

Tema 4: Electromagnetismo

1. Campo magnético.
2. Origen del campo magnético.
3. Fuerza magnética sobre una carga puntual. Ley de Lorentz.
4. Fuerza magnética sobre una corriente rectilínea. Ley de Laplace.
5. Inducción electromagnética: ley de Faraday-Lenz.

1. Campo magnético.

Introducción histórica:

Hasta fechas recientes (S. XIX), existe un escaso conocimiento sobre la interacción magnética.

Antigüedad: Magnesia (Asia Menor). Se conoce la magnetita, o piedra imán.

S. X	China	Brújula. Aplicación en navegación.
S. XIII	1269	Pierre de Maricourt (Francia) Describe los Polos Norte y Sur de un imán.
S. XVII	1600	Gilbert (Inglaterra) Propone que la Tierra es un imán.
S. XIX	1820	Örsted (Dinamarca) Explica la causa del magnetismo, relacionándolo con las corrientes eléctricas

Posteriormente, se desarrolla la teoría magnética (Faraday, Henry, Ampère, Lenz)

1865 Maxwell (R.U.) Teoría electromagnética. Relaciona la electricidad y el magnetismo.

Características elementales de los imanes:

- Atraen a distancia.
- Cada imán posee dos polos (Norte y Sur) No existen polos aislados (monopolos)
Polos iguales: repulsión
Polos distintos: atracción
- Desvían la brújula
- La Tierra se comporta como un imán. El Polo Norte geográfico es un polo Sur magnético, y viceversa.

Campo magnético: características básicas:

Supongamos un imán situado en una región del espacio. Interaccionará con otro imán colocado a cierta distancia. Es decir, el imán modifica las propiedades del espacio, introduce una propiedad nueva, que hace que cualquier otro imán sufra una fuerza magnética. A esta propiedad se le denomina *campo magnético*.

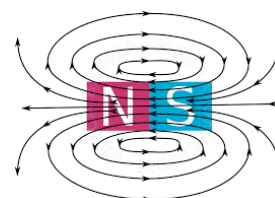
- El campo magnético es una *magnitud vectorial*. Se representa por $\vec{B}$.
- Su unidad en el S.I. es el Tesla (T). Otra unidad muy usada es el gauss (G). $1 \text{ G} = 10^{-4} \text{ T}$
- Tiene menor intensidad que campo electrostático, pero es mucho más intenso que el gravitatorio.
- Su intensidad depende del medio. Esta dependencia viene marcada por la constante magnética K_m

$$K_m = \frac{\mu}{4\pi} \quad \mu = \text{permeabilidad magnética} \quad \text{En el vacío} \quad K_m = \frac{\mu_0}{4\pi} = 10^{-7} \text{ TmA}^{-1}$$

$$\text{Por lo que} \quad \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ TmA}^{-1} \quad (\text{ó } \text{NA}^{-2})$$

- $\vec{B}$ es un campo *no conservativo*. No existe una energía potencial magnética.

- Líneas de campo "Salen" de polos Norte y "entran" por polos Sur
Líneas cerradas

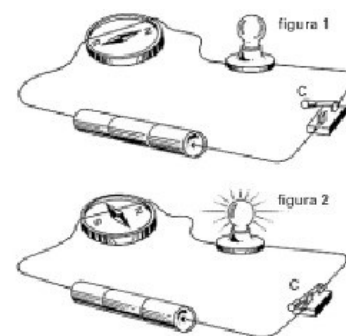


2. Origen del campo magnético

El científico danés Ørsted, en 1820, relaciona experimentalmente los imanes con las corrientes eléctricas. Observa que una corriente eléctrica desvía una brújula colocada a una cierta distancia. Es decir, la corriente eléctrica se comporta como imán. También observa que corrientes paralelas se atraen o repelen según el sentido de la corriente.

Conclusión: El origen de campo magnético está en la existencia de cargas eléctricas en movimiento. Toda carga eléctrica en movimiento origina a su alrededor un campo magnético.

Posteriormente, con el descubrimiento de la estructura de los átomos, se explica el magnetismo natural. Es originado por el movimiento de los electrones alrededor del núcleo. Cada átomo crea su propio campo magnético. Si conseguimos que la mayoría de los átomos tenga su campo magnético orientado en la misma dirección y sentido, la suma de todos estos pequeños $\vec{B}$, producirá un campo apreciable. Esto sucede de forma natural en materiales ferromagnéticos (hierro, acero, magnetita). (Más información sobre los distintos tipos de magnetismo: paramagnetismo, diamagnetismo y ferromagnetismo, en el Anexo II)

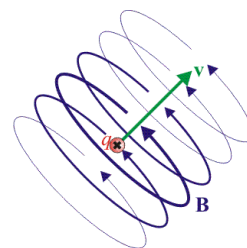


Cálculo del campo magnético producido por una corriente: ley de Biot-Savart.

La ley de Biot y Savart nos permite calcular el valor del campo magnético producido por cargas en movimiento

Campo creado por una carga en movimiento:
$$\vec{B} = \frac{\mu}{4\pi} \cdot \frac{q \cdot \vec{v} \times \vec{u}_r}{r^2}$$

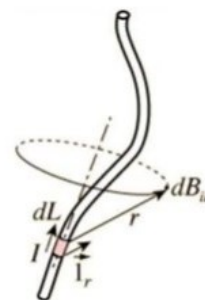
Vemos que la expresión tiene cierto parecido con la del campo electrostático. Aparece la constante magnética, es proporcional a la carga, e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia. Sin embargo, hay una diferencia fundamental: depende de la velocidad, que aparece además en un producto vectorial con $\vec{u}_r$. Por lo tanto: el campo magnético va a ser perpendicular tanto a $\vec{v}$ como a $\vec{r}$, y su sentido viene dado, además de por el signo de la carga, por la regla del sacacorchos (o de la mano derecha).



Campo creado por una corriente I: Una corriente eléctrica consiste en el movimiento de cargas eléctricas (electrones) por un conductor. Sabemos que, por razones históricas, se estudia como si se tratara de cargas positivas, de forma que el sentido de la intensidad de corriente I es el opuesto al de circulación real de los electrones. El resultado obtenido es el mismo, y su cálculo más simple.

Aplicando el principio de superposición, debemos sumar el campo generado por todas las cargas en movimiento por el conductor, es decir, por todos los elementos de corriente $d\vec{l}$ del cable. Esta

“suma” de infinitos términos es una integral. La expresión queda:
$$\vec{B} = \frac{\mu}{4\pi} \cdot \int \frac{I \cdot d\vec{l} \times \vec{u}_r}{r^2}$$



Este cálculo puede ser complejo, dependiendo de la forma del cable. En este curso sólo aplicaremos directamente los resultados obtenidos para algunos casos sencillos (corriente rectilínea y espira circular de corriente en su centro). En cada caso estudiaremos por separado módulo, dirección y sentido.

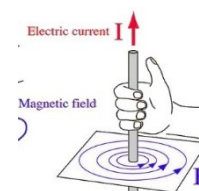
Módulo: Su expresión depende de la forma del conductor.

Dirección de $\vec{B}$: Perpendicular al movimiento de las cargas eléctricas (corriente)

Perpendicular al vector $\vec{r}$ (distancia desde la corriente al punto considerado)

Sentido de $\vec{B}$: Dado por la regla del sacacorchos (o regla de la mano derecha). Podemos verlo de dos formas:

1. Haciendo girar el sentido de la corriente I sobre el vector $\vec{r}$.
2. Poniendo el dedo pulgar en el sentido de la corriente y doblando los otros dedos, que nos indican el sentido del campo



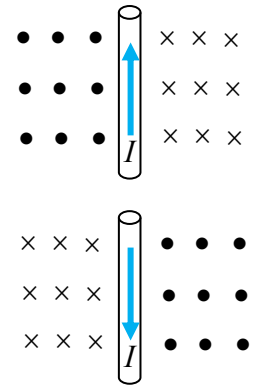
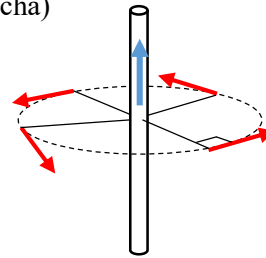
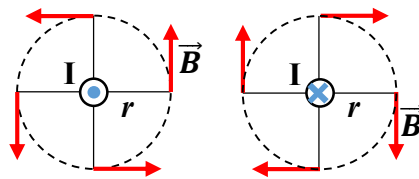
Campo magnético producido por una corriente rectilínea indefinida:

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

Ley de Biot-Savart

Dirección: Perpendicular al cable y a $\vec{r}$

Sentido: Regla del sacacorchos (mano derecha)



Campos producidos por otras distribuciones de corriente:

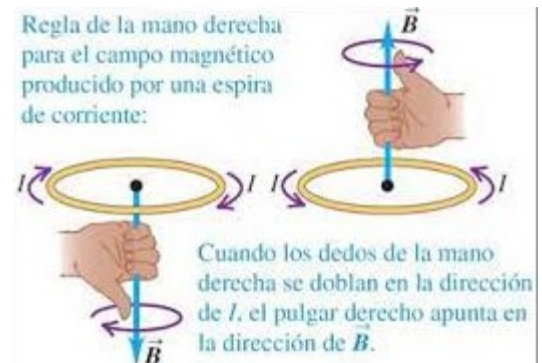
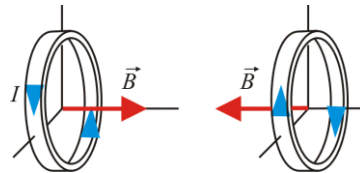
Todos los casos se calculan aplicando la ley de Biot-Savart.

Campo $\vec{B}$ producido por una espira de corriente en su centro.

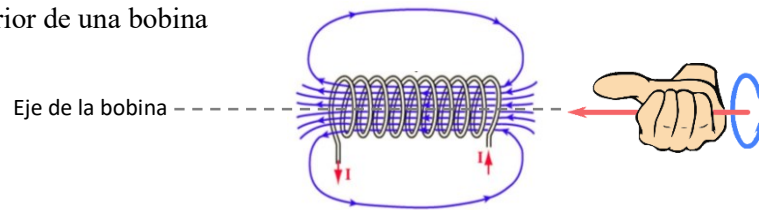
Dirección: perpendicular a la espira.

Sentido: Regla de la mano derecha, como indica la figura:

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



Sentido del campo $\vec{B}$ en el interior de una bobina (conjunto de N espiras)



Campo $\vec{B}$ producido por varias corrientes: Aplicamos el principio de superposición $\vec{B}_{TOT} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \vec{B}_3 + \dots$

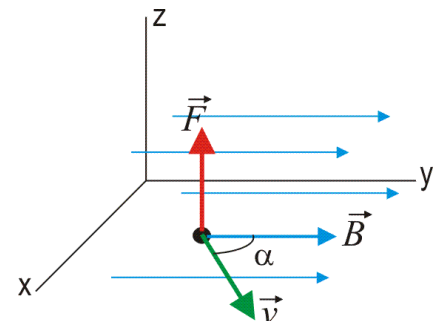
3. Fuerza magnética sobre una carga puntual. Ley de Lorentz.

