrá a ese aumento y será, por lo tanto, de sentido opuesto a I ; por lo tanto, deberá transcurrir cierto tiempo hasta que la corriente que circula alcance el valor ε/R previsto por la ley de Ohm.

Si una vez estabilizada la corriente por el circuito, se abre el interruptor (desconectamos) la intensidad cae bruscamente hasta cero. Nuevamente la variación de intensidad se traduce en la aparición de una corriente autoinducida que se opone a ese cambio; sin embargo, al estar abierto el circuito, esa corriente NO circula, sino que origina una ddp entre los extremos del interruptor que, dependiendo del valor de la intensidad que circulaba y de la proximidad de dichos extremos, se manifiesta en forma de chispa eléctrica más o menos violenta.

Por el circuito, al circular la intensidad I , sabemos que el campo magnético asociado es proporcional a esa intensidad. Por tanto, el flujo magnético también será proporcional a la intensidad de corriente, de modo que puede escribirse: $\Phi = L \cdot I$, siendo L el coeficiente de proporcionalidad.

Este coeficiente depende sólo de las características geométricas del circuito y se denomina **coeficiente de autoinducción (L)**. En el S.I. este coeficiente **se mide en Henrys (H)**. Todo circuito posee cierto coeficiente de autoinducción, L , que depende de sus características geométricas.

Q19. Un circuito está formado por una lámpara conectada en paralelo a una bobina. Basándote en los fenómenos de autoinducción descritos anteriormente, indica qué sucederá con la luminosidad de la bombilla en los siguientes casos: A) el interruptor está abierto y se cierra; B) el interruptor está cerrado y se abre; C) El interruptor está cerrado y se introduce un núcleo de hierro en el interior de la bobina.

A partir de ahora, **la autoinducción será otra característica más a considerar en los circuitos eléctricos** que manejamos siempre que en ellos se produzcan variaciones en la intensidad de corriente. En esos casos (la intensidad varía con el tiempo), el flujo a través del circuito también variará y podrá escribirse según la ley de Henry-Faraday:

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d(L \cdot I)}{dt} = -L \frac{dI}{dt}$$

- Q20.** Calcula el coeficiente de autoinducción de una bobina de N espiras y longitud l .
- Q21.** Calcular para una bobina de 400 espiras de 5 cm^2 de área y 10 cm de longitud, cuánto debe variar la corriente para que aparezca una fem autoinducida de 10 V. (Sol.: unos -10 000 A/s)
- Q22.** Dos bobinas con la misma sección y longitud, y construidas con el mismo tipo de conductor, sólo se diferencian en el número de espiras. A) ¿Cuál de las dos tiene mayor coeficiente de autoinducción?; B) Si una tiene el doble número de espiras que la otra, ¿cómo son sus respectivos coeficientes de autoinducción?
- Q23.** El coeficiente de autoinducción de una bobina de 400 vueltas es de 8 mH. ¿Cuál es el flujo magnético que pasa por una espira de la bobina cuando la corriente es de 5 mA?
- Q24.** La autoinducción de una bobina de 100 espiras muy próximas es de 0,01 H. Calcula el flujo magnético total a través de la bobina cuando la corriente es de 0,5 mA.

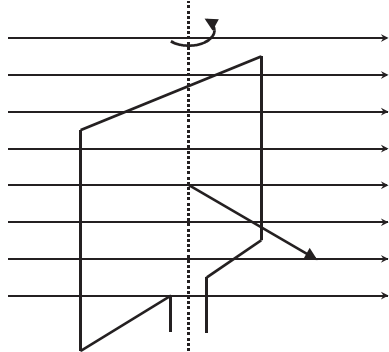
10. CAMPO MAGNÉTICO y CAMPO ELÉCTRICO: comparaciones.

A lo largo de este tema hemos venido presentando las principales características del campo magnético. Vamos a recordarlas al tiempo que las compararemos con las del campo electrostático estudiadas con anterioridad:

