# CAMPO ELÉCTRICO, CAMPO MAGNÉTICO E INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA.



## TEMA 3.

*2º Bachillerato.*
*Física*







## ESQUEMA DE LA UNIDAD.

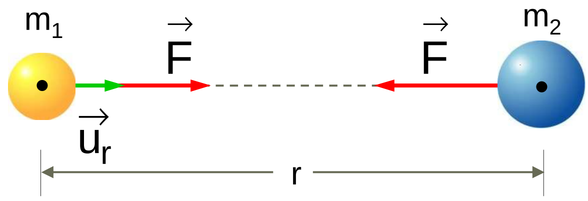
1. ***CAMPO ELECTRICO.***
   1. LA LEY DE COULOMB FRENTE A LA LEY DE NEWTON.
   2. EL CAMPO ELECTROSTÁTICO COMO CAMPO DE FUERZAS.
   3. ENERGÍA POTENCIAL Y POTENCIAL ELECTROSTÁTICO.
   4. LÍNEAS DE FUERZA Y SUPERFICIES EQUIPOTENCIALES.
   5. RELACIONES ENTRE EL CAMPO Y EL POTENCIAL ELECTROSTÁTICO.
   6. TEOREMA DE GAUSS.
2. ***CAMPO MAGNETICO.***
   1. MOVIMIENTOS DE CARGAS ELÉCTRICAS BAJO CAMPOS MAGNÉTICOS UNIFORMES.
   2. FUERZAS MAGNÉTICAS SOBRE CORRIENTES ELÉCTRICAS.
   3. CAMPOS MAGNÉTICOS DEBIDOS A CARGAS EN MOVIMIENTO.
   4. FUERZAS MAGNÉTICAS ENTRE DOS CONDUCTORES RECTILÍNEOS.
   5. LA LEY DE AMPÉRE.
   6. MAGNETISMO NATURAL.
3. ***INDUCCIÓN ELECTROMAGNETICA.***
   1. FLUJO MAGNÉTICO.
   2. LAS LEYES DE FARADAY-HENRY Y DE LENZ.
   3. PROPIEDAD DE UNA FUERZA ELECTROMOTRIZ SINUSOIDAL.
   4. GENERADORES DE CORRIENTE.
   5. MOTORES ELÉCTRICOS.
   6. PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA.
   7. TRANSPORTE Y DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA.

# 1.1 LA LEY DE COULOMB FRENTE A LA LEY DE NEWTON.

## Ley de la gravitación universal de Newton

- Todos los cuerpos se atraen con una fuerza proporcional a su masa e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre ellos

$$\vec{F} = \boxed{\pm} G \frac{m_1 m_2}{r^2} \vec{u}_r$$



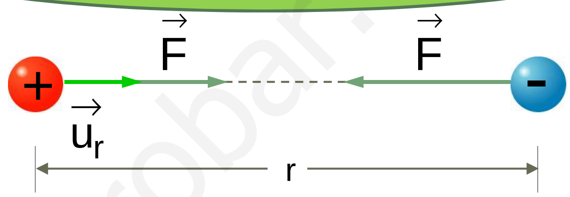

Fuerza gravitatoria entre dos masas

Siempre se presentan a pares, tienen igual modulo y dirección pero sentidos opuestos.

## Ley de Coulomb

- La fuerza entre dos cargas eléctricas puntuales $q_1$ y $q_2$ es directamente proporcional al producto de ellas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia r que las separa

$$\vec{F} = \pm K \frac{q_1 q_2}{r^2} \vec{u}_r$$




Fuerza eléctrica entre dos cargas puntuales

Hay dos tipos de cargas eléctricas: positiva y negativa.

Cargas eléctricas del mismo tipo se repelen, y cargas eléctricas de distinto tipo se atraen.



# 1.1 LA LEY DE COULOMB FRENTE A LA LEY DE NEWTON (II)

Valor de la constante dieléctrica o permitividad del medio

- En la fórmula de la ley de Coulomb, K es una constante cuyo valor depende del medio en el que se encuentran las cargas y $\vec{u}_r$ es el vector unitario

$$\vec{F} = \pm K \frac{q_1 q_2}{r^2} \vec{u}_r \quad \Rightarrow \quad \vec{F} = \frac{1}{4\pi\varepsilon} \frac{q_1 q_2}{r^2} \vec{u}_r$$

donde $\varepsilon$ es la constante dieléctrica o permitividad del medio

- La ley de Coulomb **solo es válida para cargas puntuales o puntiformes**, es decir, para aquellas cuyo tamaño es mucho menor que la distancia que las separa

- Para el vacío, el valor de $\varepsilon$ es: $\varepsilon_0 = \frac{1}{4\pi K_0} = 8{,}85.10^{-12} \ C^2 N^{-1} m^{-2}$

| Valores de K (N m² C⁻²) | |
|---|---|
| Vacío | $9.10^9$ |
| Vidrio | $1{,}29.10^9$ |
| Glicerina | $1{,}61.10^8$ |
| Agua | $1{,}11.10^8$ |

La unidad de carga eléctrica en el Sistema Internacional es el ***culombio*** (C).

1 C equivale a la carga de $6{,}25 \cdot 10^{18}$ electrones.

La carga del electrón es: $-1{,}6019 \cdot 10^{-19}$ C.

# 1.1 LA LEY DE COULOMB FRENTE A LA LEY DE NEWTON (III)

Analogías y diferencias entre las leyes de Newton y Coulomb

| A N A L O G I A S | D I F E R E N C I A S |
|---|---|
| • Su expresión matemática es análoga<br>• Describen fuerzas que son proporcionales a la magnitud física que interacciona: las masas en las fuerzas gravitatorias, las cargas en las eléctricas<br>• En ambas leyes, las fuerzas son inversamente proporcionales al cuadrado de la distancia<br>• Tanto las fuerzas gravitatorias como las eléctricas son fuerzas centrales, es decir, actúan en la dirección de la recta que une las masas o las cargas, respectivamente | • La fuerza gravitatoria está asociada a la masa; la fuerza eléctrica a la carga<br>• La fuerza gravitatoria es de atracción (solo hay un tipo de masa); la fuerza eléctrica puede ser de atracción o de repulsión (hay dos tipos de cargas)<br>• La constante G no depende del medio; el valor de la constante K depende del medio en el que estén las cargas<br>• El valor de G es muy pequeño frente a K: la interacción gravitatoria es mucho más débil que la eléctrica |





# 1.2 EL CAMPO ELECTROSTÁTICO COMO CAMPO DE FUERZAS.

El campo eléctrico. Vector intensidad de campo eléctrico

• Llamamos ***campo eléctrico*** a la ***perturbación*** que un cuerpo produce en el ***espacio*** que lo rodea por el hecho de tener ***carga eléctrica***.

• Cuando otra carga eléctrica se sitúa en esta región del espacio, interacciona con el campo y experimenta una fuerza eléctrica.

• Se define en cada punto del espacio un vector $\vec{E}$, denominado ***intensidad de campo eléctrico***, mediante la relación:

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

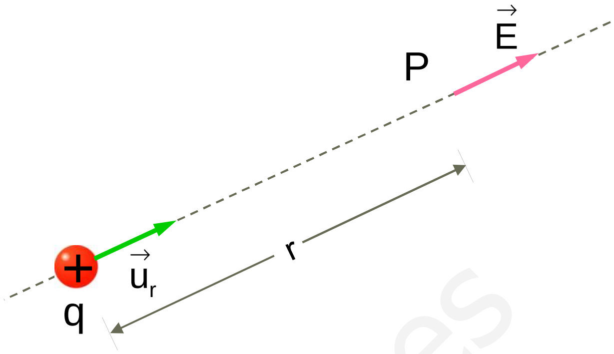
• La unidad de intensidad del campo eléctrico es N/C . Si la carga q' fuera +1 C, resultaría que la fuerza sobre ella sería igual al campo

**La intensidad del campo eléctrico en un punto es igual a la fuerza sobre la unidad de carga eléctrica positiva situada en ese punto**

# 1.2 EL CAMPO ELECTROSTÁTICO COMO CAMPO DE FUERZAS(II)

Campo eléctrico creado por una carga puntual

- Sea un **campo eléctrico** creado por una **carga puntual q**
- Si en un punto P a una distancia r de la carga q, situamos una carga testigo q', y el campo ejerce sobre ella una fuerza F, la intensidad del campo eléctrico será:




$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q'} = \pm\frac{1}{q'}\left(K\frac{q\,q'}{r^2}\vec{u}_r\right)$$

- Por tanto, la **intensidad del campo eléctrico** será: $\vec{E} = \pm\ K\dfrac{q}{r^2}\vec{u}_r$





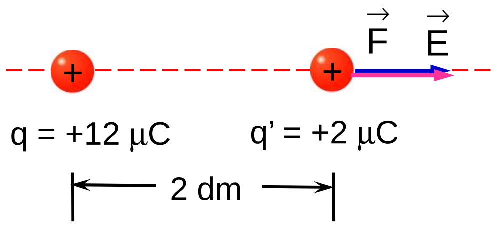
# 1.2 EL CAMPO ELECTROSTÁTICO COMO CAMPO DE FUERZAS (III)

Aplicación al cálculo de la intensidad del campo eléctrico

Calcula la intensidad del campo eléctrico creado por una carga de 12 μC en un punto P situado a 2 dm de la carga en el vacío. ¿Qué fuerza actuaría sobre una carga de 2 μC situada en el punto P?

- Intensidad del campo:

$$E = K\frac{q}{r^2} = 9.10^9\frac{12.10^{-6}}{\left(2.10^{-1}\right)^2} = 2{,}7.10^6\ \mathrm{N/C}$$




- Fuerza sobre una carga de 2 μC:

$$F = q'\,E = 2.10^{-6}\ .\ 2{,}7.10^{6} = 5{,}4\ \mathrm{N}$$

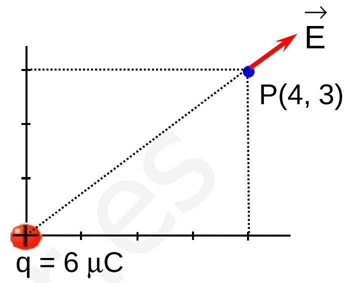
# 1.2 EL CAMPO ELECTROSTÁTICO COMO CAMPO DE FUERZAS (IV)

Cálculo de la fuerza e intensidad de campo eléctrico en un punto

Una carga de 6 μC se encuentra en el punto (0, 0). Calcula:
a) La intensidad del campo eléctrico en el punto P(4, 3)
b) La fuerza electrostática sobre una carga de –1 μC situada en P. Las distancias están expresadas en metros

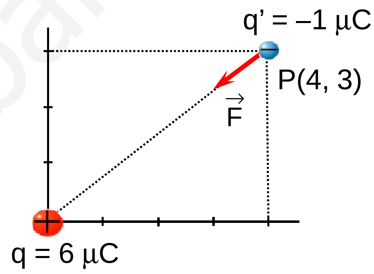
a) La intensidad del campo eléctrico en el punto P(4,3):

$$|E| = K\,\frac{q}{r^2} = 9\cdot 10^9\,\frac{6\cdot 10^{-6}}{25} = \boxed{2{,}2\cdot 10^3\ N/C}$$




b) La fuerza eléctrica sobre la carga de –1 μC situada en P es:

$| F | = q'\,E = 10^{-6}\cdot 2{,}2\cdot 10^3\ N/C = \boxed{2{,}2\cdot 10^{-3}\ N}$



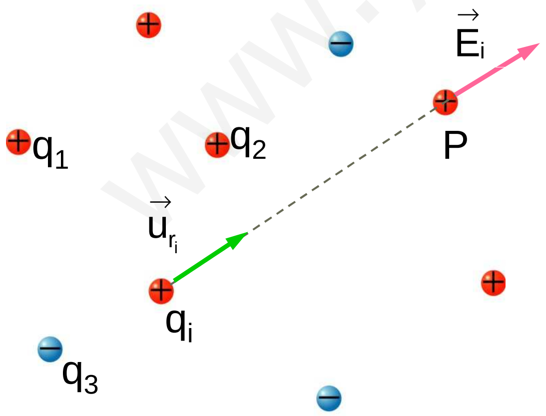





# 1.2 EL CAMPO ELECTROSTÁTICO COMO CAMPO DE FUERZAS (V)

Principio de superposición

**SISTEMA DISCRETO**

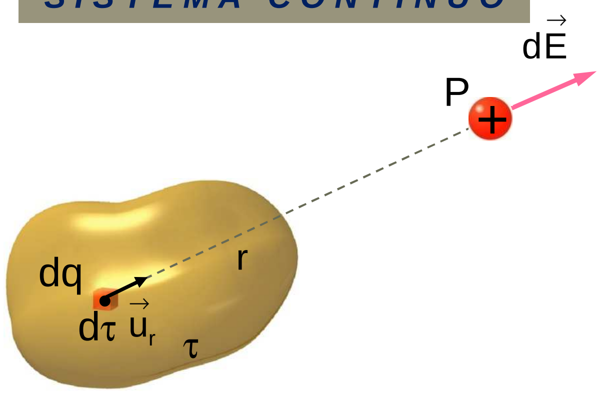



$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \ldots + \vec{E}_n = \Sigma \vec{E}_i$$

$$\vec{E} = \pm K \sum_{i=1}^{n} \frac{q_i}{r_i^2}\,\vec{u}_{r\,i}$$

La intensidad del campo eléctrico en un punto debido a un sistema discreto de cargas es igual a la suma de las intensidades de los campos debidos a cada una de ellas