Del mismo modo que un campo magnético es originado por cargas en movimiento, también el campo magnético produce efectos sólo sobre cargas en movimiento. Podemos decir, por tanto, que la interacción magnética se produce únicamente entre cargas en movimiento.

Supongamos una partícula de carga q que se mueve con velocidad $\vec{v}$ en una zona en la que existe un campo magnético $\vec{B}$. La fuerza magnética que sufre dicha partícula viene dada por la **Ley de Lorentz**:

$$\vec{F}_m = q \cdot \vec{v} \times \vec{B}$$

$$\text{Módulo } F = |q| \cdot v \cdot B \cdot \text{sen} \alpha$$



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**:

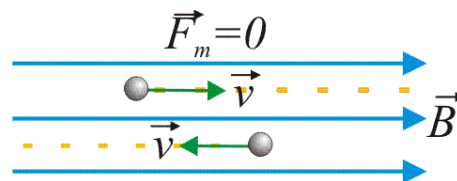
$$\vec{F} = \vec{F}_e + \vec{F}_m = q \cdot \vec{E} + q \cdot \vec{v} \times \vec{B} = q \cdot (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

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.

Fuerza magnética sobre una carga moviéndose con $\vec{v}$ paralela a $\vec{B}$:

Aplicando la ley de Lorentz, vemos que si la velocidad de la partícula es paralela al campo, en ese caso el producto vectorial se hace cero y la partícula no sufre fuerza magnética. $F_m = |q| \cdot v \cdot B \cdot \sin 0^\circ = 0$ (también si $\alpha = 180^\circ$)

Se mantendrá, por tanto con un movimiento rectilíneo uniforme (M.R.U.).



Fuerza magnética sobre una carga moviéndose con $\vec{v}$ perpendicular a $\vec{B}$:

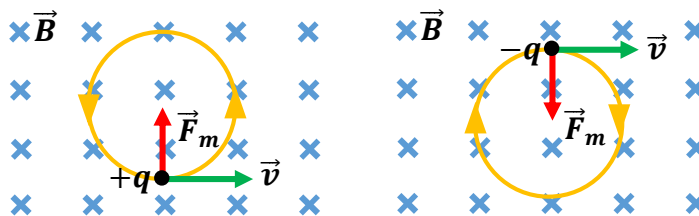
Supongamos una partícula cargada q que entra en una zona en la que hay un campo magnético constante $\vec{B}$.

$$\vec{F}_m = q \cdot \vec{v} \times \vec{B}$$

$$F_m = |q| \cdot v \cdot B \cdot \sin 90^\circ = |q| \cdot v \cdot B$$

La fuerza que sufrirá será perpendicular tanto a $\vec{B}$ como a $\vec{v}$, y su sentido dependerá tanto del producto $\vec{v} \wedge \vec{B}$ como del signo de q .

Como la fuerza es perpendicular a $\vec{v}$, la aceleración que sufra la partícula también lo será. Es decir, la aceleración será una aceleración normal ($v = \text{cte}$, cambia la dirección). El movimiento resultante será un *movimiento circular uniforme (M.C.U.)*.



Cálculo del radio R de la circunferencia:

Aplicando 2ª ley Newton: $\Sigma \vec{F} = m \cdot \vec{a}$ $|q| \cdot v \cdot B = m \cdot a_n \rightarrow |q| \cdot v \cdot B = m \cdot \frac{v^2}{R} \rightarrow R = \frac{m \cdot v}{|q| \cdot B}$

Otras magnitudes del movimiento:

Velocidad angular: $\omega = \frac{v}{R} = \frac{|q| \cdot B}{m}$

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

Aplicaciones: Ciclotrón (acelerador de partículas); Espectrógrafo de masas; Selector de velocidades.
(Al final del tema. Anexo I)

Fuerza magnética sobre una carga moviéndose con $\vec{v}$ formando cualquier ángulo con $\vec{B}$:

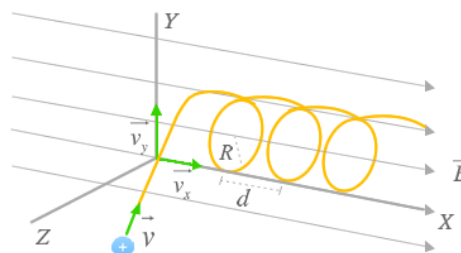
En este caso el movimiento no será circular. Lo más cómodo que podemos hacer para estudiar esto es descomponer v en dos componentes: una paralela al campo magnético (v_x , en el dibujo), y otra perpendicular (v_y).

La componente paralela no se verá modificada.

La componente perpendicular se verá modificada como ya hemos estudiado arriba (movimiento circular).

Por tanto, el movimiento total será la suma de los dos movimientos, es decir, una *hélice*.

Si el campo magnético es muy intenso, el radio de la hélice se hace muy pequeño, con lo que la partícula prácticamente "sigue" la dirección de las líneas de campo magnético.



Trabajo realizado sobre la partícula por la fuerza magnética:

Recordemos que la ley de Lorentz establece que la fuerza magnética sobre la partícula es perpendicular a la velocidad (es decir, al desplazamiento instantáneo que está realizando en ese momento). Por lo tanto, al calcular el trabajo realizado $W_{Fm} = \int \vec{F} \cdot d\vec{r} = 0$ La fuerza magnética no realiza trabajo sobre la partícula. Por lo tanto, aplicando el teorema trabajo-energía cinética, la energía cinética de la partícula se mantendrá constante.

Razonado de otra forma: Hemos visto que, al ser la fuerza magnética perpendicular a la velocidad, la aceleración que sufrirá siempre será aceleración normal, por lo que el módulo de la velocidad no cambia y, por lo tanto, la energía cinética se mantendrá constante. Aplicando el teorema trabajo-Ec, el trabajo realizado será nulo.

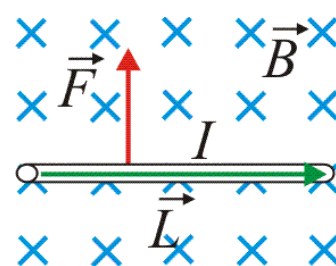
4. Fuerza magnética sobre una corriente rectilínea. Ley de Laplace.

Supongamos un hilo conductor rectilíneo por el que circula una intensidad de corriente I , colocado en el interior de un campo magnético uniforme B . La fuerza que sufrirá el cable dependerá de la intensidad del campo, del movimiento de las cargas por el conductor (de la intensidad de corriente I), y del tamaño de éste. Por tanto:

$$\vec{F}_m = I \cdot \vec{L} \times \vec{B} \quad \text{Ley de Laplace} \quad F = I \cdot L \cdot B \cdot \sin \alpha$$

El vector $\vec{L}$ tiene estas características

- Módulo: longitud del conductor
- Dirección: la del conductor
- Sentido: el de la corriente



Trabajo realizado sobre el conductor: A diferencia del caso de una sola partícula moviéndose en el vacío (en el que hemos visto que el trabajo realizado por la fuerza magnética es nulo) en el caso de un conductor la fuerza magnética sí realiza trabajo si existe un desplazamiento del conductor, que será paralelo a la fuerza.

El trabajo será $W_{Fm} = F_m \cdot \Delta r \cdot \cos 0^\circ = I \cdot L \cdot B \cdot \Delta r$

¿De dónde proviene esta energía suministrada al conductor? No del campo magnético (recordemos que no existe una energía potencial magnética) sino del generador, de la pila que produce la corriente eléctrica.

Fuerza entre corrientes rectilíneas.

Supongamos dos hilos conductores paralelos, separados una distancia d , por los que circulan corrientes I_1 e I_2 . Cada conductor creará un campo magnético a su alrededor, dado por la expresión $B = \frac{\mu \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot r}$

La corriente I_1 crea un campo B_{12} en la zona donde está el conductor 2.

$$B_{12} = \frac{\mu \cdot I_1}{2 \cdot \pi \cdot d} \quad B_{21} = \frac{\mu \cdot I_2}{2 \cdot \pi \cdot d}$$

La corriente I_2 crea un campo B_{21} en la zona donde está el conductor 1.

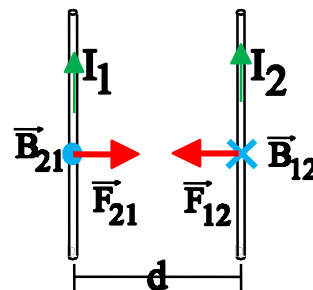
La fuerza que ejerce el conductor 1 sobre el 2 $\vec{F}_{12} = I_2 \cdot \vec{L}_2 \times \vec{B}_{12}$

La fuerza que ejerce el conductor 2 sobre el 1 $\vec{F}_{21} = I_1 \cdot \vec{L}_1 \times \vec{B}_{21}$

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21} \quad F_{12} = I_2 \cdot L_2 \cdot B_{12} = I_2 \cdot L \cdot \frac{\mu_0 \cdot I_1}{2\pi \cdot d} = L \cdot \frac{\mu_0 \cdot I_1 \cdot I_2}{2\pi \cdot d} = F_{21}$$

Calculando fuerza por unidad de longitud

$$f_{12} = \frac{F_{12}}{L} = \frac{\mu_0 \cdot I_1 \cdot I_2}{2\pi \cdot d} = f_{21}$$



Vemos que:

- Si las corrientes van en el mismo sentido: Se atraen.
- Si las corrientes van en sentidos opuestos: Se repelen.

Efecto de un campo magnético sobre un circuito cerrado (una espira de corriente):

Estudiaremos este caso con un ejemplo sencillo: un circuito rectangular (base a y altura h) por el que circula una corriente I , dentro de un campo magnético uniforme $\vec{B}$, como indica la figura. Calculamos la fuerza que se ejerce sobre cada lado del circuito.