- La fuerza que ejerce un campo electrostático sobre una carga Q depende sólo de la intensidad de ese campo y del valor de la carga (recordar $F = Q \cdot E$); en cambio, la fuerza que ejerce un campo magnético sobre una carga Q depende de la intensidad del campo, del valor de la carga y de la velocidad con que se mueva esa carga (recordar la ley de Lorentz). Un campo electrostático ejerce una fuerza sobre una carga tanto si ésta en reposo como si se mueve; pero el campo magnético sólo la ejerce si la carga está en movimiento y, aunque se mueva, puede que esa fuerza sea nula.
- El campo electrostático realiza trabajo si una carga Q se desplaza entre dos puntos que estén a distinto potencial. En cambio, el campo magnético NO realiza trabajo ya que la fuerza magnética sobre una carga es perpendicular a la velocidad (o al desplazamiento), en cuyo caso el trabajo es nulo (recordar la definición física de trabajo). Como consecuencia de esto, si una carga se desplaza entre dos puntos de un campo eléctrico que están a diferente potencial, su energía cinética varía; por el contrario, la energía cinética de una carga que se mueve en un campo magnético permanece constante.
- El hecho de que el campo electrostático sea conservativo, nos permitía asociar a la carga una energía potencial electrostática; sin embargo, no tiene sentido hablar de energía potencial magnética asociada a una carga, puesto que EL CAMPO MAGNÉTICO NO ES CONSERVATIVO.
- El campo electrostático creado por una carga puntual en reposo tiene simetría esférica en torno a la carga, en cambio, el campo magnético creado por una carga en movimiento tiene "simetría de rotación" respecto de la dirección de movimiento de la carga. Las líneas de fuerza del campo electrostático son radiales y las superficies equipotenciales son esféricas y centradas en la posición de la carga. Las líneas del campo magnético son circunferencias perpendiculares a la dirección de movimiento de la carga y centradas en la recta correspondiente a esa dirección.
- Las líneas del campo electrostático son abiertas, mientras que las del campo magnético son cerradas.
- El flujo del campo electrostático a través de una superficie cerrada sólo es nulo sin la carga total contenida en el interior de esa superficie lo es; pero el flujo del campo magnético a través de una superficie cerrada SIEMPRE es nulo.
- El campo magnético carece de "fuentes escalares": no se conocen cargas magnéticas o monopolos magnéticos.

11. ELECTROMAGNETISMO y CORRIENTE ALTERNA

Una de las mayores y mejores aplicaciones del electromagnetismo reside en la posibilidad de generar corrientes eléctricas de uso habitual. Algo ya de esto se ha venido comentando indirectamente en las páginas anteriores. Vamos ahora a acercarnos un poco más a su estudio.



Supongamos una espira en el seno de un campo magnético uniforme (ver figura). Puede girar, y al hacerlo, el flujo que la cruza variará con el tiempo, por lo que de acuerdo con la ley de Faraday, se inducirá en la espira una corriente que vendrá caracterizada por una fem

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt}$$

Que podremos escribir:

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d(\vec{B} \cdot \vec{S})}{dt} = -\frac{d(B \cdot S \cdot \cos \alpha)}{dt} = -B \cdot S \cdot \frac{d(\cos \alpha)}{dt}$$

Si suponemos que la espira gira con rapidez angular constante, ω , e inicialmente los vectores campo y superficie están orientados en el mismo sentido ($\alpha = 0$), el ángulo que formarán esos vectores tras un cierto tiempo, será $\alpha = \omega \cdot t$ y por lo tanto:

$$\varepsilon = -B \cdot S \cdot \frac{d(\cos \alpha)}{dt} = B \cdot S \cdot \omega \cdot \text{sen } \omega t$$

que podremos escribir del modo:

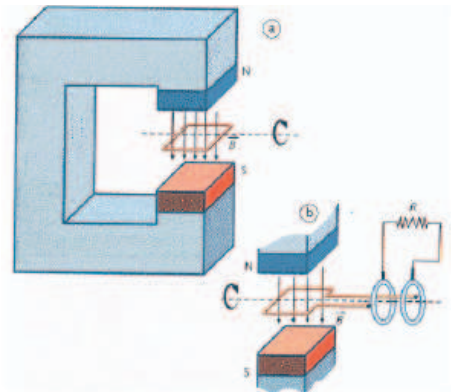
$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \text{sen } \omega t$$

donde $\varepsilon_0 = B \cdot S \cdot \omega$

A la rapidez angular ω se la denomina también frecuencia angular y no ha de confundirse con la frecuencia del giro, $f = 1/T$.

Si analizamos la última ecuación vemos:

- la fem inducida en la bobina (espira) varía con el tiempo. Al valor de ε en cualquier instante se lo denomina fem instantánea.
- el valor de la fem varía periódicamente. El periodo es $T = 2\pi/\omega$ y por tanto, la frecuencia será $f = \omega/2\pi$
- el valor máximo de la fem es $\varepsilon_0 = B \cdot S \cdot \omega$ que resulta ser directamente proporcional a la rapidez angular de giro.
- al ser la fem una función sinusoidal, su signo cambia dos veces a lo largo de un periodo; por tanto, la corriente inducida cambia de sentido $2 \cdot f$ veces por segundo.



Por ello, a partir de ahora, una corriente la llamaremos corriente alterna si posee las anteriores características, es decir, cuando su fem varía sinusoidalmente con el tiempo bajo la forma

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \text{sen } \omega t$$

Q25. Una bobina formada por 100 espiras circulares de 5 cm de radio gira en el interior de un campo magnético horizontal uniforme de 0,2 T alrededor de un eje vertical que pasa por su centro, a razón de 1000 rpm. A) Calcula el valor de la fem inducida en cualquier instante; B) Valor máximo de la fem.

Q26. ¿Con qué velocidad angular debe girar la bobina de un alternador formado por 100 espiras cuadrangulares de 5 cm de lado, situada en un campo magnético uniforme de 0,5 T, perpendicular al eje de rotación, para obtener una fem inducida de 220 V de valor máximo? ¿Cuál es la frecuencia de dicha corriente?

