

Campo Magnético

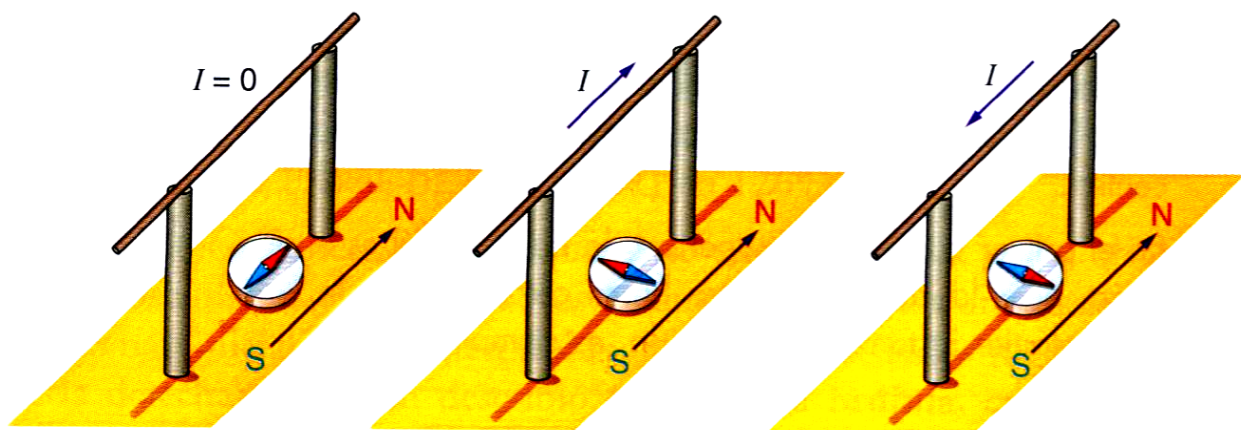
7.1.- Introducción

Si bien algunos efectos magnéticos han sido conocidos desde la antigüedad, como por ejemplo el poder de atracción que sobre el hierro ejerce la magnetita, no fue sino hasta el siglo XIX cuando la relación entre la electricidad y el magnetismo quedó patente, pasando ambos campos de ser diferenciados a formar el cuerpo de lo que se conoce como electromagnetismo.

Antes de 1820, el único magnetismo conocido era el del hierro. Esto cambió con un profesor de ciencias poco conocido de la Universidad de Copenhague, Dinamarca, **Hans Christian Oersted**. En 1820 Oersted preparó en su casa una demostración científica a sus amigos y estudiantes. Planeó demostrar el calentamiento de un hilo por una corriente eléctrica y también llevar a cabo demostraciones sobre el magnetismo, para lo cual dispuso de una aguja de compás montada sobre una peana de madera.

Mientras llevaba a cabo su demostración eléctrica, Oersted notó para su sorpresa que cada vez que se conectaba la corriente eléctrica, se movía la aguja del compás. Se calló y finalizó las demostraciones, pero en los meses siguientes trabajó duro intentando explicar este nuevo fenómeno, sin ningún resultado. La aguja no era ni atraída ni repelida por ella. En vez de eso tendía a quedarse en ángulo recto. Hoy sabemos que esto es una prueba fehaciente de la relación intrínseca entre el campo magnético y el campo eléctrico plasmada en las ecuaciones de Maxwell.

Si por el conductor no circula corriente, la brújula apunta hacia el norte geográfico, pero si circula corriente la brújula se orienta perpendicular al conductor; y si varía el sentido de la corriente, la brújula cambia de orientación.



La conclusión de la experiencia de Oersted era evidente, la corriente eléctrica se comporta como un imán, es decir, produce un campo magnético.

7.2.- Magnitudes electromagnéticas

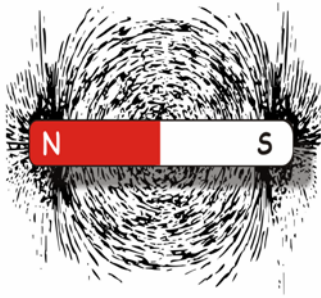
7.2.1.- Inducción Magnética

En la naturaleza encontramos materiales que tienen propiedades magnéticas, es decir, que atraen a materiales férricos

Los materiales que presentan estas propiedades son los imanes, que se caracterizan por tener un polo norte y un polo sur.

- El polo norte del imán se orienta hacia el Norte geográfico de la Tierra y el polo sur hacia el Sur Geográfico. Si acercamos dos imanes distintos, observamos que los polos de igual signo se repelen y los de distinto se atraen.
- Todo imán presenta dos polos magnéticos. Así, si rompemos un imán por la mitad, no obtenemos un polo norte y otro sur aislados, sino que obtenemos dos imanes más pequeños, cada uno de ellos con su pareja de polos norte y sur.

Si dejáramos limaduras de hierro en las cercanías de un imán podríamos observar el espectro magnético, es decir, las líneas que representan el campo magnético del imán (líneas de fuerza).



El **campo magnético** es la perturbación que un imán o una corriente eléctrica producen en el espacio que los rodea.

Esta perturbación, se manifiesta en la fuerza magnética que experimenta cualquier otra carga en movimiento dentro del campo magnético.

La intensidad del campo magnético se mide mediante el vector **inducción magnética** $\vec{B}$.

Supongamos que en una región del espacio existe un campo magnético y que en ella situamos una carga de prueba q . Experimentalmente comprobamos que:

- Si la carga está en reposo, no actúa ninguna fuerza sobre ella.
- Si la carga se mueve con una velocidad V , experimenta una fuerza magnética con las siguientes características:
 - ✓ Es proporcional al valor de la carga $|q|$
 - ✓ Es perpendicular a la velocidad $\vec{v}$
 - ✓ Su módulo depende de la dirección de la velocidad.

A partir de lo anterior se define el vector inducción magnética, $\vec{B}$, en un punto del espacio:

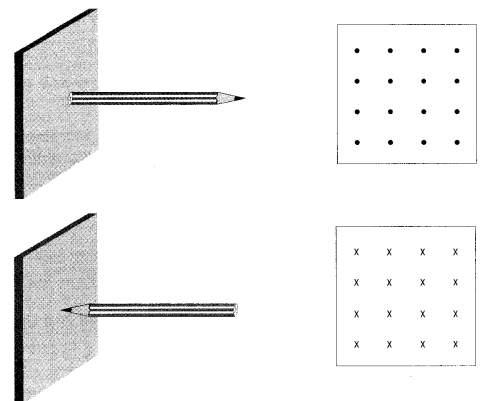
- Su dirección es la del movimiento de las cargas sobre las que la fuerza magnética es nula.
- Su sentido se determina mediante la regla del tornillo, si la carga es positiva, y si es negativa su sentido será el opuesto.
- Su módulo es:

$$B = \frac{F}{|q| \cdot v \cdot \sin \alpha}$$

La unidad de inducción magnética en el SI es el Tesla (T), aunque a veces se utiliza el Gauss (G). La equivalencia entre ambas es $1T = 10^4 G$.

Para representar la inducción magnética, en muchas ocasiones se considera un vector que tenga dirección perpendicular a la hoja, y sentido hacia dentro de la hoja (X) o hacia fuera (·).

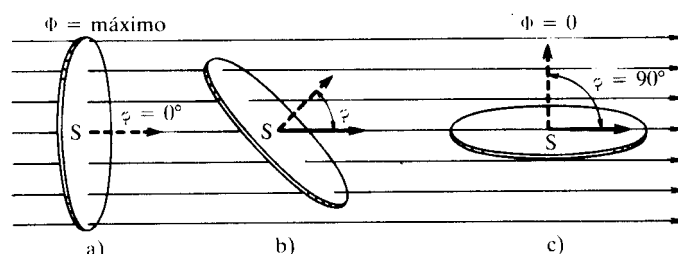
Como hemos visto con anterioridad, una carga en movimiento genera un campo magnético.



7.2.2.- Flujo Magnético

El flujo de un campo magnético que atraviesa una superficie se define como el producto escalar entre el vector inducción magnética $\vec{B}$, y el vector superficie $\vec{S}$. El vector superficie es un vector con dirección normal a la superficie cuyo módulo es el valor de esta.

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



Como se trata de un producto escalar, el flujo dependerá del módulo del vector inducción magnética, de la superficie y del ángulo que forma la superficie con $\vec{B}$. Sus unidades son el weber, (Wb).

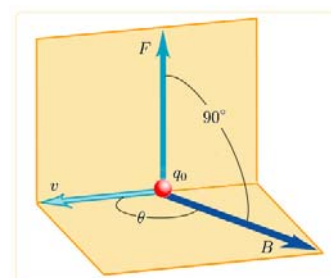
7.3.- Modelos físicos

7.3.1.- Fuerza magnética sobre una carga eléctrica en movimiento

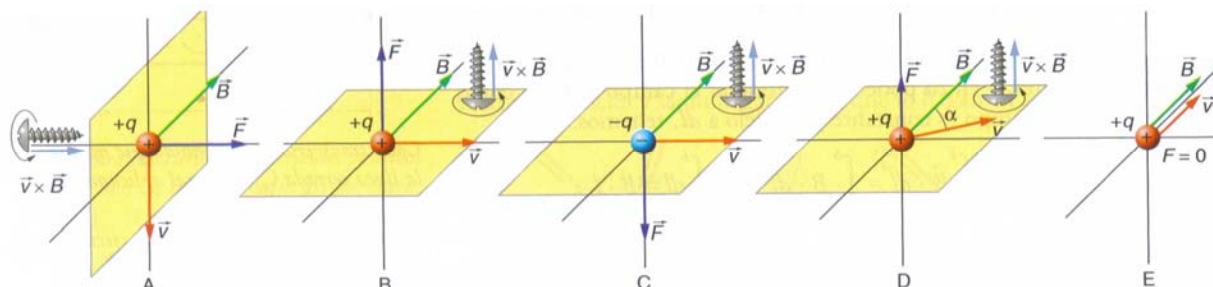
Sabemos que una carga eléctrica en movimiento genera un campo magnético.

Si una carga eléctrica penetra en una región del espacio donde haya un campo magnético, notará una fuerza magnética que se calcula mediante la expresión:

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

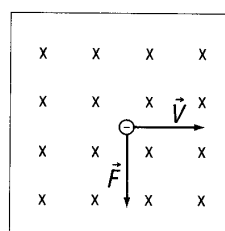
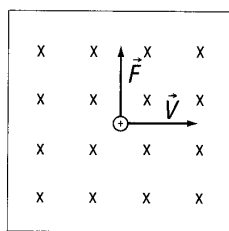


Conocida como Ley de Lorentz, y que dice: *La fuerza que actúa sobre la carga en movimiento es un vector cuya dirección es perpendicular al plano que forman la velocidad y el campo magnético. Para saber la dirección de la fuerza se aplica la regla de la mano derecha o la regla de Maxwell.*



El módulo de esta fuerza viene dado por la expresión: $F = q \cdot v \cdot B \cdot \sin \alpha$, donde α es el ángulo que forman el vector velocidad y el campo magnético. Así, cuando estos tienen la misma dirección ($\alpha = 0^\circ, \alpha = 180^\circ$) la fuerza magnética es nula; es decir, no actúa ninguna fuerza sobre una carga eléctrica en movimiento si la velocidad tiene la misma dirección que el vector inducción magnética.

En los esquemas siguientes se observa la fuerza que actuaría sobre una partícula cargada positivamente y negativamente al penetrar en una región del espacio con un campo magnético cuya dirección es perpendicular a la velocidad.



Ejemplo 7.1: Una carga positiva de 5 microcoulombios se mueve con una velocidad dada por la expresión: $v = 5\hat{i} - 5\hat{k}(\text{SI})$ en el interior de un campo magnético $\vec{B} = -\hat{i} + 2\hat{j} - \hat{k}(\text{SI})$. Deducir la fuerza que actúa sobre dicha carga.

Según la Ley de Lorentz, el vector fuerza con que el campo actúa sobre la carga viene dado por:

$$\vec{F} = q(\vec{v} \wedge \vec{B}) = 5 \cdot 10^{-6} \begin{vmatrix} \hat{i} & \hat{j} & \hat{k} \\ 5 & 0 & -5 \\ 1 & 2 & -1 \end{vmatrix} = 5 \cdot 10^{-6} \cdot (10\hat{i} + 10\hat{k}) = 5 \cdot 10^{-5} \hat{i} + 5 \cdot 10^{-5} \hat{j} \text{ N}$$

7.3.2.- Fuerza magnética sobre un conductor rectilíneo

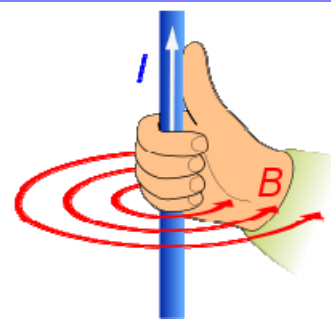
Cuando en lugar de una carga eléctrica tenemos un conductor eléctrico, por el cual circula una intensidad I , la fuerza magnética viene dada por la expresión:

$$\vec{F} = I(\vec{l} \wedge \vec{B})$$

Expresión que corresponde a la **primera ley de Laplace**, y en la que $I = \frac{q}{t}$

es la intensidad de corriente y $\vec{l}$ el vector longitud del conductor, que tiene la misma dirección que el conductor, y sentido el de la corriente.

La fuerza que actúa sobre él será perpendicular al conductor y al campo.



Ejemplo 7.2: Por un conductor recto, dirigido a lo largo del eje OY, circula en sentido positivo del citado eje una intensidad de corriente de 20A. Calcular la fuerza que el campo magnético $\vec{B} = 2\hat{i} + 3\hat{k}(\text{SI})$ ejerce por unidad de longitud, sobre dicho conductor.

De acuerdo con la Ley de Laplace, tenemos que:

$$F = I \cdot (\vec{l} \wedge \vec{B}) = 20 \begin{vmatrix} \hat{i} & \hat{j} & \hat{k} \\ 0 & 1 & 0 \\ 2 & 0 & 3 \end{vmatrix} = 20 \cdot (3\hat{i} - 2\hat{k}) = 60\hat{i} - 40\hat{k} \text{ N}$$

7.3.2.- Movimiento de una carga en un campo magnético uniforme

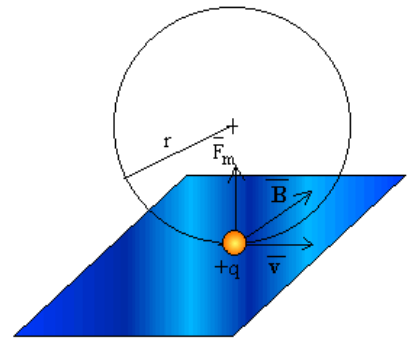
7.3.2.1.- Si los vectores $\vec{F}$ y $\vec{B}$ son perpendiculares

Si una partícula de masa m y carga q penetra en un campo magnético uniforme $\vec{B}$ con una velocidad $\vec{v}$ perpendicular a las líneas de campo, actúa sobre ella una fuerza perpendicular a su velocidad y de módulo constante, que según la segunda ley de Newton, producirá una aceleración normal:

$$\left. \begin{aligned} \vec{F} &= m\vec{a} \xRightarrow{\vec{F} \perp \vec{v}} F = m \cdot a \\ \vec{F} &= q\vec{v} \wedge \vec{B} \xRightarrow{\vec{B} \perp \vec{v}} F = qvB \end{aligned} \right\} a_n = \frac{|q|vB}{m} = cte$$

Si la aceleración normal, la única presente, es constante, la partícula realiza un movimiento circular uniforme de sentido dependiente del signo de la carga y cuyas características son:

- Radio: $a_n = \frac{v^2}{R} = \frac{|q| \cdot v \cdot B}{m} \Rightarrow R = \frac{mv}{|q| \cdot B}$
- Velocidad Angular: $\omega = \frac{v}{R} \Rightarrow \omega = \frac{|q| \cdot B}{m}$
- Periodo: $\omega = \frac{2\pi}{T} \Rightarrow T = \frac{1}{f} = \frac{2\pi \cdot m}{|q| \cdot B}$

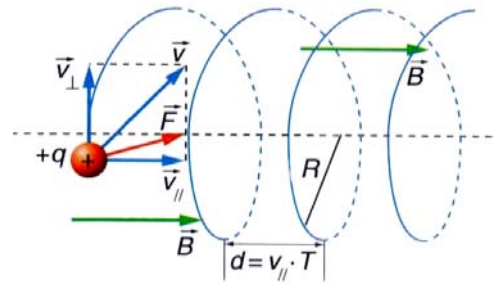


7.3.2.2.- Si los vectores $\vec{F}$ y $\vec{B}$ no son perpendiculares

Si la velocidad de la partícula no es perpendicular al campo magnético, la partícula realizará un movimiento helicoidal:

El radio y el paso de la hélice serán respectivamente:

$$R = \frac{mv_{\perp}}{|q| \cdot B} \quad d = v_{\parallel} \cdot T$$



Donde $v_{\perp}$ es la componente de la velocidad perpendicular al campo magnético y $v_{\parallel}$ la componente paralela al campo. T es tiempo que tarda la partícula en dar una vuelta:

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

Ejemplo 7.3.- Un protón y un electrón que se mueven con la misma velocidad, $\vec{v} = 4 \cdot 10^6 \hat{i} \text{ m s}^{-1}$ penetran en un campo magnético uniforme $\vec{B} = -0,01 \hat{k} \text{ T}$. Calcula: a) La fuerza sobre cada partícula al entrar al campo. b) El radio de la trayectoria descrita por cada una de las partículas. c) Lo que tarda cada partícula en dar media vuelta.

a) La fuerza que actúa sobre cada partícula viene dada por la Ley de Lorentz, $\vec{F} = q\vec{v} \wedge \vec{B}$, por tanto:

$$\vec{F}_p = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 4 \cdot 10^6 \hat{i} \text{ m s}^{-1} \wedge -0,01 \hat{k} \text{ T} = 6,4 \cdot 10^{-15} \hat{j} \text{ N}$$

$$\vec{F}_e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 4 \cdot 10^6 \hat{i} \text{ m s}^{-1} \wedge -0,01 \hat{k} \text{ T} = -6,4 \cdot 10^{-15} \hat{j} \text{ N}$$

b) El radio de la trayectoria de cada partícula será:

$$R_p = \frac{m_p \cdot v}{|q_p| \cdot B} = 4,175 \text{ m}$$

$$R_e = \frac{m_e \cdot v}{|q_e| \cdot B} = 2,275 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

c) Como cada partícula describe un mcv, su periodo valdrá:

$$T_p = \frac{2\pi \cdot m_p}{|q_p| \cdot B} = 6,6 \cdot 10^{-6} \text{ s}$$

$$T_e = \frac{2\pi \cdot m_e}{|q_e| \cdot B} = 3,6 \cdot 10^{-9} \text{ s}$$

Por tanto en dar media vuelta el electrón tarda $1,8 \cdot 10^{-9}$ segundos y el protón $3,3 \cdot 10^{-6}$ segundos.