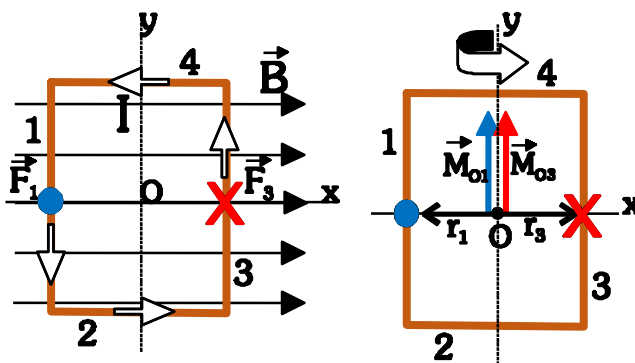
$$\vec{F}_1 = I \cdot \vec{L}_1 \times \vec{B} \rightarrow F_1 = I \cdot h \cdot B \cdot \sin 90^\circ = I \cdot h \cdot B$$

$$\vec{F}_2 = I \cdot \vec{L}_2 \times \vec{B} \rightarrow F_2 = I \cdot a \cdot B \cdot \sin 0^\circ = 0$$

$$\vec{F}_3 = I \cdot \vec{L}_3 \times \vec{B} \rightarrow F_3 = I \cdot h \cdot B \cdot \sin 90^\circ = I \cdot h \cdot B$$

$$\vec{F}_4 = I \cdot \vec{L}_4 \times \vec{B} \rightarrow F_4 = I \cdot a \cdot B \cdot \sin 180^\circ = 0$$

Vemos que $\sum \vec{F} = 0$, con lo que el circuito no se desplazará. Sin embargo, si estudiamos los momentos de fuerza respecto al centro de la espira



$$\vec{M}_{O1} = \vec{r}_1 \times \vec{F}_1 \rightarrow M_{O1} = r_1 \cdot F_1 \cdot \sin 90^\circ = \frac{a}{2} \cdot I \cdot h \cdot B = \frac{I \cdot a \cdot h \cdot B}{2} \rightarrow \vec{M}_{O1} = \frac{I \cdot a \cdot h \cdot B}{2} \cdot \vec{j} \quad (\text{N} \cdot \text{m})$$

$$\vec{M}_{O3} = \vec{r}_3 \times \vec{F}_3 \rightarrow M_{O3} = r_3 \cdot F_3 \cdot \sin 90^\circ = \frac{a}{2} \cdot I \cdot h \cdot B = \frac{I \cdot a \cdot h \cdot B}{2} \rightarrow \vec{M}_{O3} = \frac{I \cdot a \cdot h \cdot B}{2} \cdot \vec{j} \quad (\text{N} \cdot \text{m})$$

$$\text{Así: } \sum \vec{M}_O = \vec{M}_{O1} + \vec{M}_{O3} = 2 \cdot \frac{I \cdot a \cdot h \cdot B}{2} \cdot \vec{j} = I \cdot a \cdot h \cdot B \cdot \vec{j} = I \cdot S \cdot B \cdot \vec{j} \quad (\text{N} \cdot \text{m})$$

Recordando que el momento de fuerzas originaba un giro, la espira girará hasta colocarse perpendicular al campo, de forma que el campo magnético que produce la espira se oriente en la misma dirección y sentido que

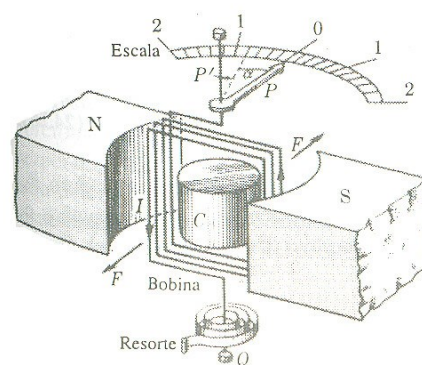
La expresión general del momento que el campo ejerce sobre la espira es:

$\vec{M}_O = I \cdot \vec{S} \times \vec{B}$, donde $\vec{S}$ es el vector que caracteriza a la superficie delimitada por el circuito.

APLICACIONES: Este momento de giro, proporcional a la intensidad de corriente que recorre el circuito, puede aprovecharse en varias aplicaciones:

Galvanómetro:

Aparato que mide la intensidad de corriente de un circuito. Consiste en una pequeña bobina (conjunto de espiras) que puede girar alrededor de un eje. La bobina está inmersa en el campo magnético creado por un pequeño imán. Al pasar corriente por la bobina, la fuerza magnética hará que ésta gire. Un resorte espiral se opone a este giro, y se llega a una situación de equilibrio. El ángulo que haya girado la bobina dependerá de la intensidad de corriente. Una aguja unida a la bobina marca sobre una escala el valor de dicha intensidad.



Motor eléctrico:

Con lo que hemos visto en el ejemplo, vemos que podemos producir un movimiento de giro en la espira simplemente haciendo pasar corriente a través de ella. Eso sí, conseguimos dar sólo un cuarto de vuelta, hasta que se coloca perpendicular al campo.

La forma de conseguir un giro completo está en colocar otra espira perpendicular a la primera, y hacer que la corriente pase por una u otra en el momento adecuado. Lograremos así un movimiento rotatorio completo. Esta es la base de un *motor eléctrico de corriente continua*. Una parte fija (estator, normalmente el imán que crea el campo magnético) y otra móvil (rotor, el conjunto de espiras).

En los *motores de corriente alterna* podemos conseguir el giro con una sola espira, pero la intensidad de corriente varía de forma adecuada para producir un giro constante. Esta corriente alterna se genera mediante inducción (esto se verá en el siguiente apartado).

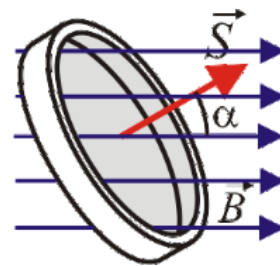
5. INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA: LEY DE FARADAY-LENZ.

Concepto de flujo magnético (Φ_m)

El **flujo magnético** (Φ_m) es un concepto matemático que nos da una idea de la cantidad (o intensidad) de líneas de campo que atraviesan una determinada superficie.

Supongamos una espira, o circuito cerrado, que encierra una superficie, y que se encuentra en el interior de un campo magnético. Habrá líneas de campo que atravesarán la superficie. La cantidad de líneas de campo que la atraviesen dependerá de tres factores:

- Intensidad del campo B
- Tamaño de la superficie (S)
- Orientación de la superficie (ángulo α entre $\vec{B}$ y $\vec{S}$, el vector superficie perpendicular a la espira)



El flujo será $\Phi_m = \int \vec{B} \cdot d\vec{S}$. Esta integral, denominada de superficie, es algo complicado. En este tema nos limitaremos al caso más simple: la superficie es plana y el campo magnético es uniforme en toda la superficie.

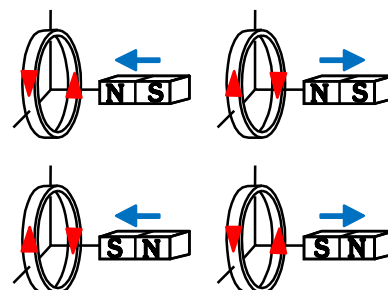
En ese caso $\Phi_m = \int \vec{B} \cdot d\vec{S} = \vec{B} \cdot \vec{S} = B \cdot S \cdot \cos\alpha$ Unidad de flujo: Weber (Wb) = T · m²

El flujo será máximo cuando $\cos\alpha = 1 \rightarrow \alpha = 0^\circ$, es decir, $\vec{B}$ y $\vec{S}$ paralelos (espira perpendicular al campo)

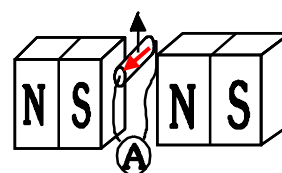
Inducción electromagnética:

Generación de corriente eléctrica en un circuito por efecto de un campo magnético. Este fenómeno fue observado en el s. XIX por Faraday y Henry.

Experiencia de Faraday: Faraday observa que, colocando un imán frente a una espira conductora, no se observa corriente en la espira mientras mantenemos ambos en reposo, pero sí se mide paso de corriente cuando los acercamos o alejamos. El sentido de la corriente depende de si acercamos o alejamos, y de qué polo enfrentemos a la espira.



Experiencia de Henry: Henry coloca un trozo de material conductor entre dos imanes. Cierra el circuito conectando el conductor a un amperímetro (A). Observa que al mover el conductor se origina corriente en él.



Ley de Faraday-Lenz:

Tanto Faraday como Lenz explican las características de este fenómeno:

- El origen de la corriente inducida está en la variación del campo magnético que atraviesa la superficie delimitada por la espira. (Lenz)
- Dicho de otra forma, está originada por la variación de flujo magnético que atraviesa la espira (Faraday)
- El sentido de la corriente es tal que origina un nuevo campo magnético inducido $\vec{B}_{ind}$, que se opone a la variación del campo magnético existente. (Lenz).
- Se opone a la variación del flujo (Faraday)

Teniendo en cuenta todo esto, llegamos a la **ley de Faraday-Lenz** sobre la inducción electromagnética:

"La corriente inducida en un circuito es originada por la variación del flujo magnético que atraviesa dicho circuito. El sentido de la corriente es tal que produce un campo magnético inducido que se opone a la variación del flujo."

La expresión de esta ley queda

$$\mathcal{E} = - \frac{d\Phi_m}{dt}$$

Donde ε es la *fuerza electromotriz* (f.e.m.), que se corresponde con la energía que se suministra a las cargas (a cada C) para que se muevan por el circuito, dando lugar a la corriente eléctrica. Se mide en voltios (V) al igual que el potencial eléctrico.

Como el flujo es $\Phi_m = \int \vec{B} \cdot d\vec{S} = \vec{B} \cdot \vec{S} = B \cdot S \cdot \cos\alpha$

Llegamos a la conclusión de que se producirá f.e.m inducida (es decir, corriente eléctrica) en el circuito si varía alguno de los factores de los que depende el flujo. Es decir, si varía la intensidad del campo, si varía la superficie del circuito, o si varía la orientación relativa entre el campo y la superficie.

Nota: si en un problema no conocemos la expresión del flujo en función del tiempo, pero tenemos dos valores, inicial y final, podemos calcular la fuerza electromotriz media,

$$\varepsilon_m: \quad \varepsilon_m = - \frac{\Delta\Phi_m}{\Delta t}$$

Este último procedimiento es el que se utiliza en las centrales productoras de energía eléctrica. Haciendo girar una bobina en el interior de un campo magnético variamos la orientación entre $\vec{B}$ y $\vec{S}$, y generaremos corriente alterna.

¿Cómo obtener el sentido de la corriente inducida?

A. Usando el esquema:

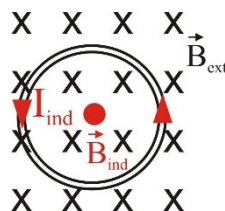
1º. Determinar el sentido del flujo magnético que atraviesa el circuito y si aumenta o disminuye. En el ejemplo 1, el sentido del flujo es hacia dentro y está aumentando.

2º. Ley de Faraday-Lenz: El campo magnético inducido se opone a la variación del flujo.

· Si el flujo aumenta, $\vec{B}_{ind}$ va en sentido opuesto a $\vec{B}_{ext}$, disminuyendo el flujo.

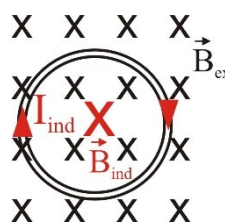
· Si el flujo disminuye, $\vec{B}_{ind}$ va en el mismo sentido que $\vec{B}_{ext}$, aumentando el flujo.

3º. Sentido de la corriente inducida: La ley de Biot-Savart relaciona la corriente que circula por un circuito (espira, bobina) y el campo magnético que produce. El sentido de la corriente viene dado aplicando la regla de la mano derecha (dedo pulgar en el sentido de $\vec{B}_{ind}$, el giro de los otros dedos indica el sentido de la corriente)



Ejemplo 1: $\vec{B}_{ext}$ aumenta.

El flujo magnético va hacia dentro y aumenta. Según la Ley de Faraday-Lenz, se produce $\vec{B}_{ind}$ hacia fuera, oponiéndose a la variación de flujo. Aplicando la ley de Biot-Savart, el sentido de la corriente va en sentido antihorario (regla de la mano derecha).