Lógicamente, con los elementos hasta aquí estudiados es posible "fabricar circuitos" con una serie de características notablemente diferentes a los montados con corriente continua. Por lo pronto, ahora, los generadores no suministran una fem uniforme, sino variable, representados con el símbolo \sim , a ello, se une la presencia de una serie de características más, como son los nuevos elementos: bobinas, espiras, autoinducciones, etc... que dan otro enfoque a la electricidad. Pero eso ya es otro tema que lamentablemente no podemos ver aquí.

11.1 UN CASO IMPORTANTE: Transformadores.

Un transformador está constituido por DOS circuitos acoplados, conocidos como primario y secundario. Cuando se aplica al circuito primario una fem variable, se produce una fem, también variable en el secundario. Normalmente el primario y el secundario están enrollados alrededor de un núcleo de hierro con el fin de conectar el flujo magnético (ver figura). Cuando se aplica la fem variable V_1 al primario (de N_1 vueltas de cable) se produce una corriente en este circuito, que produce un campo magnético localizado casi por completo dentro del núcleo de hierro. Si ϕ es el flujo magnético a través de una vuelta del primario, el flujo total será $N_1 \cdot \phi$ y escribiremos que

$$V_1 = - N_1 d\phi/dt$$

El mismo flujo pasará por las N_2 vueltas del secundario. Por lo tanto, la fem que aparece en el secundario es

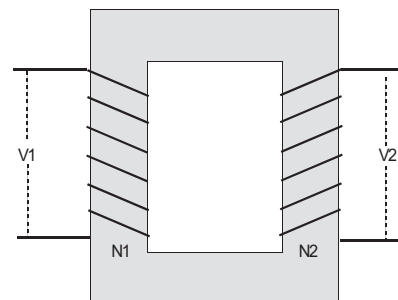
$$V_2 = - N_2 d\phi/dt$$

El cociente de las dos fems es

$$V_2/V_1 = N_2/N_1$$

lo que significa que la fem que se obtiene en el secundario guarda una proporción N_2/N_1 con la fem aplicada en el primario. Así, cuando $N_2/N_1 > 1$ hablamos de un transformador de aumento de voltaje, y cuando es < 1 se trata de un transformador de disminución del voltaje.

En realidad este análisis es un tanto simple, ya que no considera varios factores como pérdidas de flujo y de energía, o las diferencias de fase y el efecto del circuito externo conectado al secundario.



PROBLEMAS DE SÍNTESIS

NIVEL 1.

1. DE SELECTIVIDAD. Sobre dos railes paralelos al eje OX, situados en un plano horizontal y separados 30 cm, se apoya una barra de cobre de 0,1 kg. Se hace circular de un rail a otro, a través de la barra de cobre, una corriente de 30 A. Calcular el campo magnético que habría que aplicar para que la barra deslice sobre los railes a velocidad constante, si el coeficiente de rozamiento barra-railes vale $\mu = 0,2$. (Sol.: 21,8 mT en dirección vertical)

2. DE SELECTIVIDAD. Dos conductores rectilíneos paralelos, recorridos por corrientes del mismo sentido de 10 y 20 A respectivamente, están separados entre sí 10 cm. Calcular: a) el campo magnético en un punto situado a 10 cm del primer conductor y a 20 cm del segundo; B) fuerza por unidad de longitud sobre un conductor rectilíneo situado en el mismo plano, paralelo y equidistante de ambos. (Dar el resultado en función de I)

3. DE SELECTIVIDAD. Por una espira rectangular de 10x20 cm, situada en el plano XY, circula una corriente de 5 A en el sentido horario. Se aplica un campo magnético B de 2 T dirigido en el sentido positivo del eje OY. Calcular: a) fuerza magnética sobre cada lado de la espira; b) momento sobre la espira.

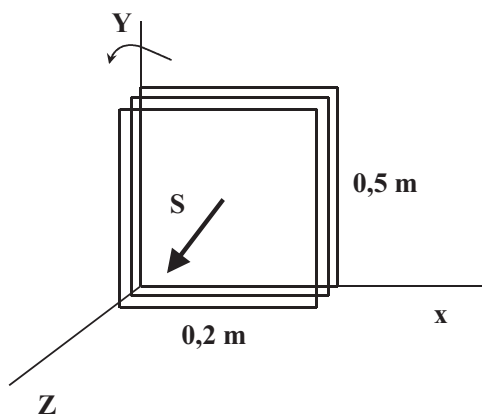
4. Un alternador está formado por una bobina de 1000 espiras circulares de 3 cm de radio, que gira alrededor de un eje vertical que pasa por su centro, en el interior de un campo magnético de 0,2 T, uniforme y horizontal, a 1000 rpm. Determinar: A) el valor de la fem inducida en cualquier instante; B) el máximo valor de la fem inducida; C) la frecuencia de la corriente inducida; D) el número de veces que cambia de sentido la corriente en un segundo.

5. Sea un circuito formado por N espiras, cada una de ellas de área S, colocado perpendicularmente a un campo magnético, cuyo módulo varía con el tiempo según la expresión $B = B_0 \cdot \sin \omega \cdot t$. Determinar la fem inducida en el circuito y el valor máximo de dicha fem.