**SISTEMA CONTINUO**




$$d\vec{E} = \pm K\,\frac{dq}{r^2}\,\vec{u}_r$$

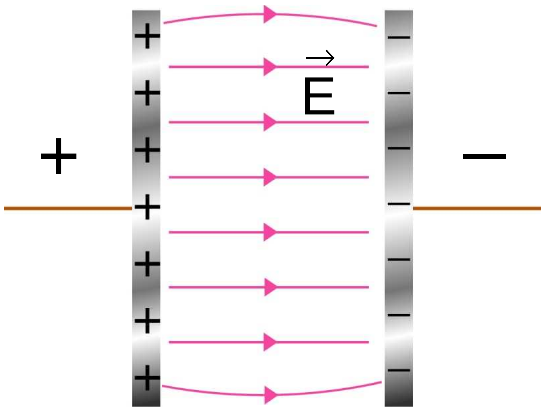
$$\vec{E} = \int_\tau d\vec{E} = \pm K \int_\tau \frac{dq}{r^2}\,\vec{u}_r$$

En un sistema continuo, la carga se distribuye en un volumen τ determinado

# 1.2 EL CAMPO ELECTROSTÁTICO COMO CAMPO DE FUERZAS (VI)



Campo eléctrico uniforme




- Un campo eléctrico en el que el vector intensidad de campo $\vec{E}$ es igual en todos los puntos se denomina campo eléctrico uniforme
- Por ejemplo el campo eléctrico en el interior de un condensador plano es un campo eléctrico uniforme

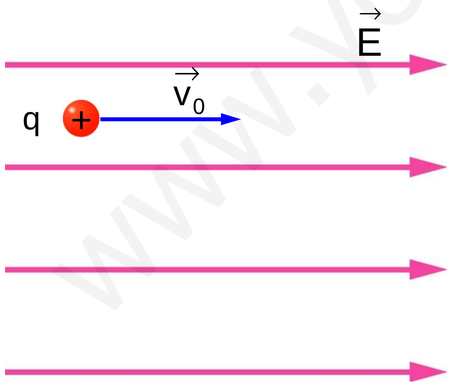


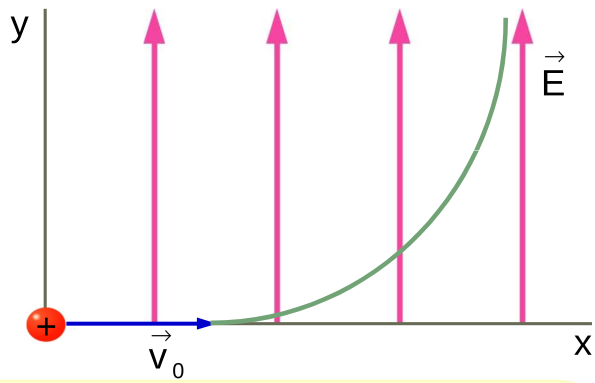


# 1.2 EL CAMPO ELECTROSTÁTICO COMO CAMPO DE FUERZAS (VII)



Movimiento de cargas bajo campos eléctricos uniformes




- Si la partícula tiene inicialmente una velocidad $\vec{v}_0$ en la dirección del campo eléctrico uniforme, se moverá con MRUA en la misma dirección

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m} = \frac{q}{m}\vec{E}$$

**Ecuaciones M.R.U.A**

$$v_f = v_o + a \cdot t$$

$$x_f = x_o + v_o \cdot t + \tfrac{1}{2} \cdot a \cdot t^2$$

- Si la partícula tiene inicialmente una velocidad en dirección perpendicular al campo eléctrico uniforme, se moverá con un movimiento compuesto por:
  - MRU con velocidad en dirección perpendicular al campo.

MRU Eje x → $x = x_o + v_{ox} t$ ; $v_x = cte$

  - MRUA con aceleración en la dirección del campo.

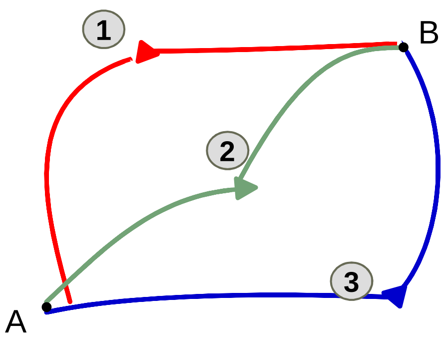
MRUA Eje y → $y = y_o + v_{yo}\, t + \tfrac{1}{2} a t^2$ ; $v_y = v_{yo} + at$

# 1.3 ENERGÍA POTENCIAL Y POTENCIAL ELECTROSTÁTICO.



Campo conservativo

## CAMPO CONSERVATIVO




$$W_{AB_1} = W_{AB_2} = W_{AB_3}$$

- Un campo de fuerzas se denomina ***conservativo*** cuando el trabajo realizado para transportar una partícula con velocidad constante en el campo ***no depende de la trayectoria seguida, sino de las posiciones inicial y final***
- El trabajo necesario para desplazar una carga eléctrica entre los puntos A y B de un campo eléctrico es el mismo cualquiera que sea el camino elegido
- ***El campo electrostático es un campo conservativo***, pues si queremos acercar dos cargas iguales, debemos realizar un trabajo contra las fuerzas eléctricas de repulsión entre las cargas. Este trabajo no depende del camino seguido para acercar las cargas, sino de sus posiciones inicial y final.

- En un campo conservativo, la energía potencial de una partícula se puede asociar a la posición





# 1.3 ENERGÍA POTENCIAL Y POTENCIAL ELECTROSTÁTICO (II)



Energía potencial y potencial electrostático

## ENERGIA POTENCIAL ELECTROSTÁTICA

- El trabajo $W_{AB}$ necesario para llevar la carga desde un punto A hasta otro B, con velocidad constante, se emplea en variar la energía potencial del sistema $W_{AB} = -\Delta E_p$
- Por convenio se toma el infinito como origen de referencia de las energías potenciales electrostáticas, de modo que si B está en el infinito, $E_{pB} = 0$, el trabajo que realiza el campo eléctrico para trasladar la carga q' desde un punto B hasta el infinito puede interpretarse como:

$$W_{AB} = -\Delta E_p = E_{pA} - E_{pB} = E_{pA} - 0 = E_{pA}$$

$$E_{pA} = W_{AB} = \int_A^B \vec{F} \cdot d\vec{r} = k\,\frac{q\,q'}{r}$$

$$E_p = k\,\frac{q\,q'}{r}$$

- La ***energía potencial*** de una carga eléctrica en un punto del campo electrostático es igual al ***trabajo que realiza el campo eléctrico para trasladar la carga q desde dicho punto hasta el infinito.***

## POTENCIAL ELECTROSTÁTICO

- El ***potencial electrostático*** de un punto del campo eléctrico es el ***trabajo que realiza el campo eléctrico para trasladar la unidad de carga positiva desde dicho punto hasta el infinito.***

$$V = \frac{E_p}{q'} = K\,\frac{q}{r_B}$$

Si un campo eléctrico esta creado por un conjunto de cargas puntuales, el potencial electrostático total creado en un punto es: $V = \sum V_i$

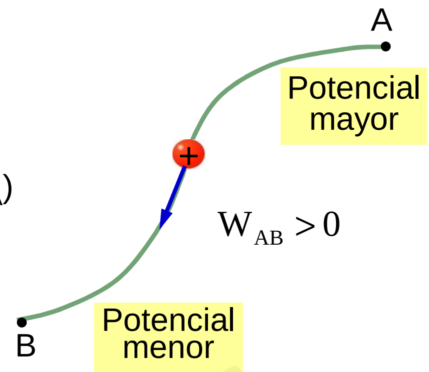
# 1.3 ENERGÍA POTENCIAL Y POTENCIAL ELECTROSTÁTICO (III)

Diferencia de potencial (ddp)

- El trabajo $W_{AB}$ necesario para llevar la carga q' desde A hasta B, con velocidad constante, se emplea en variar la energía potencial del sistema, es decir:

$$W_{AB} = -\Delta E_p = -(E_{pB} - E_{pA}) = -(V_B\, q' - V_A\, q') = -q'\,(V_B - V_A)$$

Si q' = +1C, resulta: $W_{AB} = -(V_B - V_A)$




**La *ddp* entre 2 puntos A y B es el trabajo realizado por el campo eléctrico para transportar la unidad de carga eléctrica positiva desde A hasta B**

- Las cargas positivas se mueven de forma espontánea desde los puntos de mayor potencial hasta los de menor. El trabajo es mayor que cero, y lo realiza el campo

- Para las cargas negativas, ocurre lo contrario. El trabajo es negativo y se realiza contra las fuerzas del campo

$$W_{AB} = -q'\,(V_B - V_A) = q'\,(V_A - V_B)$$

Donde q´ es la carga transportada.



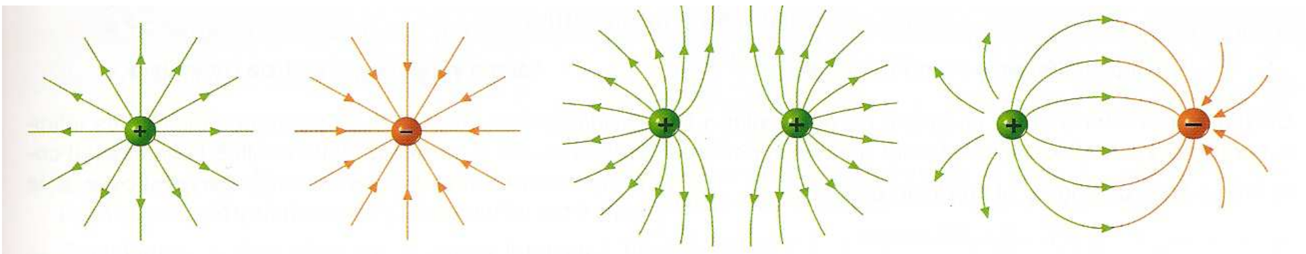


# 1.4 LINEAS DE FUERZA Y SUPERFICIES EQUIPOTENCIALES.

Líneas de fuerza

Un ***campo eléctrico*** se puede ***representar*** esquemáticamente en una región del espacio mediante sus ***líneas de campo*** y sus ***superficies equipotenciales***.

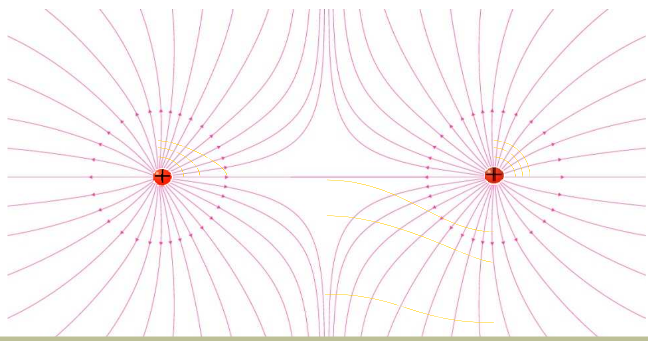
- Las líneas de campo se trazan de modo que cumplan las condiciones siguientes:
  - Que en cada punto del espacio el vector ***intensidad de campo eléctrico*** sea ***tangente*** a las ***líneas de campo*** y tenga el mismo sentido que éstas.
  - Que la ***densidad de líneas de campo***, o número de líneas que atraviesan la unidad de superficie colocada perpendicularmente a éstas, sea ***proporcional*** al ***módulo del campo eléctrico***. Es decir, al campo eléctrico es más intenso en aquellas regiones en que las líneas de campo están más juntas.
  - Las líneas de campo siempre ***se originan en las cargas positivas*** y ***terminan en las cargas negativas***. La figura muestra las líneas de campo para algunas distribuciones de carga.



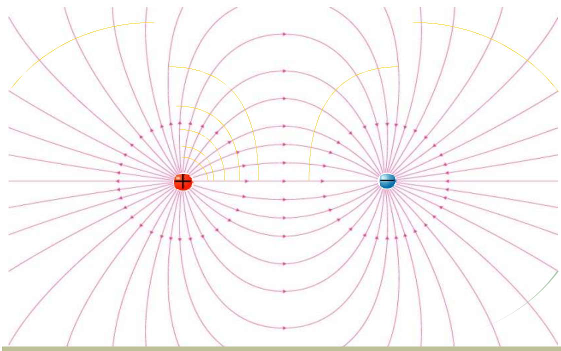
Una carga puntual positiva — Una carga puntual negativa — Dos cargas puntuales del mismo signo — Dos cargas puntuales de diferente signo

# 1.4 LINEAS DE FUERZA Y SUPERFICIES EQUIPOTENCIALES (II)

Superficies equipotenciales



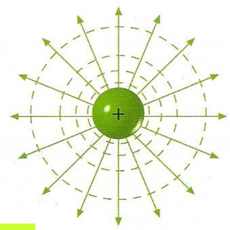
Superficies equipotenciales para dos cargas positivas



Superficies equipotenciales de un dipolo

- ***Superficies equipotenciales*** son las superficies obtenidas al unir los puntos del espacio que se encuentran al mismo potencial eléctrico. Tienen las siguientes propiedades:

- El trabajo necesario para mover una carga eléctrica por una superficie equipotencial es cero, ya que $V_A = V_B \Rightarrow W_{AB} = -q\,(V_B - V_A) = 0$
- Son perpendiculares a las líneas de fuerza del campo
- Las superficies equipotenciales de un campo eléctrico uniforme son planos paralelos
- Para el campo creado por una carga puntual, positiva o negativa, el potencial sólo depende de la distancia a la carga. Por tanto, las superficies equipotenciales son esferas concéntricas con centro en la propia carga.