Ejemplo 2: $\vec{B}_{ext}$ disminuye.

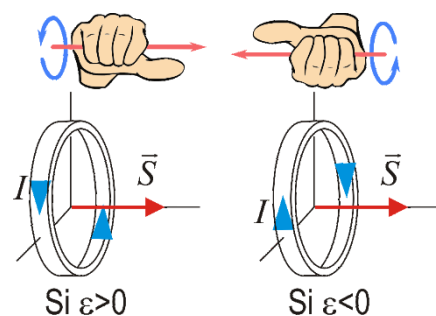
El flujo magnético va hacia dentro y disminuye. Según la Ley de Faraday-Lenz, se produce $\vec{B}_{ind}$ hacia dentro, oponiéndose a la variación de flujo. Aplicando la ley de Biot-Savart, el sentido de la corriente va en sentido horario (regla de la mano derecha).

B. A partir del signo de la f.e.m. y el vector superficie.

Para calcular la f.e.m. usando la ley de Faraday-Lenz, previamente hemos calculado el flujo, y para esto hemos tenido que elegir un sentido para el vector superficie $\vec{S}$. Pues bien, ese sentido establece un criterio de signos para el sentido de la corriente inducida (aplicando la regla de la mano derecha, con el dedo pulgar en el sentido de $\vec{S}$).

· Si $\varepsilon > 0$, la corriente inducida va en el sentido marcado por $\vec{S}$.

· Si $\varepsilon < 0$, la corriente inducida va sentido opuesto al marcado por $\vec{S}$.



Relación entre fuerza electromotriz e intensidad: Ley de Ohm.

La fuerza electromotriz inducida (ε) suministra energía a las cargas eléctricas para que se muevan por el circuito. La intensidad de la corriente eléctrica generada dependerá, además, de la resistencia que ofrezca el circuito.

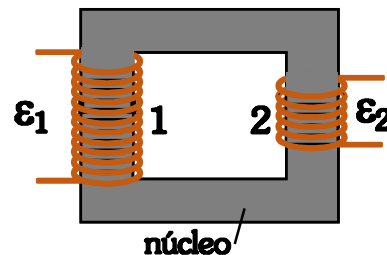
Recordemos que la resistencia (R) de un conductor representa la oposición que éste ofrece al paso de la corriente eléctrica. A nivel microscópico, esta resistencia se debe a las continuas interacciones que los electrones sufren con los átomos de la red cristalina del conductor, haciendo que pierdan energía. Se mide en ohmios (Ω)

Existe una relación entre estas tres magnitudes: es la *Ley de Ohm*: $\varepsilon = R \cdot I \quad \rightarrow \quad I = \frac{\varepsilon}{R}$

Funcionamiento de un transformador:

Un transformador se basa en el fenómeno de inducción electromagnética. La utilidad del transformador consiste en poder cambiar el voltaje (la f.e.m.) a la que vamos a conectar un aparato.

El esquema es el de la figura. El transformador consta de un núcleo de hierro alrededor del cual están arrollados dos circuitos. En el primario tendremos la f.e.m. inicial y en el secundario obtendremos la f.e.m. que utilizaremos. Al circular una corriente variable (corriente alterna, como la que tenemos en nuestras casas) por el primario, se origina un campo magnético en el núcleo de hierro (B también variable). El hierro, material ferromagnético, multiplica la intensidad del campo y concentra las líneas de campo en su interior. El campo B variable crea un flujo magnético también variable que atraviesa el circuito secundario. Si tenemos un flujo variable, se inducirá una corriente en el secundario, es decir, se originará una f.e.m. inducida. Su valor dependerá del número de vueltas de los circuitos 1º y 2º.



La relación de transformación viene dada por

$$\frac{\mathcal{E}_1}{n_1} = \frac{\mathcal{E}_2}{n_2}$$

Las intensidades que circulan por ambos circuitos se transforman de forma inversa, dado que la potencia total ($P = \mathcal{E} \cdot I$) debe ser la misma en ambos circuitos (suponiendo un transformador ideal, sin pérdidas de energía por calentamiento)

$$I_1 \cdot n_1 = I_2 \cdot n_2$$

Cuestión: *¿Puede funcionar un transformador con corriente continua?*. Vemos que no es posible, ya que funciona mediante inducción electromagnética, y para que se produzca un flujo variable en las bobinas, el campo magnético debe ser variable, y por consiguiente la corriente eléctrica que lo produce debe cambiar con el tiempo.

Aplicaciones de los transformadores:

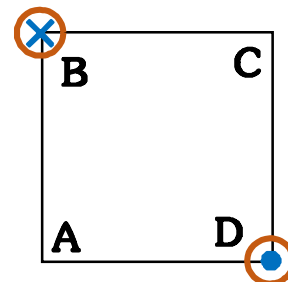
La utilidad de un transformador es clara. En los enchufes de casa el voltaje es de 230 V, y algunos aparatos (el ordenador, el teléfono móvil cuando vamos a cargarlo) funcionan a otro voltaje distinto. La fuente de alimentación del ordenador o el cargador del móvil son ejemplos de aparatos que contienen 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 $P = \mathcal{E} \cdot I$, 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 230 V, 380 V...)

Problemas sobre campo magnético:

Campos creados por corrientes rectilíneas:

- 1.- Dos conductores paralelos y rectilíneos, recorridos por corrientes del mismo sentido de 10 A y 20 A respectivamente, están separados 10 cm. Calcular:
 - a) Campo magnético creado en un punto situado a 10 cm del primer conductor y a 20 cm del segundo.
 - b) Repita los cálculos para el caso de que las corrientes vayan en distinto sentido. ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Tm/A}$)
- 2.- 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 a los cables, como ilustra la figura. El sentido de las corrientes es el indicado en la figura. Calcule y dibuje en el esquema los campos magnéticos en los vértices A, C y D. ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Tm/A}$)

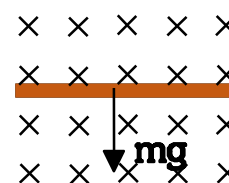


Ley de Lorentz

- 3.- Un electrón que se mueve en el sentido positivo del eje OX con una velocidad de $5 \cdot 10^4 \text{ m/s}$ penetra en una región donde existe un campo de 0,05 T dirigido en el sentido negativo del eje OZ. Calcular:
 - a) Aceleración del electrón
 - b) Radio de la órbita descrita y periodo orbital ($m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$; $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$)
- 4.- Un electrón penetra con una velocidad de $4 \cdot 10^4 \text{ m/s}$ 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:
 - a) Diferencia de potencial necesaria para que el electrón adquiera la energía cinética inicial.
 - b) Campo eléctrico que habría que aplicar para que el electrón mantuviera su trayectoria rectilínea. ($m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$; $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$)
- 5.- 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.
 - a) Realice un esquema de todo el proceso que incluya las y sentidos de la fuerza, velocidad, campo eléctrico y campo magnético implicados.
 - b) Calcule la intensidad del campo magnético. ¿Cómo variaría el radio de la trayectoria si se duplicase el campo magnético? ($m_p = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$; $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$)
- 6.- Un chorro de iones de dos isótopos de masas m_1 y m_2 con igual carga q , entran con velocidad $\vec{v}$ en el interior de un campo magnético uniforme de intensidad $\vec{B}$, perpendicular a $\vec{v}$. Calcular:
 - a) Relación entre los radios de las órbitas que describen.
 - b) Relación entre los respectivos periodos de revolución.

Ley de Laplace

- 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?
- 8.- 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. Determinar la magnitud y sentido de la intensidad de corriente que deberá circular por el alambre para que se mantenga en equilibrio y no caiga por acción de su propio peso. ($g = 9,8 \text{ N/Kg}$)

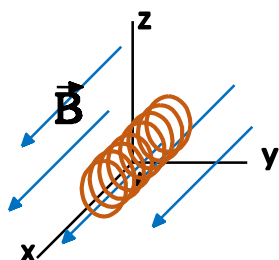
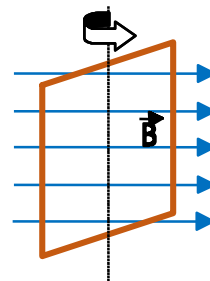


- 9.- Dos conductores paralelos y rectilíneos, recorridos por corrientes del mismo sentido de 10 A y 20 A respectivamente, están separados 10 cm. Calcule la fuerza por unidad de longitud sobre un conductor rectilíneo situado en el mismo plano que los otros dos conductores, paralelo y equidistante a ambos, por el que circula una corriente de 5 A en el sentido contrario al de los otros dos. ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T m/A}$)
- 10.- Calcule la fuerza por unidad de longitud ejercida entre los dos conductores del ejercicio 2. Dibuje en un esquema las fuerzas que actúan. ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T m/A}$)
- 11.- 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?

Inducción. Ley de Faraday-Lenz

- 12.- 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 las espiras y de intensidad variable con el tiempo:
 $B = 2 t^2 \text{ T}$.
 a) Deduzca la expresión del flujo magnético a través de la bobina en función del tiempo.
 b) Represente gráficamente la f.e.m. inducida en función del tiempo y calcule su valor para $t = 4 \text{ s}$.

- 13.- 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 circuito y representarla gráficamente. (Considerar que inicialmente el ángulo que forman $\vec{B}$ y $\vec{S}$ es cero)

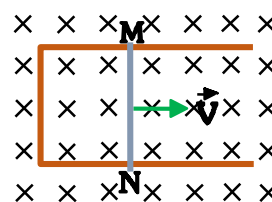


- 14.- Una bobina de 10 espiras, de 2 cm^2 cada una, se encuentra dentro de un campo magnético dirigido en el sentido positivo del eje OX. Calcule razonadamente la f.e.m. inducida si, manteniendo la espira en reposo, la intensidad del campo, que inicialmente es de 0,2 T, disminuye uniformemente con el tiempo, anulándose en 5 s.

- 15.- Una espira rectangular está formada por un lado móvil MN que se mueve sobre unos raíles 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 $b = v \cdot t$)



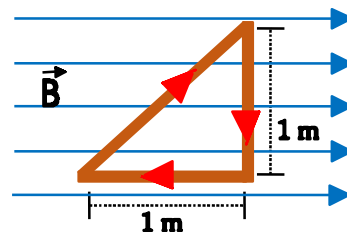
Otros ejercicios:

- 16.- 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 $\vec{B} = 2 \vec{j} \text{ (T)}$. Calcular:
 a) Radio de la órbita descrita por los electrones.
 b) Campo eléctrico que habría que aplicar para que los electrones mantuvieran su trayectoria rectilínea.
 ($m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$; $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$)
- 17.- 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:
 a) Por ambos conductores circula una corriente de 5 A en el sentido positivo del eje OY
 b) Se invierte el sentido de la corriente en el conductor situado en el eje OY
 ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T m/A}$)

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

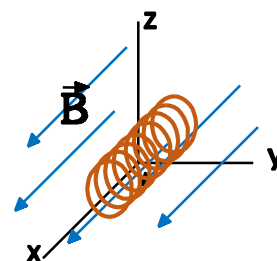
Calcular:

- 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?