6. DE SELECTIVIDAD: Junio de 1996 (Andalucía, distrito único)

a) Inducción electromagnética; ley de Lenz-Faraday.

b) Explicar el significado físico de la citada ley y, en particular, el signo menos que aparece en ella.



7. Una espira rectangular se mueve en una región en la que el campo magnético está dado por $B_x = 0$; $B_y = 0$; $B_z = 6$ T. Suponiendo que en el instante inicial, $t = 0$, la espira se encuentra en la posición dibujada y que gira a razón de 10 rpm en el sentido dibujado, hallar: a) la fem inducida en la espira en cualquier instante; b) el valor máximo de esa fem y en qué instante se produce; c) la frecuencia de la corriente inducida; d) la intensidad que recorre la espira, si su resistencia es de $0,2 \Omega$.

8. Una espira de alambre de $0,25 \text{ cm}^2$ de área se halla en un campo magnético uniforme de 0,05 T. A) ¿Cómo ha de situarse la espira de modo que no exista flujo magnético a su través? B) ¿Cuánto vale el flujo a través de la espira cuando se coloca de forma que su plano sea perpendicular al campo?

9. Por un hilo horizontal circula una corriente rectilínea de 50 A en el sentido positivo del eje OX. A 0,5 metros de él, hay una espira rectangular de modo que su lado mayor (de 4 m) es paralelo al hilo (ancho 1 m). Hallar a) el valor del flujo magnético creado por la corriente a través de la espira rectangular; b) ¿se inducirá corriente al mover la espira paralelamente al hilo? ¿Y al alejarla o acercarla al hilo?

10. Los raíles de una vía férrea están a 1 metro de distancia, eléctricamente aislados uno del otro. Un tren, que pasa por los rieles a 100 km/h (cte.), establece una conexión eléctrica entre ellos. Si el campo magnético terrestre tiene una componente vertical de 0,15 gauss, ¿cuál será la ddp que surge entre los extremos de la conexión de los raíles? (Sol.: $4,1 \cdot 10^{-4} \text{ V}$)

11. Al penetrar un electrón en un campo magnético, actúa sobre él una fuerza que le obliga a describir una trayectoria circular. ¿Qué velocidad deberá poseer un electrón para que al penetrar perpendicularmente a las líneas de un campo magnético de 0,001 mgauss describa una circunferencia de 2 cm de radio?

12. Una bobina circular plana, de 20 espiras, tiene un radio de 10 cm. ¿Qué intensidad de corriente debe circular por ella para que la inducción magnética en su centro (campo magnético) valga $2 \cdot 10^{-4} \text{ T}$?

13. Calcular la fuerza que ejerce sobre un conductor rectilíneo de 0,15 m de longitud un campo magnético perpendicular a él, de inducción $1,2 \cdot 10^{-4} \text{ T}$, siendo 5 A la intensidad de corriente que circula por el conductor.

14. Dos conductores rectilíneos y paralelos transportan una corriente de 2 y 6 A, respectivamente, y están separados una distancia de 4 cm. ¿Qué fuerza por unidad de longitud actúa sobre ellos si a) las corrientes son del mismo sentido; b) son de sentido contrario.

15. Un generador de corriente alterna proporciona una fem máxima de 250 V con una frecuencia de 50 Hz. Al generador se conecta una resistencia de 50 ohmios y se cierra el circuito. Calcular: a) la fem en cualquier instante; b) la intensidad instantánea que circula; c) intensidad y fem en el instante $t = 10 \text{ s}$; d) valor máximo de la intensidad.

16. SELECTIVIDAD LOGSE. Ley de Lorentz. ¿En qué dirección debe moverse una carga en el seno de un campo magnético para que no aparezca fuerza sobre ella?

17. Aplica la ley de Lenz para determinar el sentido de la corriente inducida en cada una de las situaciones de la figura, donde se sabe que el polo norte del imán está a la izquierda.

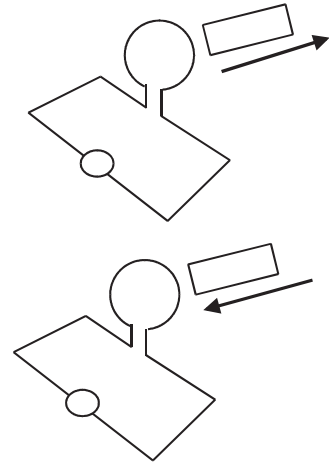
18. A. ¿De qué factores depende el coeficiente de autoinducción de un solenoide?
 B. ¿Qué le sucede a un anillo metálico si lo haces girar encima de una mesa?
 ¿Por qué?

C. El flujo magnético que atraviesa una espira varía con el tiempo, de acuerdo con la expresión:

$$\phi = 20t^4 - 6t^2 \text{ (SI)}.$$

Determina el valor de la fem inducida al cabo de 2 segundos.

D. ¿Por qué salta una chispa en un interruptor al cortar la corriente en un circuito y, sin embargo, no salta al cerrarlo?



