

INTERACCIÓN ELECTROMAGNÉTICA ELECTROSTÁTICA

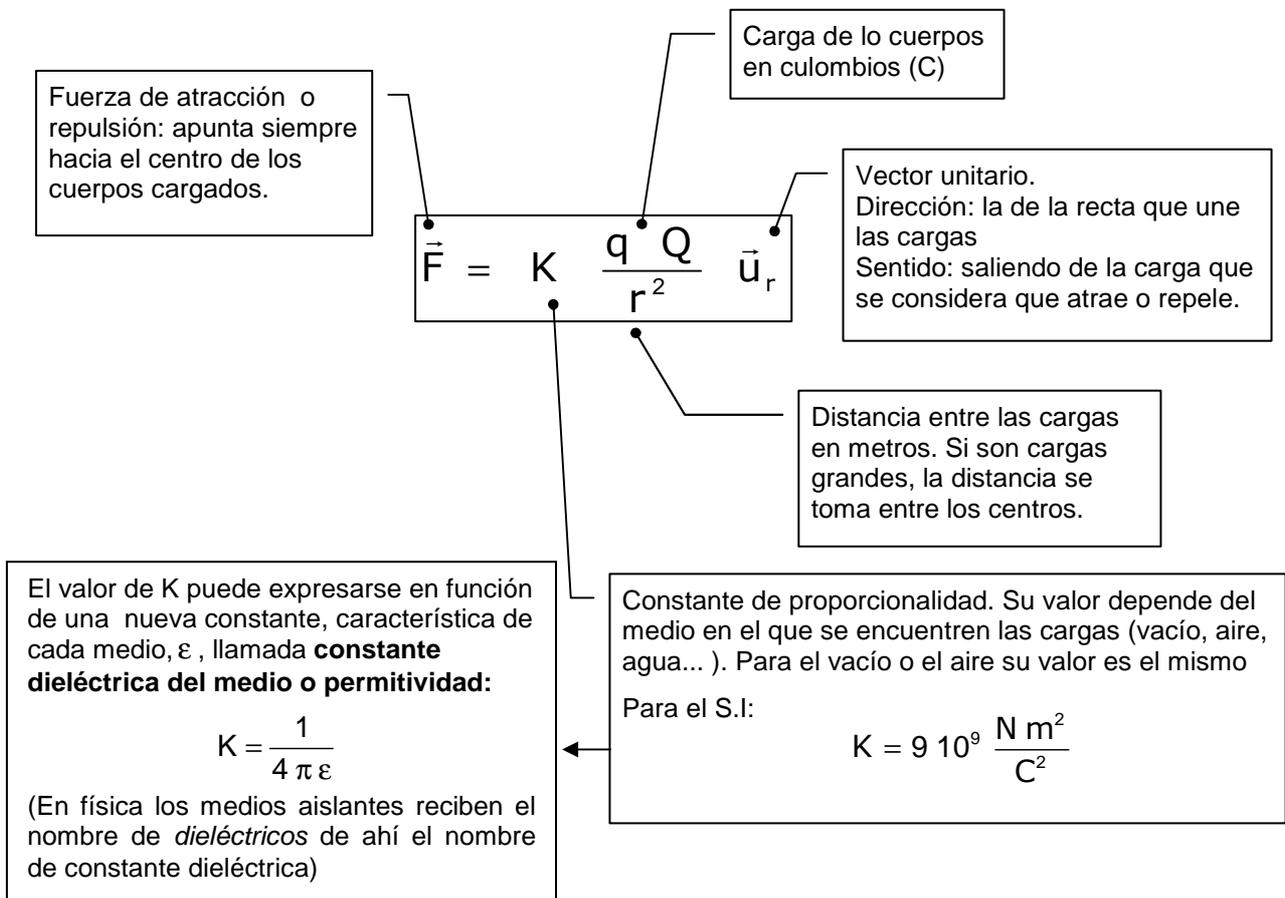
Cualquier partícula material, además de tener masa (y ser sensible, por tanto, a la interacción gravitatoria) contiene cargas eléctricas positivas y negativas (denominación atribuida a Benjamín Franklin) que como es sabido son portadas por los protones y electrones.

La existencia de la carga eléctrica da lugar a una nueva interacción fundamental en la naturaleza ya que existe una fuerza de atracción entre cargas de distinto signo, mientras que la interacción se vuelve repulsiva si las cargas tienen signo idéntico.

La materia es eléctricamente neutra, de lo que podemos deducir algunas cosas:

- **Debe de existir una carga eléctrica elemental** (la carga eléctrica del electrón). En consecuencia, la carga eléctrica perdida o adquirida en los procesos de transferencia de carga debe ser siempre un múltiplo entero de la carga eléctrica elemental. Se dice que la carga eléctrica está "**cuantizada**".
- El valor de la carga eléctrica elemental es $1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C}$.
- La neutralidad eléctrica de la materia se explica por la existencia de un número idéntico de cargas positivas y negativas.
- El mecanismo por el cual un cuerpo adquiere carga eléctrica (sea positiva o negativa) implica la transferencia de electrones débilmente ligados al núcleo atómico (los que ocupan las capas más externas). Si un cuerpo pierde electrones quedará cargado positivamente debido al exceso de carga positiva y si los gana adquirirá la correspondiente carga negativa.

La interacción entre dos cargas (supuestas puntuales) viene descrita por la **Ley de Coulomb** (1785) que establece que **la fuerza con que dos cargas se atraen o se repelen es directamente proporcional al producto de las cargas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa.**



Para el S.I. y para el vacío o el aire la constante dieléctrica (ϵ_0) vale:

$$\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^9} \frac{\text{C}^2}{\text{N} \cdot \text{m}^2}$$

Por tanto el valor de K para el vacío o el aire será :

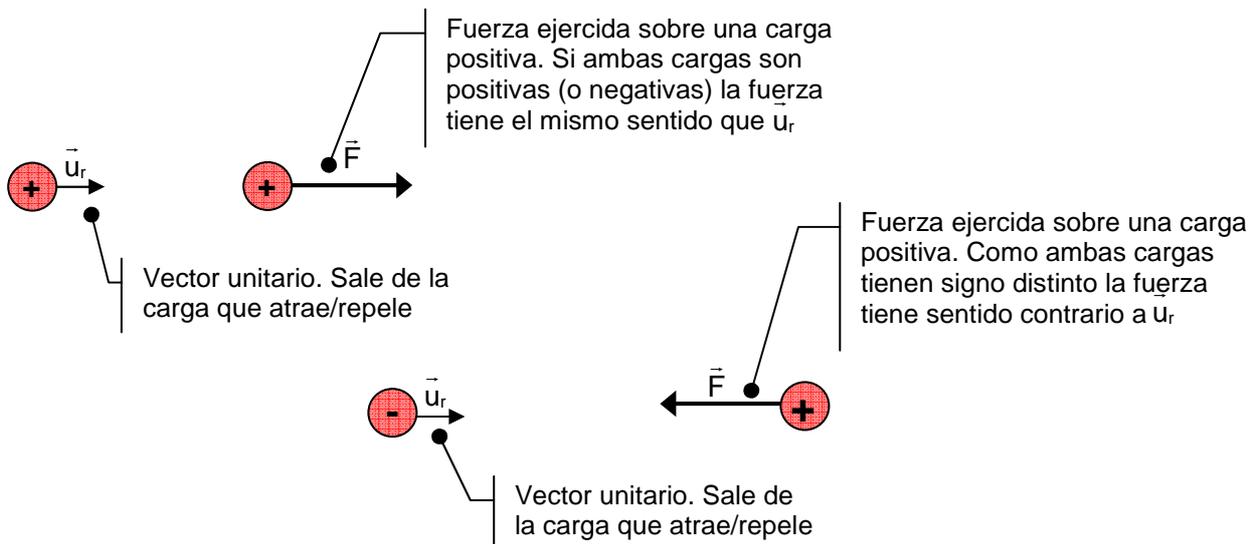
$$K = \frac{1}{\cancel{4\pi} \frac{1}{\cancel{4\pi} 9 \cdot 10^9} \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2}} = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2}$$

En otras ocasiones se emplea la **constante dieléctrica relativa** (un número sin dimensiones) definida como el cociente entre la constante dieléctrica del medio considerado y la del vacío:

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}; \quad \epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$$

La constante dieléctrica está relacionada con la capacidad del medio para transmitir la interacción eléctrica.

En un medio con un constante dieléctrica alta (K, pequeña) la fuerza entre dos cargas será más pequeña que en otro en el que la constante dieléctrica sea baja (K, grande). El primer medio es mejor aislante y, por tanto, "transmite" peor la interacción entre cargas (recordar que en física los medios aislantes reciben el nombre de *dieléctricos*)



En la práctica la unidad S.I (el culombio) resulta excesivamente grande por lo que se utilizan submúltiplos de la misma:

Microculombio (μC). $1 \mu\text{C} = 10^{-6} \text{C}$
 Nanoculombio (nC). $1 \text{nC} = 10^{-9} \text{C}$
 Picoculombio (pC). $1 \text{pC} = 10^{-12} \text{C}$

- Un aspecto importante de la carga eléctrica es que siempre aparece asociada a partículas con masa, las **partículas elementales**.
- Se ha encontrado que en todos los procesos observados la carga neta de un sistema aislado permanece invariable, lo que constituye el enunciado del **Principio de Conservación de la Carga**.
- Para calcular la fuerza total ejercida por varias cargas sobre otra es preciso calcular la fuerza ejercida por cada una de ellas y, al final, sumar (vectorialmente) todas las fuerzas (**Principio de Superposición**).
- La interacción eléctrica juega un papel fundamental en la estructura de la materia ya que es esta interacción la que mantiene unidos los electrones a los núcleos. También es la responsable de las fuerzas que actúan entre las moléculas (fuerzas intermoleculares) las cuales determinan algunas importantes propiedades de las sustancias.

La fuerza eléctrica como fuerza conservativa

Imaginemos ahora la siguiente situación:

Si en las proximidades de una carga positiva (Q) se introduce otra carga positiva de prueba (q), aplicando para ello una fuerza contraria a la ejercida por el campo, y la soltamos, será repelida y se moverá alejándose de la carga.

Tenemos una situación idéntica a la descrita cuando elevamos un objeto (situado en un campo gravitatorio) o cuando comprimimos un muelle. La energía comunicada al cuerpo se acumula como energía potencial que es liberada como energía cinética si se deja actuar a la fuerza.

La energía necesaria para traer una carga de prueba hasta un punto en el que siente la fuerza ejercida por la carga considerada, se acumula como energía potencial.

El valor de la energía potencial en un punto (igual al trabajo realizado contra la fuerza eléctrica para traer la carga hasta el punto) se puede calcular usando la siguiente expresión:

$$E_p = K \frac{q Q}{r}$$

La fuerza eléctrica, al igual que la gravitatoria, es una fuerza conservativa y, como tal, cuando realiza trabajo se produce una transferencia de energía cinética a potencial o viceversa (dependiendo del signo del trabajo). Se cumplirá por tanto:

$$E_{cin} + E_{pot} = cte. ; E_{c1} + E_{p1} = E_{c2} + E_{p2}$$

La suma de la energía cinética y potencial (energía mecánica) permanece constante (se conserva). La energía mecánica se conserva.

La energía potencial tendrá valor nulo a distancia infinita de la carga y puede tomar valores positivos o negativos en función del signo de las cargas consideradas.

A efectos prácticos lo realmente importante son las variaciones de energía potencial. **Una carga siempre se mueve espontáneamente en el sentido en el que la energía potencial disminuye.** Para conseguir que se mueva en el sentido según el cual la energía potencial aumenta es necesario comunicarle energía externamente. Esta energía aportada se acumula en la carga como energía potencial eléctrica.

$$E_p = \mp K \frac{q Q}{r}$$

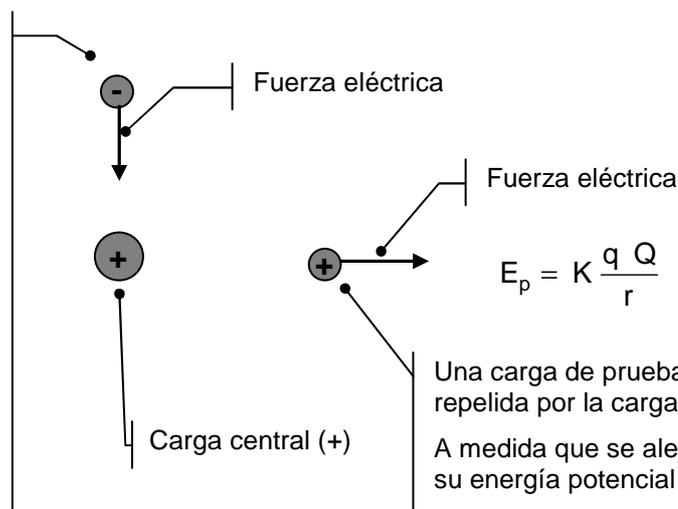
Una carga de prueba negativa es atraída hacia la carga central (+).

A medida que se acerca a la carga su energía potencial disminuye .

La carga **espontáneamente** se mueve disminuyendo su energía potencial.

Para alejarla de la carga central **es necesario aplicar una fuerza externa** (realizar trabajo). La energía suministrada se acumulará como energía potencial.

Al alejarse su energía potencial aumenta.



Una carga de prueba positiva es repelida por la carga central (+).

A medida que se aleja de la carga su energía potencial disminuye .

La carga **espontáneamente** se mueve disminuyendo su energía potencial.

Para acercarla a la carga central **es necesario aplicar una fuerza externa** (realizar trabajo). La energía suministrada se acumulará como energía potencial.

Al acercarse su energía potencial aumenta.

La interacción gravitatoria y eléctrica presentan analogías evidentes, y algunas diferencias, que se comentan a continuación:

Ley de Gravitación Universal	Ley de Coulomb
$\vec{F} = - G \frac{m M}{r^2} \vec{u}_r$	$\vec{F} = K \frac{q Q}{r^2} \vec{u}_r$

- **Tanto la interacción gravitatoria como la eléctrica son consecuencia de la existencia de propiedades inherentes a la materia: la masa y la carga.**

Todo cuerpo que posea masa será sensible a la interacción gravitatoria. Todo objeto que posea carga neta será sensible a la interacción eléctrica. Cuanto mayor es la masa o la carga de dos cuerpos mayor es su interacción gravitatoria o eléctrica.