En general, sobre una partícula cargada actuarán campos eléctricos y magnéticos. La acción conjunta de ambos originará una fuerza que vendrá dada por la **ley general de Lorentz**:

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

Hablamos entonces de fuerza electromagnética. La separación entre los términos eléctrico y magnético es algo relativo, ya que esta interacción depende del sistema de referencia usado para medir. Normalmente usaremos sistemas de referencia en reposo.

7.3.3.- Campo magnético creado por un conductor

La ley que nos permite calcular campos magnéticos a partir de las corrientes eléctricas es la Ley de Ampère. Fue descubierta por **André - Marie Ampère** en 1826 y se enuncia:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \cdot I_T$$

La integral del primer miembro es la **circulación o integral de línea del campo magnético** a lo largo de una **trayectoria cerrada**, y:

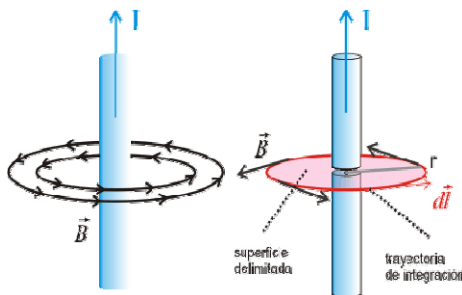
- μ_0 es la permeabilidad magnética en el vacío: $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ N/A}^2$
- $d\vec{l}$ es un vector tangente a la trayectoria elegida en cada punto
- I_T es la corriente neta que atraviesa la superficie delimitada por la trayectoria, y **será positiva o negativa según el sentido con el que atraviere a la superficie**.

Se define como **permeabilidad magnética relativa de un medio** a la razón entre su permeabilidad magnética absoluta y la del vacío, verificándose: $\mu' = \frac{\mu}{\mu_0}$

Dependiendo del valor de μ' las distintas sustancias se pueden clasificar en:

- Diamagnéticas: Si $\mu' < 1$
- Paramagnéticas: Si $\mu' > 1$
- Ferromagnéticas: Si $\mu' \gg 1$

7.3.3.1.- Campo magnético creado por un conductor rectilíneo indefinido



El campo magnético creado por un conductor indefinido rectilíneo por el que circula una corriente eléctrica I se obtiene mediante la expresión:

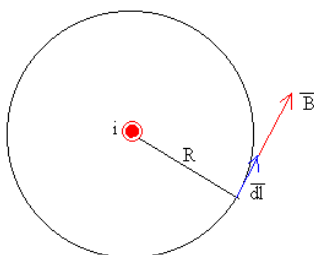
$$B = \frac{\mu I}{2 \cdot \pi r}$$

donde r es la distancia desde el conductor hasta el punto donde se calcula el campo y μ es la permeabilidad magnética del medio

material.

Esta es la expresión matemática de la **Ley de Biot y Savart**, que dice: *El valor del campo magnético creado por un conductor rectilíneo indefinido, en un determinado punto, es directamente proporcional a la intensidad de la corriente que circula por él, e inversamente proporcional a la distancia entre el punto considerado y la dirección de la corriente.*

El campo magnético creado por un conductor de este tipo atiende a las siguientes características:



- El campo magnético B es tangente a la circunferencia de radio r , paralelo al vector dl .
- El módulo del campo magnético B tiene el mismo valor en todos los puntos de dicha circunferencia.

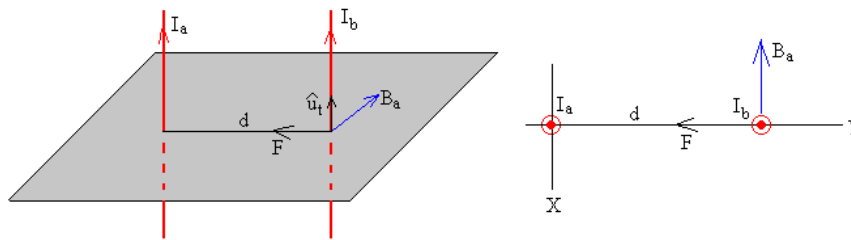
Ejemplo 7.4.- Determina el campo magnético creado por un hilo rectilíneo e indefinido por el que circula una corriente de intensidad 10A a una distancia de 20 cm.

Como no dicen nada del medio, supondremos que se trata del vacío, y en este, la permitividad del medio es: $\mu_o = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ N / A}^2$, por tanto utilizando la Ley de Biot y Savart, tenemos:

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

7.3.3.1.1.- Fuerza entre dos corrientes rectilíneas

Sean dos corrientes rectilíneas indefinidas de intensidades I_a e I_b paralelas y distantes entre sí una distancia d .



El campo magnético producido por la primera corriente rectilínea en la posición de la otra corriente es:

$$B_a = \frac{\mu \cdot I_a}{2 \cdot \pi \cdot d}$$

De acuerdo con la regla de la mano derecha tiene el sentido indicado en la figura, en forma vectorial $\vec{B}_a = B_a \hat{i}$. La fuerza sobre una porción del conductor l , de la segunda corriente rectilínea por la que circula una corriente I_b en el mismo sentido es

$$F_{ab} = I_b \cdot l \cdot B_a$$

La fuerza que ejerce el campo magnético producido por la corriente de intensidad I_b sobre la una porción de longitud l de corriente rectilínea de intensidad I_a , es igual pero de sentido contrario, ya que estas fuerzas cumplen el principio de acción y reacción.

$$F_{ba} = I_a \cdot l \cdot B_b$$

La fuerza por unidad de longitud ente dos corrientes rectilíneas indefinidas y paralelas a una distancia d es:

$$\frac{F}{L} = \frac{\mu_o \cdot I_a \cdot I_b}{2 \pi d}$$

La **unidad de medida de la intensidad de la corriente eléctrica**, el amperio, se fundamenta en esta expresión: *Un **Amperio** (A) es la intensidad de una corriente constante que manteniéndose en dos conductores paralelos, rectilíneos, de longitud infinita, de sección circular despreciable y situados a una distancia de un metro uno de otro en el vacío, produciría una fuerza igual a $2 \cdot 10^{-7}$ newton por metro de longitud.*

Si las corrientes tienen sentido opuesto, la fuerza tiene el mismo módulo pero de sentido contrario.

Por tanto, la fuerza existente entre dos corrientes rectilíneas indefinidas, paralelas, separadas una distancia d :

- Es atractiva, si las corrientes eléctricas circulan en el mismo sentido.
- Es repulsiva, si las corrientes eléctricas circulan en sentido contrario.

Ejemplo 7.5.- Dos hilos conductores rectilíneos y paralelos, de gran longitud, están separados 10 cm. Si por ellos circulan corrientes de 2 A y 5 A respectivamente en el mismo sentido, calcula la fuerza que se ejercen mutuamente por unidad de longitud y di si es atractiva o repulsiva.

La fuerza por unidad de longitud ente dos corrientes rectilíneas indefinidas y paralelas separadas una distancia d es viene dada por:

$$\frac{F}{l} = \frac{\mu_0 \cdot I_a \cdot I_b}{2\pi d}$$

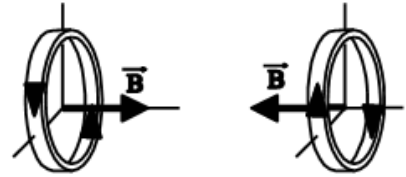
Por tanto sustituyendo los datos del problema:

$$\frac{F}{l} = \frac{\mu_0 \cdot I_a \cdot I_b}{2\pi d} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ T m A}^{-1} \cdot 2 \text{ A} \cdot 5 \text{ A}}{2 \cdot \pi \cdot 0,1 \text{ m}} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ N m}^{-1}$$

7.3.3.2.- Campo magnético creado por una espira de corriente circular

El campo magnético creado en el interior de una espira circular de corriente se obtiene mediante la expresión:

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



Donde r es la distancia desde la espira hasta el punto en el interior de la espira donde se calcula el campo.

Ejemplo 7.6.- El electrón existente en la corteza de un átomo de hidrógeno describe en su giro alrededor del núcleo una órbita circular de radio 0,53 Å, con una velocidad de $2,2 \cdot 10^6$ m/s. Calcúlese la inducción magnética en el centro de la órbita.

La longitud recorrida por el electrón será: $S = 2 \cdot \pi \cdot R = 2 \cdot \pi \cdot 0,53 \cdot 10^{-10} \text{ m} = 1,06 \pi \cdot 10^{-10} \text{ m}$

El tiempo empleado en recorrer la órbita, supuesto uniforme el movimiento: $t = \frac{S}{v} = \frac{1,06 \pi \cdot 10^{-10} \text{ m}}{2,2 \cdot 10^6 \text{ m/s}} = 1,51 \cdot 10^{-16} \text{ s}$

La intensidad de corriente valdrá: $I = \frac{q}{t} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}}{1,51 \cdot 10^{-16} \text{ s}} = 1,06 \cdot 10^{-3} \text{ A}$

Y el valor del campo magnético: $B = \frac{\mu I}{2r} = 2 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ N / A}^2 \cdot \frac{1,06 \cdot 10^{-3} \text{ A}}{0,53 \cdot 10^{-10} \text{ m}} = 12,57 \text{ T}$

Y si se tratara de una bobina plana constituida por n espiras: $B = \frac{\mu \cdot I \cdot n}{2r}$

Ejemplo 7.7.- 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 valga $2 \cdot 10^{-4}$ T?

Si en la expresión general $B = \frac{\mu \cdot I \cdot n}{2r}$ despejamos I : $I = \frac{2 \cdot B \cdot r}{\mu \cdot n} = \frac{2 \cdot 2 \cdot 10^{-4} \text{ T} \cdot 10^{-1} \text{ m}}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ N / A}^2 \cdot 20} = 1,6 \text{ A}$

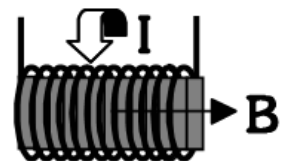
* Como no dicen nada del medio, suponemos que es en el vacío.

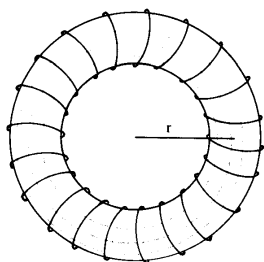
7.3.3.3.- Campo magnético creado por un Solenoide

El campo magnético creado en el interior de un solenoide se obtiene mediante la expresión:

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

Donde N es el número de espiras, I la intensidad y l la longitud de la bobina o solenoide.





A veces la podemos encontrar de la forma $B = \mu \cdot n \cdot I$, en la que $n = \frac{N}{l}$ es la densidad de espiras.

En el caso de que la bobina fuese circular (toroide), en vez de cilíndrica, la longitud corresponde al valor de la circunferencia media del toroide.

(Véase figura adjunta)

Ejemplo 7.8.- A través de una bobina que consta de 500 espiras y tiene una longitud de 15 cm circula una corriente de 20 A. Calcular la inducción magnética en el interior de la bobina.

La inducción magnética en el interior de una bobina viene dada por: $B = \frac{\mu \cdot N \cdot I}{l}$

$$\text{Por tanto } B = \frac{\mu \cdot N \cdot I}{l} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ N/A}^2 \cdot 500 \cdot 20 \text{ A}}{0,15 \text{ m}} = 8,4 \cdot 10^{-2} \text{ T}$$

7.4.- Inducción Electromagnética

La **inducción electromagnética** es el fenómeno que origina la producción de una **fuerza electromotriz** (f.e.m. o **voltaje**) en un medio o cuerpo expuesto a un campo magnético variable, o bien en un medio móvil respecto a un campo magnético estático. Es así que, cuando dicho cuerpo es un conductor, se produce una **corriente** inducida. Este fenómeno fue descubierto por **Michael Faraday** quién lo expresó indicando que la magnitud del voltaje inducido es proporcional a la variación del flujo magnético.

Por otra parte, **Heinrich Lenz** comprobó que la corriente debida a la f.e.m. inducida se opone al cambio de flujo magnético, de forma tal que la corriente tiende a mantener el flujo. Esto es válido tanto para el caso en que la intensidad del flujo varíe, o que el cuerpo conductor se mueva respecto de él.

La inducción electromagnética es el principio fundamental sobre el cual operan **transformadores**, **generadores**, **motores eléctricos**, la **vitrocerámica** de inducción y la mayoría de las demás máquinas eléctricas.

Resumiendo podemos decir que *un campo magnético variable genera un campo eléctrico*.

Siempre que varíe el flujo magnético a través de un circuito cerrado se originará en él una fuerza electromotriz inducida.

O también:

Fuerza electromotriz inducida es la producida en un circuito inerte mediante la variación de líneas de fuerza magnéticas que atraviesan la superficie limitada por él.

El circuito cerrado donde se origina la corriente recibe el nombre de **inducido**; el cuerpo que crea el campo magnético, **inductor**, y puede estar constituido:

- Por un imán permanente (magneto)
- Por un electroimán (alternador, dinamo)
- Por una bobina recorrida por corriente alterna (Transformador)

7.4.1.- Ley de Faraday-Lenz

La fuerza electromotriz inducida en un circuito cerrado es directamente proporcional a la variación del flujo magnético que atraviesa la superficie del circuito, de manera que el sentido de la corriente inducida se opone a la causa que lo produce.

$$\varepsilon = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \text{ o de forma diferencial } \varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt}$$

Donde ϕ es el flujo magnético.

Ecuaciones referidas a un circuito de una espira, si el circuito estuviese constituido por N espiras:

$$\varepsilon = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \cdot N$$

Lo que nos permite decir que *el valor de la fuerza electromotriz inducida es independiente de las causas que provocan la variación de flujo y solamente depende de la mayor o menor rapidez con que varia el flujo a través de la superficie limitada por el circuito y del número de espiras que éste posee.*

Una forma práctica de determinar el sentido de la corriente inducida puede realizarse con la denominada “regla de la mano derecha”.