19. Una varilla de 2 m de longitud se desplaza, con velocidad cte. y perpendicular a su eje, sobre un plano horizontal. Si la velocidad de la varilla es de 25 m/s y la componente vertical del campo magnético terrestre en ese lugar es 4.10⁻⁵ T, ¿cuál será la ddp que aparecerá entre los extremos de la varilla?

20. SELECTIVIDAD (Almería) A lo largo de dos conductores rectilíneos y paralelos, separados 3 m, circulan las intensidades I₁ (2.10⁻² A) e I₂ (4.10⁻² A) con la misma dirección y sentido. Determinar a qué distancia del conductor 1 el campo magnético vale 0.

21. SELECTIVIDAD (Burgos, 1995) A través de un conductor rectilíneo e indefinido pasa una corriente de intensidad I₁. Una espira rectangular ABCD, cuyos lados BC y DA son paralelos al conductor rectilíneo, está recorrida por una intensidad I. Calcula la fuerza que ejerce el campo magnético creado por el conductor sobre cada lado de la espira. (DATOS: BC = DA = a; AB = DC = b; distancia del conductor al lado AD = b)

22. SELECTIVIDAD (Jaén, 1995) Un solenoide de 400 vueltas tiene una longitud de 2,5 cm y una sección de 2 cm². Si por el solenoide circula una corriente de 3 A, calcular: a) el campo magnético en el interior del solenoide; b) su autoinducción.

23. SELECTIVIDAD (Madrid, 1995) Una carga eléctrica positiva, q, se mueve a velocidad constante v y entra en una región donde existe un campo magnético uniforme B, perpendicular a v. Determinar el módulo, dirección y sentido de un campo eléctrico E que, aplicado en la misma región del espacio, permita que la carga eléctrica siga en movimiento rectilíneo.

24. SELECTIVIDAD (Madrid, 1995) Por un conductor rectilíneo muy largo circula una corriente eléctrica I. Una espira cuadrada se mueve manteniéndose coplanaria con el conductor. Determinar el sentido de la corriente inducida en la espira cuando su movimiento es: a) paralelo al conductor; b) perpendicular al conductor y alejándose de él.

25. SELECTIVIDAD (Sevilla, 1995) Enunciar la ley de Lenz-Faraday de la inducción electromagnética. ¿Puede inducirse fem en una espira en un campo magnético constante?

26. SELECTIVIDAD (Valladolid, 1995) Se deja caer un electrón en el campo magnético terrestre. ¿Podrías indicar cualitativamente cómo sería su trayectoria? Razona la respuesta.

27. SELECTIVIDAD LOGSE (Salamanca, 1994) CUESTIONES.

A) ¿Qué se entiende por líneas de campo?

B) Diferencia fundamental entre las líneas del campo eléctrico y las del campo magnético.

C) Definir qué es el Amperio.

D) Dibujar una espira en un campo magnético uniforme y suponer que la hacemos girar en un sentido determinado (indicarlo). a) Indicar las posiciones de la espira en que el flujo a su través será el máximo positivo, máximo negativo y nulo; b) Indicar las posiciones en que la fem inducida tomará valores máximo positivo, máximo negativo y nulo.

28. SELECTIVIDAD LOGSE (Septbre. 1994) Se tiene un solenoide de 1m de longitud (sin núcleo) que consta de 1330 espiras por las que circula una corriente de 2,5 A. Si el diámetro del solenoide es de 0,05 m, calcular: a) el campo de inducción magnética producido en el interior del solenoide; b) el flujo magnético que lo cruza; c) si tuviese un núcleo cuya permeabilidad magnética fuese 100 veces la del vacío, ¿cuál sería el nuevo campo?

29. SELECTIVIDAD (Sevilla, 1994) Dos conductores rectilíneos de gran longitud, paralelos, están situados en el plano XY. Uno de ellos coincide con el eje OY y el otro pasa por el punto (20,0) cm. Calcular el campo magnético en los puntos (10,0) y (-10,0) cm si: a) por ambos conductores circula una corriente de 5 A en el sentido positivo del eje OY; b) se invierte el sentido de la corriente en el conductor situado sobre el eje OY.

30. SELECTIVIDAD (Andalucía, Junio 1999) Dos hilos metálicos largos y paralelos por los que circulan corrientes de 10 A, pasan por dos vértices opuestos de un cuadrado de 1 m de lado situado en un plano horizontal. Ambas corrientes discurren perpendicularmente a dicho plano y hacia arriba.

- Dibuje un esquema en el que figuren las interacciones mutuas y el campo magnético resultante en uno de los otros dos vértices del cuadrado.
- Calcular los valores numéricos del campo magnético en ese vértice y de la fuerza por unidad de longitud ejercida sobre uno de los hilos.

Nivel 2.

1. Un electrón que se mueve con una velocidad constante v , penetra en un campo magnético uniforme B , de tal modo que describe una trayectoria circular de radio R . Si la intensidad del campo magnético disminuye a la mitad y la velocidad aumenta al doble, determine.