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



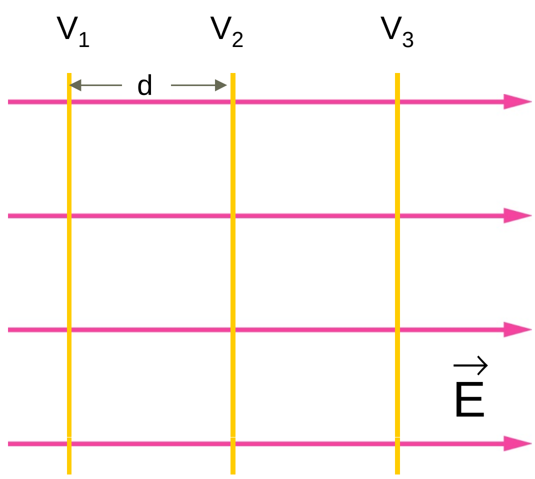
# 1.5 RELACIONES ENTRE EL CAMPO Y EL POTENCIAL ELECTROSTÁTICO.

Relación campo – potencial en un campo eléctrico uniforme

- En un campo eléctrico uniforme, las líneas de fuerza son rectas paralelas, y las superficies equipotenciales, planos perpendiculares a ellas
- La diferencia de potencial entre dos superficies equipotenciales separadas por una distancia l será el trabajo realizado para llevar una carga de +1 C de una a otra:

$$W_{12} = -q\,(V_2 - V_1)$$
$$F \cdot d = -q\,(V_2 - V_1)$$
$$E \cdot q \cdot d = -q\,(V_2 - V_1)$$
$$E \cdot d = -\,(V_2 - V_1)$$

$$|E| = \frac{|\Delta V|}{d}$$




El campo eléctrico se dirige siempre desde los puntos de mayor potencial hasta los de menor potencial.

- Al ser la intensidad del campo eléctrico igual a una variación del potencial eléctrico con la distancia, se usa también como unidad de E el voltio por metro (V/m)

# 1.5 RELACIONES ENTRE EL CAMPO Y EL POTENCIAL ELECTROSTÁTICO (II)



Cálculo de la diferencia de potencial entre dos puntos

Una partícula α (q = 3,2.10$^{-19}$ C; m = 6,5.10$^{-27}$ kg), inicialmente en reposo, es acelerada por un campo eléctrico uniforme de 2.10$^{4}$ N/C hasta una velocidad de 5000 m/s. Halla:

a) El espacio recorrido por la partícula

b) La diferencia de potencial entre los puntos extremos del recorrido

a) Cálculo del espacio recorrido por la partícula:

La fuerza eléctrica sobre la partícula es: $F = q\,E = 3{,}2.10^{-19} \,.\, 2.10^{4} = 6{,}4.10^{-15}$ N

La aceleración es: $a = \dfrac{F}{m} = \dfrac{6{,}4.10^{-15}}{6{,}5.10^{-27}} = 9{,}8.10^{11}\ m/s^2$

La distancia recorrida es:

$$v^2 - v_0^2 = 2ad \Rightarrow (5.10^3)^2 - 0 = 2 \,.\, 9{,}8.10^{11} \,.\, d \Rightarrow d = 1{,}3.10^{-5}\ m$$

b) Cálculo de la diferencia de potencial entre los puntos extremos:

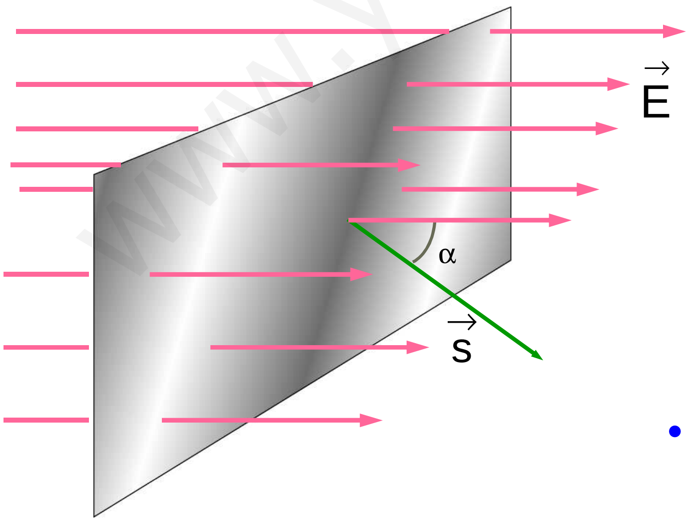
$$|E| = \frac{|\Delta V|}{d} \Rightarrow |\Delta V| = |E \cdot d| \Rightarrow |\Delta V| = 2.10^4 \,.\, 1{,}3.10^{-5} = 0{,}26\ V$$



# 1.6 TEOREMA DE GAUSS.



Flujo del campo eléctrico para una superficie plana




- Se denomina flujo del campo eléctrico (Φ) a través de una superficie al producto escalar:

$$\Phi = \vec{E} \,.\, \vec{S} = E\,S\cos\alpha$$

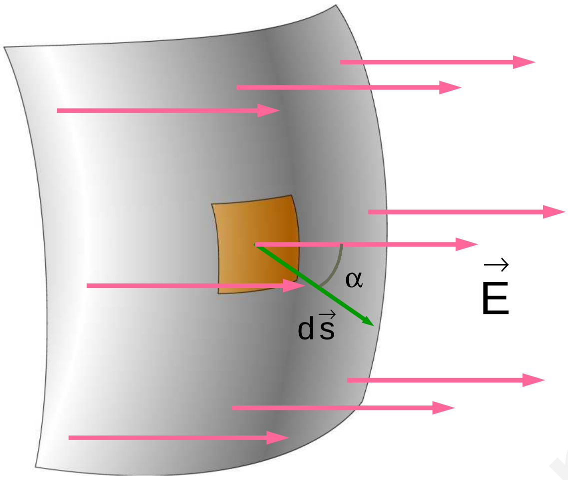
siendo α el ángulo formado por el vector intensidad del campo con el vector superficie

- El flujo representa el número de líneas de fuerza del campo que atraviesan la superficie

- Para α = 0º el número de líneas de fuerza cortadas por la superficie es máximo, y el flujo también es máximo
- Para α = 90º ninguna línea de fuerza corta la superficie, y el flujo es nulo

# 1.6 TEOREMA DE GAUSS (II)

Flujo del campo eléctrico para una superficie cualquiera

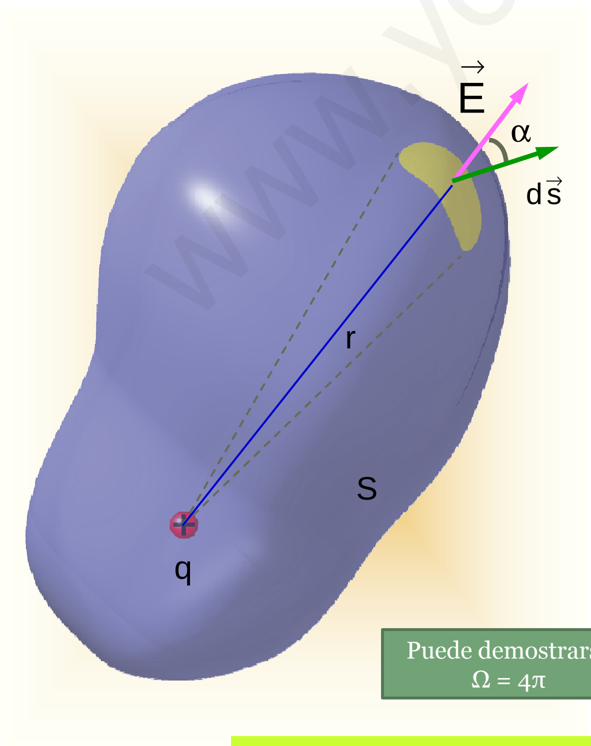



- Dada una superficie cualquiera S, el flujo elemental $d\Phi$ a través de un elemento de superficie $d\vec{S}$ es $d\Phi = \vec{E}\, d\vec{S}$
- El flujo a través de toda la superficie es $\Phi = \int_S d\Phi = \int_S \vec{E}\, d\vec{S}$



# 1.6 TEOREMA DE GAUSS (III)

*Teorema de Gauss*




Puede demostrarse
$\Omega = 4\pi$

- Si el campo eléctrico se debe a una carga puntual q, el flujo elemental $d\Phi$ a través de un elemento de superficie $d\vec{S}$ a una distancia r de la carga es:

$$\Phi = \vec{E}.d\vec{S} = E\, dS \cos\alpha = \frac{q}{4\pi\varepsilon r^2}\, dS \cos\alpha$$

siendo $\frac{dS \cos\alpha}{r^2}$ el ángulo sólido elemental $d\Omega$ con el que se ve el elemento $d\vec{S}$ desde la carga q

- Si q está encerrada en el interior de S:

$$\Phi = \int d\Phi = \int_S \frac{q}{4\pi\varepsilon}\, d\Omega = \frac{q}{4\pi\varepsilon} \int_S d\Omega$$

donde:

$\int_S d\Omega$ equivale al ángulo sólido $\Omega$ con el que se abarca toda la superficie desde la carga q

Teorema de Gauss

El flujo eléctrico $\Phi$, debido a una carga puntual q, a través de una superficie cerrada que rodea a la carga es: $\Phi = \frac{q}{\varepsilon}$

Si la superficie encierra un conjunto de cargas.

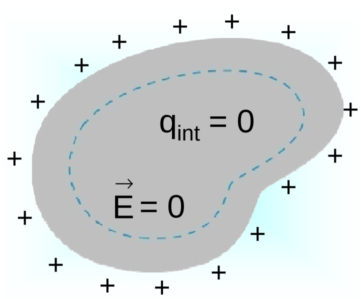
$$\Phi = \frac{\Sigma q_i}{\varepsilon}$$

# 1.6 TEOREMA DE GAUSS (IV)



Aplicaciones del teorema de Gauss ( I )

## Distribución de cargas en un conductor cargado, aislado y en equilibrio




- Las cargas de un conductor tienen libertad de movimiento. Si situamos un conductor en un campo eléctrico, sus cargas libres se ven sometidas a fuerzas eléctricas que las empujarán hasta la superficie del conductor.
- Un ***conductor*** alcanza el ***equilibrio electrostático*** cuando sus ***cargas libres*** están en ***reposo***. En esta situación, las cargas eléctricas están totalmente distribuidas en la superficie del conductor.
- Por tanto, en el ***interior del conductor***, el ***campo eléctrico es cero.***
- ***Aplicando el teorema de Gauss***, y considerando cualquier superficie cerrada interna en el conductor, se tiene que, al ser nulo el campo, el flujo a través de ella es nulo y, en consecuencia, ***la carga $q_{int}$ es igual a cero.***

**No hay cargas libres en el interior del conductor**
**Las cargas se distribuyen en su superficie**

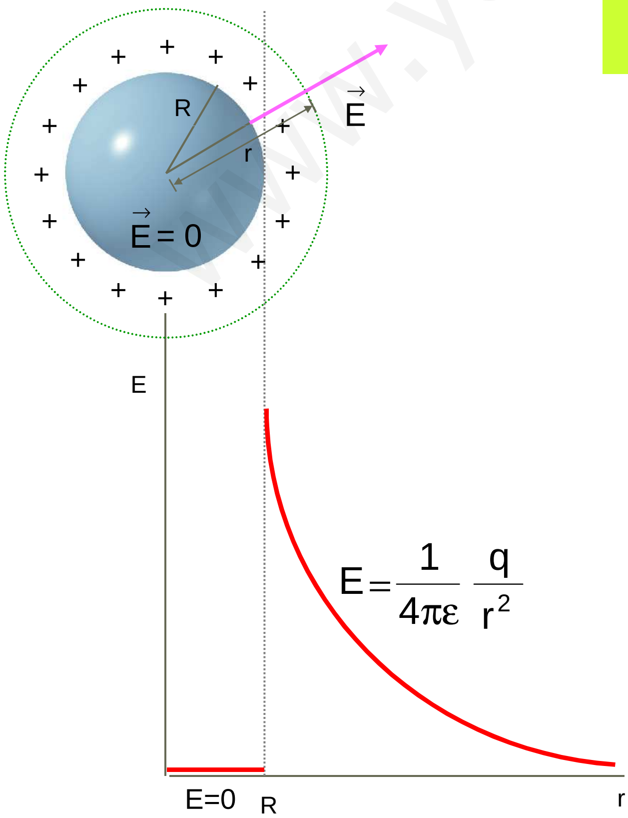




# 1.6 TEOREMA DE GAUSS (IV)



Aplicaciones del teorema de Gauss ( II )




## Campo eléctrico debido a un conductor esférico

- El campo es nulo para puntos interiores
- Para puntos exteriores, en los que r > R, siendo R el radio del conductor esférico, puede elegirse una superficie esférica de radio r concéntrica con el conductor
- El campo $\vec{E}$ es radial debido a la simetría de la distribución de cargas. El flujo es:

$$\Phi = \int_S d\Phi = \int_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \int_S E\, dS = E \int_S dS = E\, 4\pi r^2$$

- Como $E\, 4\pi r^2 = \frac{q}{\varepsilon} \Rightarrow$ $E = \frac{1}{4\pi\varepsilon}\frac{q}{r^2}$
- En la superficie, donde r = R, el campo es:

$$E = \frac{1}{4\pi\varepsilon}\frac{q}{R^2}$$

# 2 CAMPO MAGNÉTICO.

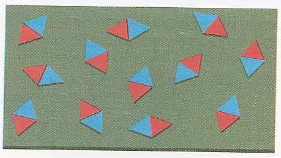
Magnetismo e imanes

Cuando se acerca el polo de un imán a una sustancia magnética, en la zona cercana al imán se induce un polo momentáneo contrario al del imán.