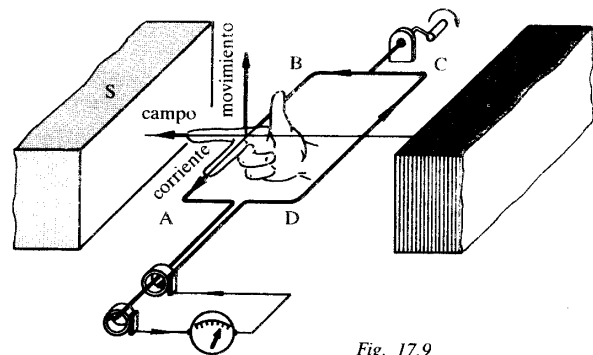


Fig. 17.9

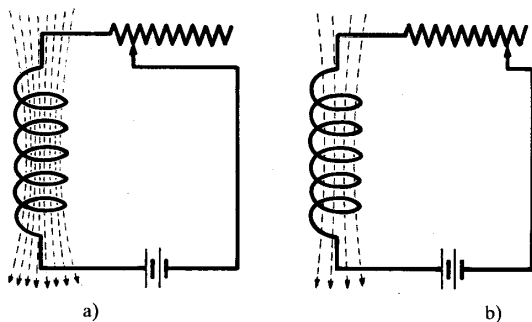
Extendiendo los tres primeros dedos de la mano derecha en las tres direcciones del espacio, si el dedo índice señala la dirección y sentido del campo, y el pulgar la dirección y sentido del movimiento, el dedo medio indicará la dirección y sentido de la corriente inducida.

El valor de la Intensidad de corriente inducida en el circuito, la obtenemos aplicando la **Ley de Ohm**:

$$I_{ind} = \frac{\varepsilon_{ind}}{R}$$

7.4.2.- Autoinducción. Corrientes Autoinducidas

Sea el circuito constituido por un solenoide, una resistencia variable y un generador de corriente continua. Si se modifica la intensidad de la corriente que pasa por el solenoide, el flujo que lo atraviesa, debido al campo magnético que se origina, variará también. Consiguientemente, se inducirá en el propio circuito una fuerza electromotriz que, según la Ley de Faraday-Lenz, se opondrá a la causa que la produce.



Este fenómeno se denomina **autoinducción**, y la fuerza electromotriz así creada, **fuerza electromotriz inducida**.

Autoinducción es el fenómeno por el cual una corriente de intensidad variable, llamada corriente principal, crea en su mismo circuito, por inducción, otra corriente denominada autoinducida o extracorrente.

7.4.2.1.- Valor de la fuerza electromotriz autoinducida

La variación de flujo magnético a través del propio circuito donde se autoinduce, es directamente proporcional a la variación dicha intensidad de corriente, verificándose que:

$$\Delta\Phi = L \cdot \Delta I$$

Donde L es una cte. De proporcionalidad, denominada coeficiente de autoinducción, que se mide en [henrios].

La fuerza electromotriz inducida viene dada por: $\varepsilon = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$

Un **Henry** es la autoinducción de un conductor en el que una corriente cuya intensidad varía 1 amperio en cada segundo produce por autoinducción una fuerza electromotriz de 1 voltio.

7.4.2.2.- Coeficiente de autoinducción de un solenoide

En un solenoide de longitud l y sección S constituido por N espiras, por el que fluye una corriente de intensidad variable, la autoinducción viene dada por:

$$L = \frac{N^2 \cdot S}{l}$$

Y el valor de la fuerza electromotriz inducida será: $\varepsilon = -L \frac{\Delta I}{\Delta t} = -\frac{N^2 \cdot S}{l} \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t}$

7.5.- Corriente Alterna

Se denomina **corriente alterna** (abreviada **CA** en español y **AC** en inglés) a la **corriente eléctrica** que cambia periódicamente de sentido, yendo las partículas eléctricas en un sentido y al cabo de un cierto tiempo volviendo en sentido contrario.

A cada ida y vuelta de las partículas eléctricas, electrones, se denomina **ciclo**; al tiempo invertido en un ciclo, **periodo**, y al número de ciclos realizados en un segundo, **frecuencia**.

Como ya sabemos el periodo y la frecuencia son inversamente proporcionales: $T = \frac{1}{\nu}$

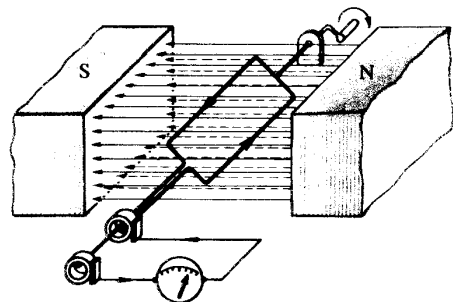
7.5.1.- Fuerza electromotriz alterna producida por la rotación de una bobina

Supongamos un conductor rectangular que gira con velocidad cte ω entre los polos de un imán.

El flujo que atraviesa la superficie viene dado por la expresión:

$$\phi = \vec{B} \cdot \vec{S} = B \cdot S \cdot \cos \varphi$$

En la que φ representa el ángulo que forman el vector campo $\vec{B}$ y el vector superficie $\vec{S}$. El ángulo φ varía con el tiempo en



la forma $\varphi = \omega t$ puesto que la espira gira con velocidad angular cte. Por tanto:

$$\varphi = \vec{B} \cdot \vec{S} = B \cdot S \cdot \cos \omega t$$

El valor de la fuerza electromotriz inducida será:

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d(B \cdot S \cdot \cos \omega t)}{dt} = B \cdot S \cdot \omega \cdot \sin \omega t$$

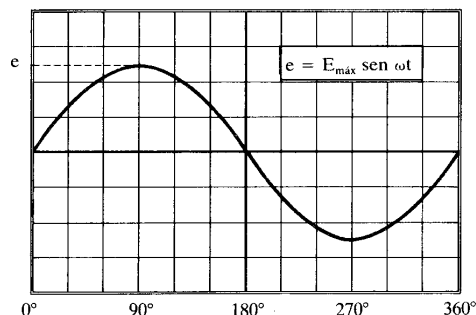
Vemos pues que la f.e.m. inducida en la espira es variable, siendo función sinusoidal del tiempo. Alcanzará su valor máximo ($\varepsilon_{\max}$) cuando $\sin \omega t = 1$, es decir $\omega t = 90^\circ$.

Matemáticamente:

$$\varepsilon_{\max} = B \cdot S \cdot \omega \cdot \sin 90^\circ = B \cdot S \cdot \omega$$

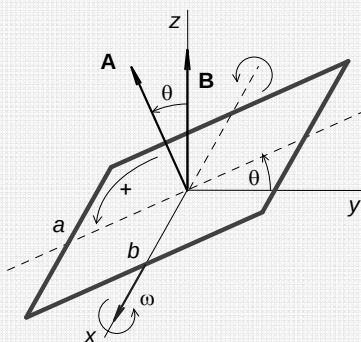
Y si en la expresión de la f.e.m. sustituimos este valor, obtenemos:

$$\varepsilon = \varepsilon_{\max} \cdot \sin \omega t$$



Si el conductor hubiese estado constituido por n espiras: $\varepsilon = n \cdot \varepsilon_{\max} \cdot \sin \omega t$

Ejemplo 7.9: Calcular la fuerza electromotriz inducida en una espira rectangular de superficie $A = a \cdot b$ que gira en un campo magnético uniforme con velocidad angular ω perpendicular al campo.



Supongamos que B está orientado según el eje Oz y que la espira gira en torno al eje Ox . El flujo que la atraviesa es:

$$\varphi = \vec{B} \cdot \vec{A} = B A \cos \theta = B A \cos \omega t$$

Este flujo varía con el tiempo, lo que genera una fem inducida:

$$\varepsilon = -\frac{d\varphi}{dt} = B A \omega \sin \omega t = \varepsilon_0 \sin \omega t$$

La tensión inducida es alterna, de frecuencia igual a la de giro de la espira. Su valor máximo, $E_0 = B A \omega$, se alcanza cuando $\theta = \pi/2$ y $\theta = 3\pi/2$; su sentido se invierte cada media vuelta, en $\theta = 0$ y $\theta = \pi$.

7.6.- Transformadores

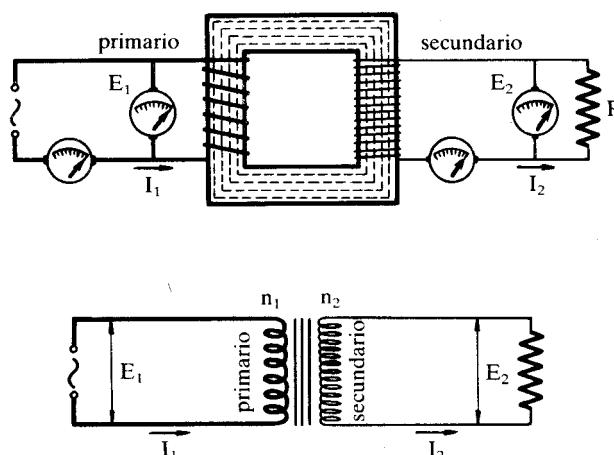
Un Transformador es un dispositivo que permite variar las tensiones de corriente alterna. Se basa en los experimentos de Faraday.

Un transformador está formado por un núcleo de hierro dulce que lleva enrolladas dos bobinas (primaria y secundaria)

Al pasar corriente alterna por una bobina, se induce un campo magnético variable en el hierro dulce y este, a su vez, inducirá una f.e.m. en la otra bobina. Combinando el número de espiras de cada bobina podemos aumentar o disminuir la tensión de entrada.

La relación entre las espiras, las tensiones y la intensidad es:

$$\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_s} = \frac{n_p}{n_s} = \frac{I_s}{I_p}$$



7.6.1.- Aplicaciones de los transformadores

La utilidad de un transformador es clara. En los enchufes de casa el voltaje es de 220 V, y algunos aparatos (el ordenador, el teléfono móvil cuando vamos a cargarlo) funcionan a otro voltaje distinto. La fuente de alimentación del ordenador o el cargador del móvil son ejemplos de aparatos que contienen en su interior un transformador.

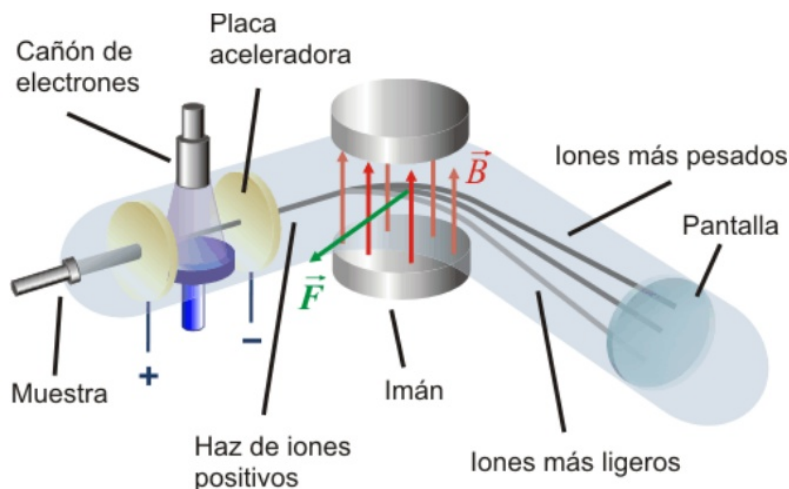
Sin embargo, existe otra utilidad mucho más importante: el transporte de energía eléctrica a grandes distancias. En las centrales eléctricas se genera a unos 20.000 V. Aunque parezca elevado, no lo es tanto. Para transportar gran cantidad de energía (una potencia elevada), como $P = \varepsilon$, es necesaria una intensidad de corriente muy elevada, lo que origina un calentamiento de los cables, que hace que se pierda mucha energía (más de la mitad) en un transporte de varios km. Para evitar esto, la corriente se transforma hasta voltajes elevados (alta tensión, entre 120.000 V y 400.000 V), con lo que se transporta con baja intensidad. Al llegar a la ciudad de destino, se vuelve a transformar al voltaje adecuado (primero a unos 11.000 V, y luego a 220 V, 380 V...)

7.7.- Aplicaciones de la fuerza de Lorentz

7.7.1.- Espectrómetro de masas

Este aparato se usa para medir la masa de partículas subatómicas y átomos ionizados (con carga eléctrica). Concretamente, para medir su relación carga/masa (q/m). Consta de una fuente de partículas cargadas, un condensador entre cuyas placas existe una diferencia de potencial ΔV , que acelera las partículas hasta una cierta velocidad $\vec{v}$, y una zona en la que existe un campo magnético constante y uniforme perpendicular a $\vec{v}$.

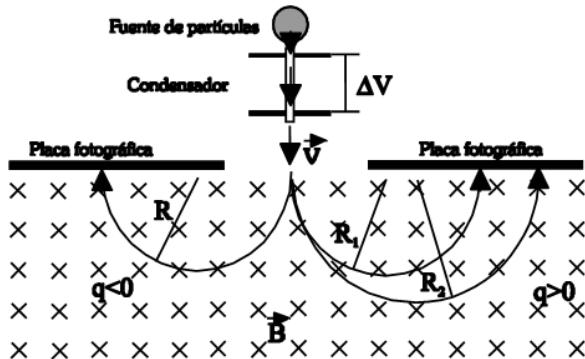
Las partículas describirán una trayectoria circular, de radio R , hasta incidir en una placa fotográfica, lo que permite detectarlas. La velocidad con la que las partículas salen del condensador se calcula a partir de:



$$\Delta E_c = -\Delta E_{pe} \rightarrow \frac{1}{2} m v^2 = q \cdot \Delta V$$

De donde:

$$v^2 = \frac{2 \cdot q \cdot \Delta V}{m}$$



Al entrar en el campo magnético, sufren una desviación que las obliga a seguir un movimiento circular uniforme de radio dado por:

$$R = \frac{m \cdot v}{q \cdot B} \text{ de donde si despejamos } v: v = \frac{R \cdot q \cdot B}{m} \text{ y de aquí:}$$

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

E igualando ambas expresiones de la velocidad, llegamos a:

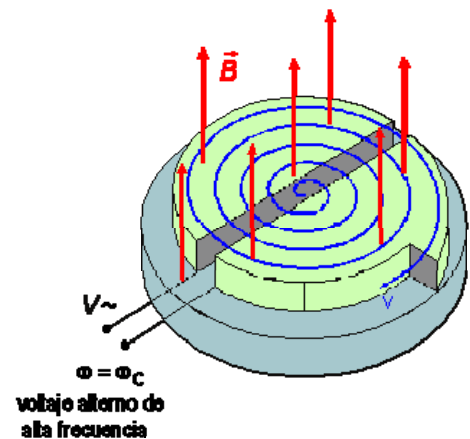
$$\frac{q}{m} = \frac{2 \cdot \Delta V}{B^2 \cdot R^2}$$

como B y ΔV son conocidos, midiendo el radio de la circunferencia podremos conocer la relación carga/masa de la partícula.

Para el caso de que se produzcan partículas con diferente masa (por ejemplo, isótopos del mismo elemento), este aparato permite separarlas, ya que, con diferente masa, las circunferencias que sigan tendrán distinto radio.

7.7.2.- Ciclotrón (E. Lawrence, 1932)

Es este un tipo de acelerador de partículas que utiliza conjuntamente campos eléctricos y magnéticos. Consiste en dos recipientes huecos con forma de D, en los que existe un campo magnético uniforme, como indica la figura. En el centro tenemos la fuente de partículas (una sustancia radiactiva, por ejemplo). La partícula cargada sale de la fuente con poca velocidad. El campo magnético perpendicular la obliga a seguir una trayectoria circular, en principio de radio pequeño. En el espacio entre las des (D) existe una diferencia de potencial ΔV colocada de forma adecuada. De esta forma, al llegar la partícula al final de la primera D, se acelera, con lo que llega a la segunda D con una velocidad mayor, y el radio de la circunferencia que describirá también será mayor. Al salir de la 2ª D vuelve a acelerarse, y así sucesivamente, aumentando el radio conforme mayor es la velocidad. Así, en el exterior de las D, al llegar al conducto de salida, las partículas llevan altas velocidades.



El funcionamiento se basa en el hecho de que una carga q que se mueve con velocidad v dentro de un campo uniforme B describe una circunferencia. El radio de la circunferencia es:

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

El tiempo que tarda la carga en dar una vuelta, o periodo T, es igual a la longitud de la circunferencia dividida por la velocidad de la carga:

$$t = \frac{2 \cdot \pi \cdot R}{v} = \frac{2 \cdot \pi \cdot m \cdot v}{v \cdot q \cdot B} = \frac{2 \cdot \pi \cdot m}{q \cdot B}$$

La frecuencia de resonancia del ciclotrón será: $f = \frac{1}{T} = \frac{q \cdot B}{2 \cdot \pi \cdot m}$

La carga q adquiere su velocidad máxima, $v_{\max}$, cuando sale del ciclotrón, instante en el que describe una circunferencia de radio R igual al radio de las des:

$$v_{\max} = \frac{q \cdot B \cdot R}{m}$$

7.7.- Resolución de Problemas y ejercicios

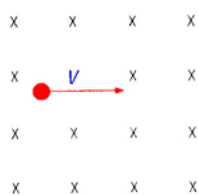
1.- Una partícula cargada entra en una región del espacio donde hay un campo magnético sin experimentar ninguna fuerza. Explica como puede ocurrir esto.