- El radio de la órbita
- La velocidad angular.

2. Dos isótopos, de masas $19,92 \cdot 10^{-27}$ Kg y $21,59 \cdot 10^{-27}$ Kg, respectivamente con la misma carga de ionización son acelerados hasta que adquieren una velocidad constante de $6,7 \cdot 10^5$ m/s. 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. Determine la relación entre los radios de las trayectorias que describe cada isótopo, si han sido ionizados una sola vez, determine la separación entre los dos isótopos cuando han descrito una semicircunferencia.

DATOS $m_1 = 19,92 \cdot 10^{-27}$ Kg $m_2 = 21,59 \cdot 10^{-27}$ Kg $v = 6,7 \cdot 10^5$ m/s $B = 0,85$ T $q = e$

3. Dos alambres conductores paralelos de 25 m de longitud están separados por una distancia de 0,25 m y están recorridos por sendas corrientes de 160 A. Determine la fuerza que actúa entre los dos alambres cuando las dos corrientes:

- Llevan el mismo sentido.
- Llevan distinto sentido.

DATOS $I_1 = I_2 = 160$ A $d = 0,25$ m $L = 25$ m

4. Un electrón pasa a través de un campo magnético sin que se altere su trayectoria. ¿Qué se puede afirmar sobre la dirección del campo magnético?

5. Un protón y un electrón se mueven perpendicularmente a un campo magnético uniforme, con igual velocidad ¿qué tipo de trayectoria realiza cada uno de ellos? ¿cómo es la trayectoria que realiza el protón en relación con la que realiza el electrón?. Razona la respuesta. Datos: Se considera que la masa del protón es igual aproximadamente, a 1836 veces la masa del electrón.

SOLUCIÓN Una trayectoria circular de distinto sentido
 $R_p/R_e = 1836$

6. Una carga $q = +1$ C entra con una velocidad $\mathbf{v} = 3\mathbf{i} - \mathbf{j} + 2\mathbf{k}$ en el campo magnético $\mathbf{B} = -\mathbf{j} + 6\mathbf{k}$. Determinar la fuerza que actúa sobre ella.

7. Un electrón se mueve en una región en la que están superpuestos un campo eléctrico $\mathbf{E} = (2\mathbf{i} + 4\mathbf{j})$ V/m y un campo magnético $\mathbf{B} = 0,4\mathbf{k}$ (T) Determinar para el instante en el que la velocidad del electrón es $\mathbf{v} = 20\mathbf{i}$ m/s: (A) Las fuerzas que actúan sobre el electrón debidas al campo eléctrico y al campo magnético respectivamente; (B) La aceleración que adquiere el electrón.

8. Un protón y una partícula α (carga $+2e$) se mueven en un campo magnético uniforme según circunferencias de igual radio. Compara los valores de:

- Sus velocidades.
- Sus energías cinéticas
- Sus momentos angulares
- Se admite que la masa de la partícula α es igual a 4 veces la masa del protón.

SOLUCIÓN a) $v_\alpha = 1/2 v_p$; b) $E_{cp} = E_{c\alpha}$; c) $L_\alpha = 2L_p$

9. Un hilo conductor, rectilíneo e indefinido, situado en el vacío sobre el eje OZ de un sistema de referencia cartesiano OXYZ, transporta una corriente eléctrica de intensidad $I = 2$ A en el sentido positivo de dicho eje. Calcula la fuerza magnética que actuará sobre una partícula cargada con 5 C, en el instante que pasa por el punto (0, 4, 0) m con una velocidad $\mathbf{v} = 20\mathbf{j}$

10. Dos partículas materiales P1 y P2, poseen cargas iguales y de signos contrarios, en tanto que la masa de P1 es mayor que la de P2. Ambas partículas, que se mueven con la misma velocidad, penetran en un campo magnético uniforme, con una dirección perpendicular al mismo. Al entrar en el campo, las dos partículas curvan sus trayectorias en sentidos contrarios. Da una explicación razonada de lo dicho y confecciona un diagrama al efecto. ¿Cuál de ellas tendrá la trayectoria de mayor radio de curvatura?. Razona tu respuesta.

11. Un electrón penetra en una zona con un campo magnético uniforme de 10^{-3} T y lleva una velocidad de 500 m/s perpendicular al campo magnético. Determina las siguientes magnitudes del electrón en la zona con campo magnético:

- Velocidad angular
- Módulo de la fuerza que experimenta.
- Módulo del momento angular respecto del centro de la circunferencia que describe el electrón

12. Sobre un electrón que se mueve con la velocidad de 5000 Km/s actúa en dirección normal a su velocidad un campo magnético en el que $B = 8$ T. Determinar:

- El valor de la fuerza centrífuga que actúa sobre el electrón.
- El radio de la órbita descrita.
- Tiempo que el electrón tarda en recorrer la circunferencia completa
- El número de vueltas que da en un segundo
- La energía del electrón a su entrada en el campo
- La variación de potencial que debe experimentar ese electrón para pasar del reposo a la citada velocidad (se supone invariable la masa)