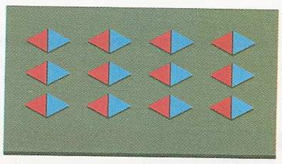
- ***Sustancias magnéticas***: aquellas que son atraídas por el mineral magnetita (imán natural), como el hierro, el acero, el cobalto, el níquel o aleaciones de dichos metales. Estas sustancias, a su vez, pueden convertirse en imanes mediante diferentes ***formas de imantación***.

Si se frotan con magnetita → imanes artificiales → { temporales / permanentes }

Si se someten a una corriente eléctrica → imanes artificiales temporales o electroimanes → { temporales / permanentes }



**a** Disposición de los dipolos magnéticos en un material no imantado



**b** Disposición de los dipolos magnéticos en un material imantado

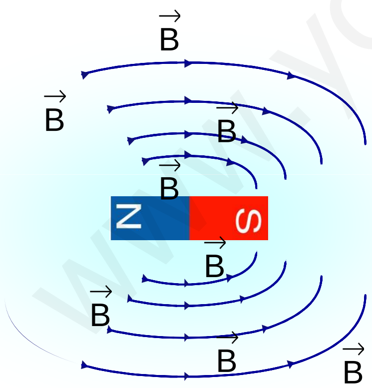
- Los imanes manifiestan sus ***propiedades magnéticas*** sin necesidad de que exista contacto con las sustancias con las que interaccionan. Las interacciones magnéticas, por tanto, se manifiestan a ***distancia***.
- Ampére observó que las corrientes eléctricas se atraían o repelían entre sí y que podían atraer limaduras de hierro. En 1823 sugirió que el ***magnetismo natural*** era debido a ***pequeñas corrientes*** cerradas en el ***interior de la materia***.
- En la actualidad, identificamos esas pequeñas corrientes con el movimiento de los electrones en el interior de los átomos. Podemos imaginar que en cualquier material existen muchos imanes de tamaño pequeño. En las ***sustancias magnéticas estos dipolos magnéticos están orientados en el mismo sentido***, sumando sus efectos formando un ***imán***.



# 2 CAMPO MAGNÉTICO (II)

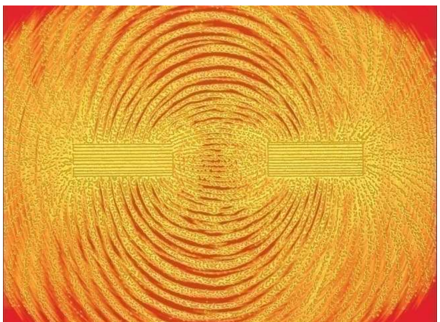


Representación de las líneas de fuerza del campo magnético




Las líneas de fuerza del campo magnético van de norte a sur

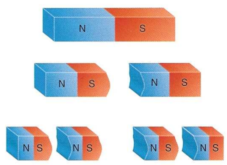
- En las zonas donde las líneas están más juntas el efecto del imán es más intenso. Estas zonas se localizan en los extremos del imán y se denominan polos, que convencionalmente se llaman ***polo norte y polo sur***. Los polos de distinto nombre se atraen y aquellos del mismo nombre se repelen.
- Se pueden visualizar las ***líneas magnéticas*** de un imán, espolvoreando limaduras de hierro sobre una cartulina situada sobre él.



Líneas de fuerza magnética

- ***La Tierra es un gigantesco imán*** permanente, este es el fundamento de las ***brújulas***. El polo norte se orienta hacia el Norte geográfico de la Tierra (polo sur magnético de la Tierra) y el sur hacia el Sur geográfico (polo Norte de la Tierra).

- Es ***imposible separar los polos*** de un imán, si rompemos un imán por la mitad obtenemos dos imanes más pequeños, con sus respectivos polos.



## 2 CAMPO MAGNÉTICO (III)

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

Carga eléctrica en un campo magnético →
- en reposo → no se observa ninguna interacción entre ambos
- en movimiento → se manifiesta una fuerza magnética sobre ella proporcional al valor de la carga y a su velocidad

- Se define un vector $\vec{B}$, denominado ***inducción magnética***, en cada punto del espacio mediante la relación: $\vec{F} = q\,(\vec{v} \wedge \vec{B})$ *La ley de Lorentz*
- Si $\alpha$ es el ángulo que forman los vectores $\vec{v}$ y $\vec{B}$ en un punto del espacio, el módulo de la fuerza que actúa sobre la carga q en ese punto es: $F = q\,v\,B\,\text{sen}\,\alpha$

$$\text{Si} \begin{cases} \alpha = 0 \Rightarrow F = 0 & \text{(si la carga se introduce paralela a } \vec{B}\text{)} \\ \alpha = 90 \Rightarrow F = F_{máx} \end{cases}$$

- ***Campo magnético uniforme*** es aquel en el que la intensidad de $\vec{B}$ es la misma en todos los puntos



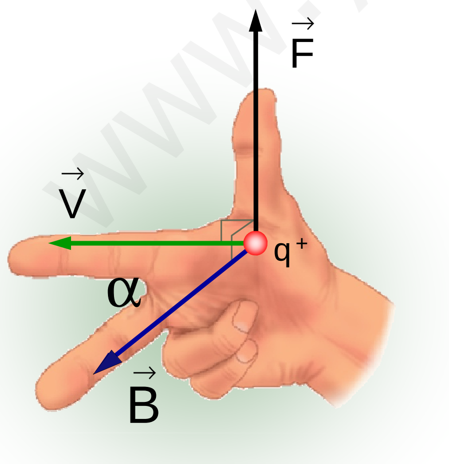


## 2 CAMPO MAGNÉTICO (IV)

Regla de la mano derecha y unidades de medida

Representación simbólica

| Z → + | Z → - |
|---|---|
| Hacia fuera del papel | Hacia dentro del papel |
| • • • • | × × × × |
| • • • • | × × × × |
| • • • • | × × × × |




Fuerza sobre una carga eléctrica positiva en un campo magnético

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

*La ley de Lorentz*

### Unidades de medida

- La unidad de inducción magnética en el S.I. es el tesla (T)
- Un tesla es el valor de la inducción magnética de un campo que ejerce una fuerza de 1 N sobre una carga eléctrica de 1 C que se mueve con una velocidad de 1m/s perpendicular al campo

Para determinar el sentido de la fuerza magnética, puede recurrirse a la llamada "**regla de la mano derecha**". Cuando el dedo índice de la mano derecha apunta en la dirección de v y el dedo corazón en la de B, el pulgar apunta en la dirección y sentido de F para una carga positiva. Cuando la carga es negativa, el sentido de F es el contrario.

# 2.1 MOVIMIENTOS DE CARGAS ELÉCTRICAS BAJO CAMPOS MAGNÉTICOS UNIFORMES.

- Sea una carga positiva con velocidad $\vec{v}$ que penetra en una campo magnético de inducción magnética $\vec{B}$. Según la posición relativa de ambos vectores, se pueden presentar tres casos:

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

- Los vectores $\vec{v}$ y $\vec{B}$ sean paralelos
- Los vectores $\vec{v}$ y $\vec{B}$ sean perpendiculares
- Los vectores $\vec{v}$ y $\vec{B}$ formen entre sí un ángulo cualquiera $\alpha$

**Si $\vec{v}$ es paralela a $\vec{B}$**

$F = q\,v\,B \text{ sen } 0 = 0 \;\Rightarrow\; F = 0 \;\Rightarrow$ la partícula se moverá con **MRU**



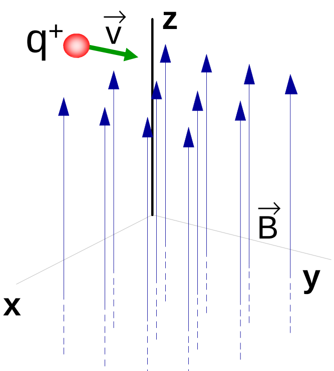
# 2.1 MOVIMIENTOS DE CARGAS ELÉCTRICAS BAJO CAMPOS MAGNÉTICOS UNIFORMES (II)

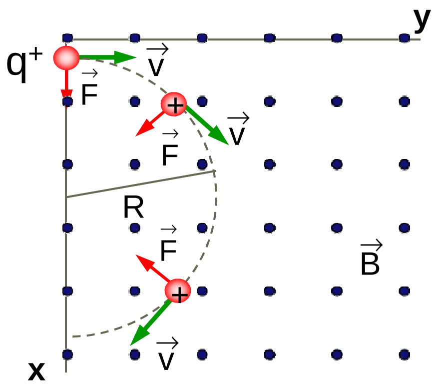
**Si $\vec{v}$ es perpendicular a $\vec{B}$**

$F = q\,v\,B \text{ sen } 90 \;\Rightarrow\; F = q\,v\,B \;\Rightarrow$

- La partícula se desplazará con **MCU**
- La fuerza magnética será quién proporcione la fuerza centrípeta $F_c = F_m$

$F = \dfrac{m\,v^2}{R} = q\,v\,B \;\Rightarrow\; R = \dfrac{m\,v}{q\,B}$ siendo R el radio de la trayectoria circular $\Rightarrow\; T = \dfrac{2\pi R}{v} = \dfrac{2\pi m}{qB}$



# 2.1 MOVIMIENTOS DE CARGAS ELÉCTRICAS BAJO CAMPOS MAGNÉTICOS UNIFORMES (III)

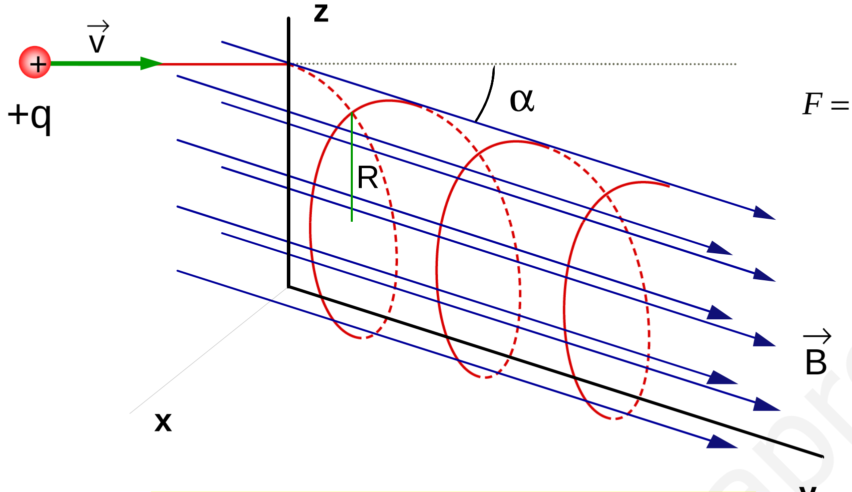
**Si $\vec{v}$ y $\vec{B}$ forman un ángulo cualquiera $\alpha$**

F = q v B sen α ⇒ La partícula seguirá una trayectoria helicoidal que se proyecta en un plano perpendicular a $\vec{B}$ según una circunferencia de radio:

$F_c = F_m$

$$F = \frac{m\,v^2}{R} = qvB\,sen\alpha \Rightarrow R = \frac{mv}{q\,B\,sen\alpha}$$

$$R = \frac{m\,v}{B\,q\,sen\,\alpha}$$




Carga con movimiento bajo un ángulo cualquiera



# 2.1 MOVIMIENTOS DE CARGAS ELÉCTRICAS BAJO CAMPOS MAGNÉTICOS UNIFORMES (IV)

Aplicación del movimiento de cargas en un campo magnético

Un electrón ($q = 1,6.10^{-19}$ C, $m = 9,1.10^{-31}$ kg) penetra con una velocidad de $3.10^6$ m. $s^{-1}$ en dirección perpendicular a un campo uniforme de 7,5 T. Calcular la fuerza magnética sobre él, el radio de la circunferencia que describe y el periodo del movimiento

a) Cálculo de la fuerza magnética

$F = q\,v\,B\,sen\,\alpha = 1,6.10^{-19} \,.\, 3.10^6 \,.\, 7,5 \,.\, (sen\,90) \Rightarrow$ $F = 3,6 \,.\, 10^{-12}$ N

b) Cálculo del radio de la circunferencia

$$R = \frac{m\,v}{q\,B} = \frac{9{,}1.\,10^{-31}\,.\,3.\,10^{6}}{1{,}6.\,10^{-19}\,.\,7{,}5} = 2{,}3.\,10^{-6}\ \text{m} \Rightarrow R = 2{,}3\,.\,10^{-6}\ \text{m}$$

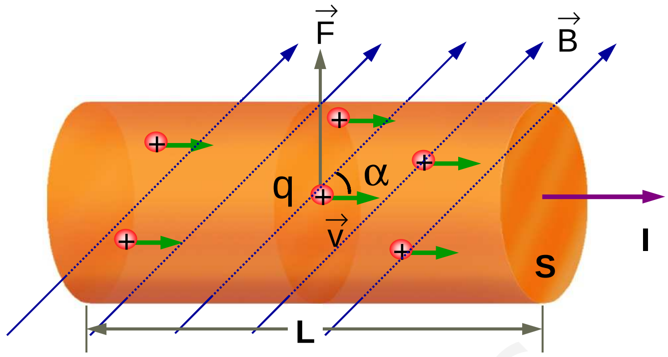
c) Cálculo del periodo

$$T = \frac{2\pi m}{q\,B} = \frac{2\,.\,3{,}14\,.\,9{,}1.\,10^{-31}}{1{,}6.\,10^{-19}\,.\,7{,}5} = 4{,}8.\,10^{-12}\ \text{s} \Rightarrow T = 4{,}8\,.\,10^{-12}\ \text{s}$$