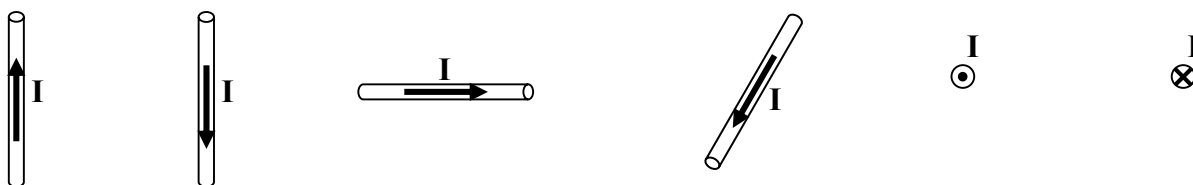
19. Una bobina de 10 espiras, de 2 cm^2 cada una, gira a 100 rpm alrededor del eje OZ, en presencia de un campo magnético uniforme de $0,2 \text{ T}$ dirigido en el sentido positivo del eje OX.

- Escribir la expresión de la f.e.m. inducida.
- Calcule la intensidad máxima que circula por la bobina, si su resistencia es de 10Ω .

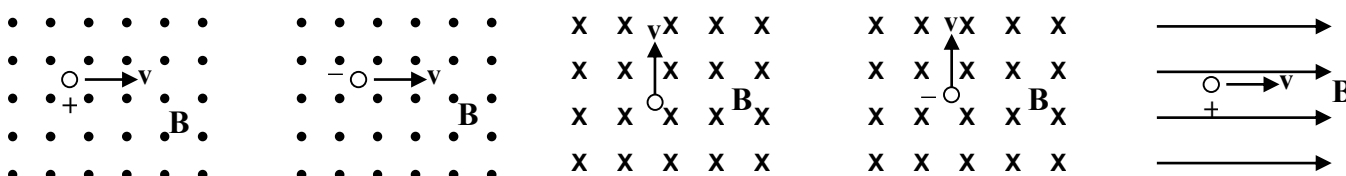


Cuestiones sobre gráficos, esquemas...

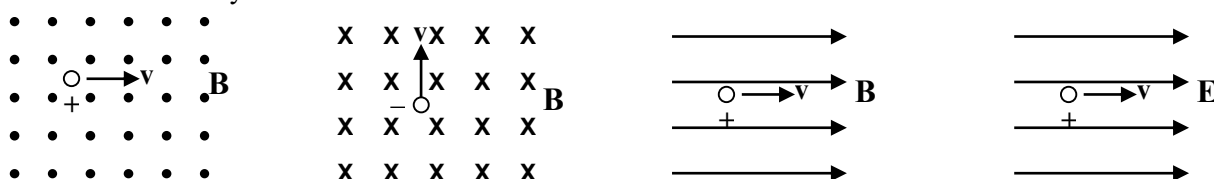
1. Dibuje la dirección y sentido del campo magnético en las siguientes situaciones:



2. Dibuje, para las siguientes situaciones, la fuerza sufrida por la partícula y la trayectoria seguida.



3. Dibuje, para cada situación, la dirección del campo (eléctrico o magnético) necesario para que la partícula no desvíe su trayectoria.

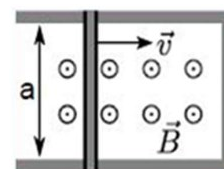


Cuestiones aparecidas en la PEvAU

2025. Junio. B

a) Dos partículas cargadas se mueven perpendicularmente a un campo magnético uniforme con la misma velocidad.
i) (0,5 puntos) Deduzca la expresión del radio de la trayectoria de una de ellas. ii) (0,5 puntos) Si la masa de la primera es veinte veces mayor y su carga es la mitad de la segunda, encuentre la razón entre los periodos de sus movimientos. Razone sus respuestas.

b1) El lado móvil de la espira rectangular de la figura, de longitud $a = 0,15 \text{ m}$, se mueve con una velocidad constante de $0,2 \text{ m s}^{-1}$ dentro de un campo magnético uniforme de módulo igual a 2 T (saliente del papel, según el esquema). La resistencia eléctrica de la espira es igual a 50Ω . Determine de forma razonada: i) (0,75 puntos) la fuerza electromotriz en valor absoluto; ii) (0,5 puntos) el valor de la intensidad de corriente; iii) (0,25 puntos) el sentido de la corriente inducida en la situación del esquema. Dibuje el campo inducido dentro de la espira.



2025. Julio. B

- a) Discuta la veracidad de las siguientes afirmaciones: i) (0,5 puntos) si no existe flujo magnético a través de una superficie, no existe campo magnético en esa región; ii) (0,5 puntos) si el valor del flujo magnético es muy grande, el valor de la fuerza electromotriz inducida en una espira será también muy grande.
- b1) Dos conductores rectilíneos muy largos se disponen paralelamente al eje OZ. El primero pasa por el punto A(0,1) m y el segundo por el punto B(0,4) m del plano XY. Por ellos circulan corrientes de 1 A y 2 A, respectivamente, hacia la parte positiva del eje OZ. i) (1 punto) Realice un esquema y calcule el vector campo magnético total en el punto C(0,3) m del plano XY. ii) (0,5 puntos) Calcule la fuerza por unidad de longitud que se ejerce sobre el conductor por el que pasa 2 A. Justifique sus respuestas. $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T m A}^{-1}$

2024. Junio. B2

- a) Responda razonadamente a las siguientes cuestiones: i) ¿Puede ser nulo el flujo magnético a través de una espira colocada en una región en la que existe un campo magnético? ii) El hecho de que la f.e.m. inducida en una espira sea nula en un instante determinado, ¿implica que no hay flujo magnético en la espira en ese instante?
- b) Una bobina formada por 100 espiral circulares de radio 5 cm está situada en el interior de un campo magnético uniforme dirigido en la dirección del eje de la bobina y de módulo $B(t) = 0,1 - 0,1 \cdot t^2 \text{ (S.I.)}$. Determine: i) el flujo magnético en la bobina para $t = 2 \text{ s}$; ii) la fuerza electromotriz inducida en la bobina para $t = 2 \text{ s}$; iii) el instante de tiempo en el que la fuerza electromotriz inducida es nula.

2023. Junio. B2

- a) Por dos hilos conductores rectilíneos paralelos, separados una cierta distancia, circulan corrientes de igual intensidad. Explique razonadamente, apoyándose en un esquema, si puede ser cero el campo magnético en algún punto entre los dos hilos, suponiendo que las corrientes circulan en sentidos: i) iguales; ii) opuestos.
- b) Dos conductores rectilíneos paralelos por los que circula la misma intensidad de corriente están separados una distancia de 20 cm y se atraen con una fuerza por unidad de longitud de $5 \cdot 10^{-8} \text{ N m}^{-1}$. i) Justifique si el sentido de la corriente es el mismo en ambos hilos, representando en un esquema el campo magnético y la fuerza entre ambos. ii) Calcule el valor de la intensidad de corriente que circula por cada conductor. $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T m A}^{-1}$

2022. Junio. B2

- a) A una espira plana, que está en reposo, se le acerca perpendicularmente al plano de la misma un imán por su polo norte. Realice un esquema en el que se represente la dirección y sentido del campo magnético inducido en la espira. Justifique el sentido de la corriente inducida en la misma.
- b) Una espira conductora cuadrada de 0,05 m de lado se encuentra en una región donde hay un campo magnético perpendicular a la espira de módulo $B = (4t - t^2) \text{ T}$ (t es el tiempo en segundos). i) Halle la expresión para el flujo del campo magnético a través de la espira. ii) Calcule el módulo de la f.e.m. inducida en la espira para $t = 3 \text{ s}$. iii) Determine el instante de tiempo para el cual no se induce corriente en la espira.

2021. Junio. B1

- a) Una espira circular situada en el plano XY, y que se desplaza por ese plano en ausencia de campo magnético, entra en una región en la que existe un campo magnético constante y uniforme dirigido en el sentido negativo del eje OZ. i) Justifique, ayudándose de esquemas, si en algún momento durante dicho desplazamiento cambiará el flujo magnético en la espira. ii) Justifique, ayudándose de un esquema, si en algún momento se inducirá corriente en la espira y cuál será su sentido.
- b) Una espira circular de 5 cm de radio gira alrededor de uno de sus diámetros con una velocidad angular igual a $\pi \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ en una región del espacio en la que existe un campo magnético uniforme de módulo igual a 10 T, perpendicular al eje de giro. Sabiendo que en el instante inicial el flujo es máximo: i) Calcule razonadamente, ayudándose de un esquema, la expresión del flujo magnético en función del tiempo. ii) Calcule razonadamente el valor de la fuerza electromotriz inducida en el instante $t = 50 \text{ s}$.

2021. Junio. B2

- a) Un electrón se mueve en sentido positivo del eje OX en una región en la que existe un campo magnético uniforme dirigido en el sentido negativo del eje OZ. i) Indique, de forma justificada y con ayuda de un esquema, la dirección y sentido en que debe actuar un campo eléctrico uniforme para que la partícula no se desvíe. ii) ¿Qué relación deben cumplir para ello los módulos de ambos campos?
- b) Un protón describe una trayectoria circular en sentido antihorario en el plano XY, con una velocidad de módulo igual a $3 \cdot 10^5 \text{ m s}^{-1}$, en una región en la que existe un campo magnético uniforme de 0,05 T. i) Justifique, con ayuda de un esquema que incluya la trayectoria descrita por el protón, la dirección y sentido del campo magnético. ii)

Calcule, de forma razonada, el periodo del movimiento y el radio de la trayectoria del protón.

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

2021. Julio. B2

a) Suponga dos conductores rectilíneos, muy largos, paralelos y separados por una distancia “d” por los que circulan corrientes eléctricas de igual intensidad y sentido. Razone cómo se modifica la fuerza por unidad de longitud entre los conductores si duplicamos ambas intensidades y a la vez reducimos “d” a la mitad.

b) Un protón que ha sido acelerado desde el reposo por una diferencia de potencial de 6000 V describe una órbita circular en un campo magnético uniforme de 0,8 T. Calcule razonadamente: i) El módulo de la fuerza magnética que actúa sobre el protón. ii) El radio de la trayectoria descrita.

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

Julio 2020. 2

a) Un solenoide de N espiras se encuentra inmerso en un campo magnético variable con el tiempo. El eje del solenoide forma un ángulo de 45° con el campo. Razone, apoyándose de un esquema, qué ocurriría con la fuerza electromotriz inducida si: i) El número de espiras fuera el doble. ii) El ángulo entre el eje y el campo fuera el doble del inicial.

b) Una espira cuadrada penetra en un campo magnético uniforme de 2 T, perpendicular al plano de la espira. Mientras entra, la superficie de la espira afectada por el campo magnético aumenta según la expresión $S(t) = 0,25 t^2 \text{ m}^2$. i) Realice un esquema que muestre el sentido de la corriente inducida en la espira y los campos magnéticos implicados (externo e inducido). ii) Calcule razonadamente la fuerza electromotriz inducida en la espira.