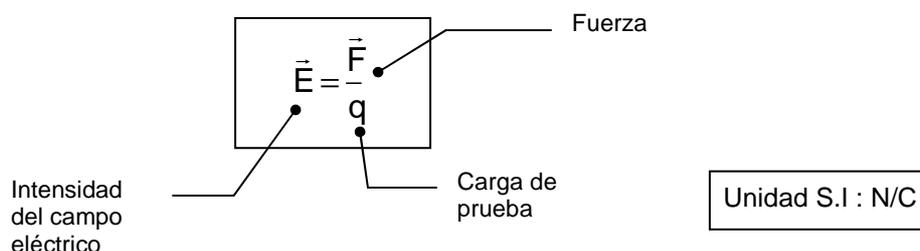
- **Ambas interacciones decrecen muy rápidamente a medida que nos alejamos de la masa o de la carga.**
- **La interacción gravitatoria es siempre atractiva, mientras que la interacción eléctrica puede ser atractiva o repulsiva en función del signo de las cargas.**
- **El pequeño valor de la constante de gravitación universal (G) hace que la fuerza de atracción gravitatoria sea despreciable** a no ser que las masa implicadas sean elevadas (astros). La fuerza de gravedad es la interacción que domina a nivel cosmológico.
- **El valor de la constante que aparece en la Ley de Coulomb (K) hace que la fuerza eléctrica sea apreciable incluso cuando consideramos cargas eléctricas muy pequeñas.** La interacción eléctrica es la dominante a nivel de átomos y moléculas, haciendo posible la existencia de las unidades estructurales básicas que forman la materia (los átomos).
- **La interacción gravitatoria no depende del medio en el que se encuentren las masas (aire, vacío, agua...), mientras que la naturaleza del medio sí influye en el valor de la interacción eléctrica.** Unos medios transmiten mejor la interacción eléctrica que otros.
- **La fuerza eléctrica y la gravitatoria son fuerzas conservativas.**

CAMPO ELÉCTRICO

De manera análoga a como sucedía en la interacción gravitatoria, la interacción eléctrica entre cargas no se ejerce a distancia. Una carga colocada en un punto **modifica las propiedades del espacio circundante** de forma tal que si ahora introducimos una carga de prueba ésta acusará la existencia de una acción (fuerza) sobre ella que la atrae (si ambas cargas tienen signo contrario) o la repele (si son del mismo signo)

Se dice que la carga Q crea un campo eléctrico a su alrededor que actúa sobre la carga de prueba. De esta manera la acción no se ejerce a distancia. El campo es el responsable de la acción ejercida sobre la carga de prueba.

El campo es una entidad física medible y se define la intensidad del campo eléctrico (\vec{E}) en un punto como la fuerza ejercida sobre la unidad de carga positiva colocada en ese punto:

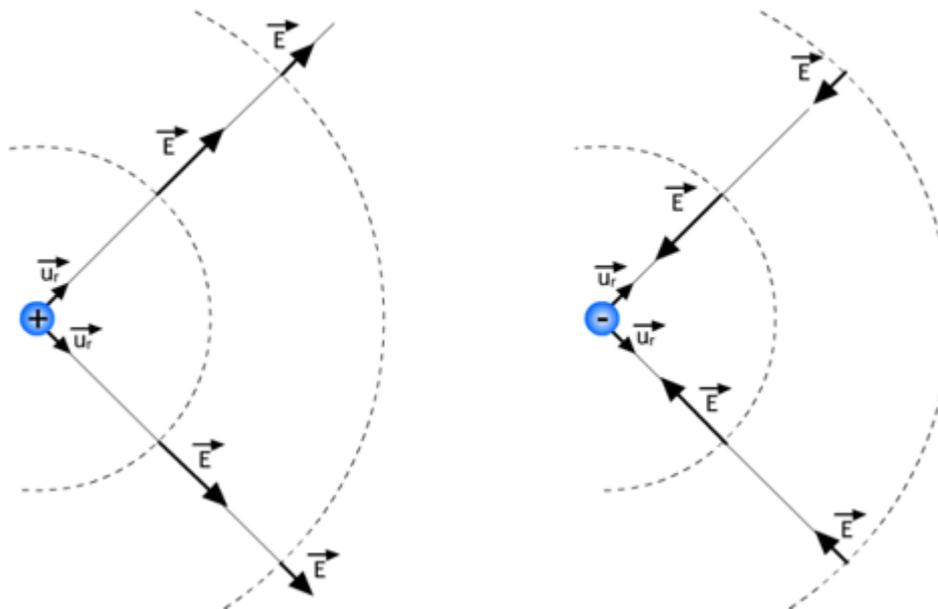


$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} = \frac{K \frac{q Q}{r^2} \vec{u}_r}{q} = K \frac{Q}{r^2} \vec{u}_r$$

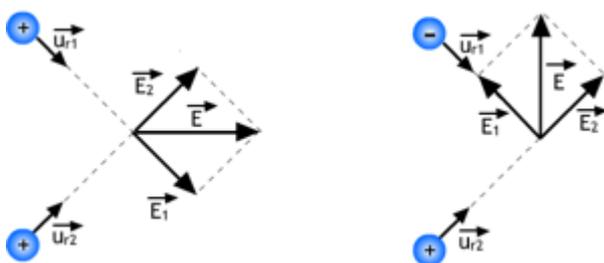
$$\vec{E} = K \frac{Q}{r^2} \vec{u}_r$$

Vector unitario.
 Dirección: la de la recta que une la carga y el punto.
 Sentido: siempre **saliendo** de la carga que crea el campo.

- La intensidad de campo, así definida, **establece un vector** (y sólo uno) para cada uno de los puntos del espacio. El campo eléctrico es un **campo vectorial**.
- El valor del campo eléctrico en un punto **es independiente de la carga de prueba** y depende sólo de la carga que crea el campo y la distancia a la que esté el punto considerado.
- Los puntos que estén a una misma distancia de la carga central **tendrán un mismo valor** para la intensidad de campo. *La distancia se toma desde el centro de la carga.*
- La intensidad del campo eléctrico **decrece muy rápidamente con la distancia**, ya que es **inversamente proporcional a su cuadrado**.
- **El sentido del vector campo eléctrico depende del signo de la carga.** Si ésta es positiva el campo es radial y saliente (se dice que en el lugar en el que hay una carga positiva existe una "fuente" del campo) Si la carga es negativa el campo es radial y entrante (se dice que existe un "sumidero" del campo)



Campo eléctrico creado por una carga puntual positiva (izquierda) y negativa (derecha). En ambos casos el campo tiene disposición radial, saliente para la carga positiva y entrante para la negativa.



Si en las proximidades de un punto existe más de una carga, el campo eléctrico es el resultado de sumar (vectorialmente) cada uno de los campos individuales creados por las cargas (Principio de Superposición).

Es conveniente diferenciar claramente entre campo y acción (fuerza) ejercida sobre las cargas situadas en su seno.

El campo es algo que sólo depende de la carga que lo crea. Si ahora introducimos una carga en el campo, éste ejerce una acción sobre ella (fuerza). La fuerza ejercida por el campo sobre la carga se puede calcular fácilmente si se conoce el valor del campo:

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

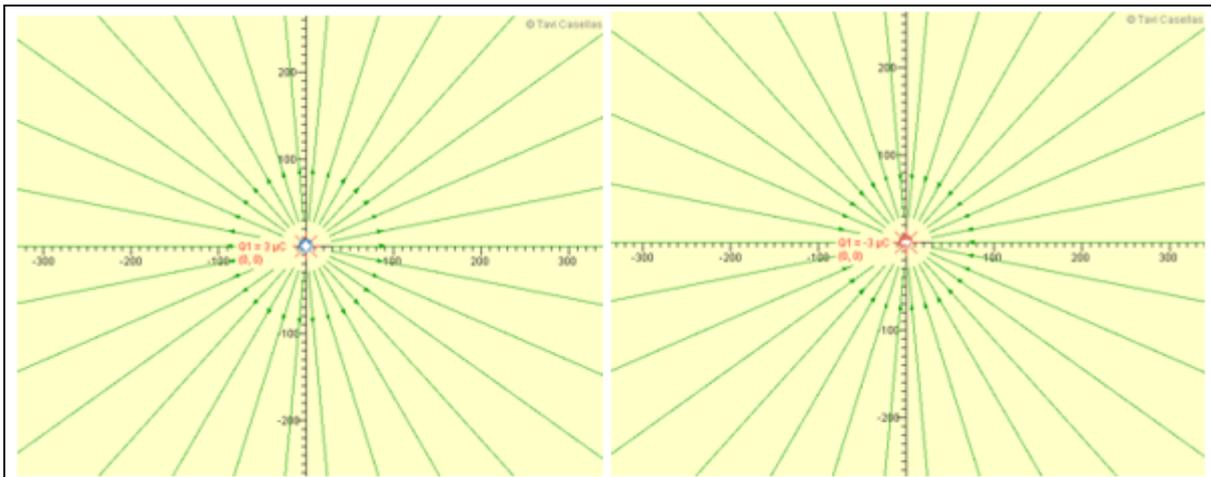
Se deduce fácilmente que fuerza y campo tendrán el mismo sentido si la carga es positiva y sentido contrario si es negativa.

Si en una región del espacio en la que existen cargas de signo distinto se origina un campo eléctrico, éstas se moverán en sentidos contrarios produciéndose la separación de las cargas.

Campo eléctrico. Líneas de fuerza

Con el fin de visualizar el campo se recurre a dibujar las llamadas "**líneas de campo o líneas de fuerza**" que cumplen la condición de que **el vector campo es siempre tangente** en cualquiera de sus puntos y se trazan de modo que **su densidad sea proporcional a la intensidad del campo**.

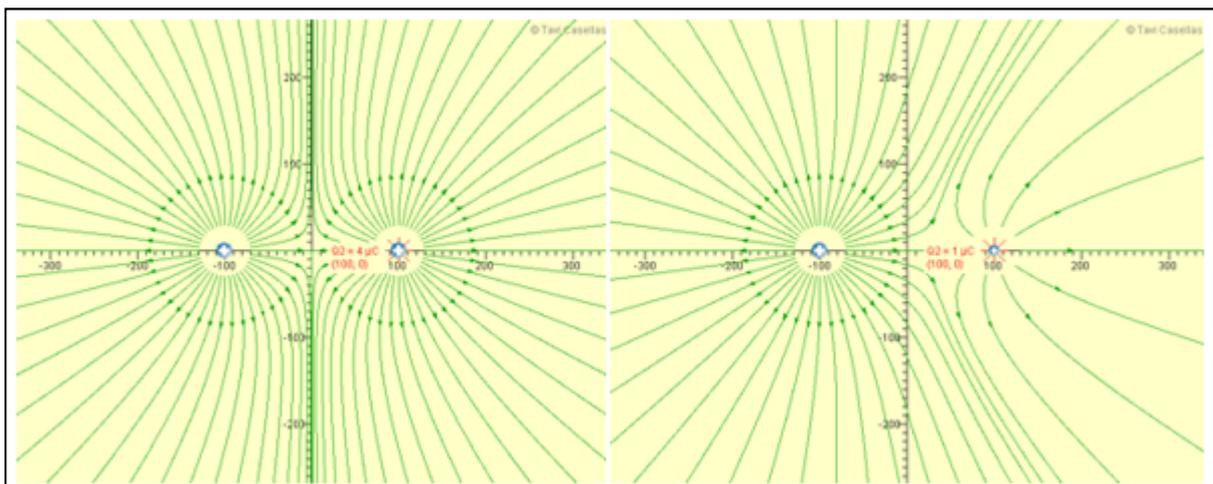
- Para una única carga las líneas de campo son radiales. Si ésta es positiva el campo sale de la carga ("fuentes de campo"), mientras que si es negativa apunta hacia ella ("sumideros del campo").
- Las líneas de fuerza representan las trayectorias que seguiría una carga situada en el campo. Si la carga es positiva se moverá en el sentido del campo. Si es negativa en sentido contrario



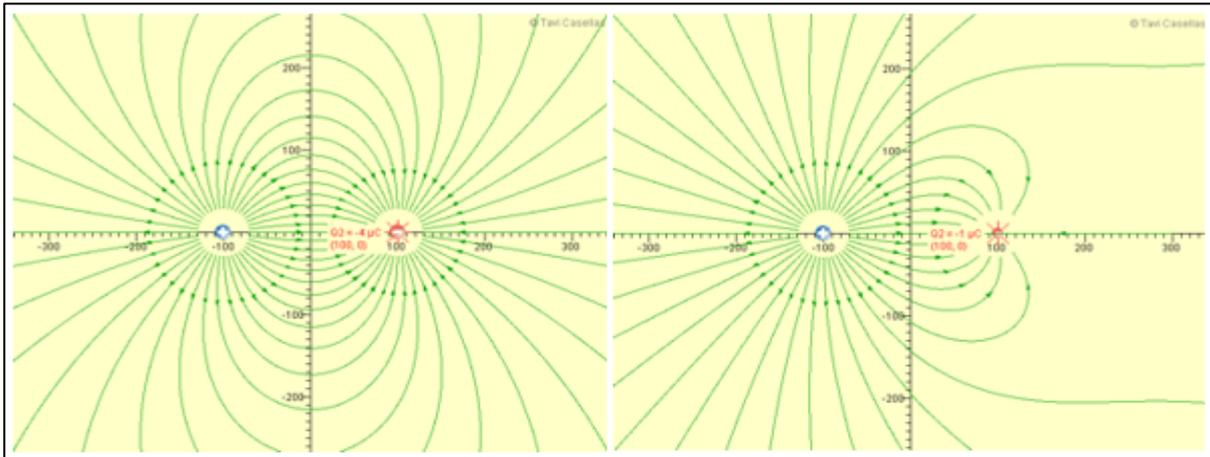
Izquierda: líneas de fuerza del campo eléctrico creado por una carga de $+3 \mu\text{C}$. El campo es saliente.
Derecha: líneas de fuerza del campo eléctrico creado por una carga de $-3 \mu\text{C}$. El campo es entrante

Captura de pantalla de **FisLab.net**. Autor: **Tavi Casellas**
(<http://www.xtec.net/~ocasella/applets/elect/appletsol2.htm>)

- Si hay más de una carga el campo se distorsiona debido a la superposición de ambos campos (en cada punto el campo resultante es la suma vectorial de los campos debidos a cada una de las cargas).



Izquierda: líneas de fuerza del campo eléctrico creado por dos cargas positivas e idénticas.
 Derecha: líneas de fuerza del campo eléctrico creado por dos cargas positivas distintas. La situada a la izquierda es cuatro veces mayor que la que está situada más a la derecha.