# 2.2 FUERZAS MAGNÉTICAS SOBRE CORRIENTES ELÉCTRICAS.

Fuerza magnética sobre un conductor rectilíneo

- Sea un conductor rectilíneo de longitud $L = v\,\Delta t$ y sección $S$, por el que circula una intensidad de corriente $I$
- Siendo $\Delta q$ la carga total que atraviesa $S$ en un tiempo $\Delta t$, la intensidad de corriente es: $I = \dfrac{\Delta q}{\Delta t}$




Segmento de conductor rectilíneo de longitud L y sección S

- La fuerza de Lorentz sobre la carga es:

$$F = \Delta q\, v\, B \,\text{sen}\,\alpha = (I\,\Delta t)\, v\, B \,\text{sen}\,\alpha = I\,(v\,\Delta t)\, B \,\text{sen}\,\alpha \quad \Rightarrow \quad F = I\,L\,B\,\text{sen}\,\alpha$$

- La fuerza magnética sobre un conductor rectilíneo de longitud L por el que circula una corriente I situado en un campo magnético $\vec{B}$ es:

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

Ley de Laplace



# 2.3 CAMPOS MAGNÉTICOS DEBIDOS A CARGAS EN MOVIMIENTO

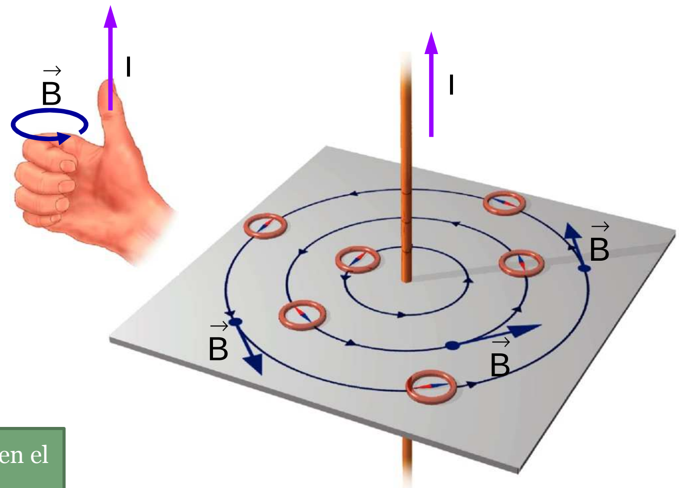
Ley de Biot y Savart

- Biot y Savart midieron el valor de la inducción magnética B, debida a un conductor **rectilíneo** largo por el que circula una corriente I en un punto situado a una distancia r:

$$\left.\begin{array}{l} B = k\,\dfrac{I}{r} \\ k = \dfrac{\mu_0}{2\pi} \end{array}\right\} \Rightarrow B = \frac{\mu_0\, I}{2\pi r}$$

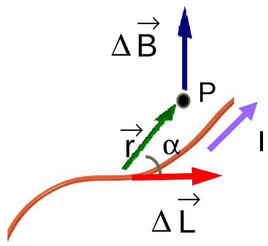
$$\mu_0 = 4\pi\, 10^{-7}\,\frac{N}{A^2}$$

Permeabilidad magnética en el Vacio




Campo magnético creado por un conductor rectilíneo. Regla de la mano derecha

- El valor de la inducción magnética $\Delta B$ debida a un elemento de conductor de longitud $\Delta L$ por el que circula una corriente $I$ en un punto a una distancia $r$ del mismo es:



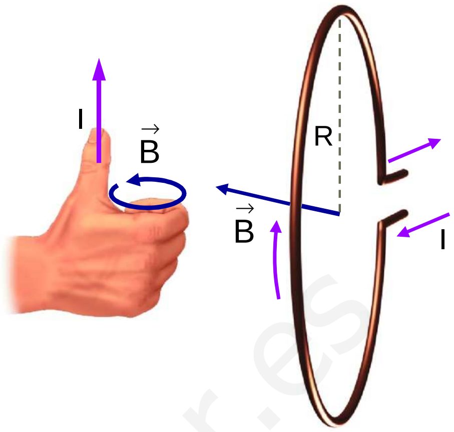

$$\Delta B = \frac{\mu_0\, I}{4\pi}\,\frac{\Delta L\,\text{sen}\,\alpha}{r^2} \quad \Rightarrow \quad \Delta\vec{B} = \frac{\mu_0\, I}{4\pi}\,\frac{\Delta\vec{L} \wedge \vec{r}}{r^3}$$

# 2.3 CAMPOS MAGNÉTICOS DEBIDOS A CARGAS EN MOVIMIENTO (II)



Campo magnético debido a una corriente circular

- La ley de Biot y Savart permite calcular el campo magnético en el centro de una espira circular de radio R por la que circula una corriente eléctrica I




- El campo es perpendicular a todos los elementos de corriente en que podemos descomponer la espira por ser perpendicular al plano que la contiene, por tanto:

$$\Delta B = \sum(\Delta B) = \sum\left(\frac{\mu_0 I}{4\pi}\frac{\Delta L}{r^2}\right) = \frac{\mu_0 I}{4\pi r^2}\sum(\Delta L) \quad \Rightarrow \quad \sum(\Delta L) = 2\pi R \quad \Rightarrow \quad \boxed{B = \frac{\mu_0 I}{2R}}$$





# 2.3 CAMPOS MAGNÉTICOS DEBIDOS A CARGAS EN MOVIMIENTO (III)



Aplicación al cálculo de la fuerza magnética

Un hilo conductor, rectilíneo e indefinido, situado en el vacío sobre el eje OZ de un sistema de coordenadas cartesiano (OXYZ), transporta una corriente eléctrica de intensidad I = 2 A en el sentido positivo de dicho eje. Calcula la fuerza magnética que actuará sobre una partícula cargada, con q = $5.10^{-6}$ C, en el instante en que pasa por el punto P (0, 4, 0) m con una velocidad $\vec{v} = 20\ \vec{j}$ m/s

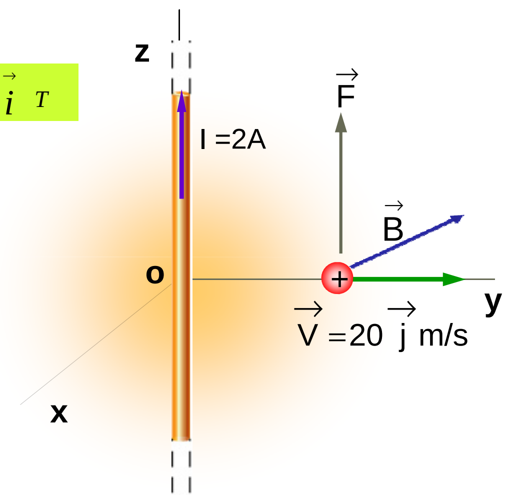
Dato: $\mu_0 = 4\,\pi.10^{-7}$ T m N $A^{-1}$

- El campo magnético creado en P (0, 4, 0) es:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} = \frac{4\pi\, 10^{-7}\cdot 2}{2\pi\cdot 4} = 10^{-7}\,T \qquad \boxed{\vec{B} = -10^{-7}\,\vec{i}\ T}$$

Su dirección es paralela al eje X

Su sentido coincide con el sentido negativo del eje, por tanto:




- La fuerza sobre la partícula en el punto considerado es:

$$F = q\ v\ B\ \text{sen}\ \alpha = 1{,}6.10^{-19}\cdot 20\cdot 10^{-7}\ (\text{sen}\ 90)$$

$$\boxed{\vec{F} = 10^{-11}\,\vec{k}\ \ N}$$

# 2.4 FUERZAS MAGNÉTICAS ENTRE DOS CONDUCTORES RECTILÍNEOS.

- El primer conductor genera un campo cuya inducción magnética en un punto cualquiera del segundo conductor es, según Biot y Savart:

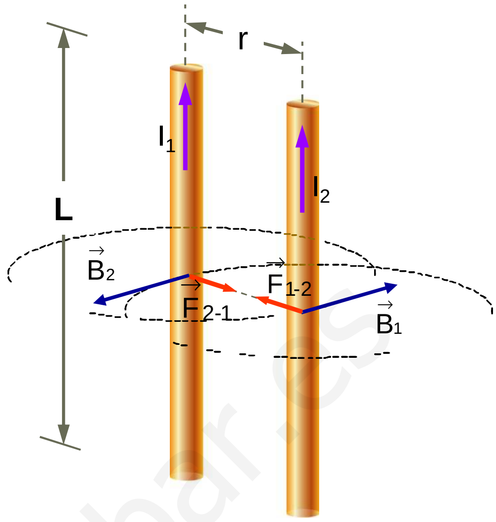
$$B_1 = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi r}$$

- $B_1$ es perpendicular al segundo conductor y al plano en el que se encuentran ambos conductores, y ejerce una fuerza magnética:

$$F_{1\text{-}2} = I_2\, L\, B_1 \text{ sen } 90$$

$$F_{1-2} = I_2\, L\, \frac{\mu_0 I_1}{2\pi r} = \frac{\mu_0 L\, I_1\, I_2}{2\pi r}$$

- De forma análoga se calcula $F_{2\text{-}1}$ que ejerce el segundo conductor sobre el primero




Fuerza magnética entre dos conductores

- **Si ambas corrientes tienen el mismo sentido, las fuerzas atraen entre sí a los conductores; si son de sentido contrario, los repelen**





# 2.4 FUERZAS MAGNÉTICAS ENTRE DOS CONDUCTORES RECTILÍNEOS (II)

Aplicación de la fuerza entre dos conductores rectilíneos

Dos conductores muy largos, rectos y paralelos, están situados en el vacío a una distancia de 10 cm y recorridos por corriente de 10 A y 20 A. Hallar la fuerza por centímetro entre ellos:

a) Si las corrientes tienen el mismo sentido

b) Si las corrientes tienen sentidos contrarios

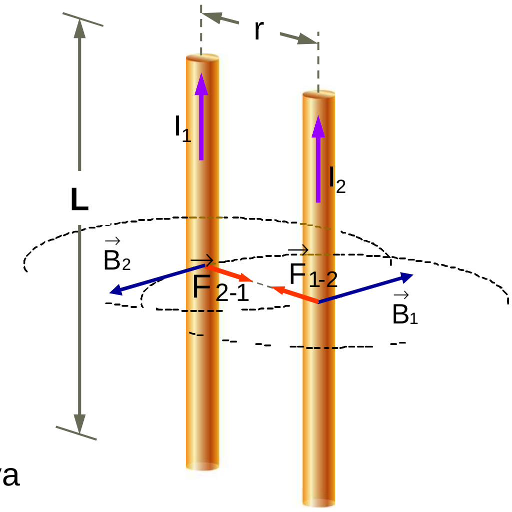
Dato: $\mu_0 = 4\,\pi.10^{-7}$ T m N A $^{-1}$

a) Fuerza entre conductores rectilíneos paralelos por los que circulan corrientes del mismo sentido:

$$F_{1-2} = \frac{\mu_0 L\, I_1\, I_2}{2\pi r}$$

$$\text{Si } L = 1 \text{ cm} \quad \Rightarrow \quad F = \frac{4\pi.10^{-7}.10^{-2}.10.20}{2\pi.10^{-1}}$$

$\boxed{F = 4.10^{-6} \text{ N}}$ esta fuerza es atractiva




b) Si las corrientes tienen sentidos contrarios:

La fuerza tiene el mismo módulo pero es repulsiva

# 2.5 LA LEY DE AMPÉRE.

- El campo magnético creado por un conductor rectilíneo, puede escribirse de la forma:

$$B \cdot 2\pi r = \mu_0 I$$

- El primer miembro se denomina circulación del vector $\vec{B}$ a lo largo de la circunferencia
- Ampère demostró que esta expresión es válida para cualquier línea cerrada que englobe una o más corrientes, y enunció que:

> La circulación de $\vec{B}$ a lo largo de una línea cerrada es igual a $\mu_0$ veces la intensidad de la corriente o corrientes encerradas por ella:
>
> $$\oint \vec{B} \cdot d\vec{L} = \mu_0 \sum I$$

André Marie Ampère

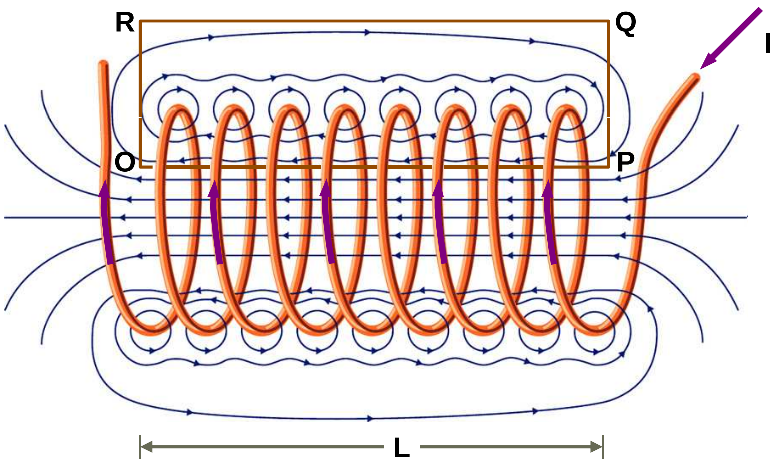


# 2.5 LA LEY DE AMPÉRE (II)

Campo magnético debido a un solenoide

- Un solenoide es un conjunto de espiras circulares paralelas que pueden ser recorridas por la misma corriente
- Por el solenoide de longitud L, formado por N espiras circula una corriente I. La circulación a lo largo del rectángulo OPQR es:

$$\vec{B} \cdot \vec{OR} + \vec{B} \cdot \vec{RQ} + \vec{B} \cdot \vec{QP} + \vec{B} \cdot \vec{PO}$$




- La corriente encerrada por este rectángulo es NI. Aplicando la ley de Ampère:

$$\vec{B} \cdot \vec{OR} + \vec{B} \cdot \vec{RQ} + \vec{B} \cdot \vec{QP} + \vec{B} \cdot \vec{PO} = \mu_0 (NI)$$

- Como el campo exterior es nulo, $\vec{B} \cdot \vec{RQ} = 0$ y los vectores $\vec{QP}$ y $\vec{OR}$ son perpendiculares al campo ($\vec{B} \cdot \vec{QP} = \vec{B} \cdot \vec{OR} = 0$), resulta:

$$\vec{B} \cdot \vec{PO} = \vec{B} \cdot \vec{L} = BL\cos 0 = BL = \mu_0 (NI)$$

$B = (\mu_0 \cdot N \cdot I) / L$ Campo magnético en interior del solenoide.