Julio 2020. 6

a) Un electrón se mueve por una región del espacio donde existen campos eléctrico y magnético uniformes, de forma que la fuerza neta que actúa sobre el electrón es nula. i) Discuta razonadamente, con la ayuda de un esquema, cómo deben ser las direcciones y sentidos de los campos. ii) Determine la expresión del módulo de la velocidad de la partícula para que esto ocurra.

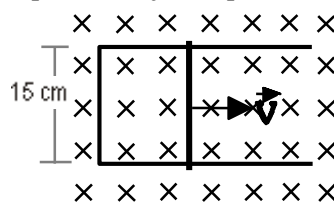
b) Tenemos dos conductores rectilíneos verticales y muy largos, dispuestos paralelamente y separados 3,5 m. Por el primero circula una intensidad de 3 A hacia arriba. i) Calcule razonadamente el valor y el sentido de la corriente que debe circular por el segundo conductor para que el campo magnético en un punto situado entre los dos conductores y a 1,5 m del primero sea nulo. ii) Realice un esquema representando las magnitudes implicadas.

$$(\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Tm A}^{-1})$$

Junio 2019. A. 2

a) Razone qué sentido tendrá la corriente inducida en una espira cuando: i) Acercamos perpendicularmente al plano de la espira el polo norte de un imán. Haga un esquema explicativo. ii) El plano de la espira se aleja del polo norte del imán. Haga un esquema explicativo.

b) Una espira rectangular como la de la figura posee uno de sus lados móvil que se mueve dentro de un campo magnético uniforme de 0,8 T con una velocidad constante de $0,12 \text{ m s}^{-1}$. Calcule: i) La f.e.m. inducida en función del tiempo. ii) La intensidad y el sentido de la corriente que recorre la espira si su resistencia es de $0,2 \Omega$.



Junio 2019. B. 2

a) Justifique la veracidad o falsedad de las siguientes afirmaciones: i) Si las intensidades de corriente que circulan por dos conductores rectilíneos, indefinidos, paralelos y separados por una distancia d, se duplican, también se duplicará la fuerza por unidad de longitud que actúa sobre cada conductor. ii) Si lo que se duplicase fuese la distancia, entonces, la fuerza por unidad de longitud que actuaría sobre cada conductor se reduciría a la mitad.

b) Por un hilo conductor situado paralelo al ecuador terrestre pasa una corriente eléctrica que lo mantiene suspendido en esa posición debido al magnetismo de la Tierra. Sabiendo que el campo magnético es paralelo a la superficie y vale $5 \cdot 10^{-5} \text{ T}$ y que el hilo tiene una densidad longitudinal de masa de $4 \cdot 10^{-3} \text{ g/m}$, calcule la intensidad de corriente que debe circular por el conductor ayudándose del esquema correspondiente. $g = 9,8 \text{ m s}^{-2}$

Junio 2018. B. 2.

a) Un electrón se mueve con un movimiento rectilíneo uniforme por una región del espacio en la que existen un campo eléctrico y un campo magnético. Justifique cual deberá ser la dirección y sentido de ambos campos y deduzca la relación entre sus módulos. ¿Qué cambiaría si la partícula fuese un protón?

b) Un conductor rectilíneo transporta una corriente de 10 A en el sentido positivo del eje Z. Un protón situado a 50 cm del conductor se dirige perpendicularmente hacia el conductor con una velocidad de $2 \cdot 10^5 \text{ m s}^{-1}$. Realice una representación gráfica indicando todas las magnitudes vectoriales implicadas y determine el módulo, dirección y sentido de la fuerza que actúa sobre el protón.

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T m A}^{-1}; e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

Junio 2017. A.2

- a) Un haz de electrones atraviesa una región del espacio siguiendo una trayectoria rectilínea. En dicha región hay aplicado un campo electrostático uniforme. ¿Es posible deducir algo acerca de la orientación del campo? Repita el razonamiento para un campo magnético uniforme.
- b) Una bobina, de 10 espiras circulares de 15 cm de radio, está situada en una región en la que existe un campo magnético uniforme cuya intensidad varía con el tiempo según: $B = 2 \cos(2\pi t - \pi/4) \text{ T}$ y cuya dirección forma un ángulo de 30° con el eje de la bobina. La resistencia de la bobina es $0,2 \Omega$. Calcule el flujo del campo magnético a través de la bobina en función del tiempo y la intensidad de corriente que circula por ella en el instante $t = 3 \text{ s}$.

Cuestiones aparecidas en la Fase Local de la Olimpiada de Física de Granada:



2025. CUESTIÓN 3

Considere dos hilos rectos, indefinidos y paralelos, separados por una distancia de 1 m, recorridos, por dos intensidades de sentido contrarios y valor uno doble que el otro. Determine, ayudándose de un esquema, los puntos donde el campo magnético es nulo, si existen.

2024. PROBLEMA 2

Dos cables, largos y paralelos (Figura 1), de densidad 0,05 kg/m, por los que circulan corrientes de la misma intensidad, cuelgan por medio de unos hilos, de longitud 4 cm, de dos puntos comunes. El sistema está en equilibrio cuando los hilos forman un ángulo de 12° entre sí.

- ¿En que sentido circula la corriente en cada hilo, en el mismo sentido o en sentido contrario?
- ¿Cuál es la intensidad de corriente que está circulando por los cables?

Datos: $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}(\text{SI})$, $g = 9,8(\text{SI})$.

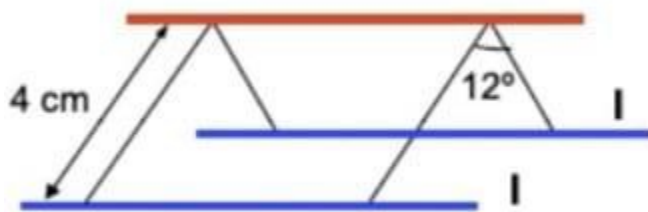


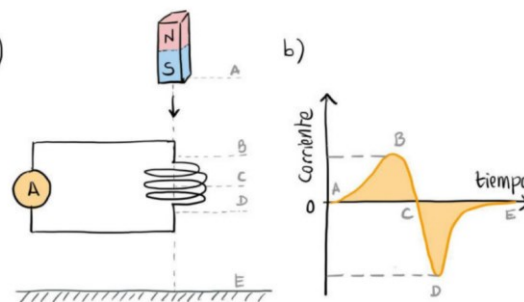
Figura 1

2023.

CUESTIÓN 1

La figura muestra un experimento en el que se deja caer sin velocidad inicial un imán a) desde el punto A. Durante la caída, el imán atraviesa una pequeña bobina conductora de resistencia total R según se muestra en la figura a). Con un amperímetro se mide la corriente eléctrica inducida en la bobina durante la caída, obteniendo la gráfica de la figura b).

- Explique por qué se ha generado una corriente en la bobina.
- Razone por qué la corriente cambia de sentido. ¿Dónde está el imán en el instante en el que se produce el campo? ¿Por qué, en valor absoluto, la altura del segundo pico es mayor que la del primero en la figura b)?
- Cuando el imán impacta contra el suelo, ¿su velocidad es mayor, menor o igual a la que tendría si se repitiese el experimento quitando la bobina? Razone su respuesta.



Soluciones a los problemas de campo magnético:

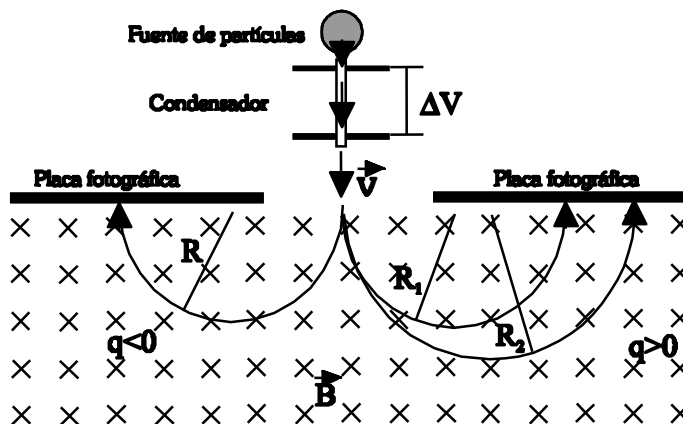
1. a) $\vec{B} = 4 \cdot 10^{-5} \vec{k}$ T ; b) $\vec{B} = 0$ T
2. $\vec{B}_A = -3 \cdot 10^{-7} \vec{i} - 4 \cdot 10^{-7} \vec{j}$ T ; b) $\vec{B}_C = -4 \cdot 10^{-7} \vec{i} - 3 \cdot 10^{-7} \vec{j}$ T ;
El cable D no crea campo sobre sí mismo, por lo que en el vértice D sólo tenemos el campo creado por el cable B. Módulo: $2,12 \cdot 10^{-7}$ T. Forma 45° con el lado inferior $\vec{B}_D = -1,48 \cdot 10^{-7} \vec{i} - 1,48 \cdot 10^{-7} \vec{j}$ T
3. a) $\vec{a} = -4,4 \cdot 10^{14} \vec{j}$ m/s² ; b) $R = 5,7 \cdot 10^{-6}$ m ; $T = 7,1 \cdot 10^{-10}$ s
4. a) $\Delta V = 4,55 \cdot 10^{-3}$ V ; $\vec{E} = 2 \cdot 10^4 \vec{j}$ N/C
5. b) $B = 0,15$ T al duplicar B, R se hace la mitad
6. $R_1/R_2 = m_1/m_2$; $T_1/T_2 = m_1/m_2$
7. $\vec{F} = -5,4 \vec{k}$ N
8. 1 A hacia la derecha
9. $\vec{f} = -2 \cdot 10^{-4} \vec{i}$ N/m (suponiendo ambos conductores paralelos al eje y, y sentido positivo para la corriente)
10. $f = 8,5 \cdot 10^{-7}$ N/m (dirección : a lo largo de la diagonal BD, sentido: hacia fuera (repulsivo))
11. lado superior: $1 \vec{k}$ N ; lado inferior: $-1 \vec{k}$ N ; laterales: 0 N
12. a) $\phi_m = 0,5 \text{ t}^2 \text{ Tm}^2$; b) $\varepsilon = -\text{t V}$; $\varepsilon = -4 \text{ V}$
13. $\varepsilon = 40 \sin(200 \text{ t}) \text{ V}$
14. $\varepsilon = 8 \cdot 10^{-5} \text{ V}$
15. $\varepsilon = 0,5 \text{ V}$; sentido de corriente antihorario.
16. $R = 3,8 \cdot 10^{-4} \text{ m}$, $\vec{E} = -2,65 \cdot 10^8 \vec{k}$ N/C
17. a) $\vec{B}_{(-10,0)} = 1,33 \cdot 10^{-5} \vec{k}$ T ; $\vec{B}_{(10,0)} = 0$ T
b) $\vec{B}_{(-10,0)} = -6,7 \cdot 10^{-6} \vec{k}$ T ; $\vec{B}_{(10,0)} = 2 \cdot 10^{-5} \vec{k}$ T
18. a) lado oblicuo $\vec{F} = -5 \vec{k}$ N , lado vertical $\vec{F} = 5 \vec{k}$ N , lado horizontal $\vec{F} = 0$ N
b) $\vec{F}_T = 0$ N , la espira no se desplaza pero gira.
19. a) $\varepsilon = 4,3 \cdot 10^{-3} \cdot \sin(10,5 \text{ t}) \text{ V}$ b) $4,3 \cdot 10^{-4} \text{ A}$