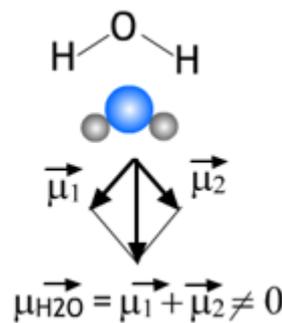
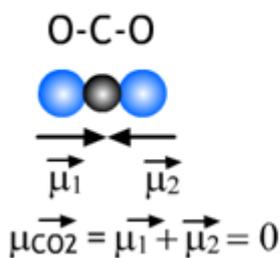
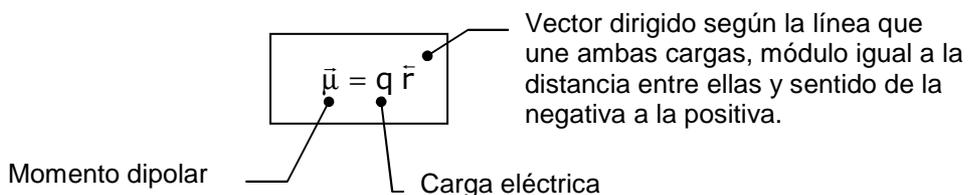
Izquierda: líneas de fuerza del campo eléctrico creado por dos cargas idénticas, pero de distinto signo. Las líneas salen de la positiva y entran en la negativa. Esta agrupación recibe el nombre de **dipolo eléctrico**.

Derecha: líneas de fuerza del campo eléctrico creado por dos cargas de distinto signo. La situada a la izquierda es positiva y cuatro veces mayor que la que está situada más a la derecha (negativa).

El dipolo eléctrico es una distribución de carga que adquiere una gran importancia en el estudio de las moléculas. Cuando están formadas por átomos distintos (moléculas heteronucleares), y debido a la diferente electronegatividad de éstos, se produce una separación de cargas adquiriendo el átomo más electronegativo una carga parcial negativa, mientras que el menos electronegativo adquiere una carga parcial idéntica pero positiva. **Se forma un dipolo.**

Si se quiere hacer un estudio cuantitativo se define el llamado **momento dipolar**, un vector definido de la forma siguiente:

- Módulo: producto de la carga por la distancia que las separa.
- Dirección: la de la línea que une ambas cargas.
- Sentido: de la carga negativa a la positiva



Izquierda: molécula de CO₂. Aunque los dos enlaces CO son polares, la molécula, en conjunto, es apolar, ya que el momento dipolar resultante es nulo.

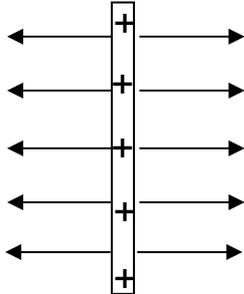
Derecha: molécula de H₂O. Los momentos dipolares de los dos enlaces H-O se suman para dar un momento dipolar total no nulo. La molécula es polar.

Campo eléctrico creado por una lámina conductora plana

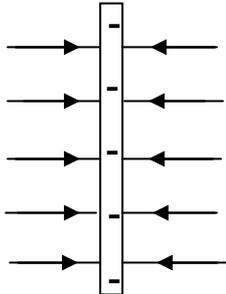
El campo eléctrico creado es perpendicular a la lámina y uniforme. Su valor no depende de la distancia a la que nos situemos. Sólo depende de la densidad de carga de la misma (carga/superficie).

$$E = \frac{\sigma}{2 \epsilon_0}$$

Densidad de carga:
 $\sigma = \frac{q}{S}$



a) Con carga positiva.
 Campo saliente.



b) Con carga negativa.
 Campo entrante.

El campo mostrado es un esquema teórico obtenido suponiendo una longitud infinita para la lámina.

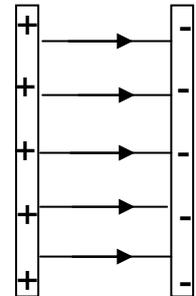
Realmente en los extremos se produce una distorsión del campo que hace que en esas zonas no sea uniforme.

Campo eléctrico creado por dos láminas paralelas con carga de signo contrario

En el interior los campos creados por ambas láminas se suman, produciendo un campo uniforme y de intensidad doble.

En el exterior los campos se restan dando un campo nulo.

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$$



Campo eléctrico creado por un conductor cilíndrico (hilo) cargado

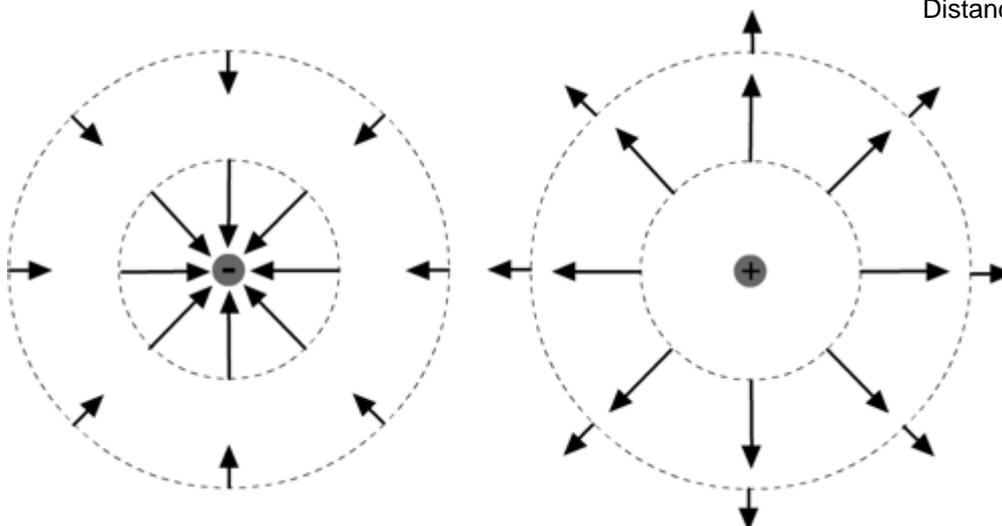
El campo creado es radial y tiene distribución cilíndrica.

Depende de la densidad lineal de carga (carga/longitud) y de la distancia al eje del cilindro.

Densidad lineal de carga:
 $\lambda = \frac{q}{L}$

$$E = \frac{\lambda}{2 \pi \epsilon_0 r}$$

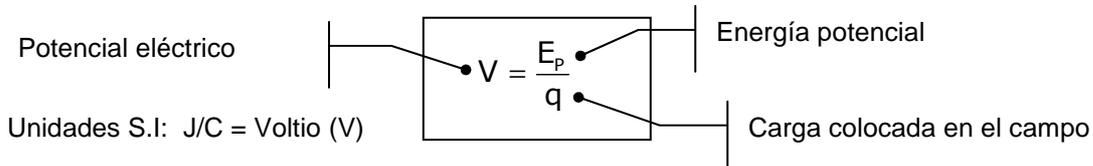
Distancia al eje



Esquema del campo eléctrico de un cilindro con carga (vista cenital).

Potencial eléctrico

La fuerza eléctrica es una fuerza conservativa. En consecuencia, a toda carga situada en su seno se le puede asignar una energía potencial. Basándonos en este hecho se puede definir una nueva magnitud (característica de los campos conservativos) denominada **potencial eléctrico, V**:



El potencial eléctrico se define como la energía potencial por unidad de carga positiva colocada en el campo.

El potencial eléctrico es un número (escalar) que se puede calcular para cada uno de los puntos del campo, siendo su valor:

$$V = \frac{E_p}{q} = \frac{K \frac{q Q}{r}}{q} = K \frac{Q}{r}$$

$$V = K \frac{Q}{r}$$

Si existe más de una carga el potencial eléctrico en un punto es la suma de los potenciales debidos a cada una de las cargas (Principio de Superposición):

$$V_{TOT} = V_1 + V_2 + V_3 \dots$$

Como se puede ver el valor del potencial eléctrico sólo depende de la carga que crea el campo y de la distancia al punto considerado. **Tendrá valor nulo a distancia infinita de la carga y puede tomar valores positivos o negativos en función del signo de la carga considerada.**

Un potencial positivo implica que el punto considerado está dentro del campo creado por una carga positiva.

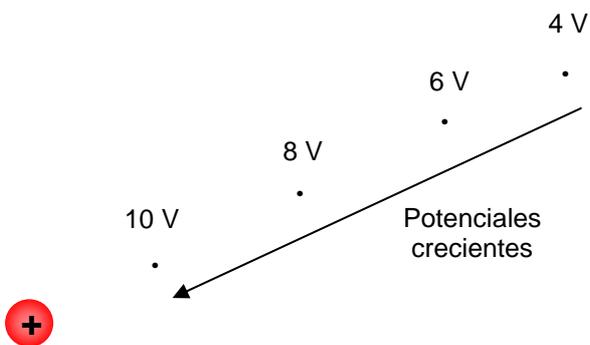
Análogamente un potencial negativo implica que el punto considerado está dentro del campo creado por una carga negativa.

Es importante distinguir entre el potencial eléctrico (V) y la energía potencial de una carga colocada en su seno. Ésta depende del valor de la carga y se puede obtener fácilmente si se conoce el valor del potencial eléctrico:

$$E_p = q V$$

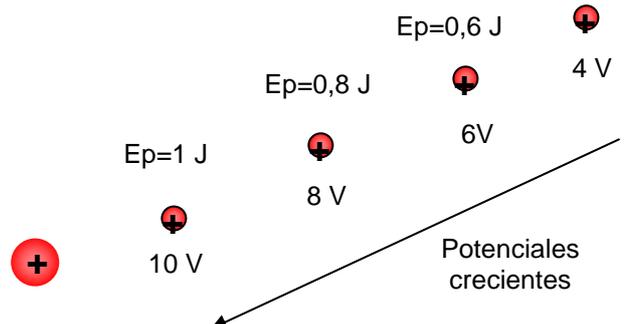
Valores del potencial en varios puntos del campo de una carga positiva. El potencial disminuye a medida que nos alejamos de la carga.

El punto de $V = 0$ estará situado a distancia infinita ($r = \infty$)



Si colocamos una carga positiva (de 0,1 C, por ejemplo) en cada uno de esos puntos, adquirirá una energía potencial dada por $E_p = q V$

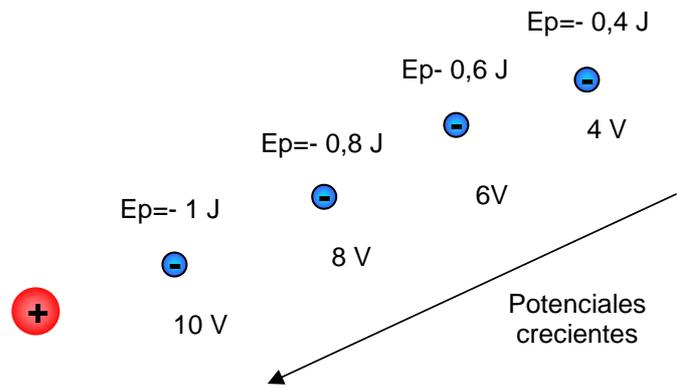
Si la carga se deja libre se moverá en el sentido de alejarse de la carga que crea el campo. Esto es, disminuyendo su energía potencial (sentido de los potenciales decrecientes)



Si colocamos ahora una carga negativa (de - 0,1 C, por ejemplo) en cada uno de esos puntos, adquirirá una energía potencial dada por $E_p = q V$

Si la carga se deja libre, se moverá en el sentido de acercarse a la carga que crea el campo. Esto es disminuyendo su energía potencial (sentido de los potenciales crecientes)

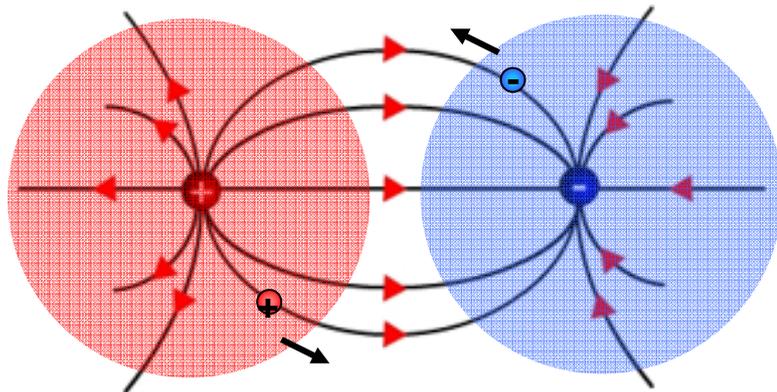
Reparar en el signo negativo que tiene ahora la energía potencial.



Resumiendo lo anterior:

- **Cuando las cargas se introducen en un campo se mueven espontáneamente (siguiendo las líneas de campo) en la dirección en que su energía potencial disminuye.**
- **Una carga positiva se moverá en la dirección de los potenciales decrecientes.** O lo que es lo mismo, desde las zonas de mayor potencial a las de menor potencial
- **Una carga negativa se moverá en la dirección de los potenciales crecientes.** O lo que es lo mismo, desde las zonas de menor potencial a las de mayor.

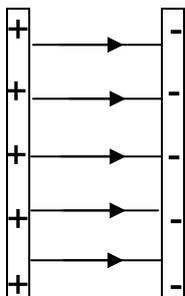
En la figura se ha representado con un círculo rojo la zona de potencial netamente positivo y en azul la que tendría un potencial negativo. Una carga positiva se moverá ,espontáneamente, siguiendo la línea de campo, desde la zona de potencial positivo hacia la zona de potencial negativo. Por el contrario, una carga negativa se mueve hacia los potenciales positivos.



Conclusión:

Para lograr que las cargas se muevan entre dos puntos hemos de conseguir que dichos puntos se encuentren a distinto potencial.

Una manera de conseguir esto es acumular cargas positivas en una zona y negativas en otra.



Diferencia de potencial entre dos láminas paralelas con carga de signo contrario

Como en la región situada entre las dos placas el campo es uniforme es posible establecer una relación muy sencilla entre campo y diferencia de potencial:

$$\Delta V = E r$$

Si la distancia entre ambas placas es d, la diferencia de potencial entre ambas valdrá:

$$\Delta V = E d$$

Las superficies equipotenciales son, por tanto, planos paralelos a las placas.