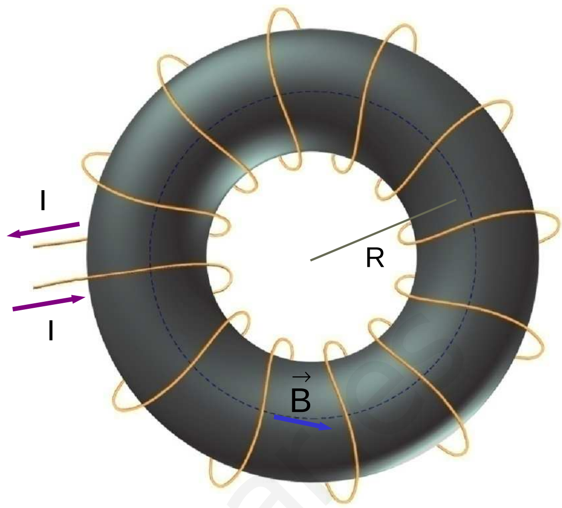
# 2.5 LA LEY DE AMPÉRE (III)



Campo magnético debido a un toroide

- Un toroide es un conjunto de espiras circulares arrolladas a un núcleo de hierro en forma de anillo (anillo toroidal)
- Para calcular el campo magnético en su interior, se considera un toroide de radio medio R por el que circula una intensidad de corriente I
- Considerando al toroide como a un solenoide de longitud L = $2\pi$R, el campo magnético en su interior será:

$$B=\mu_0\frac{N}{L}I=\mu_0\frac{N}{2\pi R}I$$




Las líneas de fuerza del campo magnético son circulares y el valor de la inducción magnética es prácticamente igual en todos los puntos interiores del toroide
En el exterior, el campo magnético puede considerarse nulo





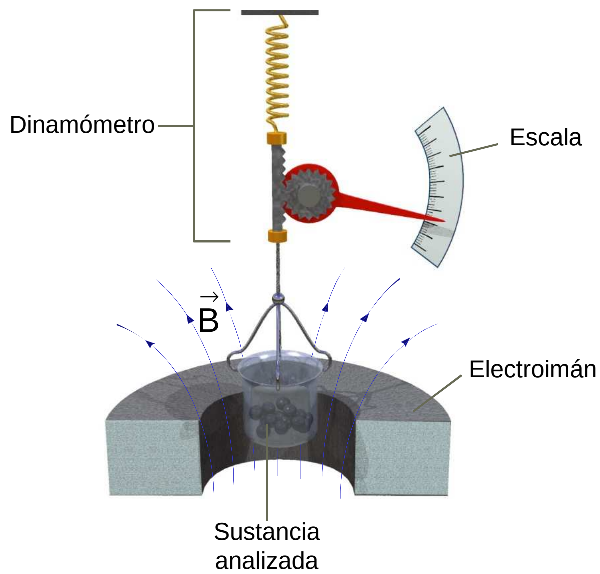
# 2.6 MAGNETISMO NATURAL



- En los átomos, los electrones en su movimiento alrededor del núcleo y en su giro sobre sí mismos, constituyen pequeñas espiras de corriente que generan un campo magnético, comportándose como pequeños imanes

Los efectos de estos pequeños imanes atómicos pueden acumularse o anularse entre sí.

- No todas las sustancias se comportan del mismo modo en presencia de un campo magnético
- Esto se comprueba, introduciéndola por uno de los extremos del electroimán y midiendo la fuerza que ejerce el campo magnético sobre ellas
- Según su comportamiento, se clasifican:
  - sustancias diamagnéticas
  - sustancias paramagnéticas
  - sustancias ferromagnéticas

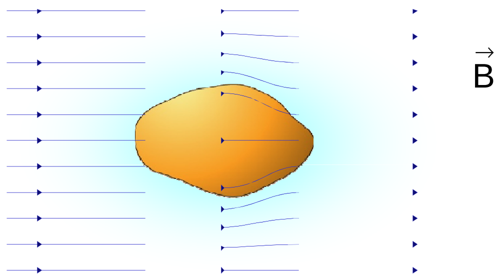



Medida de la fuerza magnética sobre una sustancia

# 2.6 MAGNETISMO NATURAL (II)

Sustancias diamagnéticas

Permeabilidad magnética
$\mu \leq 1$




Comportamiento de una sustancia diamagnética

- El momento magnético de cada átomo es cero
- No presenta efectos magnéticos observables

El momento magnético de cada átomo es el resultante de los momentos magnéticos de sus electrones (debidos a los movimientos orbitales y espín).

- Al situar la sustancia en un campo externo, se induce un campo magnético muy débil de sentido opuesto al externo que tiende a alejar la sustancia del imán
- Su permeabilidad magnética siempre es inferior a la del vacío $\mu_o$
- El agua, el cloruro sódico, el alcohol, el oro, la plata, el cobre, … son diamagnéticas

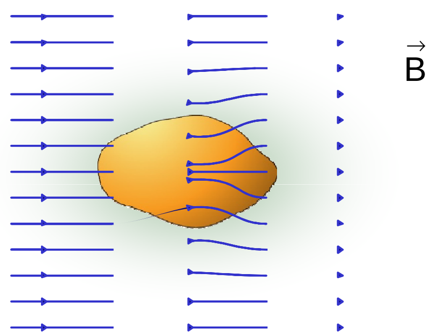




# 2.6 MAGNETISMO NATURAL (III)

Sustancias paramagnéticas

Permeabilidad magnética
$\mu \geq 1$




Comportamiento de una sustancia paramagnética

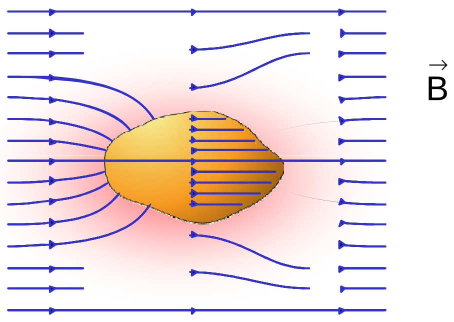
- El momento magnético de cada átomo no es cero debido al movimiento orbital de sus electrones y a su espín
- Al situar la sustancia en un campo externo, los momentos magnéticos tienden a alinearse con él, si bien no se consigue una alineación total debida a la agitación térmica
- Se genera un campo magnético resultante que es la causa de atracción hacia las zonas más intensas del campo
- Su permeabilidad magnética siempre es superior a la del vacío $\mu_o$
- El estaño, platino, oxígeno y aluminio, son paramagnéticas (atraídas débilmente por los imanes)
- El paramagnetismo aumenta al disminuir la temperatura, siendo máximo cerca del cero absoluto

# 2.6 MAGNETISMO NATURAL (IV)

Sustancias ferromagnéticas

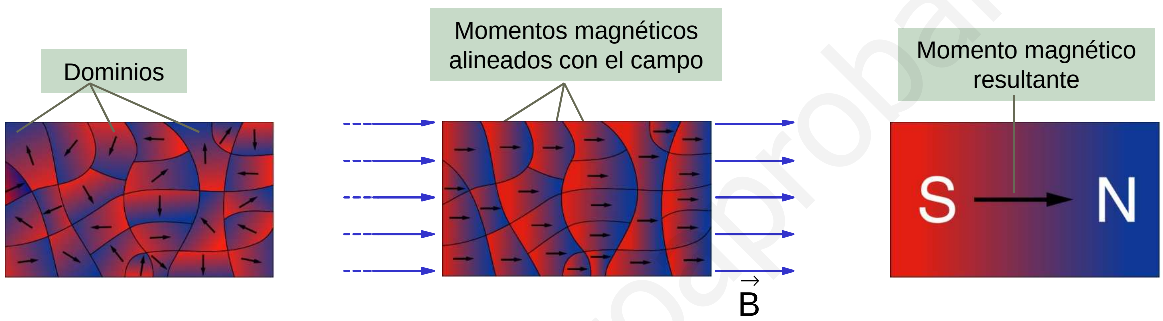
Permeabilidad magnética
$\mu >>> 1$

- Son sustancias atraídas muy intensamente por los imanes (ej. hierro, cobalto o el níquel)
- Sus efectos desaparecen por encima de una temperatura, característica de cada sustancia, llamada punto de Curie
- Sus átomos están agrupados en grandes dominios, y en cada uno de ellos, los momentos magnéticos de todos sus átomos, presentan una misma orientación debido a la interacción entre ellos



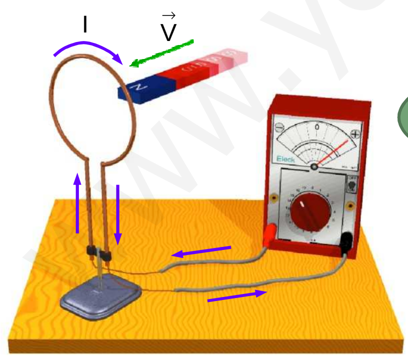

Comportamiento de una sustancia ferromagnética

- Por encima del punto de Curie, la agitación térmica desalinea los dominios, y la sustancia pasa a comportarse como paramagnética

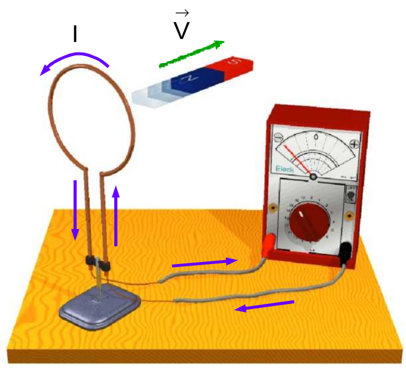





# 3. INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA.




Experiencias de Faraday

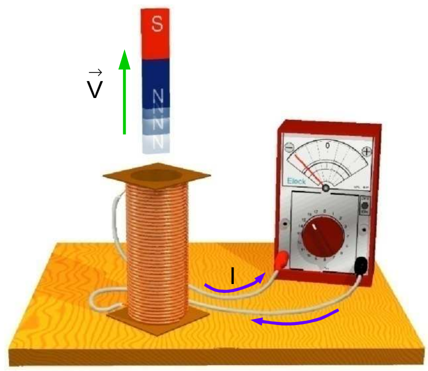



- Michael Faraday demostró mediante un experimento, que se podía generar una corriente eléctrica inducida a partir de un campo magnético
- Al acercar el imán a una espira conductora que no está conectada a ninguna fuente de alimentación eléctrica, el galvanómetro detectaba el paso de corriente mientras el imán estuviera en movimiento
- El sentido de la corriente al acercar el imán es opuesto al que tiene cuando se aleja
- Si se mantiene fijo el imán y se mueve la espira, el resultado es el mismo

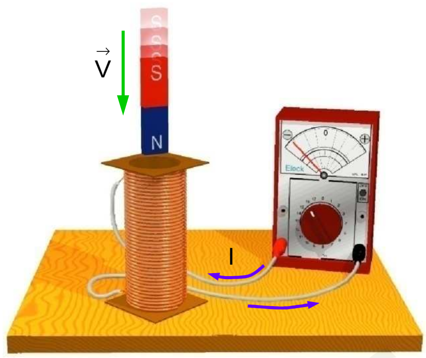
Aparece una corriente inducida mientras haya movimiento relativo entre la espira y el imán

# 3. INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA (II)






Al sacar el imán se produce una corriente inducida




Al introducir el imán se produce la misma corriente inducida pero de sentido contrario

- Esto significa que se ha producido en el circuito una fuerza electromotriz que ha dado lugar a la corriente. Este fenómeno se denomina ***inducción electromagnética***

En determinadas condiciones se induce en un circuito una fuerza electromotriz capaz de generar corriente eléctrica sin establecer conexiones con ninguna fuente de alimentación

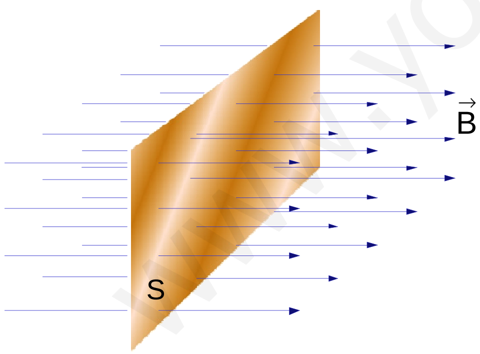
La ***inducción electromagnética*** consiste en la aparición de una ***corriente eléctrica*** en un circuito cuando ***varía*** el número de líneas de ***inducción magnética*** que lo atraviesan.