Una partícula cargada en una región del espacio experimenta una fuerza magnética (debida al campo magnético) que se obtiene mediante la expresión de la Ley de Lorentz: $\vec{F} = q(\vec{v} \wedge \vec{B})$.

El módulo de la fuerza magnética depende del ángulo α (ángulo que forman los vectores velocidad y campo magnético) mediante la expresión $F = q \cdot v \cdot B \cdot \text{Sen}\alpha$; en el caso de que $\alpha = 0$ ó $\alpha = \pi$, la fuerza magnética es nula, es decir, la partícula cargada no experimentará ninguna fuerza.

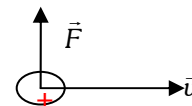
El valor de $\alpha = 0$ ó $\alpha = \pi$ se da cuando los vectores $\vec{v}$ y $\vec{B}$ son paralelos.

2.- Un protón entra con velocidad v en una región del espacio donde hay un campo magnético uniforme perpendicular a la velocidad y al plano del papel y dirigido hacia dentro (ver figura). Haz un dibujo indicando la dirección y el sentido de la fuerza que hace el campo sobre el protón. ¿Cambiaría la respuesta si la partícula fuera un electrón? ¿Por qué?. En caso afirmativo ¿Cuál sería el cambio?.

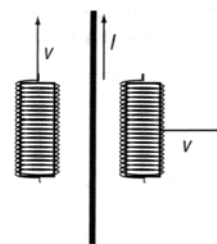


Como sabemos, una partícula cargada en una región del espacio experimenta una fuerza magnética (debida al campo magnético) que se obtiene mediante la expresión de la Ley de Lorentz: $\vec{F} = q(\vec{v} \wedge \vec{B})$.

La dirección de la fuerza es perpendicular al plano formado por el vector inducción magnética (en este caso dirección perpendicular a esta hoja y sentido hacia dentro de la hoja) y el vector velocidad (en este caso hacia la derecha). Luego la fuerza que actúa sobre el protón será la de la figura, en la que hemos utilizado la regla de Maxwell.



3.- Por un hilo conductor indefinido circula una corriente eléctrica de intensidad I . Si dos espiras se mueven con las velocidades indicadas en la figura, ¿Se inducirá corriente eléctrica en alguna de ellas? ¿Por cual?. Razona la respuesta.



Por la espira de la derecha se inducirá corriente eléctrica ya que el campo creado por el hilo varía con la distancia al hilo, y por lo tanto, variará el flujo magnético que atraviesa la espira.

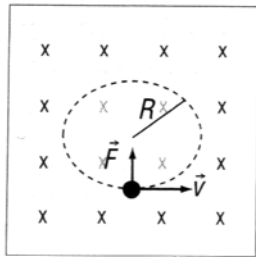
$$\phi = \vec{B} \cdot \vec{S}$$

Por la espira de la izquierda se inducirá corriente eléctrica porque el campo magnético a través de ella se mantiene constante ya que la espira se mantiene separada siempre la misma distancia del hilo, por lo tanto no habrá variación del flujo magnético y no se inducirá corriente eléctrica alguna.

4.- Un protón entra en una región del espacio donde hay un campo magnético uniforme $B = 0,2$ T. Si al entrar su velocidad es $v = 10^6$ m·s⁻¹, perpendicular a la dirección del campo, calcula el radio de la trayectoria circular que describe el protón.

Datos: $q_p = 1,603 \cdot 10^{-19}$ C, $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27}$ kg

El protón describe una órbita circular al penetrar en una región del espacio con una velocidad perpendicular al campo magnético.



La fuerza magnética es responsable de la trayectoria circular del protón. Aplicando la segunda Ley de Newton $\sum F = ma$, y teniendo en cuenta que la aceleración será normal debido a que movimiento es circular uniforme, tenemos que como la única fuerza que actúa sobre la partícula es la fuerza magnética:

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

Como los vectores $\vec{v}$ y $\vec{B}$ son perpendiculares, el módulo de la fuerza magnética será:

$$F = q \cdot v \cdot B \cdot \sin 90 = q \cdot v \cdot B$$

Sustituyendo en la 2ª ley de Newton tenemos:

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

De donde despejando el valor del radio:

$$R = \frac{m_p \cdot v}{q_p \cdot B} = \frac{1,67 \cdot 10^{-27} \cdot 10^6}{1,602 \cdot 10^{-19} \cdot 0,2} = 0,052 \text{ m}$$

Por tanto el radio de la órbita circular es de 0,052 m.

5.- ¿Por qué los transformadores pueden trabajar con corriente alterna, pero no con corriente continua?

Los transformadores se basan en la inducción electromagnética que solamente se produce cuando varía la intensidad de corriente que circula por una bobina, ya que entonces produce un campo magnético variable que induce una fem.

En el caso de corriente continua, la intensidad es constante, y por lo tanto no se producirá ninguna variación de flujo magnético y no funcionará el transformador.

6.- El flujo electromotriz que atraviesa una espira conductora varía con el tiempo de acuerdo con la expresión $\phi = 0,1t^2 - 0,4t$, donde ϕ viene dado en Tm^2 y t en segundos. Halla la expresión de la fuerza electromotriz inducida en función del tiempo.

La fem inducida es la derivada del flujo respecto del tiempo:

$$\varepsilon = -\frac{d\phi}{dt} = -\frac{d}{dt}(0,1t^2 - 0,4t) = -(0,2t - 0,4) \text{ V}$$

Por tanto la fuerza electromotriz inducida respecto al tiempo será:

$$\varepsilon = -(0,2t - 0,4) \text{ V}$$

7.- Una bobina cuadrada, con 100 espira de lado $l=5$ cm, está situada en el plano XY. Si aplicamos un campo magnético dirigido a lo largo del eje Z que varía entre 0,5 T y 0,2T en el intervalo de 0,1 s.

a) ¿Qué fuerza electromotriz se inducirá en la bobina?

b) Si ahora el campo permanece constante con valor 0,5 T y la bobina gira en 1 s hasta colocarse sobre el plano XZ, ¿Cuál será la f.e.m. inducida en este caso?

c) Si en el apartado b) la bobina se desplaza a lo largo del eje Z sin girar, ¿cuál será la f.e.m.?

a) La f.e.m. inducida en una espira se obtiene mediante la ley de Lenz-Faraday:

$$\varepsilon = -\frac{d\phi}{dt} = -\frac{\Delta\phi}{\Delta t}$$

El flujo magnético que atraviesa la bobina depende del número de espiras (N), del campo magnético (B), de la superficie (S) de la espira y del ángulo (α) que forman el vector normal a la superficie y el campo magnético:

$$\phi = N \cdot \vec{B} \cdot \vec{S} = N \cdot B \cdot S \cdot \cos\alpha$$

Al tratarse de una bobina cuadrada de lado L, la superficie es $S=L^2$. El ángulo $\alpha=0$, ya que la espira está sobre el plano XY y, por lo tanto, el vector $\vec{S}$ tiene la misma dirección que el vector $\vec{B}$ (eje OZ). Así, la forma del flujo queda:

$$\phi = N \cdot B \cdot L^2$$

La variación del flujo será: $\Delta\phi = N \cdot L^2 \cdot \Delta B = N \cdot L^2 (B_1 - B_0)$, y la f.e.m. inducida será:

$$\varepsilon = -\frac{d\phi}{dt} = -\frac{\Delta\phi}{\Delta t} = \frac{-N \cdot L^2 (B_1 - B_0)}{t_1 - t_0} = \frac{-100 \cdot 0,05^2 \cdot (0,2 - 0,5)}{0,1 - 0} = \frac{-0,075}{0,1} = 0,75V$$

b) El flujo inicial en este caso es el mismo y el campo vale 0,5 T, pero el flujo final será 0, ya que la bobina se coloca sobre el plano XY y es paralelo al campo magnético, por lo tanto no habrá flujo final. Así la f.e.m. indicada en este caso será:

$$\varepsilon = -\frac{d\phi}{dt} = -\frac{\Delta\phi}{\Delta t} = \frac{-N \cdot L^2 (B_1 - B_0)}{t_1 - t_0} = \frac{-100 \cdot 0,05^2 \cdot (0 - 0,5)}{1} = \frac{-0,125}{1} = 0,125V$$

c) Si la bobina se desplaza a lo largo del eje Z no habrá variación de flujo, y por lo tanto no se producirá ninguna fuerza electromotriz inducida.

8.- En la cámara de ionización de un espectrómetro de masas se obtienen iones $^2H^+$. Estos iones se aceleran mediante una diferencia de potencial de 1500 V y penetran en un campo magnético uniforme de 0,1T perpendicular a la velocidad de los iones. Calcula:

a) La velocidad con la que los iones penetran en el campo magnético.

b) El radio de la órbita circular que describen los iones en el interior del campo magnético.

Datos: carga del ión: $1,602 \cdot 10^{-19} C$, masa: $3,34 \cdot 10^{-27} kg$

a) El incremento de la energía cinética de los iones $^2H^+$ es igual a su pérdida de energía potencial electrostática:

$$\Delta E_c = -\Delta E_{pe} \rightarrow \frac{1}{2} m v^2 = q \cdot \Delta V$$

De aquí deducimos su velocidad:

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot q \cdot \Delta V}{m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1500}{3,34 \cdot 10^{-27}}} = 3,8 \cdot 10^5 m \cdot s^{-1}$$

a) El radio de la circunferencia que describen los iones se calcula a partir de su velocidad y del campo magnético:

$$R = \frac{m v}{q \cdot B} = \frac{3,34 \cdot 10^{-27} kg \cdot 3,8 \cdot 10^5 m \cdot s^{-1}}{1,6 \cdot 10^{-19} C \cdot 0,1T} = 7,9 \cdot 10^{-2} m$$

9.- Una espira de 10 cm de radio se coloca en un campo magnético uniforme de 0,4 T y se la hace girar con una frecuencia de 20 Hz. En el instante inicial el plano de la espira es perpendicular al campo.

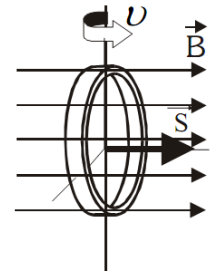
- a) **Escriba la expresión del flujo magnético que atraviesa la espira en función del tiempo y determine el valor máximo de la f.e.m. inducida.**
b) **Explique cómo cambiarían los valores máximos del flujo magnético y de la f.e.m. inducida si se duplicase el radio de la espira. ¿Y si se duplicara la frecuencia de giro?**

a) Estamos ante una cuestión de inducción electromagnética (generación de corriente eléctrica en un circuito por la acción de un campo magnético). Se inducirá corriente eléctrica en el circuito si varía respecto al tiempo el flujo magnético Φ que atraviesa la superficie encerrada por el circuito. El flujo magnético nos indica el número de líneas de campo (considerando una línea por cada m^2) que atraviesan la superficie del circuito. Se calcula con la expresión:

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

considerando el campo B uniforme y el circuito plano.

α es el ángulo que forma el vector superficie $\vec{S}$ (perpendicular al plano de la espira) con el campo $\vec{B}$. Inicialmente es cero (dibujo), pero cambia con el tiempo, ya que la espira describe un movimiento circular uniforme.



$$\alpha = \alpha_0 + \omega t = 0 + 2\pi\nu = 2\pi t \text{ (rad)}$$

El flujo magnético que atraviesa la espira será

$$\phi_m = B \cdot S \cdot \cos \alpha = B \cdot 4\pi R^2 \cdot \cos(2\pi\nu t)$$

La fuerza electromotriz inducida (f.e.m.) (ε), energía que se suministra a cada culombio de carga eléctrica, se obtiene aplicando la ley de Faraday-Lenz: "La corriente inducida en un circuito es originada por la variación del flujo magnético que atraviesa dicho circuito. Su sentido es tal que se opone a dicha variación."

La expresión de esta ley queda:

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

Así:

$$\varepsilon = -\frac{d\phi_m}{dt} = -\frac{d[B \cdot 4\pi R^2 \cdot \cos(2\pi\nu t)]}{dt} = -8\pi^2 \cdot \nu \cdot B \cdot R^2 \cdot \sin(2\pi\nu t)$$

Sustituyendo valores $R = 0,1 \text{ m}$, $B = 0,4 \text{ T}$, $\nu = 20 \text{ Hz}$, obtenemos:

$$\phi_m = B \cdot S \cdot \cos \alpha = B \cdot 4\pi \cdot R^2 \cdot \cos(2\pi\nu t) = 0,05 \cdot \cos(40\pi t) \text{ Wb}$$

Y

$$\varepsilon = -6,3 \sin(40\pi t) \text{ V}$$

Y por tanto:

$$\varepsilon_{m\acute{a}x} = 6,3 \text{ V}$$

- b) Al duplicar el radio de la espira, la superficie de la misma se cuadruplica, con lo que el valor máximo del flujo magnético y de la f.e.m. también se cuadruplicará.

$$\phi_m = B \cdot 4\pi \cdot R^2 \cdot \cos(2\pi\nu t) \Rightarrow \phi_{m\acute{a}x} = 4\pi \cdot B \cdot R^2$$

$$\varepsilon = -8\pi^2 \cdot \nu \cdot B \cdot R^2 \cdot \sin(2\pi\nu t) \Rightarrow \varepsilon_{m\acute{a}x} = 8\pi^2 \cdot \nu \cdot B \cdot R^2$$

Al duplicar la frecuencia de giro, el valor máximo del flujo magnético no se ve afectado, no depende de ν . Lo único que cambia es el ritmo de variación del flujo magnético. Según la ley de Faraday-Lenz, la f.e.m. debe cambiar. Y el valor máximo cambia (se duplica), ya que depende de ν .

7.8.- Relación de Problemas y Cuestiones

7.8.1.- Problemas

1.- Un electrón que se mueve en el sentido positivo del eje OX con una velocidad de $5 \cdot 10^4$ m/s penetra en una región donde existe un campo de 0,05 T dirigido en el sentido negativo del eje OZ. Calcular:

- Aceleración del electrón.
- Radio de la órbita descrita y periodo orbital.

Datos: ($m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ kg ; $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C)

Solución: a) $a = -4,4 \cdot 10^{14}$ j m/s² ; b) $R = 5,7 \cdot 10^{-6}$ m; $T = 7,1 \cdot 10^{-10}$ s

2.- Un electrón penetra con una velocidad de $4 \cdot 10^4$ m/s en el sentido positivo del eje OX, en una región en la que existe un campo magnético B de 0,5 T en el sentido positivo del eje OZ. Calcular:

- Diferencia de potencial necesaria para que el electrón adquiriera la energía cinética inicial.
- Campo eléctrico que habría que aplicar para que el electrón mantuviera su trayectoria rectilínea.

Datos: ($m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ kg ; $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C)

Solución: a) $\Delta V = 4,55 \cdot 10^{-3}$ V ; b) $E = 2 \cdot 10^4$ j N/C

3.- Un protón, tras ser acelerado por una diferencia de potencial de 10^5 V, entra en una región en la que existe un campo magnético de dirección perpendicular a su velocidad, describiendo una trayectoria circular de 30 cm de radio.

- Realice un análisis energético de todo el proceso y, con ayuda de esquemas, explique las posibles direcciones y sentidos de la fuerza, velocidad, campo eléctrico y campo magnético implicados.
- Calcule la intensidad del campo magnético. ¿Cómo variaría el radio de la trayectoria si se duplicase el campo magnético? . Datos: ($m_p = 1,66 \cdot 10^{-27}$ kg ; $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C)

Solución: b) $B = 0,15$ T al duplicar B, R se hace la mitad

4.- Un chorro de iones de dos isótopos de masas m_1 y m_2 con igual carga q, entran con velocidad v en el interior de un campo magnético uniforme de intensidad B, perpendicular a v. Calcular:

- Relación entre los radios de las órbitas que describen.
- Relación entre los respectivos periodos de revolución.