SOLUCIÓN a) $64 \cdot 10^{-13}$ N b) $3,5 \cdot 10^{-6}$ m c) $4,34 \cdot 10^{-12}$ s d) $2,3 \cdot 10^{11}$ Hz e) $1,125 \cdot 10^{-17}$ J f) 70,31 V

13. Un protón, un electrón y una partícula α , acelerados por la misma diferencia de potencial, entran en una región del espacio donde el campo magnético es uniforme y se mueven perpendiculares a dicho campo. Encuentra:

- La relación entre sus energías cinéticas en el momento de penetrar en el campo magnético.
- La relación entre sus velocidades en el momento de penetrar en el campo magnético.
- Si el radio de la trayectoria del protón es de 0,1 m, ¿cuáles son los radios de las trayectorias del electrón y de la partícula?

Datos : $m_p = 1u$; $m_e = 5,45 \cdot 10^{-4}u$; $m_\alpha = 4u$

14. En una misma región del espacio existen un campo eléctrico uniforme de valor 0.3 T, siendo sus direcciones perpendiculares entre sí:

- ¿Cuál deberá ser la velocidad de una partícula cargada que penetra en esa región en dirección perpendicular a ambos campos para que pase a través de la misma sin ser desviada?.
- Si la partícula es un protón, ¿cuál deberá ser su energía cinética para no ser desviado?

15. En el seno de un campo magnético uniforme se sitúan tres partículas cargadas. Una de las partículas está en reposo y las otras dos en movimiento, siendo sus vectores velocidad perpendicular y paralelo respectivamente a la dirección del campo magnético. explica cuál es la acción del campo sobre cada una de las partículas y cómo será su movimiento en él

16. En cierta región del espacio hay un campo eléctrico $\mathbf{E} = E_0 \mathbf{k}$ y un campo magnético $\mathbf{B} = -B_0 \mathbf{i}$ ¿Qué velocidad y dirección debe tener un electrón que penetre en esta región para que su trayectoria sea rectilínea?

Datos : $E_0 = 1000$ V/m ; $B_0 = 1$ T. SOLUCIÓN $V = -100$ j

17. Explica si es posible que un electrón se mueva con velocidad v , paralelamente a dos conductores y equidistante entre ellos sin cambiar su trayectoria.

18. Efectuar un análisis cualitativo del movimiento que efectúa una carga eléctrica al penetrar en un campo magnético uniforme, considerando los casos posibles referente a la dirección de entrada y signo de la carga. ¿En qué dirección ha de entrar un electrón en ese campo para que no se ejerza fuerza sobre él?

19. Un hilo conductor transporta 2 A de corriente en el sentido positivo del eje OZ. Por el punto (0,4,0) pasa otro hilo (paralelo al eje OX) que porta una corriente de 1 A hacia la parte negativa del eje OX. Calcula y dibuja el vector campo magnético en el punto (-6,0,0). En un segundo experimento, eliminamos el conductor de 2 A y fabricamos una espira rectangular con el cable de 1 A cuyas dimensiones son de 3x5 cm, de forma que situada sobre el plano XZ porta la corriente en sentido horario. Si aplicamos el campo magnético $\mathbf{B} = -1,5 \mathbf{j}$. Dibuja las fuerzas que actúan sobre cada lado de la espira y calcula su valor. ¿Girará la espira? En caso afirmativo, determina el valor del momento magnético a aplicar para que NO gire.

20. En cierta región del espacio, existe un campo magnético $\mathbf{B} = 6i$ (S.I.). Introducimos un protón con la velocidad $\mathbf{v} = -100 \mathbf{k}$. Se pide:

- Hacia dónde deberíamos aplicar un campo eléctrico para conseguir que el protón no se desvíe una vez dentro del campo magnético? ¿Cuál habría de ser su valor?
- En otro experimento distinto, dejamos el campo magnético anterior e introducimos un hilo de corriente en su interior, de modo que transporta 0,5 A en el sentido positivo del eje OY. Dibuja y calcula la fuerza que padece este hilo conductor (por unidad de longitud).
- Con el mismo hilo de antes, y el mismo campo magnético, nos fabricamos una espira de 2x6 cm, de modo que la corriente de 0,5 A circula en sentido horario. El plano de la espira así construida está sobre el plano XY. Dibuja las fuerzas que padece cada lado de la espira y determina el flujo que la atraviesa entonces.

d) Eliminamos la corriente de la espira anterior y la hacemos girar a 800 rpm de modo que el eje de giro es paralelo al eje OY. Determina la fuerza electromotriz inducida en cualquier instante y cuándo alcanzará ésta su valor máximo por primera vez.