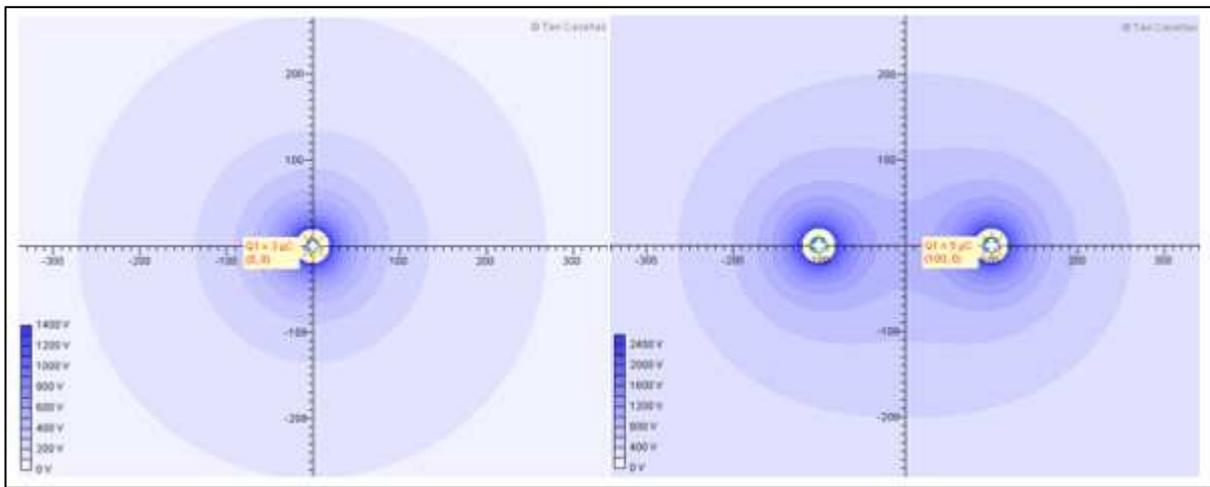
Como se deduce de la ecuación que permite calcular el potencial eléctrico en un punto, todos los puntos situados a una misma distancia (r) de la carga que crea el campo tendrán idéntico potencial. Si se unen con

una línea todos estos puntos obtendremos circunferencias centradas en la carga que cumplen la condición de que **todos sus puntos se encuentran al mismo potencial**. Por esta razón reciben el nombre de **líneas (o superficies, en tres dimensiones) equipotenciales**.

De todo lo dicho se deduce que el trabajo realizado por la fuerza eléctrica para llevar una carga q desde un punto **1** hasta otro **2** se puede calcular (fuerza conservativa) por diferencia entre las respectivas energías potenciales:

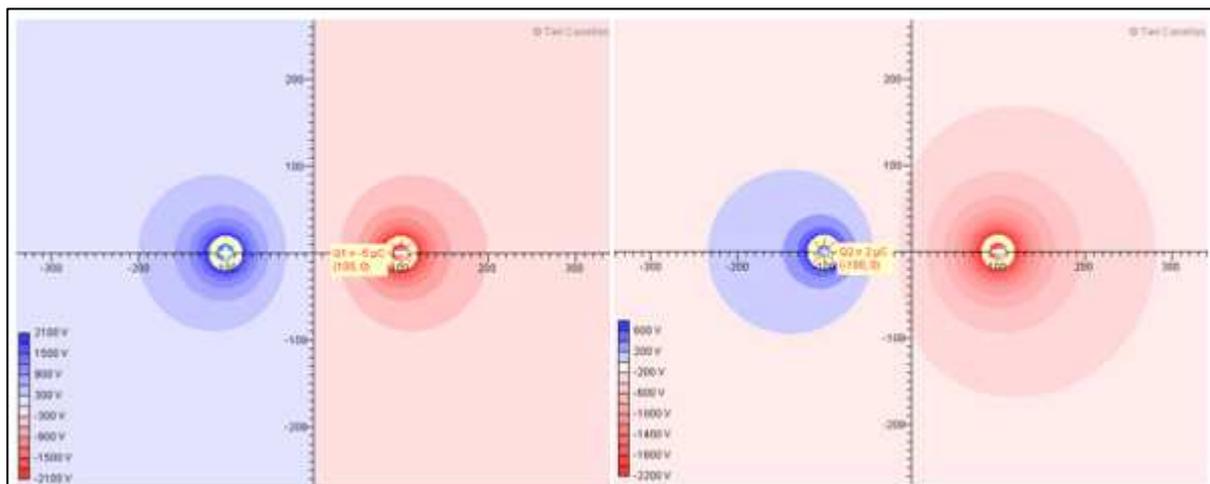
$$W_{\text{cons}} = -\Delta E_p = E_{p1} - E_{p2} = q V_1 - q V_2 = q (V_1 - V_2)$$

Si nos movemos a lo largo de una línea equipotencial ($V_2=V_1$) el trabajo realizado será nulo. La fuerza eléctrica no realiza trabajo alguno, o lo que es equivalente, no se requiere aporte alguno de energía para trasladar una carga a lo largo de una línea equipotencial, de lo que se deduce que **la fuerza eléctrica, y por consiguiente el vector campo, debe de ser perpendicular a la línea equipotencial**.



Izquierda: superficies equipotenciales para una carga de $+3 \mu\text{C}$.
Derecha: superficies equipotenciales para dos cargas idénticas.

Captura de pantalla de **FisLab.net**. Autor: **Tavi Casellas**
(<http://www.xtec.net/~ocasella/applets/elect/appletsol2.htm>)



Izquierda: superficies equipotenciales para dos cargas idénticas pero de signo opuesto.
Derecha: superficies equipotenciales para dos cargas distintas y de signo opuesto. La carga negativa (situada a la derecha) es bastante mayor que la carga positiva situada a la izquierda

Captura de pantalla de **FisLab.net**. Autor: **Tavi Casellas**
(<http://www.xtec.net/~ocasella/applets/elect/appletsol2.htm>)

CAMPO MAGNÉTICO

Desde muy antiguo es conocida la curiosa propiedad del *imán natural* o **magnetita** ⁽¹⁾ (mineral de hierro integrado, fundamentalmente, por Fe_3O_4) de atraer pequeños trozos de hierro o acero.

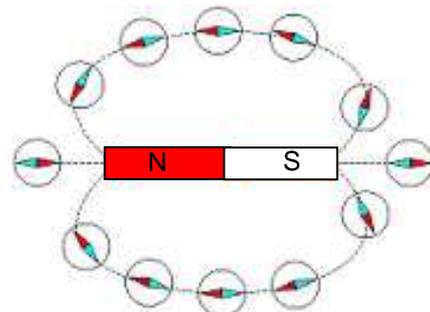
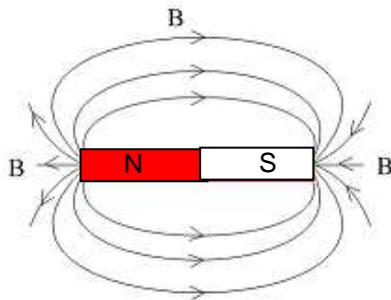
Posteriormente se observó que algunos metales, particularmente el hierro y el acero, podían transformarse en imanes obteniéndose de esta manera los *imanes artificiales*.

Del estudio de los imanes, y de su efecto asociado, el magnetismo, podemos extraer algunos datos importantes:

- El efecto atractivo es máximo en los extremos de imán, en las zonas denominadas *polos*, y nula en la parte media, o zona denominada como *línea neutra*. Esta afirmación es fácilmente comprobable espolvoreando limaduras de hierro directamente sobre el imán.
- El propio planeta Tierra se comporta como un gigantesco imán, ya que una aguja imantada que pueda girar libremente se orienta en la dirección Norte-Sur (aproximadamente) ⁽²⁾. Por esta razón el polo del imán que apunta hacia el Norte geográfico se le da el nombre de polo norte (N) y polo sur (S) al contrario.
- Si enfrentamos polos del mismo nombre se repelen y si son de nombre distinto se atraen.
- **Es imposible obtener polos magnéticos aislados.** No existen partículas fundamentales (tal y como sucede en el caso de la carga eléctrica) a las que puedan asociárseles un tipo de magnetismo N o S. **Los cuerpos magnetizados siempre presentan ambos polos.**

Un imán (de forma similar a lo que ocurre con una masa o una carga eléctrica) produce una alteración de las propiedades del medio que lo rodea, de forma tal que si se coloca otro imán en sus proximidades, éste "siente" una acción (fuerza). Podemos entonces decir que origina un **campo magnético (B)**.

- El campo magnético se puede visualizar espolvoreando limaduras de hierro sobre un papel situado sobre un imán u observando la orientación adquirida por una aguja imantada situada en sus proximidades. De estas experiencias concluiremos que:
 - ✓ Las líneas de campo son cerradas.
 - ✓ Salen del polo N y entran por el S.



La orientación de una aguja imantada en las proximidades de un imán nos suministra información acerca de la forma de las líneas del campo magnético.

⁽¹⁾ El nombre proviene de **Magnesia** (actual Turquía asiática) donde el mineral era muy abundante.

⁽²⁾ La aguja imantada no apunta exactamente al Norte geográfico, ya que existe una desviación entre este punto y el denominado norte magnético que se conoce como **declinación magnética**. La declinación varía, entre otras cosas, con la latitud. Para Avilés (Asturias) la declinación magnética vale $2^{\circ} 28' \text{ W}$, lo que significa que una brújula apunta $2^{\circ} 28'$ a la izquierda del Norte (geográfico).

Campo magnético y cargas

Si introducimos una carga eléctrica en el seno de un campo magnético no se detecta acción alguna del campo sobre la carga, pero **si ésta se mueve en una dirección que no coincida con la del campo magnético**, su trayectoria se curva evidenciando la acción de una fuerza perpendicular a la dirección de la velocidad.

La fuerza ejercida sobre una carga en movimiento en el seno de un campo magnético es proporcional a la carga, a su velocidad y a la intensidad del campo magnético (a veces llamado *inducción magnética*), B. El vector fuerza viene dado por la expresión:

Velocidad con que se desplaza la carga

Valor del campo magnético

Fuerza ejercida sobre la carga por el campo magnético (fuerza de Lorentz)

Valor de la carga

Producto vectorial

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

El producto vectorial de dos vectores **es un vector** definido de la forma siguiente:

Módulo: producto del módulo de ambos vectores por el seno del ángulo que forman.

Dirección: perpendicular al plano definido por ambos vectores.

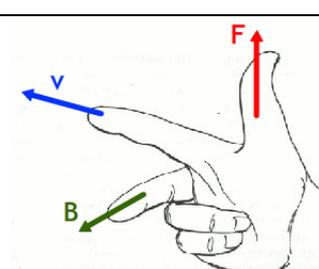
Sentido: el del sacacorchos que gira del primero al segundo vector por el camino más corto.

El módulo de la fuerza viene dado por: $F = q v B \sin \alpha$, donde α es el ángulo formado por el vector campo magnético y la velocidad de la carga. Esto implica:

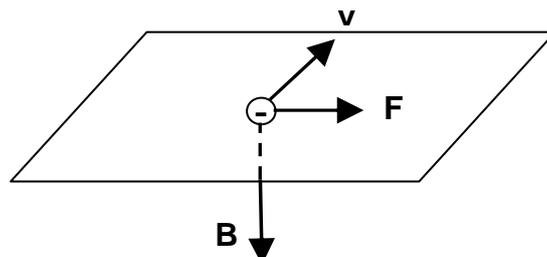
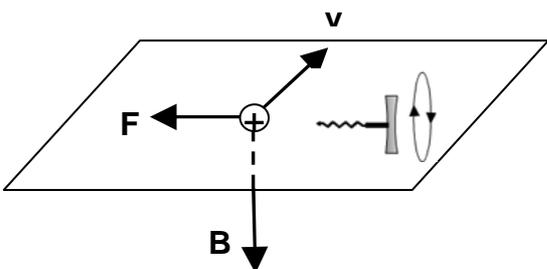
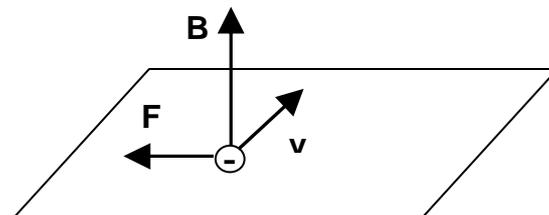
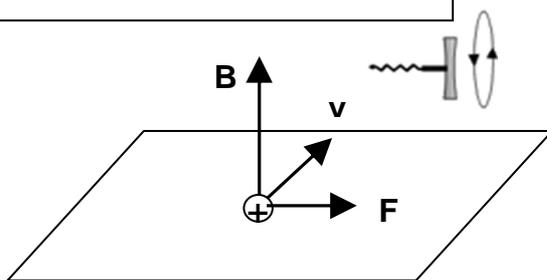
- Que si la carga se desplaza en la misma dirección del campo no experimentará fuerza alguna.
- Que la fuerza adquirirá su máximo valor cuando la carga se mueva en dirección perpendicular al campo ($F = q v B$)

El vector fuerza, por tanto, es perpendicular al plano determinado por los vectores velocidad y campo magnético.

Su sentido es de un sacacorchos que gira de v a B por el camino más corto, si la carga es positiva. Si la carga es negativa, su sentido es opuesto.



Regla de la mano derecha

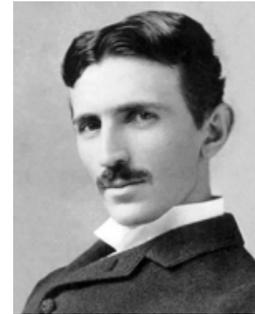


Dirección y sentido del vector fuerza para una carga **positiva** que se desplaza con velocidad v

Dirección y sentido del vector fuerza para una carga **negativa** que se desplaza con velocidad v

Teniendo en cuenta lo anterior podemos definir la unidad de campo magnético en el S.I. llamada **tesla (T)**.