Solución: a) $R_1/R_2 = m_1/m_2$; b) $T_1/T_2 = m_1/m_2$

5.- Dos conductores paralelos y rectilíneos, recorridos por corrientes del mismo sentido de 10 A y 20 A respectivamente, están separados 10 cm. Calcular:

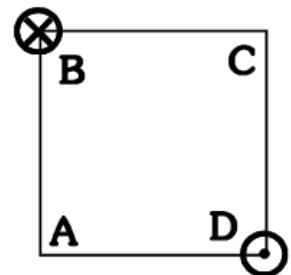
- Campo magnético creado en un punto situado a 10 cm del primer conductor y a 20 cm del segundo.
- Fuerza por unidad de longitud sobre un conductor rectilíneo situado en el mismo plano que los otros dos conductores, paralelo y equidistante a ambos, por el que circula una corriente de 5 A en el sentido contrario al de los otros dos. Datos: ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Tm/A)

Solución: a) $B = 4 \cdot 10^{-5}$ k T ; b) $B = 4 \cdot 10^{-5}$ k T ; $f = -2 \cdot 10^{-4}$ i N/m

6.- Dos hilos metálicos largos y paralelos, por los que circulan corrientes de 3 A y 4 A, pasan por los vértices B y D de un cuadrado de 2 m de lado, situado en un plano perpendicular, como ilustra la figura. El sentido de las corrientes es el indicado en la figura.

- Dibuje un esquema en el que figuren las interacciones mutuas y el campo magnético resultante en el vértice A.
- Calcule los valores numéricos del campo magnético en A y de la fuerza por unidad de longitud ejercida sobre uno de los hilos.

Datos: ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Tm/A)



Solución: b) $B_A = (-3 \cdot 10^{-7}$ i - $4 \cdot 10^{-7}$ j) T ; $F = 8,5 \cdot 10^{-7}$ N/m

7.- Un conductor recto de 2 m de largo por el que circula una corriente de 3 A está en el interior de un campo magnético uniforme de 1,5 T. El conductor forma un ángulo de 37° con la dirección del campo magnético. ¿Cuál es el valor de la fuerza que actúa sobre el conductor?

Solución: $F = -5,4 \text{ k N}$

8.- Por una espira rectangular de 10 y 20 cm de lado, 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 la fuerza magnética sobre cada lado de la espira. ¿Qué movimiento realizará la espira?

Solución: Lado superior: 1 k N ; lado inferior: -1 k N ; laterales: 0 N

9.- Un alambre homogéneo de 50 cm de longitud y 10 g de masa se encuentra "sumergido" en un campo magnético de 0,2 T, como indica la figura. Determina la magnitud y dirección de la intensidad de corriente que deberá circular para que se mantenga en equilibrio y no caiga por acción de su propio peso.



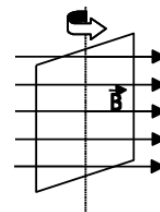
Solución: 1 A hacia la derecha

10.- Una bobina de 100 espiras cuadradas de 5 cm de lado se encuentra en el interior de un campo magnético uniforme, de dirección normal al plano de la espira y de intensidad variable con el tiempo: $B = 2t^2$ T.

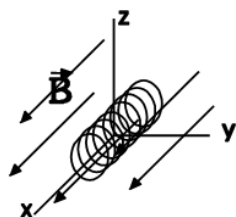
- Deduzca la expresión del flujo magnético a través de la espira en función del tiempo.
- Represente gráficamente la fuerza electromotriz inducida en función del tiempo y calcule su valor para $t = 4 \text{ s}$.

Solución a) $\phi_m = 0,5 t^2 \text{ Tm}^2$; b) $\varepsilon = -t \text{ V}$; $\varepsilon = -4 \text{ V}$

11.- Hacemos girar una espira cuadrada de 0,5 m de lado con una velocidad angular de 200 rad/s en el interior de un campo magnético uniforme de 0,8 T tal y como se indica en la figura. Calcula la f.e.m. inducida en el cuadro y representarla gráficamente. (Considerar que inicialmente el ángulo que forman B y S es cero)



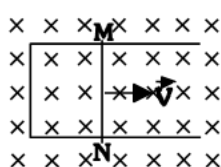
Solución: $\varepsilon = 40 \sin(200 t) \text{ V}$



12.- Una bobina de 10 espiras, de 2 cm^2 cada una, gira a 100 rpm alrededor del eje OZ, en presencia de un campo magnético uniforme de 0,2 T dirigido en el sentido positivo del eje OX.

- Escribir la expresión de la f.e.m. inducida.
- f.e.m. inducida si, manteniendo la espira en reposo, la intensidad del campo disminuye uniformemente con el tiempo, anulándose en 5 s.

Solución: a) $\varepsilon = 4,3 \cdot 10^{-3} \cdot \sin(10,5 t) \text{ V}$; b) $\varepsilon = 8 \cdot 10^{-5} \text{ V}$



13.- Una espira rectangular está formada por un lado móvil MN que se mueve como se indica en el dibujo con $v = 1 \text{ m/s}$. Dicha espira sufre un campo magnético perpendicular a ella $B = 5 \text{ T}$.

Si $MN = 10 \text{ cm}$. ¿Qué f.e.m. se produce? ¿Qué sentido tiene? (Nota: la superficie de la espira viene dada por $S = b \cdot h$, con $h = 10 \text{ cm}$ y $b = v \cdot t$)

Solución: $\varepsilon = 0,5 \text{ V}$; sentido de corriente antihorario.

14.- Un haz de electrones se mueve acelerado por una diferencia de potencial de 50 kV en el sentido positivo del eje OX y penetra en una región en la que existe un campo magnético $B = 2 \text{ j (T)}$. Calcular:

- Radio de la órbita descrita por los electrones.
- Campo eléctrico que habría que aplicar para que los electrones mantuvieran su trayectoria rectilínea. Datos: ($m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$; $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$)

Solución: $R = 3,8 \cdot 10^{-4} \text{ m}$, $E = -2,65 \cdot 10^8 \text{ k N/C}$

15.- Dos conductores rectilíneos de gran longitud, paralelos, están situados entre el eje X y el eje Y (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 (-10,0) y (10,0) cm si:

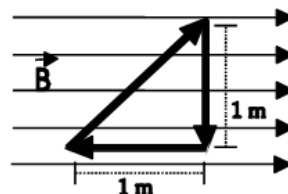
- Por ambos conductores circula una corriente de 5 A en el sentido positivo del eje OY
- Se invierte el sentido de la corriente en el conductor situado en el eje OY

Datos: $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Tm/A}$

Solución: a) $B(-10,0) = 1,33 \cdot 10^{-5} \text{ k T}$; $B(10,0) = 0 \text{ T}$ b) $B(-10,0) = -6,7 \cdot 10^{-6} \text{ k T}$; $B(10,0) = 2 \cdot 10^{-5} \text{ k T}$

16.- En la figura está representado un campo magnético uniforme $B = 0,5 \text{ T}$. Calcular:

- Módulo, dirección y sentido de la fuerza que actúa sobre cada uno de los lados del circuito, cuando por él circula una corriente de 10 A, en el sentido indicado por la figura.
- ¿Cuál es la fuerza total sobre el circuito?



Solución: a) lado oblicuo $F = -5 \text{ k N}$, lado vertical $F = 5 \text{ k N}$, lado horizontal $F = 0 \text{ N}$ b) $F_T = 0 \text{ N}$, la espira no se desplaza pero gira.

7.8.2.- Cuestiones

1.- ¿Qué dirección debe tener el movimiento de una carga en un campo magnético para que no esté sometida a ninguna fuerza magnética?

2.- Un protón viaja por una región del espacio sin experimentar ninguna desviación. ¿Puede afirmarse que en esa región no existe campo magnético? Razonar la respuesta

3.- Una partícula con carga q y masa m se mueve en dirección perpendicular a un campo B . Demostrar que la frecuencia de su movimiento orbital es $\nu = B q / 2\pi m$ (Hz)

4.- ¿Depende la fuerza magnética que midamos del sistema de referencia que tomemos para medirla? Razonar la respuesta.

5.- Una partícula, con carga q , penetra en una región en la que existe un campo.

- Explique cómo podríamos determinar, al observar la trayectoria de la partícula, si se trata de un campo eléctrico o magnético. ¿Hay algún caso en que no sería posible determinar el tipo de campo?
- Haga un análisis energético del movimiento de la partícula para un campo eléctrico y para un campo magnético, ambos perpendiculares a la velocidad con que la partícula penetra en el campo.

6.- Un electrón, un protón y un átomo de helio penetran en una zona del espacio en la que existe un campo magnético uniforme en dirección perpendicular a la velocidad de las partículas.

- Dibuje la trayectoria que seguirá cada una de las partículas e indique sobre cuál de ellas se ejercerá una fuerza mayor.
- compare las aceleraciones de las tres partículas. ¿Cómo varía su energía cinética?

7.- Una espira atraviesa una región del espacio en la que existe un campo magnético uniforme, vertical y hacia arriba. La espira se mueve en un plano horizontal.

- Explique si circula corriente o no por la espira cuando: i) está penetrando en la región del campo, ii) mientras se mueve en dicha región, iii) cuando está saliendo.
- Indique el sentido de la corriente, en los casos en que exista, mediante un esquema.

8.- ¿Se puede transformar la corriente continua de la misma forma que se hace con la corriente alterna? Razonar la respuesta.

7.9.- Para saber más

1.- La intensidad de un campo magnético es 10T. ¿Qué flujo atravesará una superficie de 50 cm^2 en los siguientes casos?: a) El campo es perpendicular a la superficie; b) El campo y la normal a la superficie forman un ángulo de 60° .

Solución: a) 0,05 wb; b) 0,025 Wb

2.- Un electrón penetra en un campo de inducción 0,02T, perpendicularmente a las líneas de inducción. ¿Qué fuerza actúa sobre él si su velocidad es de 1500 m/s.?

Solución: $4,8 \cdot 10^{-18} \text{ N}$

3.- Un protón con una energía cinética de 1 Mev se mueve perpendicularmente a un campo magnético de 1,5 T. Calcúlese la fuerza que actúa sobre esa partícula. Datos: Masa del protón: $1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$, carga del protón $1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$.

Solución: $3,3 \cdot 10^{-12} \text{ N}$

4.- En un mismo punto de un campo magnético B dejamos en libertad un protón y un electrón dotados de la misma velocidad, perpendicular a las líneas de campo. Deducir la relación existente:

- a) Entre los radios de las órbitas que describen.
- b) Entre los periodos de las mismas.

Solución: a) 1836; b) 1836

5.- Un núcleo de helio penetra en un campo magnético de inducción 1,2 T con una velocidad perpendicular al campo de $25 \cdot 10^4 \text{ m/s}$. ¿Qué fuerza actúa sobre él?.

Solución: $9,6 \cdot 10^{-14} \text{ N}$

6.- Calcular el campo magnético creado por un hilo de 3m de longitud por el que circula una corriente de 100 A en un punto situado a 1 cm del hilo.

Solución: $2 \cdot 10^{-3} \text{ T}$

7.- El flujo magnético que atraviesa una espira varía con el tiempo, de acuerdo con la expresión: $\Phi = 20t^4 - 6t^2$ (SI). Calcular el valor de la f.e.m. inducida al cabo de 2 seg.

Solución: 616 V

8.- Un electrón con 1 eV de energía cinética describe un movimiento circular uniforme en un plano perpendicular a un campo magnético de 10^{-4} T .

- a) Explicar con ayuda de esquemas las posibles direcciones y sentidos de la fuerza, velocidad y campo magnético implicados y calcular el radio de la trayectoria.
- b) Repetir el apartado anterior para otro electrón que siguiera una trayectoria rectilínea. $m_e = 9,1 \times 10^{-31} \text{ Kg}$; $e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$.

Solución: R= 3,4 cm.

9.- Un salto de agua de 20 m de altura y $48 \text{ m}^3/\text{s}$ de caudal, mueve un transformador que produce una corriente eléctrica de 2000 V y 4000 A. Calcular: a) la potencia del salto; b) La potencia del alternador; c) El rendimiento de la instalación; d) ¿Cómo se lograría que la tensión de la corriente fuese 100 veces mayor?; e) ¿Cuál sería en este caso la intensidad de la corriente?.

Solución: a) $9,42 \cdot 10^6 \text{ W}$; b) $8 \cdot 10^6 \text{ W}$; c) 85%; d) Con un transformador elevador cuyo n° de espiras secundario sea 100 veces mayor que el primario; e) 40 A.

10.- Un protón penetra en un campo magnético, con una velocidad perpendicular al campo y describe una trayectoria circular con un período de 10^{-5} s .

- a) Dibujar en un esquema el campo magnético, la fuerza que actúa sobre el protón y su velocidad en un punto de su trayectoria.
- b) Calcular el valor del campo magnético. Si el radio de la trayectoria que describe es de 5 cm ¿Cuál es la velocidad de la partícula?.

Solución: b) $B = 6,7 \times 10^{-3} \text{ T}$; $v = 3,14 \cdot 10^4 \text{ m/s}$.

11.- Un protón penetra en un campo eléctrico uniforme de 200 N.C^{-1} , con una velocidad de 10^6 m/s perpendicular a dicho campo.

- a) Explicar, con ayuda de un esquema, las características del campo magnético que habría que aplicar, superpuesto al eléctrico, para que no se modifique la dirección y sentido de la velocidad inicial del protón.
- b) Calcular el valor de dicho campo magnético. ¿Se modificaría el resultado si en vez de un protón penetrara, en las mismas condiciones, un electrón?.

Solución: b) $B = 2 \cdot 10^{-4} \text{ T}$

12.- Un electrón penetra con una velocidad de $5 \cdot 10^6 \text{ m/s}$ en un c.m de 12 T perpendicular a dicha velocidad.

- a) Dibujar en un esquema la fuerza que actúa sobre la partícula así como la trayectoria seguida, y justificar el tipo de trayectoria.
- b) Calcular el radio de la trayectoria y el tiempo que tarda en dar una vuelta completa. Comentar cómo varían dichos resultados si el c.m fuera de doble valor.

Solución: $R = 2,4 \cdot 10^{-6} \text{ m}$; $T = 3 \cdot 10^{-12} \text{ s}$.

13.- Por un conductor rectilíneo indefinido, apoyado sobre un plano horizontal, circula una corriente de 20 A .

- a) Dibujar las líneas del campo magnético producido por la corriente y calcular el valor de dicho campo en un punto situado en la vertical del conductor y a 2 cm de él.
 - b) ¿Qué corriente tendría que circular por un conductor paralelo al anterior y situado a 2 cm por encima de él, para que no cayera, si la masa por unidad de longitud de dicho conductor es de $0,1 \text{ Kg/dm}$?
- $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N.m}^2.\text{A}^{-2}$; $g = 10 \text{ m.s}^{-2}$.

Solución: a) $B = 2 \cdot 10^{-4} \text{ T}$ b) $I_2 = 100 \text{ A}$

14.- Entre dos placas planas paralelas hay un campo eléctrico de 10^4 N/C . Su longitud es de $5 \cdot 10^{-2} \text{ m}$ y la separación es de $2 \cdot 10^{-2} \text{ m}$. En la dirección del eje se manda un electrón que penetra entre las dos placas con la velocidad de 10^7 m/s . Calcular: a) ¿Cuánto ha descendido el electrón cuando sale de las placas? b) Ángulo que forma con el eje la velocidad a la salida de las placas;. DATOS: masa electrón = $9,1 \cdot 10^{-31} \text{ Kg}$; carga del electrón $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$. Despreciar efectos gravitatorios.

Solución: a) $0,022 \text{ m}$; b) $41,34^\circ$.

15.- 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 la Y positivas. Calcular el campo magnético creado por este conductor en los puntos $(2,2,0)$, $(0,0,5)$ admitiendo que se trabaja en el S.I.

Solución: a) $20 \cdot 10^{-7} \text{ T}$; b) $8 \cdot 10^{-7} \text{ T}$

16.- Un solenoide de 20 cm de longitud y 20 cm^2 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 magnético creado por el solenoide si se introduce en su interior una barra de hierro dulce, cuya permeabilidad magnética es de 10^{-3} T m/A .

Solución: a) $0,25 \text{ mT}$; b) $2\pi \text{ mT}$; c) 5 T

17.- 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, su energía cinética expresada en eV ($1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$) y su aceleración b) Determina el radio de su movimiento orbital, el período orbital y la variación de energía cinética al cabo de ese período.

Solución: a) $9 \cdot 10^7 \text{ m/s}$; $E_c = 23,031 \text{ eV}$; $a = 1,62 \cdot 10^{16} \text{ m/s}^2$; b) $T = 35 \text{ ns}$; $E_c = 0$

18.- Determina la rapidez con que se mueve un electrón en el interior de un c.m 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.

Solución: $6,25 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

19.- Determina el c.m 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 . Considerar cada lado como un conductor recto e indefinido.