ANEXO I: APLICACIONES DEL MOVIMIENTO DE UNA PARTÍCULA EN EL INTERIOR DE UN CAMPO MAGNÉTICO

Espectrógrafo de masas: (F.W. Aston, 1919)

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



$$\Delta E_c = -\Delta E_{pe} \rightarrow \frac{1}{2}mv^2 = q \cdot \Delta V \quad (q \text{ y } \Delta V \text{ en valor absoluto}) \quad v^2 = \frac{2 \cdot q \cdot \Delta V}{m}$$

Al entrar en el campo magnético, sufren una desviación que las obliga a seguir un movimiento circular

uniforme de radio dado por $R = \frac{m \cdot v}{q \cdot B} \rightarrow v = \frac{R \cdot q \cdot B}{m} \rightarrow v^2 = \frac{R^2 \cdot q^2 \cdot B^2}{m^2}$

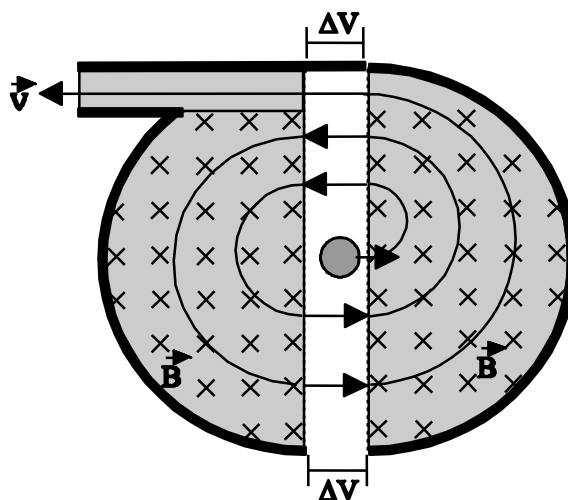
Igualando: $\frac{2 \cdot q \cdot \Delta V}{m} = \frac{R^2 \cdot q^2 \cdot B^2}{m^2} \rightarrow \frac{q}{m} = \frac{2 \cdot \Delta V}{B^2 \cdot R^2}$ como B y ΔV son conocidos, midiendo el radio de la circunferencia podremos conocer la relación carga/masa de la partícula.

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.

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 ej.). 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 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.



Selector de velocidades:

En multitud de experimentos y aparatos (como el espectrógrafo de masas) se necesita trabajar con partículas cargadas cuya velocidad conozcamos con precisión. Como a veces estas partículas provienen de fuentes radiactivas, la velocidad con la que son desprendidas varía aleatoriamente. Se hace necesario seleccionar aquellas partículas cuya velocidad sea la que nos interesa.

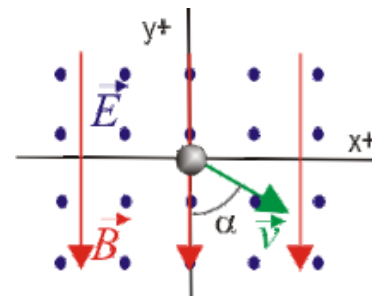
Esto se consigue mediante la aplicación conjunta de un campo eléctrico y un campo magnético. La fuerza total sobre la partícula será $\vec{F}_e + \vec{F}_m = q \cdot \vec{E} + q \cdot \vec{v} \times \vec{B} = q \cdot (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$

En general, esta fuerza modificará el movimiento de la partícula, haciendo que se desvíe. Pero podemos ajustar los valores y orientaciones de los campos para que, para partículas con una velocidad concreta, la fuerza total sea nula, y siga con MRU, sin desviarse. Para ello

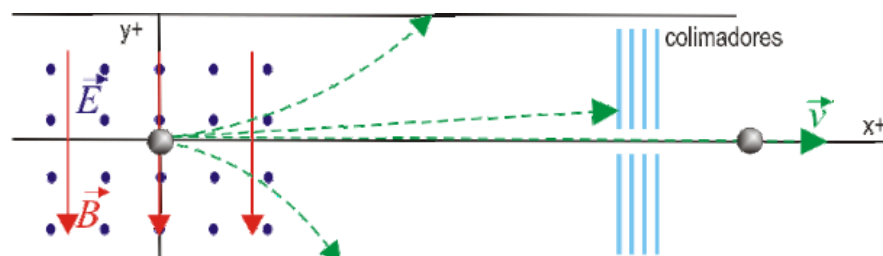
$$\vec{F}_e + \vec{F}_m = q \cdot (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) = 0 \rightarrow \vec{E} = -\vec{v} \times \vec{B}$$

El módulo del campo eléctrico, que podemos variar mediante el voltaje de la pila, será $E = B \cdot v \cdot \sin\alpha$

Aquellas partículas que no cumplan con la condición anterior, serán desviadas y chocarán con las paredes del aparato.



Sólo con esto, no garantizamos una única velocidad. Cualquier velocidad cuya componente en el eje x ($v \cdot \sin\alpha$) cumpla con la condición, seguirá con trayectoria rectilínea. Para conseguir partículas con un módulo concreto v , debemos colocar colimadores a la salida del aparato. Un colimador consiste en un conjunto de láminas metálicas que dejan sólo una rendija por la que pueden pasar únicamente las partículas que lleven una dirección concreta (eje x en nuestro caso), chocando el resto con las láminas. De este modo, al fijar la dirección ($\sin\alpha = 1$, $\alpha = 90^\circ$), garantizamos con bastante precisión el módulo v de las partículas que salen del selector.



ANEXO II: CAMPO MAGNÉTICO EN LA MATERIA

Hemos visto que el origen del campo magnético está en las corrientes eléctricas, es decir, en el movimiento de cargas eléctricas. Entonces, ¿cómo produce campo magnético un imán, que está en reposo? La respuesta hay que buscarla en la estructura microscópica de la materia.

Los átomos que componen cualquier sustancia están formados, básicamente, por un núcleo de carga positiva alrededor del cual giran electrones. Cada electrón en movimiento crea un campo magnético en el átomo. A esto se añade el spin de cada electrón. De este modo, cada átomo o molécula se comporta como un imán microscópico, que podemos caracterizar por su momento magnético $\vec{M}_i$. La suma de todos los momentos magnéticos microscópicos del material se conoce como vector magnetización ($\vec{M} = \sum \vec{M}_i$)

Normalmente, en la mayoría de las sustancias, estos imanes microscópicos están desorientados, de forma que la magnetización total (la suma de todos los momentos microscópicos, es nula. $\sum \vec{M}_i = 0$)

Sin embargo, si de forma natural o bajo la acción de un campo externo, los momentos magnéticos se orientan en la misma dirección, la magnetización total no será nula. $\vec{M} = \sum \vec{M}_i \neq 0$, y el material producirá un campo magnético apreciable, que dependerá del valor de la magnetización $\vec{B}_m = \mu_0 \cdot \vec{M}$

Sabemos que el campo magnético $\vec{B}$ depende del medio, a través de la permeabilidad magnética μ . Si dividimos el valor de $\vec{B}$ entre μ , obtendremos un vector que no depende del medio. Se denomina **intensidad de campo magnético** $\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu}$, con lo que $\vec{B} = \mu \cdot \vec{H}$

El medio está formado por una estructura de átomos (o moléculas) en un espacio vacío. Podemos descomponer entonces el campo magnético en una suma de dos contribuciones: la del vacío ($\vec{B}_0 = \mu_0 \cdot \vec{H}$) y la de la estructura atómico-molecular (magnetización) ($\vec{B}_m = \mu_0 \cdot \vec{M}$)

$$\text{Así } \vec{B} = \mu_0 \cdot \vec{H} + \mu_0 \cdot \vec{M} \rightarrow \vec{B} = \mu_0 \cdot (\vec{H} + \vec{M})$$

La magnetización depende del campo externo $\vec{H}$

$$\vec{M} = \chi_m \cdot \vec{H}$$

donde χ_m es la susceptibilidad magnética, que depende del material

La expresión del campo magnético total queda $\vec{B} = \mu_0 \cdot (1 + \chi_m) \cdot \vec{H}$

Comparando esta expresión con $\vec{B} = \mu \cdot \vec{H} \rightarrow \mu = \mu_0 \cdot (1 + \chi_m)$ y la permeabilidad relativa $\mu_r = 1 + \chi_m$

Según el comportamiento del material frente a un campo magnético H externo, tendremos materiales:

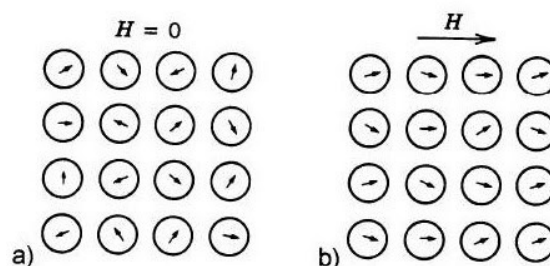
Paramagnéticos: (aluminio, magnesio, titanio, aire...)

Su susceptibilidad χ_m es positiva, aunque muy pequeña, con lo que la permitividad relativa es ligeramente mayor que 1.

Una sustancia paramagnética suele tener átomos con electrones desapareados, como el aluminio. Esto hace que cada átomo o molécula posea un momento magnético $\vec{M}_i$. En ausencia de un campo externo los momentos magnéticos están desordenados, con lo que la magnetización del material es nula.

La acción de un campo magnético externo hace que los átomos tiendan a reorientarse con sus momentos paralelos al campo. Sólo se reorienta un porcentaje reducido, ya que la agitación térmica tiende a desorientarlos nuevamente. De este modo la magnetización $\vec{M}$ tiene un valor pequeño y va en el mismo sentido que el campo externo (χ_m es positiva).

La interacción entre el campo externo y la magnetización en el mismo sentido produce una fuerza atractiva. Un material paramagnético se siente ligeramente atraído por un imán.



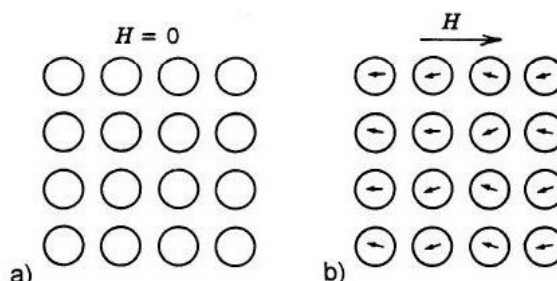
Diamagnéticos: (oro, cobre, agua, hidrógeno, helio, grafito...)

Su susceptibilidad χ_m es negativa, aunque muy pequeña, con lo que la permeabilidad relativa es ligeramente menor que 1.