Un tesla es la intensidad de un campo magnético que ejerce una fuerza de 1 N sobre una carga de 1 C que se mueve perpendicularmente al campo con una velocidad de 1 m/s



Nikola Tesla (1856 - 1943)
Ingeniero e inventor serbio-americano que realizó importantes contribuciones al estudio del electromagnetismo

Dimensionalmente (recordar que $I = q/t$):

$$|B| = \frac{|F|}{|q||v|} = \frac{|MLT^{-2}|}{|IT||LT^{-1}|} = |MI^{-1}T^{-2}|$$

$$\text{Unidad S.I. : Tesla} = \frac{N}{C \text{ m/s}} = \frac{N}{A \text{ m}}$$

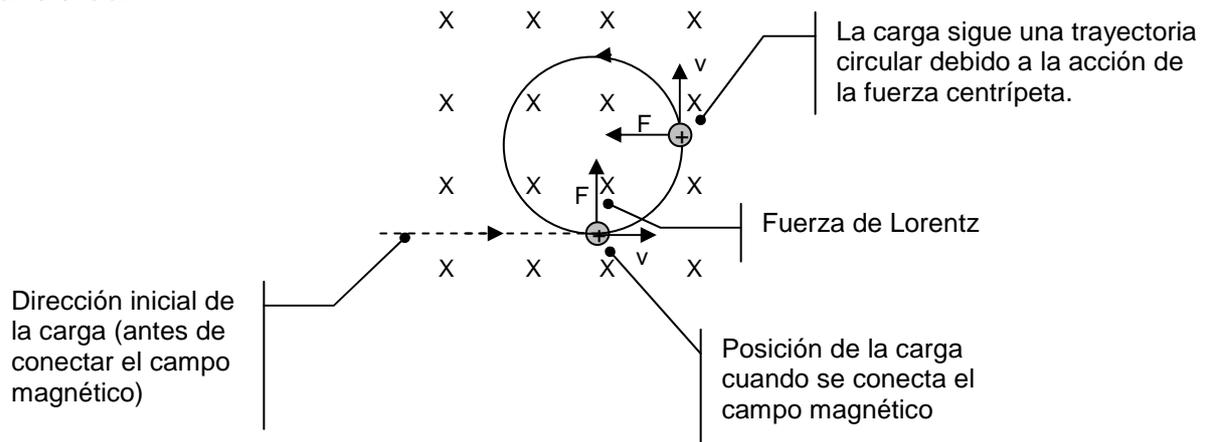
En la práctica el tesla resulta ser una unidad demasiado grande por lo que frecuentemente se emplea el **gauss (G)**: $1 T = 10^4 G$.

Según se ha dicho fuerza y velocidad son siempre perpendiculares, por tanto la fuerza variará la dirección del vector velocidad, pero no su módulo. Cuando una carga en movimiento es sometida a la acción de un campo magnético no se produce una conversión de energía potencial en cinética. **El campo magnético no es conservativo. No obstante, y en ausencia de fuerzas de rozamiento, la energía cinética de la carga permanece invariable.**

Puede ocurrir que en la región considerada exista, además de un campo magnético (B), uno eléctrico (E), en este caso la carga en movimiento interacciona con ambos campos y la fuerza total será:

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

Supongamos una partícula con carga positiva que se mueve de izquierda a derecha con velocidad constante. Si se crea un campo magnético perpendicular al plano del papel y dirigido hacia abajo (el campo magnético se representa por aspas), la carga interaccionará con dicho campo ejerciéndose sobre ella una fuerza perpendicular a su velocidad que hará que cambie continuamente de dirección describiendo una circunferencia.



La carga se moverá con movimiento circular uniforme:

$$F_N = m a_N$$

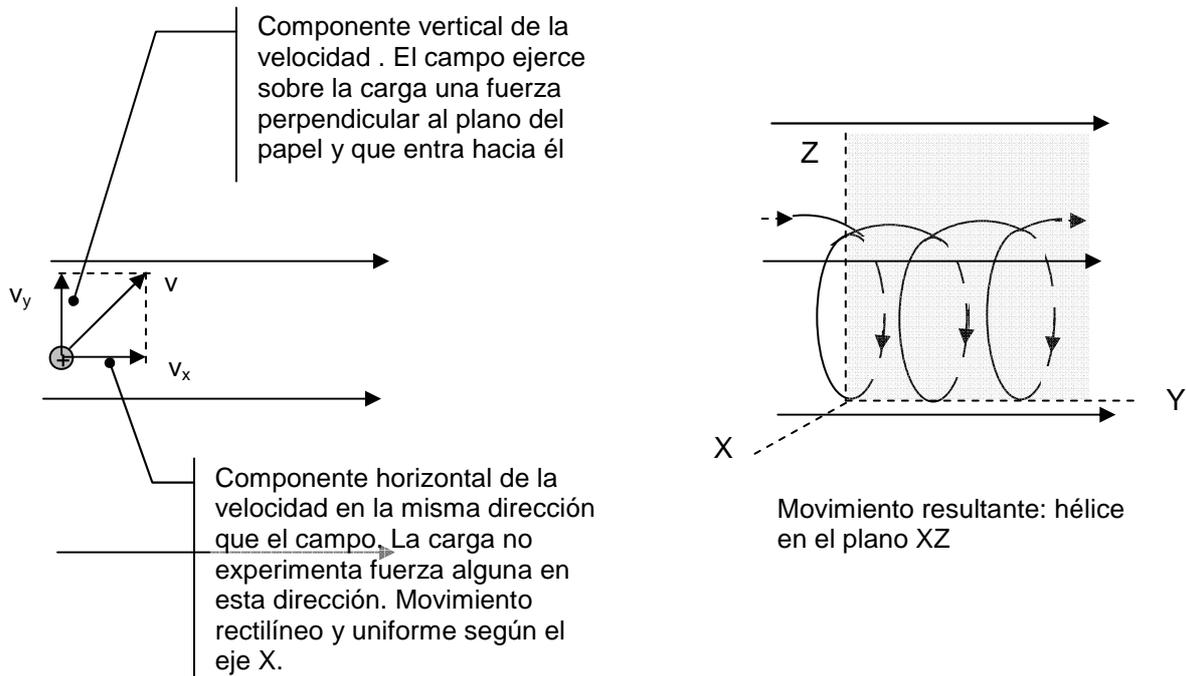
$$q v B = m \frac{v^2}{R}$$

$$R = \frac{m v}{q B} = \left(\frac{m}{q B} \right) v$$

$$v = \omega R ; \omega = \frac{v}{R} = \frac{R q B}{m} = \frac{q B}{m}$$

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

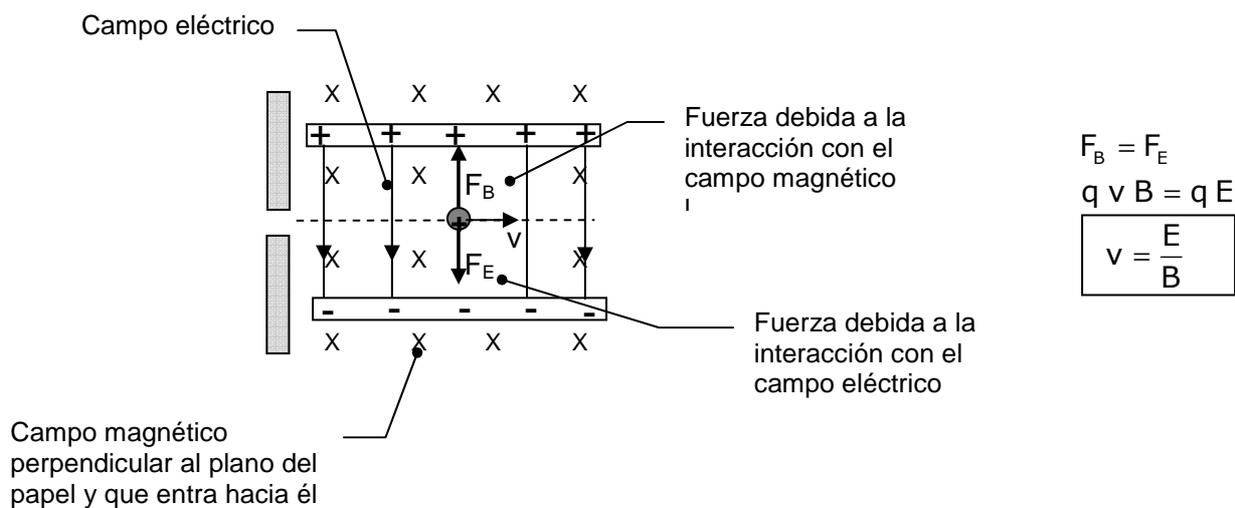
En el caso general de que la carga penetre en el campo magnético con una velocidad oblicua, podemos considerar las componentes horizontal (en la misma dirección del campo) y vertical (perpendicular) de la velocidad. El movimiento resultante será la composición del movimiento de avance según el eje X y el circular según el eje Y, es decir un movimiento helicoidal.



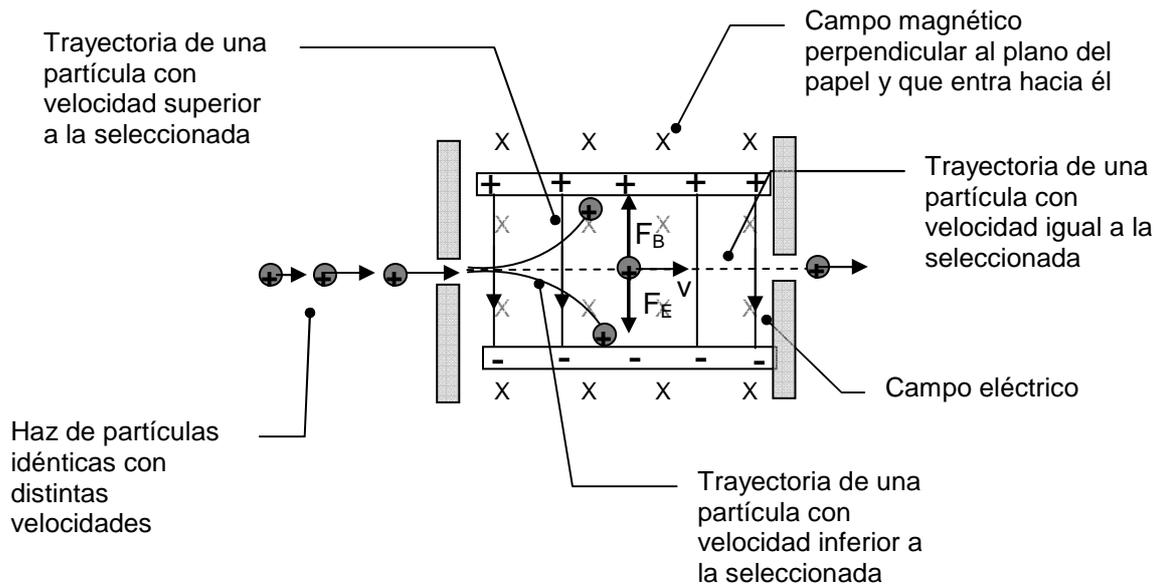
Selector de velocidades

Como su propio nombre indica el selector de velocidades es un aparato que permite seleccionar haces de partículas con idéntica velocidad.

Su funcionamiento se basa en la interacción de las partículas con campos eléctricos y magnéticos cruzados (perpendiculares). Como se observa en la figura el campo eléctrico ejerce una fuerza hacia abajo y el magnético en sentido justamente opuesto a él. Si regulamos el valor del campo magnético y del eléctrico de forma que F_E y F_B sean iguales la carga seguirá una trayectoria recta



Si la velocidad de la partícula es superior a la seleccionada la fuerza magnética será superior a la eléctrica y la trayectoria se curvará hacia arriba. Si ocurre lo contrario la trayectoria se curva hacia abajo impidiendo que estas partículas emerjan del selector.



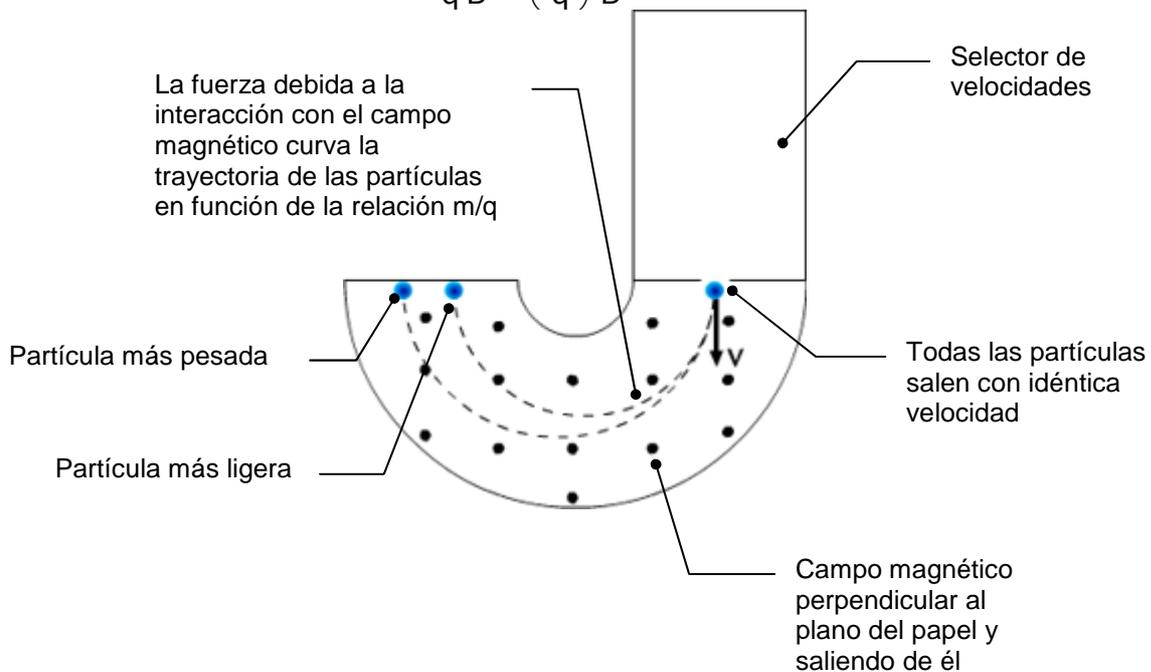
Espectrógrafo de masas

El espectrógrafo de masas permite separar partículas con idéntica carga y distinta masa (por ejemplo) aprovechando la interacción de las partículas cargadas con un campo magnético perpendicular:

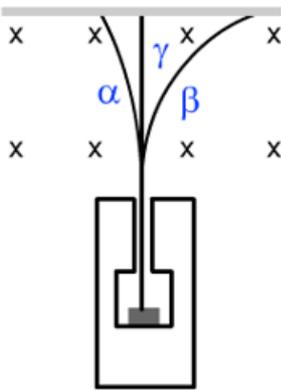
$$F_N = m a_N = m \frac{v^2}{R}$$

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

$$R = \frac{m v}{q B} = \left(\frac{m}{q} \right) \frac{v}{B}$$



El espectrógrafo de masas permite evaluar masas atómicas con gran precisión y la separación de isótopos de un mismo elemento.