Solución: $5,32 \cdot 10^{-7} \text{ T}$.

20.- Dada la ecuación $\vec{F} = q\vec{E}$ 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 término.

9º. Un electrón con velocidad de 10^4 m/s en el sentido positivo del eje OX penetra en una región en la que existe un c.m de 0, 5 T en el sentido positivo del eje OZ. Calcular a) a ddp necesaria para que el electrón adquiriera la energía cinética inicial; b) campo eléctrico que hay que aplicar para que el electrón mantenga rectilínea su trayectoria.

Solución: a) $284\mu\text{V}$; b) 5000 j N/C

21.- Una carga positiva de 5 mC se mueve con una velocidad $\vec{v} = 5\vec{i} - 5\vec{k}$ en el interior de un c.m. $\vec{B} = \vec{i} + 2\vec{j} - \vec{k}$. Deducir la fuerza que actúa sobre dicha carga.

Solución: $\vec{F} = 5 \cdot 10^{-2} \vec{i} + 5 \cdot 10^{-2} \vec{j}$

22.- Por un conductor recto, dirigido a lo largo del eje OY, circula en el sentido de ese eje, una intensidad de corriente de 20 A. Calcula la fuerza que el c.m $\vec{B} = 2\vec{i} + 3\vec{k}$ ejerce, por unidad de longitud, sobre dicho conductor.

Solución: $72,11 \text{ N/m}$

23.- 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 8g/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).

Solución: $0,5 \text{ cm}$

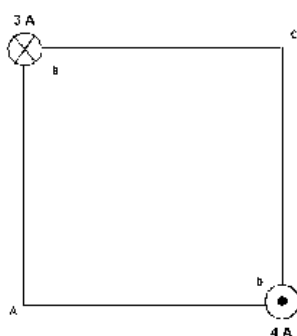
7.10.- Histórico Ejercicios de Selectividad Andalucía desde 1996

7.10.1.- Problemas Electromagnetismo

(96-E) Un electrón con 1 eV de energía cinética describe un movimiento circular uniforme en un plano perpendicular a un campo magnético de 10^{-4} T .

- Explique con ayuda de esquemas, las posibles direcciones y sentidos de la fuerza, velocidad y campo magnético implicados y calcule el radio de la trayectoria.
- Repita el apartado anterior para otro electrón que siguiera una trayectoria rectilínea.

Datos: $m_e = 9,1 \times 10^{-31} \text{ Kg}$. $e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$.



(97-E) Dos hilos metálicos largos y paralelos, por los que circulan corrientes de 3A y 4A, pasan por los vértices B y D de un cuadrado de 2 m de lado, situado en un plano perpendicular, como se ilustra en la figura. El sentido de las corrientes se indica por los símbolos $\times$ = entra en el papel, $\bullet$ = sale del papel.

- Dibuje un esquema en el que figuren las interacciones mutuas y el campo magnético resultante en el vértice A.
- Calcule los valores numéricos del campo magnético en A y de la fuerza por unidad de longitud ejercida sobre uno de los hilos.

Datos: $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ N}\cdot\text{m}^2\cdot\text{A}^{-2}$

(97-R) Un protón, tras ser acelerado mediante una diferencia de potencial de 10^5 V , entra en una región en la que existe un campo magnético de dirección perpendicular a su velocidad, describiendo una trayectoria circular de 30 cm de radio.

- Realice un análisis energético de todo el proceso, y con ayuda de esquemas, explique las posibles direcciones y sentidos de la fuerza, velocidad, campo eléctrico y campo magnético implicados.
- Calcule la intensidad del campo magnético. ¿Cómo varía el radio de la trayectoria si se duplicase el campo magnético?

Datos: $m_p = 1,7 \times 10^{-27} \text{ Kg}$. $e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$.

(97-R) Una espira cuadrada de 5 cm de lado se encuentra en el interior de un campo magnético uniforme, de dirección normal al plano de la espira y de intensidad variable con el tiempo: $B = 2t^2$ (T).

- Deduzca la expresión del flujo magnético a través de la espira en función del tiempo.
- Represente gráficamente la fuerza electromotriz inducida en función del tiempo y calcule su valor para $t = 4$ s.

(97-R) Un electrón penetra en una región en la que existe un campo magnético, de intensidad 0,1 T, con una velocidad de 6×10^6 m/s perpendicular al campo.

- Dibuje un esquema representando el campo, la fuerza magnética y la trayectoria seguida por el electrón y calcule el radio. ¿Cómo cambiaría la trayectoria si se tratara de un protón?
- Determine las características del campo eléctrico que, superpuesto al magnético, haría que el electrón siguiera un movimiento rectilíneo uniforme.

$$\text{Datos: } m_e = 9,1 \times 10^{-31} \text{ Kg. } e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C. } m_p = 1,7 \times 10^{-27} \text{ Kg.}$$

(98-R) Por un conductor rectilíneo indefinido, apoyado sobre un plano horizontal, circula una corriente de 20 A.

- Dibuje las líneas del campo magnético producido por la corriente y calcule el valor de dicho campo en un punto situado en la vertical del conductor y a 2 cm de él.
- ¿Qué corriente tendría que circular por un conductor, paralelo al anterior y situado a 2 cm por encima de él, para que no cayera, si la masa por unidad de longitud de dicho conductor es de 0,1 kg?

$$\text{Datos: } \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ N}\cdot\text{m}^2\cdot\text{A}^{-2} \quad g = 10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$$

(98-R) Un protón, acelerado por una diferencia de potencial de 10^5 V, penetra en una región en la que existe un campo magnético uniforme de 2 T, perpendicular a su velocidad.

- Dibuje la trayectoria seguida por la partícula y analícelas variaciones de energía del protón desde su situación inicial de reposo hasta encontrarse en el campo magnético.
- Calcule el radio de la trayectoria del protón y su periodo y explique las diferencias que encontrarías si se tratara de un electrón que penetrara con la misma velocidad en el campo magnético.

$$\text{Datos: } m_e = 9,1 \times 10^{-31} \text{ Kg. } e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C. } m_p = 1,7 \times 10^{-27} \text{ Kg.}$$

(98-R) Una espira cuadrada de 10 cm de lado, inicialmente horizontal, gira a 1200 revoluciones por minuto, en torno a uno de sus lados, en un campo magnético uniforme vertical de 0,2 T.

- Calcule el valor máximo de la fuerza electromotriz inducida en la espira y represente, en función del tiempo, el flujo magnético a través de la espira y la fuerza electromotriz inducida.
- ¿Cómo se modificaría la fuerza electromotriz inducida en la espira si se redujera la velocidad de rotación a la mitad? ¿Y si se invirtiera el sentido del campo magnético?

(99-E) 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.
- Calcule los valores numéricos del campo magnético en dicho vértice y de la fuerza por unidad de longitud ejercida sobre uno de los dos hilos.

$$\text{Datos: } \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ N}\cdot\text{m}^2\cdot\text{A}^{-2}$$

(99-E) En una región del espacio en la que existe un campo eléctrico de 100 N/C y un campo magnético de 10^{-3} T, perpendiculares entre sí, penetran un protón y un electrón con velocidades perpendiculares a ambos campos.

- Dibuje en un esquema los vectores velocidad, campo eléctrico y campo magnético en el caso de que las partículas no se desvíen.
- ¿Qué energía cinética debería tener el protón y el electrón en esas condiciones?

$$\text{Datos: } m_e = 9,1 \times 10^{-31} \text{ Kg. } e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C. } m_p = 1,7 \times 10^{-27} \text{ Kg.}$$

(99-R) Una espira circular de 10 cm de diámetro, inmóvil, está situada en una región en la que existe un campo magnético, perpendicular a su plano, cuya intensidad varía de 0,5 a 0,2 T en 0,1 s.

- Dibuje en un esquema la espira, el campo y el sentido de la corriente inducida, razonando la respuesta.
- Calcule la fuerza electromotriz inducida y razone cómo cambiaría dicha fuerza electromotriz si la intensidad del campo aumentase en lugar de disminuir.

(99-R) Una espira de 20 cm^2 se sitúa en un plano perpendicular a un campo magnético uniforme de $0,2 \text{ T}$.

- Calcule el flujo magnético a través de la espira y explique cómo varía el valor del flujo al girar la espira un ángulo de 60° .
- Si el tiempo invertido en el giro es de $2 \times 10^{-3} \text{ s}$, ¿cuánto vale la fuerza electromotriz media inducida en la espira? Explique que habría ocurrido si la espira se hubiese girado en sentido contrario.

(99-R) Un electrón penetra con una velocidad de $5 \times 10^6 \text{ m/s}$ en un campo magnético de 12 T perpendicular a dicha velocidad.

- Dibuje en un esquema la fuerza que actúa sobre la partícula así como la trayectoria seguida, y justifique el tipo de trayectoria.
- Calcule el radio de la trayectoria y el tiempo que tarda en dar una vuelta completa. Comente cómo varían dichos resultados si el campo magnético fuera de valor doble.

Datos: $m_e = 9,1 \times 10^{-31} \text{ Kg}$. $e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$.

(00-E) Un protón penetra en un campo eléctrico uniforme de 200 N C^{-1} , con una velocidad de 10^6 m s^{-1} perpendicular a dicho campo.

- Explique, con ayuda de un esquema, las características del campo magnético que habría que aplicar, superpuesto al eléctrico, para que no se modifique la dirección y sentido de la velocidad inicial del protón.
- Calcule el valor de dicho campo magnético. ¿Se modificaría el resultado si en vez de un protón penetrara, en las mismas condiciones un electrón? Datos: $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

(00-R) Un protón penetra en un campo magnético, con una velocidad perpendicular al campo, y describe una trayectoria circular con un período de 10^{-5} s .

- Dibuje en un esquema el campo magnético, la fuerza que actúa sobre el protón y su velocidad en un punto de su trayectoria.
- Calcule el valor del campo magnético. Si el radio de la trayectoria que describe es de 5 cm , ¿cuál es la velocidad de la partícula? Datos: $e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$. $m_p = 1,7 \times 10^{-27} \text{ Kg}$.

(00-R) Para caracterizar el campo magnético uniforme que existe en una región se utiliza un haz de protones con una velocidad de $5 \times 10^5 \text{ m s}^{-1}$. Si se lanza el haz en la dirección del eje **X**, la trayectoria de los protones es rectilínea, pero si se lanza en el sentido positivo del eje **Z**, actúa sobre los protones una fuerza de 10^{-14} N dirigida en el sentido positivo del eje **Y**.

- Determine, razonadamente, el campo magnético (módulo, dirección y sentido).
- Describa, sin necesidad de hacer cálculos, cómo se modificaría la fuerza magnética y la trayectoria de las partículas si en lugar de protones se lanzaran electrones con la misma velocidad.

Datos: $e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$.

(00-R) Una espira cuadrada de 2 m de lado está situada perpendicularmente a un campo magnético uniforme de $0,5 \text{ T}$.

- Explique razonadamente si, en estas circunstancias, se induce corriente eléctrica en la espira.
- Determine la fuerza electromotriz media inducida en la espira si, en $0,1 \text{ s}$, gira 90° en torno a un eje perpendicular al campo.

(01-E) Un protón se mueve en el sentido positivo del eje OY en una región donde existe un campo eléctrico de $3 \cdot 10^5 \text{ N C}^{-1}$ en el sentido positivo del eje OZ y un campo magnético de $0,6 \text{ T}$ en el sentido positivo del eje OX.

- Dibuje un esquema de las fuerzas que actúan sobre la partícula y razona en qué condiciones la partícula no se desvía.
- Si un electrón se moviera en el sentido positivo del eje OY con una velocidad de 10^3 m s^{-1} , ¿sería desviado? Explíquelo.

(01-R) Dos conductores rectilíneos, verticales y paralelos, A a la izquierda y B a la derecha, distan entre sí 10 cm . Por A circula una corriente de 10 A hacia arriba.

- Calcule la corriente que debe circular por B, para que el campo magnético en un punto situado a 4 cm a la izquierda de A sea nulo.
- Explique con ayuda de un esquema si puede ser nulo el campo magnético en un punto intermedio entre los dos conductores. Datos: $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N A}^{-2}$

(01-R) Un protón, que se encuentra inicialmente en reposo, se acelera por medio de una diferencia de potencial de 6000 V. Posteriormente, penetra en una región del espacio donde existe un campo magnético de 0,5 T, perpendicular a su velocidad.

- Calcule la velocidad del protón al entrar en el campo magnético y el radio de su trayectoria posterior.
- ¿Cómo se modificarían los resultados del apartado a) si se tratara de una partícula alfa, cuya masa es aproximadamente cuatro veces la del protón y cuya carga es dos veces la del mismo?

$$\text{Datos: } e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} ; m_p = 1,7 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

(02-E) En una región del espacio existe un campo magnético uniforme en el sentido negativo del eje Z. Indique, con la ayuda de un esquema, la dirección y sentido de la fuerza magnética en los siguientes casos:

- una partícula β que se mueve en el sentido positivo del eje X;
- una partícula α que se mueve en el sentido positivo del eje Z.

(02-R) Una espira cuadrada, de 30 cm de lado, se mueve con una velocidad constante de 10 m s^{-1} y penetra en un campo magnético de 0,05 T perpendicular al plano de la espira.

- Explique, razonadamente, qué ocurre en la espira desde que comienza a entrar en la región del campo hasta que toda ella está en el interior del campo. ¿Qué ocurriría si la espira, una vez en el interior del campo, saliera del mismo?
- Calcule la fuerza electromotriz inducida en la espira mientras está entrando en el campo.

(02-E) Dos conductores rectilíneos e indefinidos, paralelos, por los que circulan corrientes de igual intensidad, I, están separados una distancia de 0,1 m y se repelen con una fuerza por unidad de longitud de $6 \cdot 10^{-9} \text{ N m}^{-1}$.

- Explique cualitativamente, con la ayuda de un esquema en el que dibuje el campo y la fuerza que actúa sobre cada conductor, el sentido de la corriente en cada uno de ellos.
- Calcule el valor de la intensidad de corriente que circula por cada conductor.

$$\text{Datos: } \mu_0 = 4 \pi \cdot 10^{-7} \text{ T m A}^{-1}$$

(02-R) Un catión Na^+ penetra en un campo magnético uniforme de 0,6 T, con una velocidad de $3 \cdot 10^3 \text{ m s}^{-1}$, perpendicular a la dirección del campo.

- Dibuje la fuerza que el campo ejerce sobre el catión Na^+ y calcule su valor.
- Dibuje la trayectoria que sigue el catión Na^+ en el seno del campo magnético y determine el radio de dicha trayectoria. Datos: $m_{\text{Na}^+} = 3,8 \cdot 10^{-26} \text{ kg}$; $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

(02-R) Un protón se mueve en una órbita circular, de 1 m de radio, perpendicular a un campo magnético uniforme de 0,5 T.

- Dibuje la fuerza que el campo ejerce sobre el protón y calcule la velocidad y el período de su movimiento.
- Repita el apartado anterior para el caso de un electrón y compare los resultados.

$$\text{Datos: } m_p = 1,7 \cdot 10^{-27} \text{ kg} ; m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg} ; e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

(02-R) Un protón, un deuterón (${}^2_1\text{H}^+$) y una partícula alfa, acelerados desde el reposo por una misma diferencia de potencial V, penetran posteriormente en una región en la que hay un campo magnético uniforme, **B**, perpendicular a la velocidad de las partículas.

- ¿Qué relación existe entre las energías cinéticas del deuterón y del protón? ¿Y entre las de la partícula alfa y del protón?
- Si el radio de la trayectoria del protón es de 0,01 m, calcule los radios de las trayectorias del deuterón y de la partícula alfa. Datos: $m_{\text{alfa}} = 2 m_{\text{deuterón}} = 4 m_{\text{protón}}$

(03-E) Por un alambre recto y largo circula una corriente eléctrica de 50 A. Un electrón, moviéndose a 10^6 m s^{-1} , se encuentra a 5 cm del alambre. Determine la fuerza que actúa sobre el electrón si su velocidad está dirigida:

- Hacia el alambre.
- Paralela al alambre. ¿Y si la velocidad fuese perpendicular a las dos direcciones anteriores.

$$\text{Datos: } e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} ; \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N A}^{-2}$$

(03-R) El flujo de un campo magnético que atraviesa cada espira de una bobina de 250 vueltas, entre $t = 0$ y $t = 5 \text{ s}$, está dado por la expresión: $\Phi(t) = 3 \cdot 10^{-3} + 15 \cdot 10^{-3} t^2$ (S.I.)