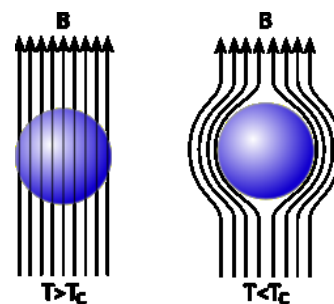
Una sustancia diamagnética suele tener átomos o moléculas con electrones apareados, como el oro, agua, y carecen de momento magnético $\vec{M}_i$. La magnetización es nula en ausencia de un campo externo.

Al introducir un campo externo, por inducción, se originan pequeñas corrientes en el interior del material, las cuales generan un campo que se opone al campo externo (va en sentido contrario). entonces, la magnetización $\vec{M}$ tiene un valor pequeño y va en el sentido contrario al campo externo (χ_m es negativa).

La interacción entre el campo externo y la magnetización en sentido contrario produce una fuerza repulsiva. Un material diamagnético se siente muy ligeramente repelido por un imán.

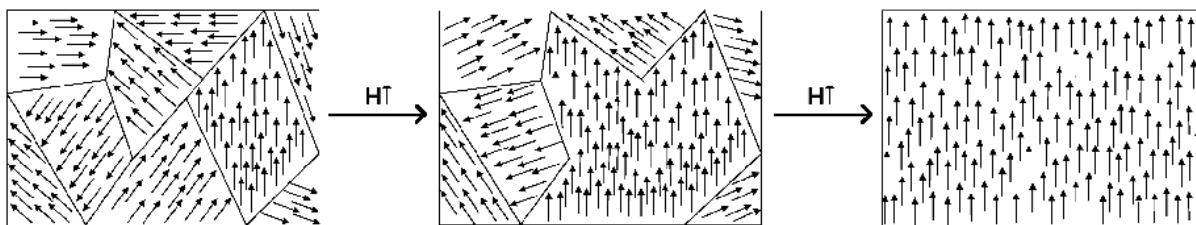


Superconductores: Un caso extremo de diamagnetismo se da cuando la susceptibilidad del material es -1, es decir, las corrientes inducidas en el materiales son tales que anulan el campo magnético en el interior, ya que $\vec{M} = -\vec{H}$. Estos materiales son los superconductores, y son impermeables a los campos magnéticos. La mayoría de las sustancia superconductoras lo son a muy bajas temperaturas.



Ferromagnéticos: Los materiales ferromagnéticos (Fe, Co, Ni, Gd, y aleaciones con otros elementos), poseen átomos con momento magnético y una estructura que facilita la reordenación y alineación de los átomos, que se agrupan formando dominios magnéticos (zonas microscópicas donde los momentos magnéticos van en la misma dirección).

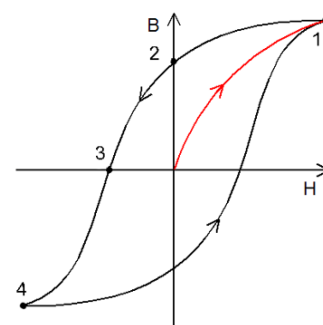
En ausencia de un campo externo, los dominios magnéticos están orientados al azar (magnetización total nula). Al introducir un campo externo, el dominio cuya dirección coincida con la del campo irá creciendo, influyendo en los átomos vecinos y reorientándolos. Cuanto mayor se vuelva este dominio, con más intensidad reorientará a otros átomos, con lo que la magnetización alcanza un valor muy grande (mucho mayor que el del campo) rápidamente. La susceptibilidad es positiva y muy grande, hasta 10^5 .



Histéresis magnética: Los materiales paramagnéticos y diamagnéticos se magnetizan ligeramente en presencia de un campo externo $\vec{H}$, pero al retirar este campo externo, la magnetización desaparece.

Sin embargo, en un material ferromagnético, la existencia de dominios magnéticos crecientes hace que el campo $\vec{B}$ aumente muy rápidamente al aumentar $\vec{H}$. Cuando se han reorientado la mayor parte de los átomos y quedan pocos desorientados, ya el campo $\vec{B}$ deja de crecer, alcanzando el valor de saturación.

Al retirar el campo externo, la agitación térmica hace que los átomos tiendan a desorientarse, reduciéndose la magnetización. Sin embargo, la influencia que ejercen los dominios magnéticos hace que muchos sigan orientados aunque desaparezca el campo magnético externo. Queda entonces una magnetización residual que es muy baja en el hierro dulce, pero muy importante en el acero (se convierte así en un imán permanente). Esto es lo que se conoce como **histéresis magnética**.



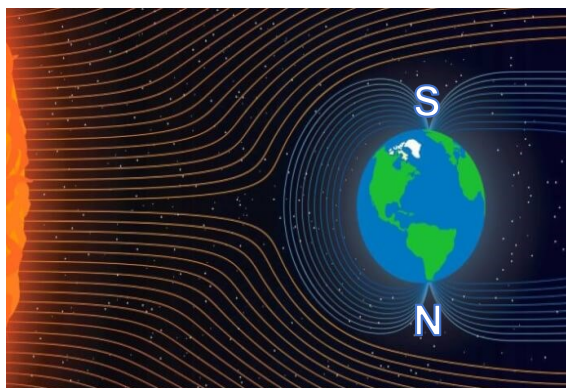
Temperatura de Curie: La agitación térmica tiende a desorientar los momentos magnéticos de los átomos. A baja temperatura, la influencia de los átomos colindantes mantiene los dominios magnéticos, pero existe una temperatura límite por encima de la cual la agitación térmica destruye os dominios y la sustancia se convierte en paramagnética. Esta temperatura se conoce como **Temperatura de Curie** (T_C), y para el hierro es de 700 °C.

Permeabilidades relativas de algunas sustancias			
Paramagnéticos		Ferromagnéticos	
Sustancia	$\mu_r = 1 + \chi$	Sustancia	μ_r (máxima)
Aire	$1 + 3,6 \cdot 10^{-7}$	Hierro dulce	200
Aluminio	$1 + 2,2 \cdot 10^{-5}$	Cobalto	270
Platino	$1 + 2,6 \cdot 10^{-4}$	Níquel	700
Diamagnéticos		Hierro fundido	600
Sustancia	$\mu_r = 1 - \chi$	Hierro magnético (0,1% Si)	5500
Oro	$1 - 3,6 \cdot 10^{-5}$	Acero forjado	6000
Cobre	$1 - 10^{-5}$	Hierro al silicio (4% Si)	6700
Agua	$1 - 0,9 \cdot 10^{-5}$	Hipernik (50%Fe, 50%Ni)	70000

ANEXO III: CAMPO MAGNÉTICO TERRESTRE: EL CINTURÓN DE VAN ALLEN

A principios del S.XVII William Gilbert descubrió que la Tierra se comporta como un imán, explicando el comportamiento de la brújula. Desde entonces nuestro conocimiento sobre el campo magnético terrestre se ha ido incrementando.

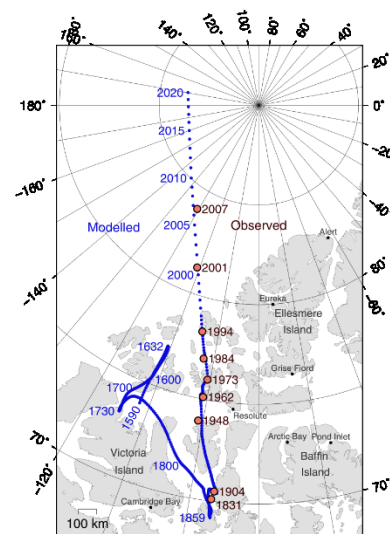
Origen: La causa del campo magnético terrestre se encuentra en el núcleo externo de la Tierra, formado por aleaciones fluidas de hierro-níquel. Aunque el mecanismo aún no está explicado completamente, las corrientes de convección que se producen en el metal fundido, unidas a la diferencia de temperatura entre la parte interna y externa del núcleo (efecto Seebeck o termoelectrónico), producen intensas corrientes eléctricas, que dan lugar al campo magnético (geodinamo).



Polos magnéticos: Los polos magnéticos no coinciden con los geográficos. Además, los nombres están invertidos: el Polo “Norte” magnético es en realidad un polo sur, y viceversa. Es algo lógico, ya que si el que consideramos polo Norte de una brújula apunta aproximadamente hacia el Norte geográfico, éste debe ser un polo Sur magnético. No olvidemos que los nombres de los polos y el sentido de las líneas de campo, es algo que hemos establecido por convenio.

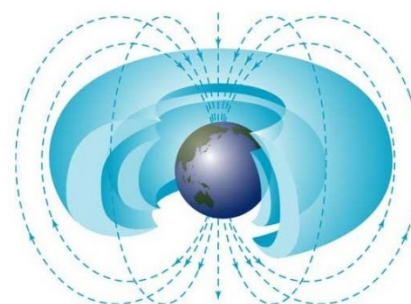
Actualmente el campo magnético terrestre es aproximadamente dipolar (tiene dos polos, N y S) con una inclinación actual de unos 10° respecto al eje terrestre. La situación de los polos magnéticos N y S va cambiando, los polos magnéticos se desplazan, debido a las variaciones caóticas en las corrientes del núcleo terrestre. A lo largo de la historia, en periodos de cientos de miles de años, llegan incluso a invertirse. En alguna ocasión, la Tierra ha tenido más de dos polos magnéticos (campo cuadrupolar, dos polos N y dos S). El estudio de estas variaciones (*paleomagnetismo*) ha permitido estudiar el movimiento de los continentes, datar fósiles, etc.

Valor en la superficie: El valor en la superficie varía entre 0,25 G y 0,65 G ($2,5 \cdot 10^{-5} \text{ T} - 6,5 \cdot 10^{-5} \text{ T}$). Su dirección no es en general paralela a los meridianos, ni exactamente paralela a la superficie. La *declinación magnética* mide la desviación del campo magnético terrestre respecto al meridiano en cada punto. Dicha declinación magnética, al igual que los polos, va cambiando con el tiempo.



Desplazamiento del Polo Norte Magnético. De Cavit
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=46888403>

Alcance del campo magnético terrestre: Aunque teóricamente el campo magnético tiene alcance infinito, no olvidemos que la Tierra no está sola en el espacio. Otros astros generan magnetismo, y el campo magnético solar es mucho más intenso. Las líneas del campo magnético terrestre se ven distorsionadas por las del campo solar (principio de superposición). A efectos prácticos, se considera que el campo magnético terrestre alcanza hasta donde la contribución del campo magnético solar es significativamente más intensa que la del terrestre.



Cinturón de Van Allen. Auroras boreales: El Sol, además de ondas electromagnéticas (luz, de todo el espectro) también emite partículas cargadas (protones, electrones, etc). Estas partículas viajan a gran velocidad, constituyendo el denominado viento solar, y alcanzan la órbita de la Tierra. Esta radiación podría destruir la vida en la Tierra, si no fuera porque el campo magnético terrestre desvía estas partículas (fuerza de Lorentz), que siguen trayectorias helicoidales siguiendo las líneas del campo magnético hacia los polos. La fricción con las moléculas de la atmósfera hacen que pierdan energía en forma de luz, dando lugar a las *auroras boreales* (en el Norte) y *auroras australes* (en el Sur).

La zona del campo magnético terrestre donde quedan confinadas estas partículas se conoce como *cinturón de Van Allen*.