Dispositivo usado por Rutherford (en 1903) para analizar la emisión radiactiva del radio.

La aplicación de un campo magnético permitió resolver la radiación en tres tipos distintos que fueron denominados como **radiación alfa, beta y gamma**.

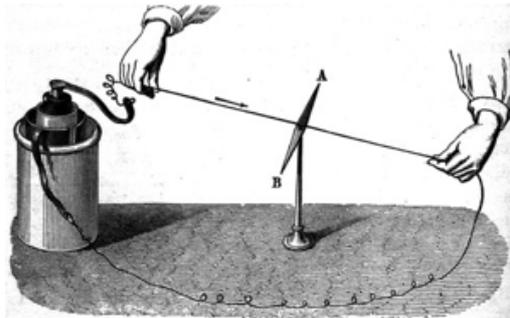
La radiación alfa estaba formada por partículas pesadas y con carga positiva (núcleos de He)

La radiación beta consistía en un chorro de partículas muy ligeras y con carga negativa (electrones)

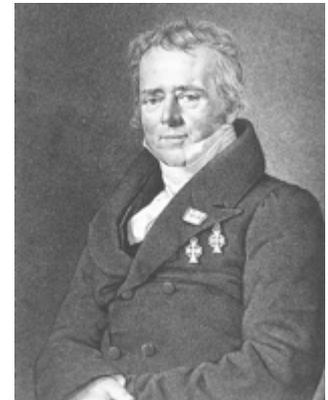
La radiación gamma no poseía ningún tipo de carga, ya que no eran desviadas por el campo magnético

ELECTROMAGNETISMO

La unión electricidad-magnetismo tiene una fecha: 1820. Ese año Oersted realizó su famoso experimento (ver figura) en el cual hacía circular una corriente eléctrica por un conductor cerca del cual se colocaba una aguja imantada. La aguja se desviaba mostrando que **una corriente eléctrica crea un campo magnético a su alrededor**.



Experiencia de Oersted (1820) mostrando como una corriente eléctrica desvía una aguja imantada



Hans Christian Oersted (1777 - 1851)

Campo magnético creado por un conductor

El valor del campo magnético creado por un hilo por el que circula una corriente de intensidad I en un punto situado a una distancia r viene dado, por (**Ley de Biot-Savart**):

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

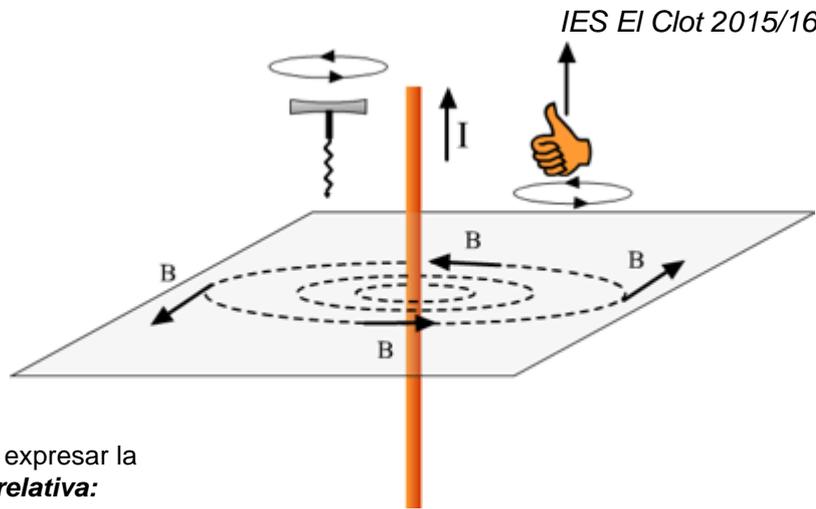
- **Las líneas de campo son circunferencias** concéntricas al hilo, situadas en un plano perpendicular al mismo.
- **El sentido de las líneas de campo** es el de giro de un sacacorchos que avanza en el sentido de la corriente.
- **El vector campo magnético** es tangente a las líneas de campo y de su mismo sentido.
- **La intensidad del campo magnético** es directamente proporcional a la intensidad que circula e inversamente proporcional a la distancia al conductor.

μ es la **permeabilidad** magnética del medio. Recoge la mayor o menor facilidad del medio para transmitir el campo magnético. Para el vacío o el aire el valor es el mismo:

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{T m}}{\text{A}} = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{N}}{\text{A}^2}$$

Para otros medios es muy frecuente expresar la permeabilidad como **permeabilidad relativa**:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} ; \quad \mu = \mu_r \mu_0$$



Podemos clasificar los distintos materiales de acuerdo con su comportamientos magnético como:

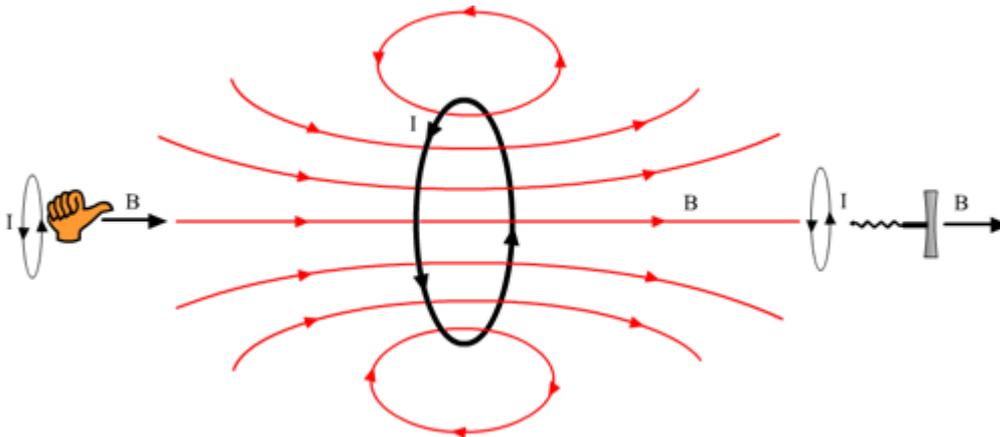
Sustancias ferromagnéticas	Sustancias paramagnéticas	Sustancias diamagnéticas
<ul style="list-style-type: none"> • Su permeabilidad es muy superior a la del vacío: $\mu_r \gg 1$ • Son fuertemente atraídas por los imanes. • Son fácilmente imantables y mantienen sus propiedades magnéticas durante cierto tiempo. A veces (caso del acero) se convierten en imanes permanentes. • Si se someten a un campo magnético externo el campo en su interior es mayor que el externo. • Ejemplos: hierro, acero, cobalto, níquel, neodimio... 	<ul style="list-style-type: none"> • Su permeabilidad es algo superior a la del vacío: $\mu_r \geq 1$ • Son débilmente atraídas por los imanes. • Aunque son imantables no mantienen sus propiedades magnéticas una vez que se suprime el campo magnético exterior. • Si se someten a un campo magnético externo el campo en su interior es prácticamente igual que el externo • Ejemplos: aluminio, platino, paladio... 	<ul style="list-style-type: none"> • Su permeabilidad es inferior a la del vacío: $\mu_r \leq 1$ • Son débilmente repelidas por los imanes. • No son imantables. • Si se someten a un campo magnético externo el campo magnético en su interior es menor que el externo. • Ejemplos: mercurio, plata, cobre, bismuto, agua...

Campo magnético creado por un espira

Una espira crea un campo magnético tal como el de la figura. En los puntos situados en el eje de la espira el campo vale:

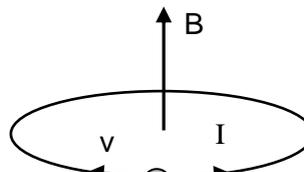
$$B = \frac{\mu I}{2} \frac{R^2}{(R^2 + x^2)^{\frac{3}{2}}} \quad \text{Y en su centro (donde } x=0\text{):}$$

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



El hecho de que una corriente eléctrica genere un campo magnético permite explicar el magnetismo natural como consecuencia de la existencia de diminutos imanes de tamaño atómico.

Si consideramos un único electrón (carga eléctrica negativa) orbitando alrededor del núcleo tendremos el equivalente a una diminuta corriente eléctrica circular (espira) que generará su correspondiente campo magnético.

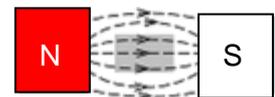


Un electrón girando (carga negativa) equivale a una corriente de sentido contrario al del movimiento que crea un campo magnético perpendicular al plano de la órbita.

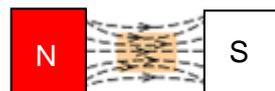
Si consideramos átomos más complejos

(con varios electrones situados en varias capas) la situación puede ser mucho más complicada y el campo magnético total ⁽³⁾ sería el resultante de la suma del de todos los electrones, que puede dar un valor nulo. Una situación similar se produce cuando tratamos con moléculas.

En las sustancias diamagnéticas los átomos o moléculas (debido a su configuración electrónica) no tienen campo magnético neto. Si se someten a la acción de un campo externo **se induce** en ellas un campo magnético opuesto. De esta manera el campo aplicado es más débil en su interior y son repelidas por los imanes (Faraday ya observó en 1846 que el bismuto era repelido por un imán).



En las sustancias paramagnéticas los átomos o moléculas individuales sí que pueden ser considerados como diminutos imanes, pero como resultado de la agitación molecular (energía cinética) están orientados al azar dando un campo magnético resultante nulo. Si se someten a la acción de un campo magnético externo se orientan en parte y presentan propiedades magnéticas mientras actúe el campo. Si éste cesa, los imanes microscópicos vuelven a desordenarse. La magnetización no es permanente.



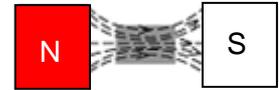
De todo lo dicho se desprende que la magnetización será mayor cuanto más intenso sea el campo magnético externo o más baja la temperatura. Esta dependencia con la temperatura fue observada por

⁽³⁾ Realmente se habla de **momento magnético**, un vector definido en la forma siguiente:

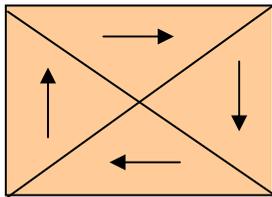
El vector unitario se define como perpendicular a la superficie (órbita) y sentido el del sacacorchos que gire en el mismo sentido que el de la intensidad.

Pierre Curie. La **ley de Curie** relaciona la magnetización de una sustancia con el campo magnético aplicado y la temperatura absoluta, aunque deja de ser válida para campos magnéticos muy grandes o temperaturas muy bajas.

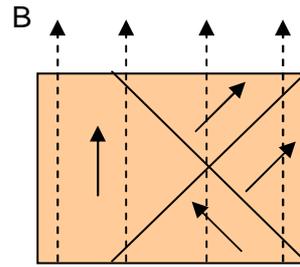
En las sustancias ferromagnéticas se observa una magnetización permanente. A nivel microscópico se pueden distinguir zonas, denominadas **dominios**, en las cuales los imanes atómicos están orientados en una dirección determinada, aun en ausencia de campos externos. Si se aplica un campo magnético externo aquellos dominios que están orientados según el campo aplicado crecen a expensas de los que no poseen esa orientación, a la vez que se produce una rotación en la orientación de los dominios en la dirección del campo magnético externo. Todo ello hace que se produzca un refuerzo considerable del campo magnético en el interior de la sustancia.



La agitación térmica tiende a desordenar los dominios, por eso existe una temperatura (**temperatura de Curie**) por encima de la cual la sustancia pierde sus propiedades ferromagnéticas y se convierte en paramagnética.



Dominios magnéticos sin una orientación preferente.
Sustancia no magnetizada



En presencia de un campo magnético los dominios tienden a orientarse y se produce un crecimiento de los que tienen la misma orientación que el campo.

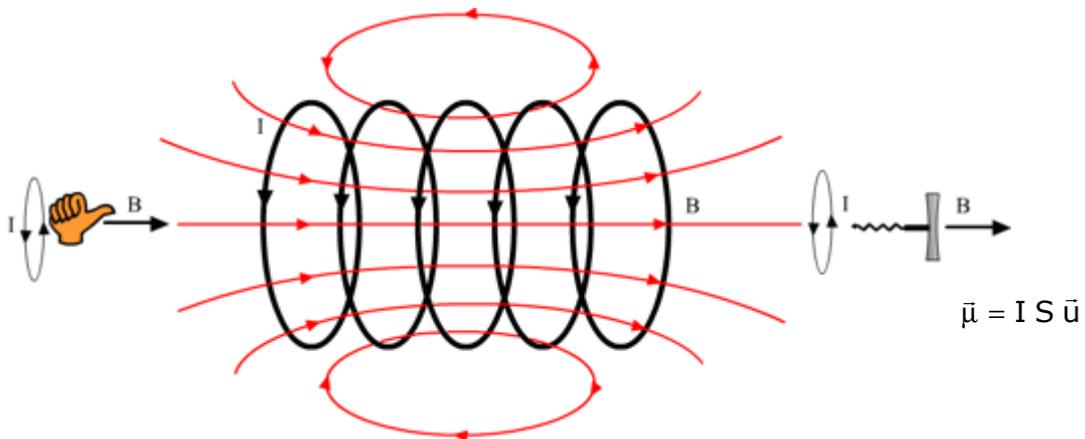
Campo magnético creado por un solenoide

Un solenoide de longitud L crea un campo resultante de la suma del de las N espiras que lo componen. En el interior del solenoide y para puntos situados sobre su eje:

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

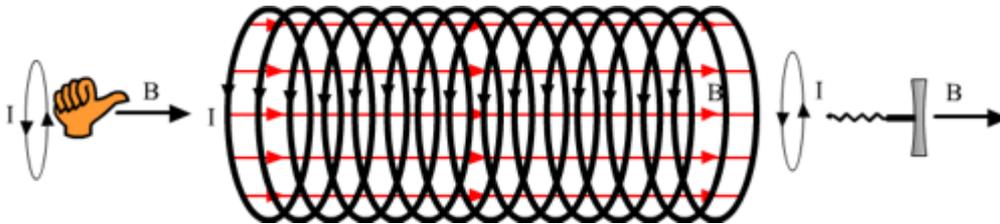
Para el centro del solenoide y en sus extremos:

$$B = \frac{N \mu I}{2 L}$$



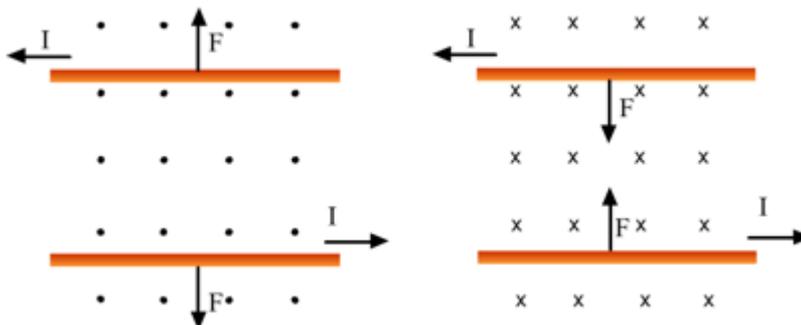
Si consideramos un solenoide largo y con las espiras lo suficientemente juntas, podemos considerar que el campo en el exterior es nulo y uniforme en su interior:

$$B = \frac{N \mu I}{L} \quad B = n \mu I \quad \left(\text{Donde } n = \frac{N}{L} \right)$$