- Deduzca la expresión de la fuerza electromotriz inducida en la bobina en ese intervalo de tiempo y calcule su valor para $t = 5$ s.
- A partir del instante $t = 5$ s el flujo magnético comienza a disminuir linealmente hasta anularse en $t = 10$ s. Represente gráficamente la fuerza electromotriz inducida en la bobina en función del tiempo, entre $t = 0$ y $t = 10$ s.

(03-R) En una región del espacio coexisten un campo eléctrico uniforme de 5000 V m^{-1} (dirigido en el sentido positivo del eje X) y un campo magnético uniforme de $0,3 \text{ T}$ (dirigido en el sentido positivo del eje Y):

- ¿Qué velocidad (módulo, dirección y sentido) debe tener una partícula cargada para que atraviese dicha región sin desviarse?
- Calcule la intensidad de un campo eléctrico uniforme capaz de comunicar a un protón en reposo dicha velocidad tras desplazarse 2 cm . Datos: $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$; $m_p = 1,7 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

(03-R) Una espira circular de 45 mm de radio está situada perpendicularmente a un campo magnético uniforme. Durante un intervalo de tiempo de $120 \cdot 10^{-3} \text{ s}$ el valor del campo aumenta linealmente de 250 mT a 310 mT .

- Calcule el flujo del campo magnético que atraviesa la espira durante dicho intervalo y la fuerza electromotriz inducida en la espira.
- Dibuje en un esquema el campo magnético y el sentido de la corriente inducida en la espira. Explique el razonamiento seguido.

(04-E) Suponga dos hilos metálicos largos, rectilíneos y paralelos, perpendiculares al plano del papel y separados 60 mm , por los que circulan corrientes de 9 y 15 A en el mismo sentido.

- Dibuje en un esquema el campo magnético resultante en el punto medio de la línea que une ambos conductores y calcule su valor.
- En la región entre los conductores, ¿a qué distancia del hilo por el que circula la corriente de 9 A será cero el campo magnético? Datos: $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N A}^{-2}$

(04-E) Un campo magnético, cuyo módulo viene dado por: $B = 2 \cos 100 t$ (S. I.), forma un ángulo de 45° con el plano de una espira circular de radio $R = 12 \text{ cm}$.

- Calcule la fuerza electromotriz inducida en la espira en el instante $t = 2 \text{ s}$.
- ¿Podría conseguirse que fuera nula la fuerza electromotriz inducida girando la espira? Razone la respuesta.

(05-R) En un experimento se aceleran partículas alfa ($q = +2e$) desde el reposo, mediante una diferencia de potencial de 10 kV . Después, entran en un campo magnético $B = 0,5 \text{ T}$, perpendicular a la dirección de su movimiento. a) Explique con ayuda de un esquema la trayectoria de las partículas y calcule la velocidad con que penetran en el campo magnético. b) Calcule el radio de la trayectoria que siguen las partículas alfa en el seno del campo magnético. Datos: $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$; $m = 6,7 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

(05-R) Dos conductores rectilíneos, paralelos y muy largos, separados 10 cm , transportan corrientes de 5 y 8 A , respectivamente, en sentidos opuestos. a) Dibuje en un esquema el campo magnético producido por cada uno de los conductores en un punto del plano definido por ellos y situado a 2 cm del primero y 12 cm del segundo y calcule la intensidad del campo total. b) Determine la fuerza por unidad de longitud sobre uno de los conductores, indicando si es atractiva o repulsiva. Datos: $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N A}^{-2}$

(05-E) Una espira de 10 cm de radio se coloca en un campo magnético uniforme de $0,4 \text{ T}$ y se la hace girar con una frecuencia de 20 Hz . En el instante inicial el plano de la espira es perpendicular al campo. a) Escriba la expresión del flujo magnético que atraviesa la espira en función del tiempo y determine el valor máximo de la f.e.m. inducida. b) Explique cómo cambiarían los valores máximos del flujo magnético y de la f.e.m. inducida si se duplicase el radio de la espira. ¿Y si se duplicara la frecuencia de giro?

(06-R) Un hilo recto, de longitud $0,2 \text{ m}$ y masa $8 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$, está situado a lo largo del eje OX en presencia de un campo magnético uniforme $\mathbf{B} = 0,5 \mathbf{j} \text{ T}$

- Razone el sentido que debe tener la corriente para que la fuerza magnética sea de sentido opuesto a la fuerza gravitatoria, $\mathbf{F}_g = -F_g \mathbf{k}$
- Calcule la intensidad de corriente necesaria para que la fuerza magnética equilibre al peso del hilo.

Datos: $g = 10 \text{ m s}^{-2}$

(06-E) a) Un electrón incide en un campo magnético perpendicular a su velocidad. Determine la intensidad del campo magnético necesaria para que el período de su movimiento sea 10^{-6} s .

b) Razone cómo cambiaría la trayectoria descrita si la partícula incidente fuera un protón.

Datos: $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$; $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$; $m_p = 1,7 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

(06-R) Por un conductor rectilíneo situado sobre el eje OZ circula una corriente de 25 A en el sentido positivo de dicho eje. Un electrón pasa a 5 cm del conductor con una velocidad de 10^6 m s^{-1} . Calcule la fuerza que actúa sobre el electrón e indique con ayuda de un esquema su dirección y sentido, en los siguientes casos:

a) Si el electrón se mueve en el sentido negativo del eje OY.

b) Si se mueve paralelamente al eje OX. ¿Y si se mueve paralelamente al eje OZ?

Datos: $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N A}^{-2}$

(06-R) Sea un solenoide de sección transversal $4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ y 100 espiras. En el instante inicial se aplica un campo magnético, perpendicular a su sección transversal, cuya intensidad varía con el tiempo según $B = 2t + 1 \text{ T}$, que se suprime a partir del instante $t = 5 \text{ s}$.

a) Explique qué ocurre en el solenoide y represente el flujo magnético a través del solenoide en función del tiempo.

b) Calcule la fuerza electromotriz inducida en el solenoide en los instantes $t = 3 \text{ s}$ y $t = 10 \text{ s}$.

(07-R) Una cámara de niebla es un dispositivo para observar trayectorias de partículas cargadas. Al aplicar un campo magnético uniforme, se observa que las trayectorias seguidas por un protón y un electrón son circunferencias.

a) Explique por qué las trayectorias son circulares y represente en un esquema el campo y las trayectorias de ambas partículas.

b) Si la velocidad angular del protón es $\omega_p = 10^6 \text{ rad s}^{-1}$, determine la velocidad angular del electrón y la intensidad del campo magnético. Datos: $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$; $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$; $m_p = 1,7 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

(07-R) Cuando una espira circular, situada en un campo magnético uniforme de 2 T, gira con velocidad angular constante en torno a uno de sus diámetros perpendicular al campo, la fuerza electromotriz inducida es: $\varepsilon(t) = -10 \sin(20t) \text{ (S.I.)}$

a) Deduzca la expresión de la f.e.m. inducida en una espira que gira en las condiciones descritas y calcule el diámetro de la espira y su periodo de revolución.

b) Explique cómo variarían el periodo de revolución y la f.e.m. si la velocidad angular fuese la mitad.

(07-R) Dos conductores rectilíneos, muy largos y paralelos, distan entre si 0,5 m. Por ellos circulan corrientes de 1 A y 2 A, respectivamente.

a) Explique el origen de las fuerzas que se ejercen ambos conductores y su carácter atractivo o repulsivo. Calcule la fuerza que actúa sobre uno de los conductores por unidad de longitud.

b) Determine el campo magnético total en el punto medio de un segmento que una los dos conductores si las corrientes son del mismo sentido. Datos: $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T m A}^{-1}$

(07-E) Por un conductor rectilíneo muy largo, apoyado sobre un plano horizontal, circula una corriente de 150 A.

a) Dibuje las líneas del campo magnético producido por la corriente y calcule el valor de dicho campo en un punto situado en la vertical del conductor y a 3 cm de él.

b) ¿Qué corriente tendría que circular por un conductor, paralelo al anterior y situado a 0,8 cm por encima de él, para que no cayera, si la masa por unidad de longitud de dicho conductor es de 20 g m^{-1} ?

Datos: $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T m A}^{-1}$; $g = 10 \text{ m s}^{-2}$

(07-R) Una espira circular de 2 cm de radio se encuentra en un campo magnético uniforme, de dirección normal al plano de la espira y de intensidad variable con el tiempo:

$B = 3t^2 + 4 \text{ (S.I.)}$

- a) Deduzca la expresión del flujo magnético a través de la espira en función del tiempo.
 b) Represente gráficamente la fuerza electromotriz inducida en función del tiempo y calcule su valor para $t = 2$ s.

(08-R) Una espira circular de 0,5 m de radio está situada en una región en la que existe un campo magnético perpendicular a su plano, cuya intensidad varía de 0,3 T a 0,4 T en 0,12 s.

- a) Dibuje en un esquema la espira, el campo magnético y el sentido de la corriente inducida y explique sus características.
 b) Calcule la fuerza electromotriz inducida en la espira y razone cómo cambiaría dicha fuerza electromotriz si la intensidad del campo disminuyese en lugar de aumentar.

(08-E) Dos conductores rectilíneos, indefinidos y paralelos distan entre sí 1,5 cm. Por ellos circulan corrientes de igual intensidad y del mismo sentido.

- a) Explique con la ayuda de un esquema la dirección y sentido del campo magnético creado por cada una de las corrientes y de la fuerza que actúa sobre cada conductor.
 b) Calcule el valor de la intensidad de la corriente que circula por los conductores si la fuerza que uno de ellos ejerce sobre un trozo de 25 cm del otro es de 10^{-3} N. Datos: $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N A}^{-2}$.

(08-R) En una región en la que existe un campo magnético uniforme de 0,8 T, se inyecta un protón con una energía cinética de 0,2 MeV, moviéndose perpendicularmente al campo.

- a) Haga un esquema en el que se representen el campo, la fuerza sobre el protón y la trayectoria seguida por éste y calcule el valor de dicha fuerza.
 b) Si se duplicara la energía cinética del protón, ¿en qué forma variaría su trayectoria?
 Razone la respuesta. Datos: $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$; $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$; $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

(08-R) Un electrón entra con velocidad $\mathbf{v} = 10 \text{ j m s}^{-1}$ en una región en la que existen un campo eléctrico, $\mathbf{E} = 20 \text{ k N C}^{-1}$, y un campo magnético, $\mathbf{B} = B_0 \text{ i T}$.

- a) Dibuje las fuerzas que actúan sobre el electrón en el instante en que entra en la región donde existen los campos eléctrico y magnético y explique las características del movimiento del electrón.
 b) Calcule el valor de B_0 para que el movimiento del electrón sea rectilíneo y uniforme.

(09-E) Por dos conductores rectilíneos, paralelos y muy largos, separados 0,2 m, circulan corrientes de la misma intensidad y sentido.

- a) Razone qué fuerzas se ejercen entre ambos conductores y determine el valor de la intensidad de corriente que debe circular por cada conductor para que la fuerza por unidad de longitud sea $2,25 \cdot 10^{-6} \text{ N m}^{-1}$.
 b) Razone cómo depende dicha fuerza de la distancia de separación de los conductores y del sentido de las corrientes. Datos: $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T m A}^{-1}$

(09-E) Un electrón con una velocidad $\mathbf{v} = 10^5 \text{ j m s}^{-1}$ penetra en una región del espacio en la que existen un campo eléctrico $\mathbf{E} = 10^4 \text{ i N C}^{-1}$ y un campo magnético $\mathbf{B} = -0,1 \text{ k T}$.

- a) Analice, con ayuda de un esquema, el movimiento que sigue el electrón.
 b) En un instante dado se suprime el campo eléctrico. Razone cómo cambia el movimiento del electrón y calcule las características de su trayectoria. Datos: $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$; $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$

(09-R) Un protón tiene una energía cinética de $2 \cdot 10^{-12} \text{ J}$ y se mueve en una región en la que existe un campo magnético de 0,6 T en dirección perpendicular a su velocidad.

- a) Razone, con ayuda de un esquema, la trayectoria del protón y calcule el periodo de su movimiento.
 b) ¿Cómo variarían las características de su movimiento si la energía cinética se redujera a la mitad?
 Datos: $m_p = 1,7 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$; $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

(10-E) Una espira circular de 5 cm de radio, inicialmente horizontal, gira a 60 rpm en torno a uno de sus diámetros en un campo magnético vertical de 0,2 T.

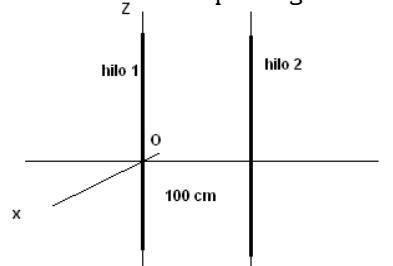
- a) Dibuje en una gráfica el flujo magnético a través de la espira en función del tiempo entre los instantes $t=0$ s y $t=2$ s e indique el valor máximo de dicho flujo.
 b) Escriba la expresión de la fuerza electromotriz inducida en la espira en función del tiempo e indique su valor en el instante $t=1$ s.

(10-R) Considere los dos hilos conductores rectilíneos e indefinidos mostrados en la figura. Por el hilo 1 circula una corriente de intensidad $I_1 = 10 \text{ A}$ dirigida en el sentido positivo del eje Z.

a) Determine el sentido de la corriente en el hilo 2 y el valor de su intensidad si el campo magnético es cero en un punto del eje Y situado 0,1 m a la izquierda del hilo 1.

b) Razone cuál sería el campo magnético en un punto del eje Y situado 0,1 m a la derecha del hilo 2, si por éste circulara una corriente del mismo valor y sentido que por el hilo 1.

$$\text{Datos: } \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T m A}^{-1}$$



(10-R) Un electrón se mueve con velocidad $\mathbf{v} = 200 \mathbf{i} \text{ m s}^{-1}$ en una región en la que existen un campo eléctrico $\mathbf{E} = 100 \mathbf{j} \text{ V m}^{-1}$ y un campo magnético $\mathbf{B}$.

a) Explique con ayuda de un esquema la dirección del campo magnético y calcule su intensidad.

b) En un instante dado, se suprime el campo eléctrico. Razone cuál sería la nueva trayectoria del electrón e indique en un esquema el sentido en que se mueve. Datos: $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

7.10.2.- Cuestiones de Electromagnetismo

(96-E) a) Fuerza magnética sobre una carga en movimiento. b) ¿En qué dirección se debe mover una carga en un campo magnético para que no se ejerza fuerza sobre ella?

(97-E) Un electrón, un protón y un átomo de helio penetran en una zona del espacio en la que existe un campo magnético uniforme en dirección perpendicular a la velocidad de las partículas. a) Dibuje la trayectoria que seguiría cada una de las partículas e indique sobre cuál de ellas se ejerce una fuerza mayor. b) Compare las aceleraciones de las tres partículas. ¿Cómo varía su energía cinética?

(97-E) Una espira atraviesa una región del espacio en la que existe un campo magnético uniforme, vertical y hacia arriba. La espira se mueve en un plano horizontal. a) Explique si circula corriente o no por la espira cuando: i) está penetrando en la región del campo; ii) mientras se mueve en dicha región; iii) cuando está saliendo. b) Indique el sentido de la corriente, en los casos en que exista, mediante un esquema.

(97-R) Por dos conductores rectilíneos e indefinidos, dispuestos paralelamente, circulan corrientes eléctricas de la misma intensidad y sentido. a) Dibuje un esquema, indicando la dirección y el sentido del campo magnético debido a cada corriente y del campo magnético total en el punto medio de un segmento que una a los dos conductores. b) ¿Cómo cambiaría la situación al duplicar una de las intensidades?

(97-R) a) Explique el funcionamiento de un transformador eléctrico. b) ¿Podría funcionar con corriente continua? Justifique la respuesta.

(98-E) (a) ¿Cuál es la condición para que una partícula cargada, que se mueve en línea recta, siga en su trayectoria rectilínea cuando se somete simultáneamente a un campo eléctrico y a otro magnético, perpendiculares entre sí y perpendiculares a la velocidad de la carga? b) Dibuje las trayectorias de la partícula cargada del apartado anterior si sólo existiera el campo eléctrico o el campo magnético y explique, en cada caso, si varía la velocidad.

(98-R) Razone si son verdaderas o falsas las siguientes afirmaciones: a) La fuerza electromotriz inducida en una espira es proporcional al flujo magnético que la atraviesa. b) Un transformador eléctrico no puede utilizarse con corriente continua.

