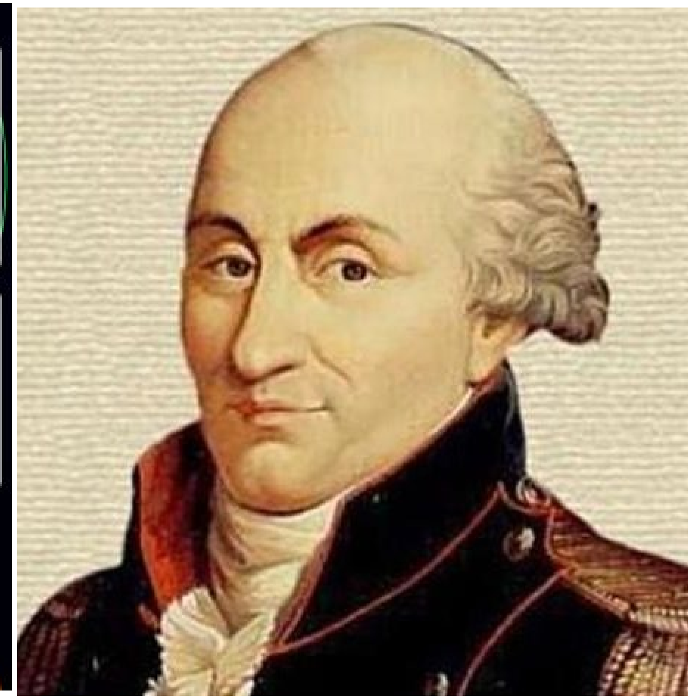
FÍSICA

2º CURSO

BLOQUE 2: ELECTROMAGNETISMO

03. CAMPO ELÉCTRICO



Se organiza alrededor de los conceptos de campos eléctrico y magnético, con el estudio de sus fuentes y de sus efectos, además de los fenómenos de inducción y las ecuaciones de Maxwell. También se incluye una breve revisión de la corriente eléctrica.

Rafael Artacho Cañadas

ÍNDICE

1.1. La carga eléctrica

La **carga eléctrica** en movimiento es la propiedad de la materia que señalamos como causa de la interacción electromagnética.

- La **unidad** en el SI es el **culombio** (**C**), cantidad de carga que atraviesa una sección de conductor en un segundo cuando la intensidad de corriente es de un amperio.

- La carga eléctrica está **cuantizada** y su unidad más elemental es la del electrón,

$$e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ C$$

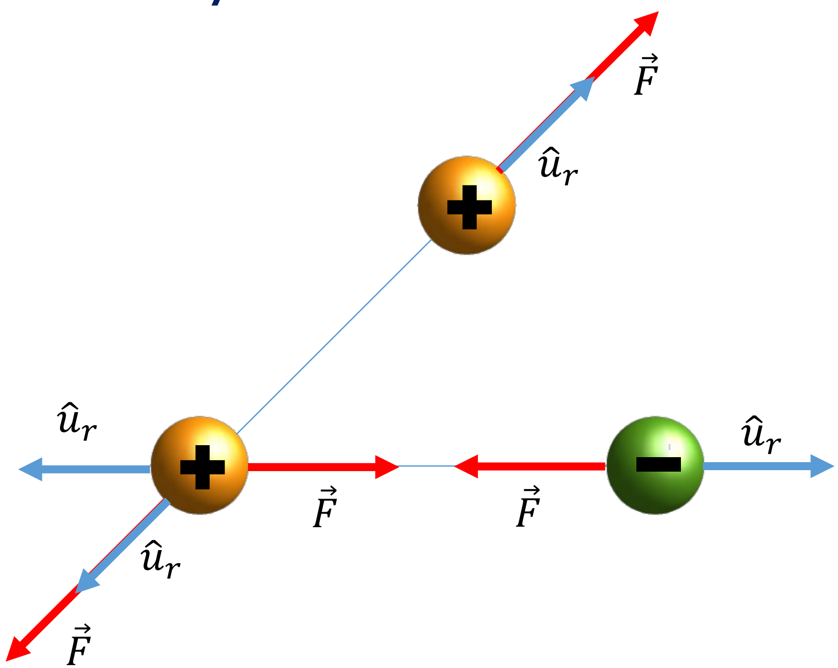
- Existen dos tipos de cargas, **positiva** y **negativa**, de este modo la interacción puede ser atractiva o repulsiva.