Fuerzas sobre conductores rectilíneos

Tal y como se ha estudiado, el campo magnético interactúa con cargas eléctricas que se muevan en su seno. Como la corriente eléctrica es debida al movimiento de cargas en los conductores, es razonable suponer que si se sitúa un conductor eléctrico en el seno de un campo magnético, y hacemos que circule por él una corriente eléctrica, se producirá una interacción con el campo y aparecerá una fuerza sobre el conductor:



La fuerza magnética que actúa sobre el conductor se puede obtener a partir de la siguiente expresión:

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

Longitud del conductor

Vector de modulo igual a la intensidad y que tiene la dirección y sentido de ésta

- La fuerza es siempre perpendicular al plano determinado por el conductor y el campo magnético.
- El sentido se puede determinar aplicando la regla del sacacorchos.
- Su módulo depende del ángulo que formen el conductor y el campo. Adquiere el valor máximo cuando el conductor forme un ángulo de 90° con el vector campo

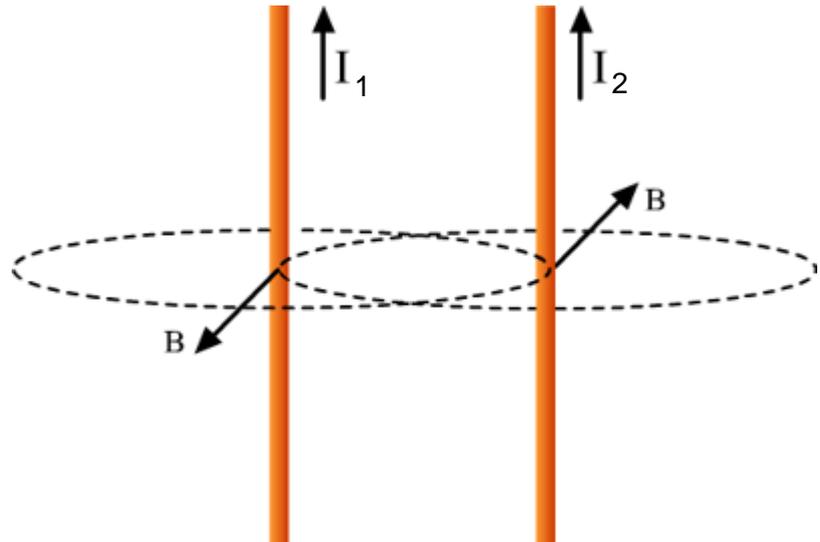
$$F = L I B \text{ sen } \alpha$$

$$F_{\text{MAX}} = L I B \quad (\text{sen } 90^\circ = 1)$$

Un efecto importante se produce cuando se tienen **dos conductores por los que circula corriente**, ya que entonces se crearan campos magnéticos alrededor de ambos conductores que interactuarán con las cargas del otro (ver figura) .

Para el caso de dos conductores de la misma longitud, paralelos y separados por una distancia d , el campo magnético creado por uno de ellos (por ejemplo el situado a la izquierda en la figura) a la distancia que se encuentra el otro valdrá:

$$B = \frac{\mu}{2 \pi} \frac{I_1}{d}$$

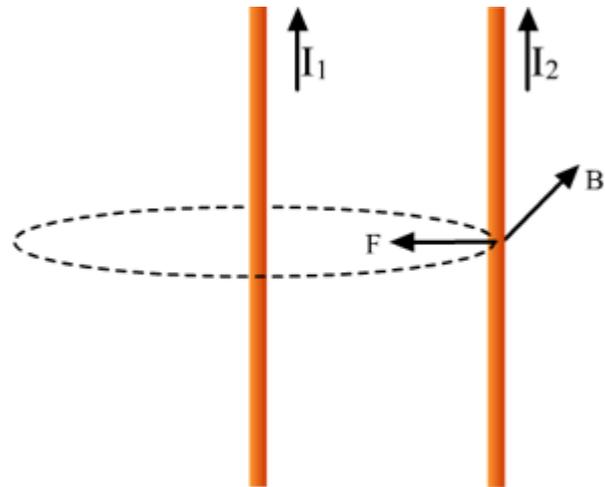


Este campo interactuará con las cargas en movimiento del otro conductor produciendo una fuerza sobre él de valor:

$$F = L I_2 B$$

Si sustituimos el valor obtenido para el campo magnético, tenemos:

$$F = L I_2 \left(\frac{\mu}{2 \pi} \frac{I_1}{d} \right) = \left(\frac{\mu L}{2 \pi} \right) \frac{I_2 I_1}{d}$$



El resultado es una fuerza de atracción sobre el otro conductor.

Si repetimos el proceso intercambiando los conductores llegaríamos a un resultado análogo, luego:

Dos corrientes paralelas del mismo sentido se atraen con una fuerza directamente proporcional a las intensidades que circulan por los conductores e inversamente proporcional a la distancia que los separa.

Si las intensidades tienen sentido contrario la fuerza entre los conductores es repulsiva.

La fuerza ejercida entre dos conductores paralelos por los que circula idéntica intensidad sirvió para establecer la definición del amperio:

Dos conductores iguales por los que circulan corrientes del mismo sentido y con idéntica intensidad se atraerán con una fuerza:

$$F = \left(\frac{\mu L}{2 \pi} \right) \frac{I^2}{d}$$

La fuerza por unidad de longitud vendrá dada por:

$$\frac{F}{L} = \left(\frac{\mu}{2\pi} \right) \frac{I^2}{d}$$

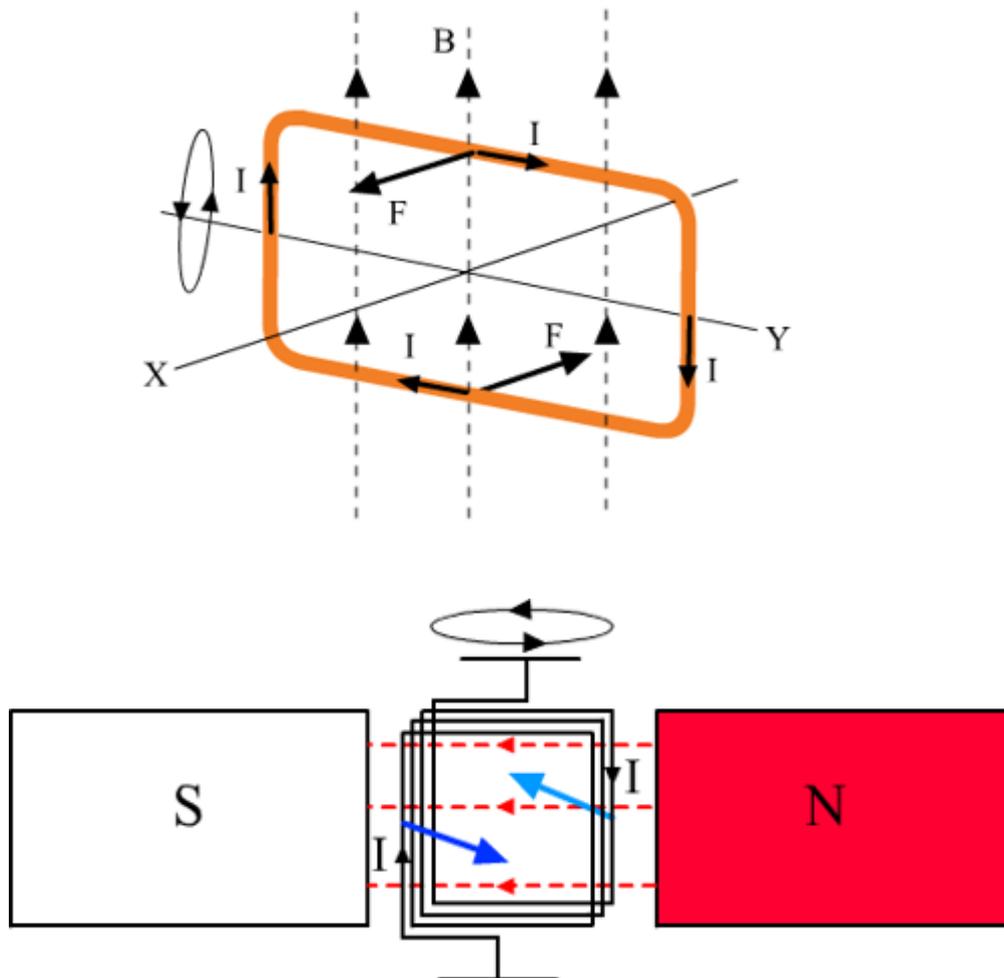
Si suponemos que por ambos circula una intensidad de 1 A y que la distancia entre los conductores es 1 m, la fuerza de atracción por unidad de longitud entre ambos valdrá:

$$\frac{F}{L} = \left(\frac{\mu}{2\pi} \right) \frac{I^2}{d} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{N}}{\text{A}^2}}{2\pi} \frac{1 \text{ A}^2}{1,0 \text{ m}} = 2 \cdot 10^{-7} \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

Se define el amperio internacional (A) como la intensidad de corriente que debe circular por dos conductores rectilíneos, paralelos e indefinidos, para que separados por una distancia de 1 m ejerzan entre ellos una fuerza de $2 \cdot 10^{-7} \text{ N/m}$

Fuerzas sobre una espira cuadrada

Si situamos una espira rectangular en un campo magnético (ver figura) aparecerán sendas fuerzas sobre los lados opuestos que tienden a hacerla girar. Este es un fenómeno de singular importancia, ya que en él se apoya la construcción de motores eléctricos o de galvanómetros (aparatos destinados a medir el paso de la corriente eléctrica: amperímetros y voltímetros).



Esquema de un galvanómetro.

Si circula corriente por la espira, ésta gira un cierto ángulo. Como el ángulo girado es proporcional a la intensidad de corriente puede servir para su medida.

INDUCCIÓN

En el tema dedicado al electromagnetismo se ha visto que una corriente eléctrica crea un campo magnético. Podríamos preguntarnos si es posible el proceso inverso, esto es: **crear una corriente eléctrica a partir de un campo magnético**.

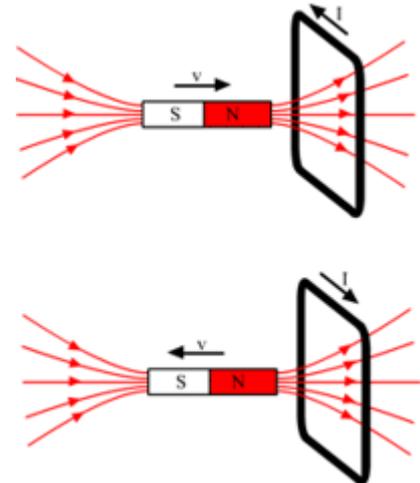
Michael Faraday (1791-1867) y **Joseph Henry** (1797-1878) llevaron a cabo diversos experimentos (hacia 1830) que permitieron dar respuesta a esta pregunta.

Experiencia de Faraday

Fue Faraday quien comprobó que al acercar un imán a una espira en ésta se origina una corriente que invierte su sentido cuando el imán se aleja (ver figura).

Un dato importante es que **la corriente aparece sólo cuando el imán está en movimiento respecto de la espira (puede moverse el imán o la espira, es igual) y cesa una vez que cesa el movimiento**. El origen de la corriente eléctrica, por tanto, no es la presencia de un campo magnético, **sino la variación del campo que atraviesa la espira**.

Como se puede ver en la figura las líneas de fuerza del campo del imán están más juntas cerca de los polos (mayor intensidad), y más separadas (menor intensidad) a medida que nos alejamos de ellos, con lo que al acercar o separar el imán de la espira se produce una variación del campo magnético que la atraviesa.



Experiencia de Faraday

Otro dato experimental importante es que **la intensidad de la corriente inducida depende de lo rápido que se mueva el imán respecto de la espira**. Esto indica una dependencia con **la rapidez de variación del campo magnético**.

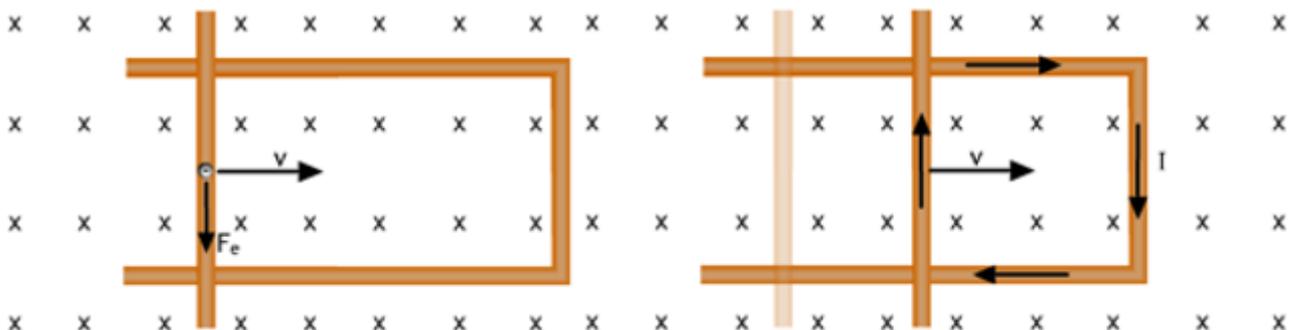
Al acercar o alejar un imán a una espira se induce en ésta una corriente eléctrica

Experiencia de Henry

Henry realizó, de forma simultánea con Faraday, una experiencia que permitió una mejor comprensión del fenómeno de la inducción de una corriente eléctrica a partir de un campo magnético.