(98-R) Una partícula, con carga q , penetra en una región en la que existe un campo. a) Explique cómo podríamos determinar, al observar la trayectoria de la partícula, si se trata de un campo eléctrico o de un campo magnético. ¿Hay algún caso en que no sería posible determinar el tipo de campo? b) Haga un análisis energético del movimiento de la partícula para un campo eléctrico y para un campo magnético, ambos perpendiculares a la velocidad con la que la partícula penetra en el campo.

(98-R) a) ¿Cuál es la condición para que una partícula cargada, que se mueve en línea recta, siga en su trayectoria rectilínea cuando se somete simultáneamente a un campo eléctrico y a otro magnético, perpendiculares entre sí y perpendiculares a la velocidad de la carga? b) Dibuje las trayectorias de la partícula cargada del apartado a) si sólo existiera el campo eléctrico o el campo magnético y explique, en cada caso, si varía la velocidad.

(99-E) Dos partículas cargadas se mueven con la misma velocidad y, al aplicarles un campo magnético perpendicular a dicha velocidad, se desvían en sentidos contrarios y describen trayectorias circulares de distintos radios. a) ¿Qué puede decirse 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, indique razonadamente cómo se mueven las partículas.

(99-E) Conteste razonadamente a las siguientes cuestiones: a) ¿Puede moverse una carga bajo la acción de un campo magnético sin experimentar fuerza magnética? b) ¿Puede ser nulo el flujo magnético a través de una espira colocada en una región en la que existe un campo magnético?

(99-R) Conteste razonadamente a las siguientes cuestiones: a) ¿Se conserva la energía mecánica de una partícula cargada que se mueve en el seno de un campo magnético uniforme? ¿Es conservativa la fuerza que ejerce dicho campo sobre la carga?

(99-R) a) Explique por qué no se utilizan los transformadores con corrientes continuas. b) Comente las ventajas de la corriente alterna frente a la corriente continua.

(99-R) a) Comente la siguiente afirmación: Si el flujo magnético a través de una espira varía con el tiempo, se induce en ella una fuerza electromotriz. b) Explique diversos procedimientos para lograr la situación anterior.

(00-E) a) Explique razonadamente la acción de un campo magnético sobre un conductor rectilíneo, perpendicular al campo, por el que circula una corriente eléctrica y dibuje en un esquema la dirección y sentido de todas las magnitudes vectoriales que intervienen. b) Explique qué modificaciones se producirían, respecto del apartado anterior, en los casos siguientes: i) si el conductor forma un ángulo de 45° con el campo; ii) si el conductor es paralelo al campo.

(00-R) a) Explique el funcionamiento de un transformador eléctrico. b) ¿Se puede transformar corriente continua? Razone la respuesta.

(00-R) a) La fuerza que actúa sobre una partícula cargada que se mueve en un campo magnético no realiza trabajo ¿Por qué? b) Un alambre recto muy largo transporta una corriente de intensidad I . Un protón se mueve con velocidad v perpendicular al alambre y se encuentra en un instante a una distancia r del alambre. Dibuje en un esquema la dirección y sentido del campo magnético y de la fuerza que actúa sobre el protón.

(00-R) a) Escriba la expresión de la fuerza electromotriz inducida en una espira bajo la acción de un campo magnético y explique el origen y las características de dicha fuerza electromotriz. b) Si la espira se encuentra en reposo, en un plano horizontal, y el campo magnético es vertical y hacia arriba, indique en un esquema el sentido de la corriente que circula por la espira: i) si aumenta la intensidad del campo magnético; ii) si disminuye dicha intensidad.

(00-R) Dos partículas, de masas m_1 y m_2 e igual carga, penetran con velocidades v_1 y $v_2 = 2v_1$ en dirección perpendicular a un campo magnético. a) Si $m_2 = 2m_1$, ¿cuál de las dos trayectorias tendrá mayor radio? b) Si $m_1 = m_2$, ¿en qué relación estarán sus periodos de revolución? Razone las respuestas.

(01-R) Por dos conductores rectilíneos paralelos circulan corrientes de igual intensidad. a) Indique la dirección y sentido de las fuerzas que se ejercen los conductores entre sí. ¿Depende esta fuerza de la corriente que circula por ellos? b) Represente gráficamente la situación en la que la fuerza es repulsiva.

(01-R) a) Explique cualitativamente el funcionamiento de un transformador eléctrico. b) ¿Qué ocurre si el primario del transformador está conectado a una pila? Razone la respuesta.

(02-R) Un protón entra, con una velocidad $\mathbf{v}$, en una región del espacio donde existe un campo magnético uniforme. a) Indique, con la ayuda de un esquema, las posibles trayectorias del protón en el interior del campo magnético. b) Explique qué ocurre con la energía cinética del protón.

(02-R) Justifique razonadamente, con la ayuda de un esquema, el sentido de la corriente inducida en una espira en cada uno de los siguientes supuestos: a) la espira está en reposo y se le acerca, perpendicularmente al plano de la misma, un imán por su polo sur; b) la espira está penetrando en una región en la que existe un campo magnético uniforme, vertical y hacia arriba, manteniéndose la espira horizontal.

(03-E) Razone las respuestas a las siguientes preguntas: a) ¿Cómo debe moverse una carga en un campo magnético uniforme para experimentar fuerza magnética? b) ¿Cómo debe situarse un disco en un campo magnético para que el flujo magnético que lo atraviese sea cero?

(03-E) Una espira se mueve en un plano horizontal y penetra en un campo magnético uniforme vertical. a) Explique las características de la corriente inducida en la espira al entrar en la región del campo, al moverse en él y al abandonarlo. b) Razone en qué etapas del trayecto descrito habría que comunicarle una fuerza externa a la espira para que avanzara con velocidad constante.

(03-R) Razone las respuestas a las siguientes preguntas: a) De los tres vectores que aparecen en la ecuación $\mathbf{F} = q \mathbf{v} \times \mathbf{B}$, ¿qué pares de vectores son siempre perpendiculares entre sí y cuáles pueden no serlo? b) La fuerza electromotriz inducida en una espira es función: i) del flujo magnético que la atraviesa; ii) del ángulo que forma el campo magnético con la espira; iii) del campo magnético existente; iv) de la rapidez con que varía el flujo con el tiempo

(03-R) Razone las respuestas a las siguientes preguntas: a) ¿Existe siempre interacción magnética entre dos partículas cargadas? ¿Existe siempre interacción eléctrica entre ellas? b) ¿En qué casos un campo magnético no ejerce ninguna fuerza sobre una partícula cargada?

(04-E) Conteste razonadamente a las siguientes preguntas:

a) Si no existe flujo magnético a través de una superficie, ¿puede asegurarse que no existe campo magnético en esa región? b) La fuerza electromotriz inducida en una espira, ¿es más grande cuanto mayor sea el flujo magnético que la atraviesa?

(05-R) a) Un haz de electrones atraviesa una región del espacio sin desviarse, ¿se puede afirmar que en esa región no hay campo magnético? De existir, ¿cómo tiene que ser? b) En una región existe un campo magnético uniforme dirigido verticalmente hacia abajo. Se disparan dos protones horizontalmente en sentidos opuestos. Razone qué trayectorias describen, en qué plano están y qué sentidos tienen sus movimientos.

(05-R) Sobre un electrón, que se mueve con velocidad $\mathbf{v}$, actúa un campo magnético $\mathbf{B}$ en dirección normal a su velocidad. a) Razone por qué la trayectoria que sigue es circular y haga un esquema que muestre el sentido de giro del electrón. b) Deduzca las expresiones del radio de la órbita y del período del movimiento.

(05-R) Razone las respuestas a las siguientes cuestiones: a) Observando la trayectoria de una partícula con carga eléctrica, ¿se puede deducir si la fuerza que actúa sobre ella procede de un campo eléctrico uniforme o de un campo magnético uniforme? b) ¿Es posible que sea nula la fuerza que actúa sobre un hilo conductor, por el que circula una corriente eléctrica, situado en un campo magnético?

(05-R) Una espira cuadrada está cerca de un conductor, recto e indefinido, recorrido por una corriente I . La espira y el conductor están en un mismo plano. Con ayuda de un esquema, razone en qué sentido circula la corriente inducida en la espira: a) Si se aumenta la corriente en el conductor. b) Si, dejando constante la corriente en el conductor, la espira se aleja de éste manteniéndose en el mismo plano.

(05-E) Considere dos hilos largos, paralelos, separados una distancia d , por los que circulan intensidades I_1 e I_2 ($I_1 < I_2$). Sea un segmento, de longitud d , perpendicular a los dos hilos y situado entre ambos. Razone si existe algún punto del citado segmento en el que el campo magnético sea nulo, si: a) Las corrientes circulan en el mismo sentido. b) Las corrientes circulan en sentidos opuestos. Si existe dicho punto, ¿de qué hilo está más cerca?

(05-E) Dos partículas con cargas eléctricas, del mismo valor absoluto y diferente signo, se mueven con la misma velocidad, dirigida hacia la derecha y en el plano del folio. Ambas partículas penetran en un campo magnético de dirección perpendicular al folio y dirigido hacia abajo. a) Analice con ayuda de un gráfico las trayectorias seguidas por las dos partículas. b) Si la masa de una de ellas es doble que la de la otra ($m_1 = 2 m_2$) ¿Cuál gira más rápidamente?

(06-R) Considere las dos experiencias siguientes: i) un imán frente a una espira con un amperímetro y ii) la espira con amperímetro frente a otra espira con un generador de corriente eléctrica y un interruptor:

a) Copie y complete el cuadro siguiente:

		¿Existe B en la espira?	¿Varía el flujo magnético a través de la espira?	¿Existe corriente inducida en la espira?
i)	imán acercándose			
	imán quieto			
	imán alejándose			
ii)	interruptor abierto			
	interruptor cerrado			
	Al abrir o cerrar el interruptor			

b) A partir de los resultados del cuadro anterior razone, con la ayuda de esquemas, la causa de la aparición de corriente inducida en la espira.

(06-R) Una partícula con carga q y velocidad $\mathbf{v}$ penetra en un campo magnético perpendicular a la dirección de movimiento.

a) Analice el trabajo realizado por la fuerza magnética y la variación de energía cinética de la partícula.

b) Repita el apartado anterior en el caso de que la partícula se mueva en dirección paralela al campo y explique las diferencias entre ambos casos.

(06-E) Sean dos conductores rectilíneos paralelos por los que circulan corrientes eléctricas de igual intensidad y sentido.

a) Explique qué fuerzas se ejercen entre sí ambos conductores.

b) Represente gráficamente la situación en la que las fuerzas son repulsivas, dibujando el campo magnético y la fuerza sobre cada conductor.

(07-R) a) Explique el efecto de un campo magnético sobre una partícula cargada en movimiento. b) Explique con ayuda de un esquema la dirección y sentido de la fuerza que actúa sobre una partícula con carga positiva que se mueve paralelamente a una corriente eléctrica rectilínea ¿Y si se mueve perpendicularmente al conductor, alejándose de él?

(07-R) a) Explique el fenómeno de inducción electromagnética y enuncie la ley de Faraday-Henry. b) Una espira circular se encuentra situada perpendicularmente a un campo magnético uniforme. Razone qué fuerza electromotriz se induce en la espira, al girar con velocidad angular constante en torno a un eje, en los siguientes casos: i) el eje es un diámetro de la espira; ii) el eje pasa por el centro de la espira y es perpendicular a su plano.

(07-E) Un haz de electrones penetra en una zona del espacio en la que existen un campo eléctrico y otro magnético.

a) Indique, ayudándose de un esquema si lo necesita, qué fuerzas se ejercen sobre los electrones del haz.

b) Si el haz de electrones no se desvía, ¿se puede afirmar que tanto el campo eléctrico como el magnético son nulos? Razone la respuesta.

(07-R) a) Fuerza magnética sobre una carga en movimiento. b) Una partícula, con carga q , penetra en una región en la que existe un campo magnético perpendicular a la dirección del movimiento. Analice el trabajo realizado por la fuerza magnética y la variación de energía cinética de la partícula.

(07-E) Por dos conductores rectilíneos y de gran longitud, dispuestos paralelamente, circulan corrientes eléctricas de la misma intensidad y sentido.

- a) Dibuje un esquema, indicando la dirección y el sentido del campo magnético debido a cada corriente y del campo magnético total en el punto medio de un segmento que una a los dos conductores y coméntelo.
b) Razone cómo cambiaría la situación al duplicar una de las intensidades y cambiar su sentido.

(08-R) a) Explique las experiencias de Ørsted y comente cómo las cargas en movimiento originan campos magnéticos.

b) ¿En qué casos un campo magnético no ejerce ninguna fuerza sobre una partícula cargada? Razone la respuesta.

(08-E) Comente razonadamente la veracidad o falsedad de las siguientes afirmaciones: a) La fuerza magnética entre dos conductores rectilíneos e indefinidos por los que circulan corrientes de diferente sentido es repulsiva.

b) Si una partícula cargada en movimiento penetra en una región en la que existe un campo magnético siempre actúa sobre ella una fuerza.

(08-R) a) Fuerza magnética sobre una carga en movimiento; ley de Lorentz. b) Explique, con ayuda de un esquema, la dirección y el sentido de la fuerza que actúa sobre una partícula con carga positiva que se mueve paralelamente a un conductor rectilíneo por el que circula una corriente eléctrica. ¿Y si la carga se mueve perpendicularmente al conductor, alejándose de él?

(08-R) a) Enuncie la ley de Lenz-Faraday de la inducción electromagnética y comente su significado físico.

b) Una espira circular de sección S se encuentra en un campo magnético $\mathbf{B}$, de modo que el plano de la espira es perpendicular al campo. Razone en qué caso se induce fuerza electromotriz en la espira.

(08-R) a) Fuerza electromotriz inducida y variación de flujo magnético: ley de Lenz-Faraday. b) Una espira circular se encuentra situada perpendicularmente a un campo magnético. Razone qué fuerza electromotriz se induce en la espira al girar ésta con velocidad angular constante en torno a un eje, en los siguientes casos: i) el eje es un diámetro de la espira; ii) el eje pasa por el centro de la espira y es perpendicular a su plano.

(09-E) a) Enuncie la ley de Lorentz y razone, a partir de ella, las características de la fuerza magnética sobre una carga.

b) En una región del espacio existe un campo magnético uniforme, vertical y dirigido hacia abajo. Se disparan horizontalmente un electrón y un protón con igual velocidad. Compare, con ayuda de un esquema, las trayectorias descritas por ambas partículas y razone cuáles son sus diferencias.

(09-R) a) Razone cómo podría averiguar con ayuda de una carga si en una región del espacio hay un campo eléctrico o un campo magnético

b) Un haz de protones atraviesa sin desviarse una zona en la que existen un campo eléctrico y otro magnético. Razone qué condiciones deben cumplir esos campos.

(09-R) a) Enuncie la ley de Faraday-Lenz y razone si con un campo magnético constante puede producirse fuerza electromotriz inducida en una espira.

b) Un conductor rectilíneo se conecta a un generador de corriente continua durante un cierto tiempo y después se desconecta. Cerca del conductor se encuentra una espira. Razone, ayudándose de un esquema, si en algún instante se induce fuerza electromotriz en la espira y explique sus características.

(10-E) a) Explique las características de la fuerza magnética sobre una carga en movimiento.

b) Dos partículas cargadas describen trayectorias circulares de igual radio en una región en la que existe un campo magnético uniforme. ¿Puede asegurarse que ambas partículas tienen la misma masa? ¿Tienen que ser iguales sus velocidades? Razone las respuestas.

(10-R) a) Explique qué es la inducción electromagnética.

b) Una espira rectangular está situada, horizontalmente, en un campo magnético vertical uniforme. Razone si se induce fuerza electromotriz en la espira en las situaciones siguientes: i) se aumenta o disminuye la intensidad del campo magnético; ii) manteniendo constante el campo magnético, se mueve la espira con velocidad constante hasta quedar fuera del campo.

(10-R) a) Explique las características del campo magnético creado por una corriente rectilínea indefinida.

b) Por dos conductores rectilíneos e indefinidos, paralelos entre sí, circulan corrientes eléctricas de igual intensidad y sentidos opuestos. Explique, con ayuda de un esquema, la dirección y el sentido del campo magnético debido a cada corriente y del campo magnético total en el punto medio de un segmento que una a los dos conductores. ¿Cómo cambiaría la situación si se invirtiese el sentido de una de las corrientes?

(10-R) a) Enuncie la Ley de Lenz-Faraday.

b) Una espira circular gira en torno a uno de sus diámetros en un campo magnético uniforme. Razone si se induce fuerza electromotriz en la espira si: i) el campo magnético es paralelo al eje de rotación; ii) es perpendicular.