# 3.1 FLUJO MAGNÉTICO



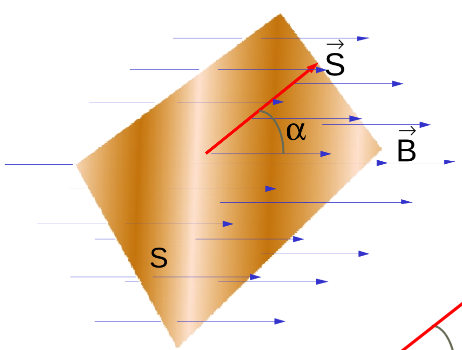
Flujo magnético a través de una superficie plana

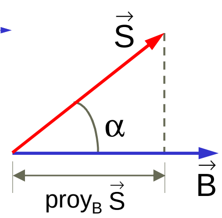



## Placa perpendicular al campo magnético

El producto B·S se denomina ***flujo magnético*** y representa el número de líneas de inducción que atraviesan la superficie

$$\phi = \vec{B}\cdot\vec{S} = B \cdot S \cdot \cos\alpha = B \cdot S \cdot \cos 0 \rightarrow \phi = B\cdot S \text{ (Wb)}$$




Superficie plana formando un ángulo con la dirección de $\vec{B}$

## Si forma un ángulo con el campo magnético

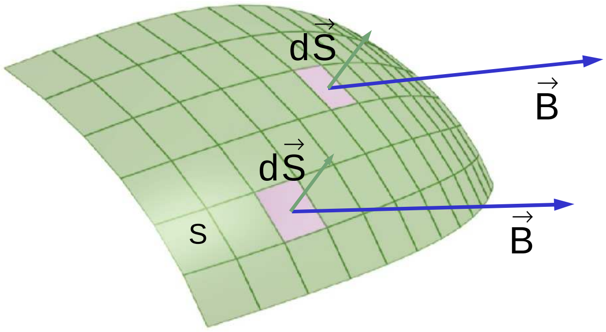
Para hallar el flujo se proyecta la superficie según la dirección del campo

$$\phi = \vec{B}\cdot\vec{S} \rightarrow \phi = B \cdot S \cdot \cos\alpha \text{ (Wb)}$$

La unidad de flujo en el S.I. es el ***weber (wb)***, que se define como el flujo magnético que atraviesa una superficie de 1 $m^2$ situada perpendicularmente a un campo de 1 T

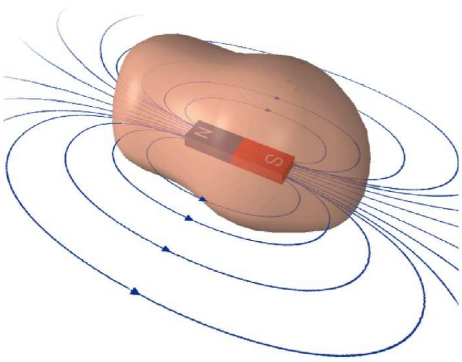
# 3.1 FLUJO MAGNÉTICO (II)

Flujo magnético a través de una superficie cualquiera




- El flujo elemental $d\phi$ para cada elemento de superficie $d\vec{S}$ será $d\phi = \vec{B}.d\vec{S}$
- El flujo a través de toda la superficie es:

$$\phi = \int_S \vec{B}.d\vec{S}$$



Líneas de inducción

- En las ***superficies cerradas***, la imposibilidad de obtener un polo magnético aislado implica que ***las líneas de inducción magnéticas se cierran sobre sí mismas***
- Cada línea de inducción atraviesa un número par de veces la superficie cerrada, siendo el ***flujo total nulo***





# 3.2 LAS LEYES DE FARADAY-HENRY Y DE LENZ

Ley de Faraday – Henry

- De las experiencias de Faraday se deduce que ***La fuerza electromotriz*** $\varepsilon$ inducida en un circuito es igual a la ***variación del flujo magnético*** $\phi$ que lo atraviesa por unidad de tiempo:

$$\varepsilon = \frac{d\phi}{dt} \quad (V) \qquad \phi = B \cdot S \cdot \cos\alpha \ (Wb)$$

- En el ***caso de una espira***, al acercar o alejar el imán, la variación del flujo magnético aumentaba o disminuía porque así lo hacía el campo magnético
- Cuando se mantienen fijos el imán y la espira, si esta se deforma, el flujo a través de ella varía al modificar su superficie, aunque el campo permanezca constante, en definitiva, podemos ***inducir una corriente variando cada uno de los tres factores*** que intervienen en la expresión matemática del flujo.
- *La corriente inducida es mayor cuanto mayor sea la rapidez de la variación de su flujo*, es decir, cuanto más rápidamente acerquemos o alejemos el imán a la espira, o cuanto más rápida sea su deformación

La ley de Faraday-Henry explica el valor de la fuerza electromotriz inducida, pero no su sentido, que fue investigado por Lenz

# 3.2 LAS LEYES DE FARADAY-HENRY Y DE LENZ (II)



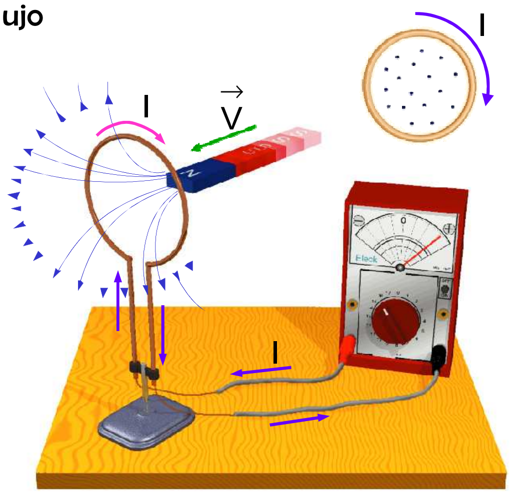
Ley de Lenz

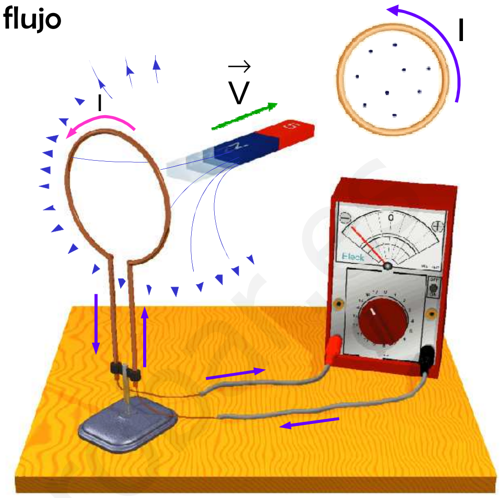
- El ***sentido*** de la ***corriente inducida*** es tal que se ***opone*** a la ***causa que la produce***.

$$\varepsilon = -\frac{d\phi}{dt} \quad (V)$$

$$I = \frac{\varepsilon\,(Voltaje)}{R\,(Resistencia)} \quad (A)$$

- Al acercar el imán a la espira, aumenta el campo magnético que la atraviesa, y el flujo
- Al alejar el imán de la espira, disminuye el campo magnético que la atraviesa, y el flujo




- La corriente inducida circula en el sentido en el que se genera un campo magnético por la espira, que tiende a compensar la variación (incremento o disminución) de flujo magnético.

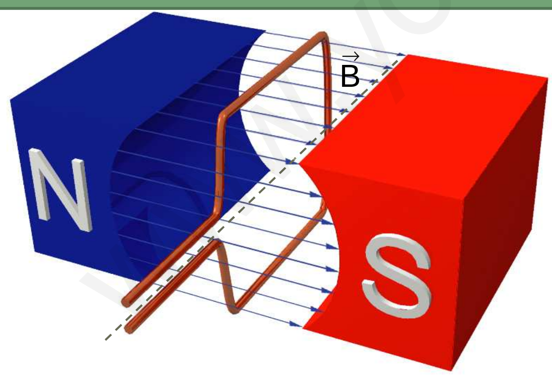
- Podemos calcular la intensidad de la corriente inducida en un circuito, aplicando la ley de Ohm.
- El signo positivo de la fem indica que se opone a la disminución del flujo magnético. El negativo al aumento.

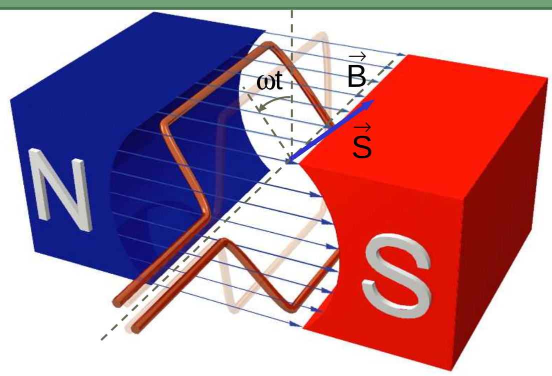


# 3.3 PRODUCCIÓN DE UNA FUERZA ELECTROMOTRIZ SINUSOIDAL



La importancia fundamental del fenómeno de la inducción electromagnética, reside en la posibilidad de ***transformar la energía mecánica en energía eléctrica***.




- La espira, situada inicialmente perpendicular al campo, gira con velocidad $\omega$ constante
- El flujo que la atraviesa es: $\phi = \vec{B}\cdot\vec{S} = BS\cos\alpha$
- Por ser un MCU: $\alpha = \omega\, t$

$\Rightarrow \boxed{\phi = B\,S\cos\omega t}$ $\qquad \boxed{\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt}}$

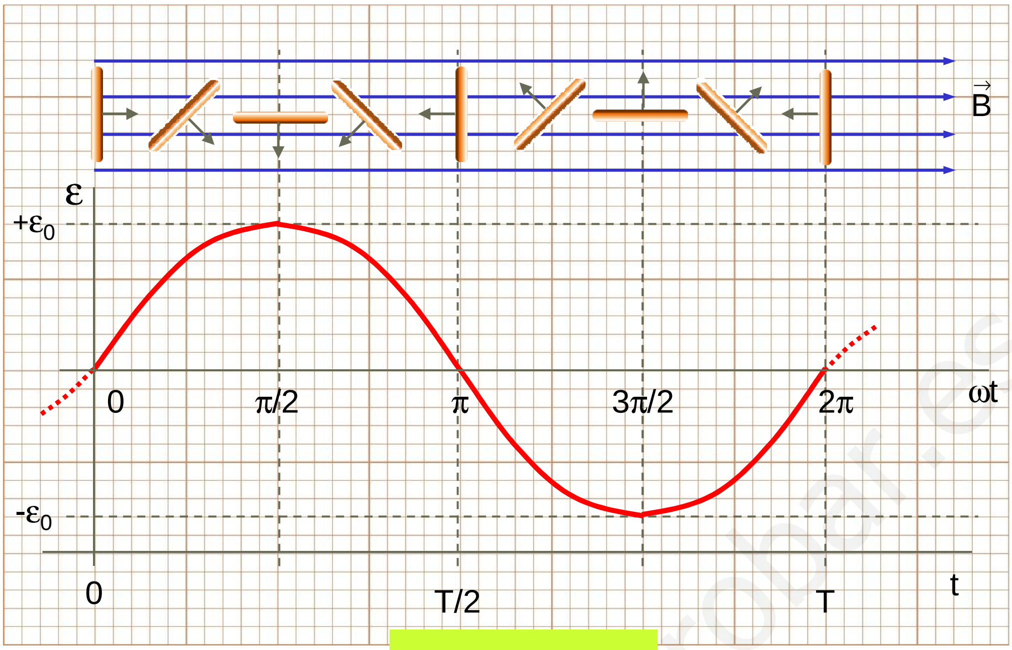
- Según Faraday-Henry y Lenz: $\boxed{\varepsilon = BS\,\omega\,\text{sen}\,\omega t}$
- Para una bobina de N espiras: $\varepsilon = NBS\,\omega\,\text{sen}\,\omega t$
- La f.e.m. máxima es: $\boxed{\varepsilon_0 = NBS\,\omega}$

$\Rightarrow \boxed{\varepsilon = \varepsilon_0\,\text{sen}\,\omega t \quad (V)}$

# 3.3 PRODUCCIÓN DE UNA FUERZA ELECTROMOTRIZ SINUSOIDAL (II)



Gráfica de la fuerza electromotriz sinusoidal




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

La corriente inducida en la bobina se denomina ***corriente alterna*** porque el sentido de la corriente varía periódicamente con el tiempo dos veces cada período.



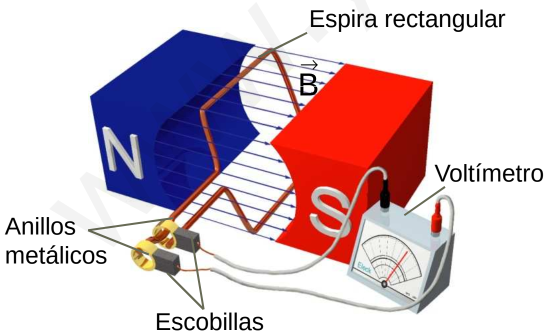
# 3.4 GENERADORES DE CORRIENTE .

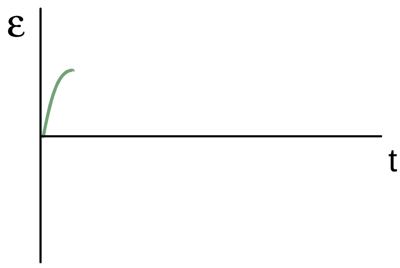


Generadores de corriente alterna

Un generador eléctrico es cualquier dispositivo que transforma una determinada forma de energía en energía eléctrica.