La experiencia de Henry consistió en deslizar un conductor móvil sobre otro doblado en forma de U (ver figura), situado en el seno de un campo magnético constante y perpendicular a la dirección del movimiento. Como consecuencia del movimiento (y de la presencia del campo magnético) **aparece una fuerza de Lorentz sobre las cargas libres del conductor (electrones)**. Por tanto, las cargas negativas se desplazan hacia el extremo derecho del conductor móvil, mientras que en el izquierdo se acumularán las positivas creándose una diferencia de potencial entre ambos extremos que hará que comience a circular una corriente por el circuito.

En la experiencia de Henry se induce una corriente de forma un tanto diferente a la de Faraday. Ahora el campo magnético es uniforme y lo que varía es el tamaño de "la espira" que forma el circuito.



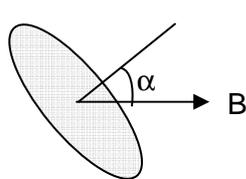
Comparando ambas experiencias podemos llegar a la conclusión de que **lo que varía en ambas es la cantidad de líneas de campo que atraviesan el circuito en el que se induce la corriente.**

Tratemos ahora de dar una formulación matemática a la conclusión que hemos extraído.

- Por convenio **la intensidad del campo magnético se hace igual al número de líneas de campo que atraviesan la unidad de superficie colocada perpendicularmente a ellas.**
- Si queremos saber el número de líneas que atraviesan la superficie S, perpendicular a las líneas de campo, bastará multiplicar la intensidad por la superficie. Esta nueva magnitud recibe el nombre de **flujo del campo magnético** (ϕ_B):

$$\phi_B = B \cdot S$$

- Si la superficie no está colocada perpendicularmente a las líneas de campo, sino que forma con ellas cierto ángulo, el flujo magnético a través de esa superficie viene dado por:



$$\phi_B = B \cdot S \cdot \cos \alpha$$

El ángulo es el formado por el vector campo magnético y la perpendicular a la superficie.

- **La unidad S.I. de flujo magnético es el tesla por metro cuadrado ($T \cdot m^2$) y recibe el nombre de weber (Wb) en honor de Wilhem Weber (1804-1891)**
- La rapidez con que varía el flujo magnético a través de una superficie se puede poner en la forma: $\frac{\Delta\phi}{\Delta t}$ En forma diferencial (variación infinitesimal del tiempo): $\frac{d\phi}{dt}$

Utilizando el concepto de flujo, podremos decir:

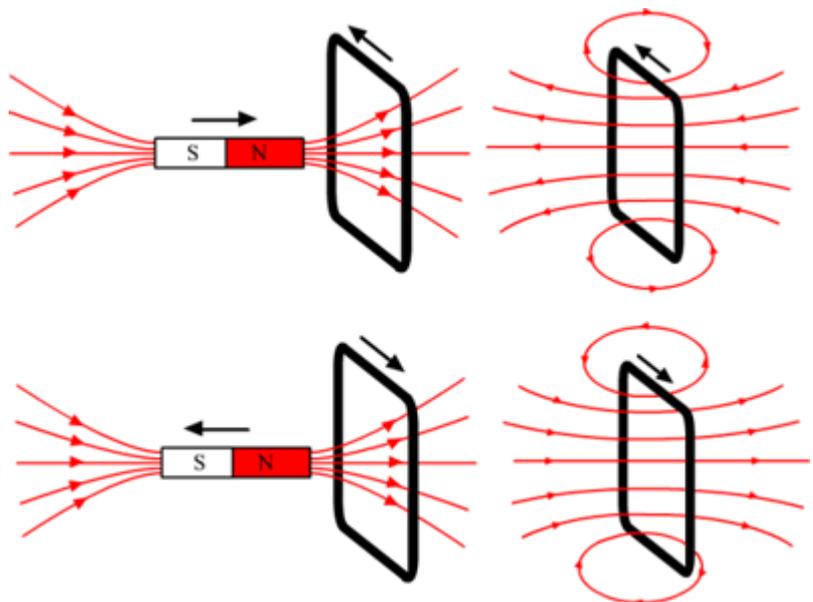
Se induce una corriente eléctrica en un circuito si este es atravesado por un flujo magnético variable.

En 1833 **Heinrich Lenz (1804-1865)** hizo una nueva contribución para la comprensión del fenómeno al descubrir la regla (**Ley de Lenz**) que permite establecer el sentido de la corriente inducida.

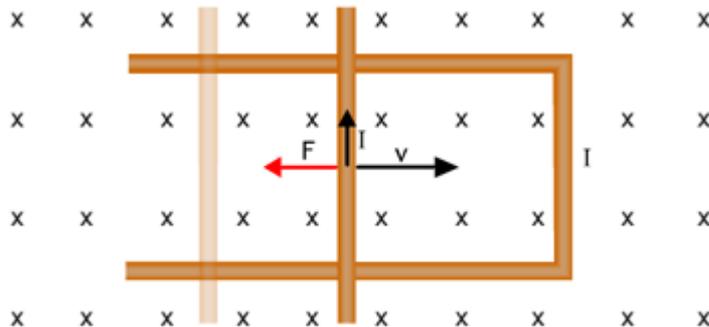
Ley de Lenz
El sentido de la corriente inducida es tal que se opone a la causa que la origina

En la experiencia de Faraday la causa que produce la corriente inducida cuando se acerca el imán es el **aumento de la intensidad del campo magnético**. En este caso la corriente inducida es tal que tiende a crear **un campo magnético contrario**, que hace que disminuya el campo inductor.

Cuando alejamos el imán se produce una **disminución en la intensidad del campo**. La corriente que se induce tiene un sentido tal que **origina un campo que refuerza al campo inductor**.



En la experiencia de Henry la causa que produce la corriente inducida es el **desplazamiento del conductor** (hacia la derecha en la figura) . En este caso la corriente inducida es tal que el campo magnético ejerce sobre las cargas que circulan por el conductor **una fuerza que tiene a dificultar su desplazamiento** (hacia la izquierda en la figura)

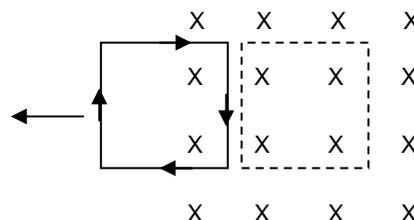


La Ley de Lenz puede reformularse, teniendo en cuenta el concepto de flujo, en la forma siguiente:

El sentido de la corriente inducida es tal que siempre **se opone a la variación del flujo que la produce**. Esto es:

- Si la corriente se induce debido a **un aumento del flujo magnético**, el sentido de la corriente será el que genere **un campo magnético opuesto al campo inductor** (produciendo de esta manera un campo más pequeño y una disminución del flujo).
- Si la corriente se induce debido a **una disminución del flujo magnético**, el sentido de la corriente será el que genere **un campo magnético del mismo sentido que el campo inductor** (produciendo de esta manera un reforzamiento del campo y un aumento del flujo).

La relación matemática entre la fuerza electromotriz inducida y la variación del flujo magnético que atraviesa el circuito se recoge en la **ley de Faraday-Henry** :



Ley de Faraday-Henry

La fuerza electromotriz inducida es igual, y de signo contrario, a la rapidez con que varía el flujo magnético.

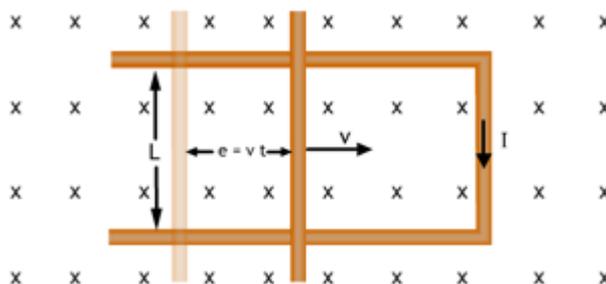
$$\varepsilon = - \frac{\Delta\phi}{\Delta t}$$

Para una variación de flujo no uniforme la fuerza electromotriz viene dada por menos la derivada del flujo respecto del tiempo:

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

En el caso del experimento de Henry, suponiendo que el conductor se desplaza con una velocidad constante, v, la variación de flujo podría calcularse de la forma siguiente:

$$\begin{aligned} \phi_1 &= B S_1 \\ \phi_2 &= B S_2 = B [S_1 - L (v t)] \\ \Delta\phi &= \phi_2 - \phi_1 = B [S_1 - L (v t)] - B S_1 = - B L (v t) \\ \frac{\Delta\phi}{\Delta t} &= - \frac{B L (v t)}{t} = - B L v \\ \varepsilon &= - \frac{\Delta\phi}{\Delta t} = B L v \end{aligned}$$



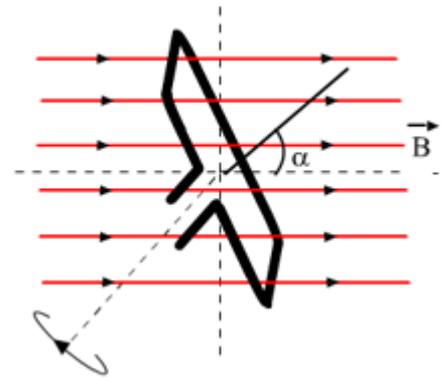
Aplicando la ley de Ohm generalizada podemos obtener la intensidad que circula. Suponiendo que la resistencia del circuito es R:

$$V_A - V_B = \Sigma I (R + r) - \Sigma \varepsilon$$

$$0 = IR - \varepsilon$$

$$I = \frac{\varepsilon}{R} = \frac{B L v}{R}$$

La manera más corriente de producir una corriente eléctrica es haciendo girar una espira (realmente una bobina) en un campo magnético. El flujo variable que atraviesa la espira produce una corriente eléctrica que cambia continuamente su polaridad. El dispositivo recibe el nombre de **alternador**.



En la figura de la derecha se ve una espira que gira con velocidad angular constante en el seno de un campo magnético. El flujo que atraviesa la espira variará en función del ángulo que forme con el campo magnético. Si suponemos que para $t = 0$ la espira está perpendicular al campo ($\alpha = 0$):

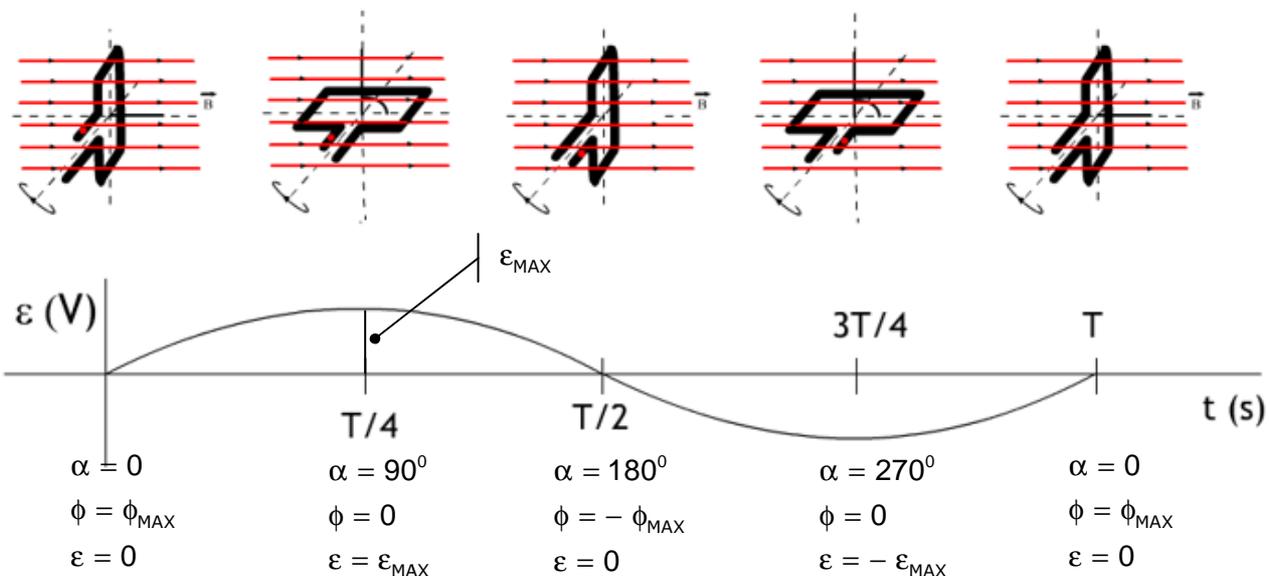
$$\left. \begin{aligned} \phi &= B S \cos \alpha \\ \alpha &= \omega t \end{aligned} \right\} \phi = B S \cos(\omega t) = \phi_{MAX} \cos(\omega t)$$

Aplicando la ley de Faraday-Henry la f.e.m. valdrá:

$$\varepsilon = -\frac{d\phi}{dt} = B S \omega \sin(\omega t) = \varepsilon_{MAX} \sin(\omega t)$$

La f.e.m. varía senoidalmente desde el valor cero inicial hasta su valor máximo ($\varepsilon_{MAX} = B S \omega$) para disminuir nuevamente hasta cero, tomar valores negativos y volver a anularse. La intensidad cambia de sentido continuamente (**corriente alterna**) siendo su frecuencia (en Hz):

$$\omega = 2 \pi f ; f = \frac{\omega}{2 \pi}$$



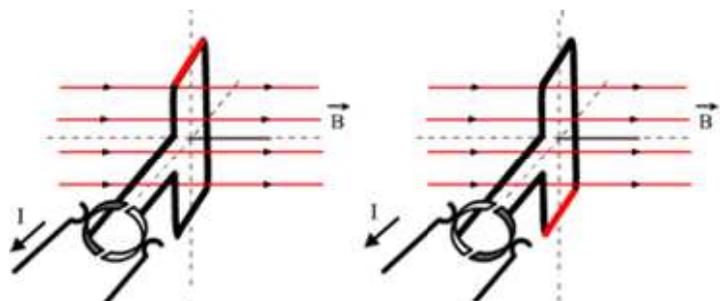
La intensidad que circula por la espira se puede calcular si aplicamos la ley de Ohm generalizada al circuito. Si suponemos que la resistencia es R:

$$V_A - V_B = \Sigma I (R + r) - \Sigma \varepsilon$$

$$0 = IR - \varepsilon$$

$$I = \frac{\varepsilon}{R}$$

Un alternador se puede modificar para que la corriente obtenida sea continua, en este caso



En un dinamo se consigue que la corriente circule siempre en el mismo sentido gracias a dos semianillos partidos llamados **conmutadores**.

recibe el nombre de **dinamo**.

Procedencia (FisQuiWeb)