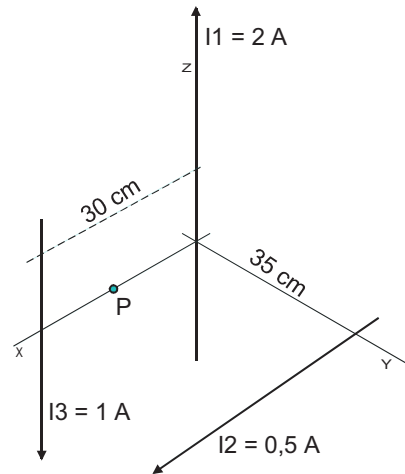
21. Por dos vértices opuestos de un cuadrado de 1 m de lado, y perpendicular a él, pasan dos hilos conductores que transportan, en el mismo sentido, corrientes de 2 y 5 amperios. Se pide:

a) Calcular el campo magnético resultante en el centro del cuadrado.

b) DIBUJAR (lo más claro posible) y CALCULAR, la fuerza magnética que se ejercen los conductores, especificando su naturaleza (repulsión-atracción)

c) Si en otra ocasión, con el cable de 5 A nos fabricamos una espira cuadrada de 20 cm de lado y lo introducimos en un campo magnético uniforme de 0,48 T, de modo que el plano de la espira sea paralelo a las líneas de fuerza del campo, ¿Qué fuerza magnética soportará cada lado de ese cuadrado y EXPLICAR qué efectos producirá en la espira así construida? (Decidir el sentido de circulación de la corriente de 5 Amperios)

22. Determina el VECTOR campo magnético en el punto P de la figura, sabiendo que éste se halla justo en medio de los conductores I1 e I3.



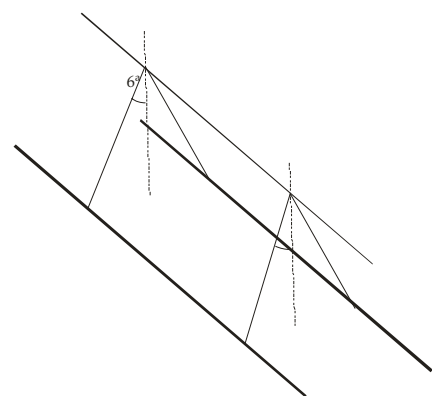
23. De uno de los platillos de una balanza pende un circuito rectangular, cuyo lado inferior es una varilla rígida; el otro platillo se equilibra por medio de pesas. En ausencia de campo magnético, el circuito está equilibrado con una masa m. La varilla de la balanza, de 10 cm de longitud, recorrida por una corriente de 2 A, se introduce en el seno de un campo magnético horizontal y perpendicular a ella. En estas circunstancias hay que añadir pesas hasta completar 12 g en el otro platillo para recuperar el equilibrio. Calcula el módulo del campo magnético (un dispositivo como el aquí descrito, recibe el nombre de **Balanza de Cotton**)

24. El campo eléctrico entre las placas del filtro de velocidades de un espectrómetro de masas es de 120000 V/m y el campo magnético que es contrarrestado por el anterior y que sigue actuando tras el filtro, es de 0,6 T. Un chorro de iones de neón, con una sola carga, describe una trayectoria circular de 7,28 cm de radio en el campo magnético. Determinar el número másico del isótopo de neón ($1 u = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$)

25. Un solenoide de 20 cm de longitud formado por 600 espiras tiene una resistencia de 12 Ω . Determinar el valor del campo magnético en su interior cuando está conectado a una ddp de 100 V.

26. Una espira rectangular (de 8x6 cm) puede girar alrededor del eje OZ y transporta una corriente de 10 A en sentido horario. La espira está en una región del espacio donde hay un campo magnético paralelo al eje OX y dirigido hacia valores positivos de X y de magnitud 0,2 T. Calcula la fuerza sobre cada uno de los lados de la espira y el momento necesario para mantener la espira en su posición.

27. Dos hilos conductores de igual longitud (L) que transportan corrientes del mismo valor, cuelgan de una barra del techo mediante dos cuerdas iguales inextensibles (de longitud l) y de masa despreciable tal y como se ve en la figura. El ángulo que forman las cuerdas con la vertical es de 6°. Deducir el valor de la corriente que circula por esos cables (explicando su sentido) si se sabe que todo el conjunto está en equilibrio y que los cables tienen una densidad lineal ρ (kg/m). Ofrecer el resultado en función de los datos suministrados y/o de las constantes características.



28. Un topógrafo maneja una brújula a 4 m por debajo de una línea de corriente por la que circulan 150 A (supongamos que de corriente continua). Se sabe que en ese lugar, la componente horizontal del campo magnético terrestre vale $2,5 \cdot 10^{-5} \text{ T}$ y que el hilo conductor está orientado justo hacia el Sur, y dirigiendo hacia allí la corriente. Encontrar la nueva orientación de la brújula.

29. Un electrón de 10^4 eV de energía se mueve horizontalmente y penetra en una región donde hay un campo eléctrico $E = 100 \text{ V/cm}$ dirigido verticalmente hacia abajo. A) Hallar la magnitud y dirección del campo magnético capaz de lograr que el electrón conserve su movimiento horizontal en presencia de ambos campos; b) si fuera un protón, ¿cómo debe ser B para conseguir el mismo resultado? La acción de la fuerza de la gravedad se puede despreciar.

30. Análisis comparativo entre los campos gravitatorio, eléctrico y magnético.