ESQUEMA DE UN ALTERNADOR



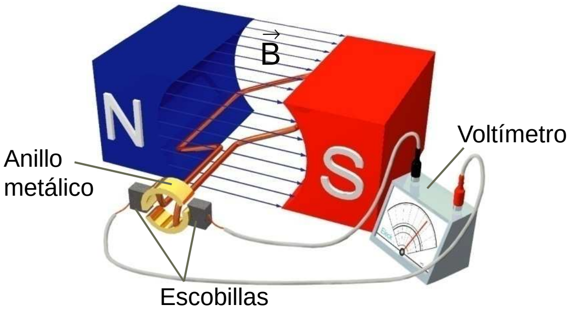

- La bobina gira con velocidad cte en un campo magnético uniforme creado por el imán
- Se induce así una f.e.m. sinusoidal que varía de sentido 2 veces cada período ***(corriente alterna)***
- Los extremos de la espira se conectan al circuito externo mediante escobillas
- La energía mecánica necesaria para girar la bobina se transforma en energía eléctrica
- Alternadores más complejos constan de inductor (imán o electroimán) e inducido (circuito donde se produce la f.e.m.). La parte móvil es el rotor y la fija, el estátor

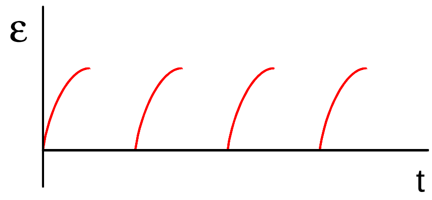
# 3.4 GENERADORES DE CORRIENTE (II)



Generadores de corriente continua

ESQUEMA DE UNA DINAMO




- Si se sustituyen los dos anillos metálicos del generador por un anillo divido en dos, cambiando de esta forma la polaridad en cada vuelta, se obtiene una ***dinamo***
- La corriente producida es una corriente pulsante
- Modificando el diseño del anillo (dividiéndolo en trozos) se puede lograr una corriente cuyo valor sea casi constante ***(corriente continua)***



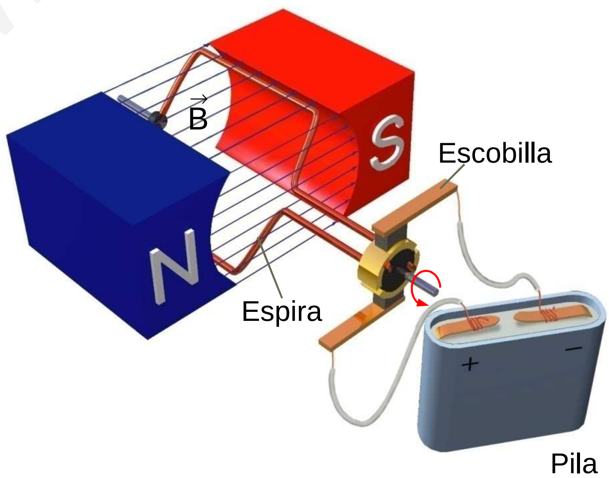


# 3.5 MOTORES ELÉCTRICOS.



ESQUEMA DE UN MOTOR ELÉCTRICO

El campo magnético del imán ejerce sobre la espira por la que circula corriente un par de fuerzas que la hacen girar. Así se consigue realizar trabajo mecánico.




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

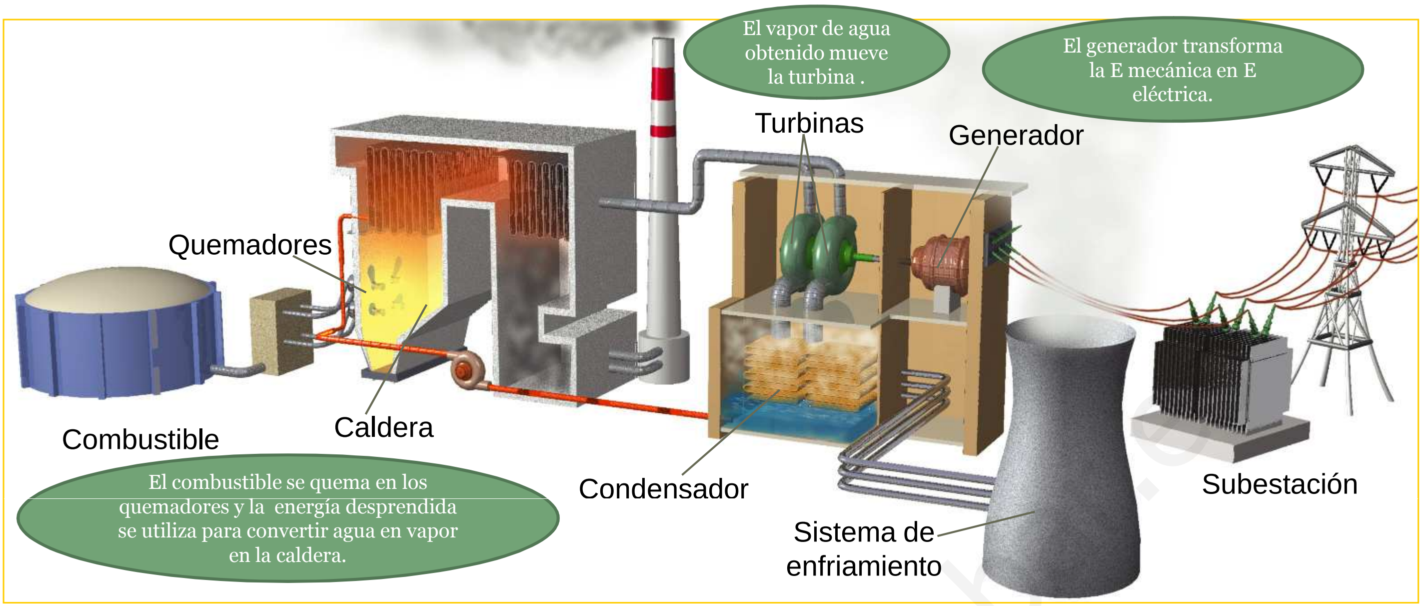
Ley de Laplace

- Al circular la corriente eléctrica por la espira, se produce en ella un movimiento de giro de modo que ***la energía eléctrica se convierte en energía mecánica***
- Puede diseñarse un motor que funcione igualmente con corriente continua y alterna (motor universal)

# 3.6 PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA.



Central termoeléctrica clásica




- Produce energía eléctrica a partir de la energía desprendida en la reacción química de combustión que tiene lugar al quemar un combustible fósil (carbón, gasóleo o gas). La energía primaria es ***energía química.***



# 3.6 PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA (II)



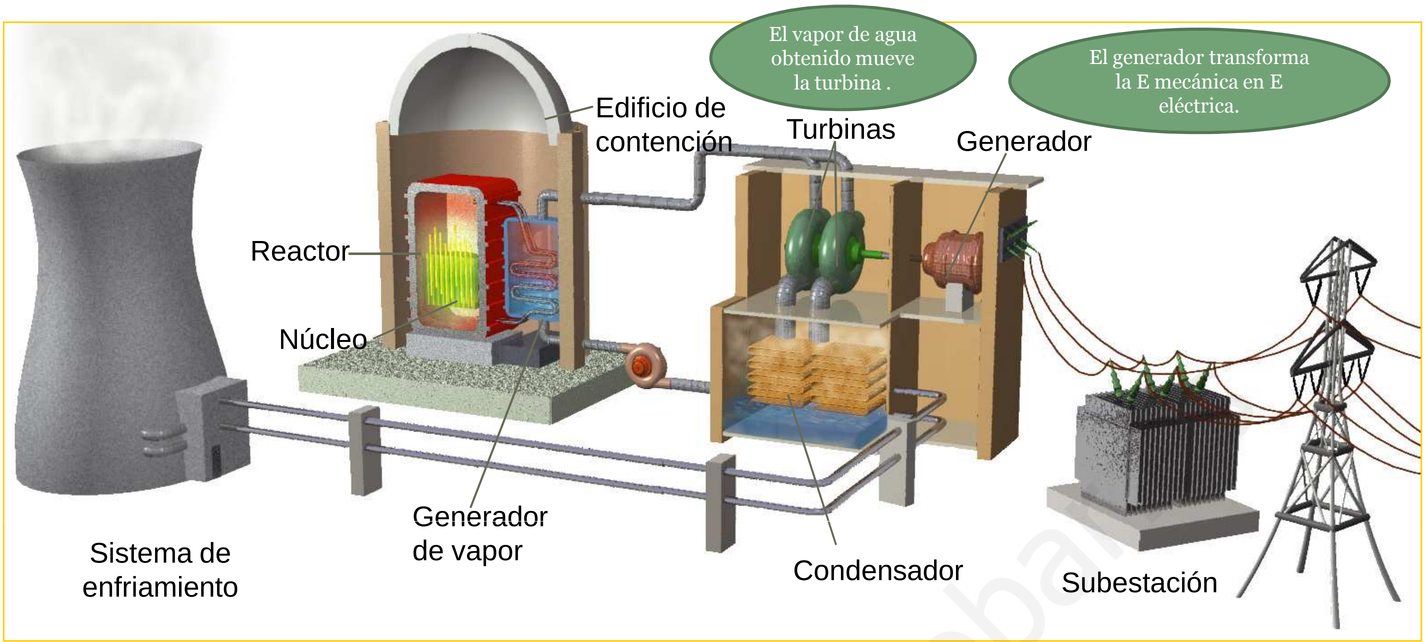
Central hidroeléctrica


- Aprovecha mediante un desnivel, la ***energía potencial gravitatoria del agua*** que transporta un río, por medio de una presa.
- El agua mueve las turbinas al caer por el desnivel

# 3.6 PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA (III)



Central termoeléctrica nuclear




- Aprovecha la energía desprendida en la fisión de núcleos atómicos (uranio), para convertir un líquido (agua) en vapor a alta temperatura que incide sobre los álabes de las turbinas. La energía primaria es la ***energía nuclear***.





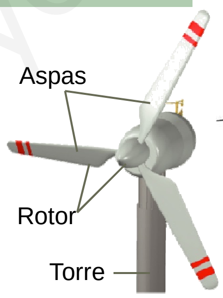
# 3.6 PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA (IV)

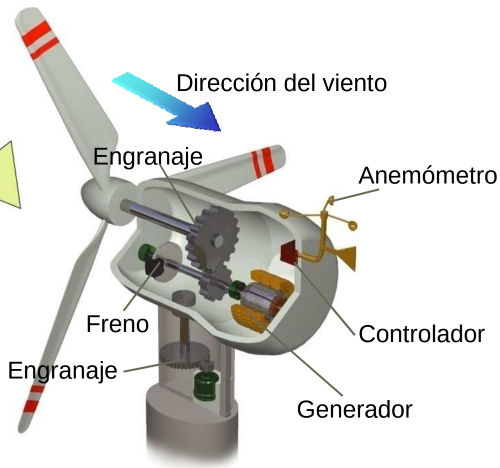


Otros tipos de centrales eléctricas

## ESQUEMA DE UN AEROGENERADOR

- Las turbinas son accionadas por aspas de molinos que mueve el viento. La energía primaria es la ***energía cinética del viento***.

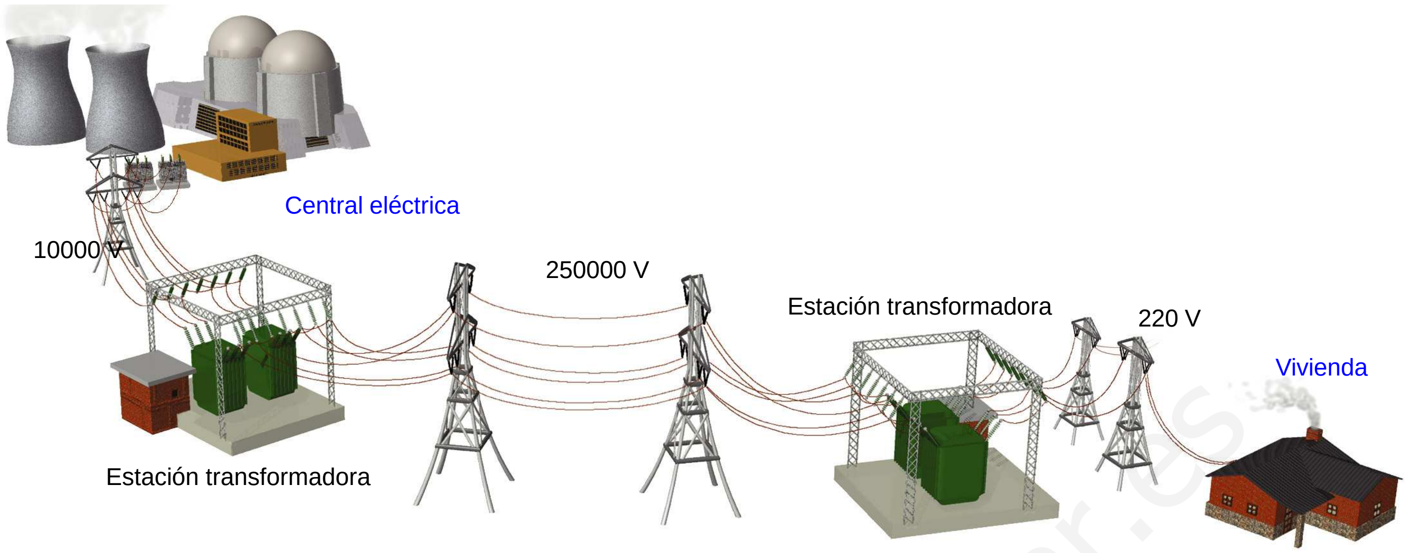



## CENTRALES TÉRMICAS SOLARES

- La energía eléctrica se obtiene sin necesidad de turbinas mediante ***células fotovoltaicas*** que generan electricidad al ser iluminadas por el Sol. La energía primaria es la energía de la ***radiación solar***.

# 3.7 TRANSPORTE Y DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA.




- El transporte de energía eléctrica desde las centrales hasta el consumidor, debe hacerse a ***voltajes muy altos e intensidades muy pequeñas*** para evitar pérdidas por disipación calorífica