- La carga eléctrica **se conserva** en cualquier proceso que tenga lugar en un sistema aislado.

ACTIVIDADES

1. Determina la carga correspondiente a 1 mol de electrones. Dicha carga se conoce comúnmente como la unidad de Faraday.
   Sol: $-96\,352\ C$
2. Determina la carga correspondiente aun mol de los siguientes iones: ion cloruro, ion sodio, ion hierro (III) e ion carbonato.
   Sol: $-96\,352\ C; 96\,352\ C; 289\,056\ C; -192\,704\ C$
3. ¿Qué cantidad de electrones es necesaria para obtener una carga total de $-1{,}2\ mC$?
   Sol: $7{,}5 \cdot 10^{15}\ electrones$

1.2. La ley de Coulomb



La fuerza con la que se atraen o repelen dos cargas es directamente proporcional al producto de las cargas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa.

$$\vec{F} = k\frac{qq'}{r^2}\hat{u}_r \qquad k \cong 9 \cdot 10^9\ N \cdot m^2/C^2$$

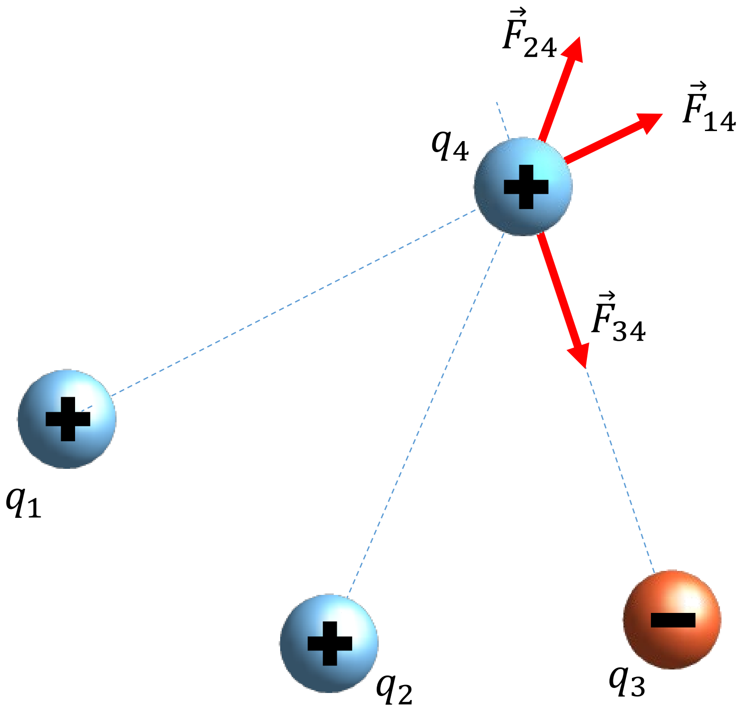
k no es una constante universal: $$k = \frac{1}{4\pi\varepsilon}$$

$\boldsymbol{\varepsilon}$ es la **permitividad** del medio, en el vacío, $$\varepsilon_0 \cong 8{,}9 \cdot 10^{-12}\frac{C^2}{N \cdot m^2}$$

- La fuerza varía conforme al **inverso del cuadrado de la distancia**.
- Es **central** y, por tanto, **conservativa**.
- Depende del medio

$$\boldsymbol{\vec{F} = \frac{1}{4\pi\varepsilon}\frac{qq'}{r^2}\hat{u}_r}$$

Principio de superposición



- La fuerza de interacción entre dos cargas puntuales no varía en presencia de otras cargas.
- La fuerza resultante que actúa sobre una carga dada es igual a la suma de las fuerzas individuales que se ejercen sobre dicha carga.

$$\vec{F}_4 = \vec{F}_{14} + \vec{F}_{24} + \vec{F}_{34}$$

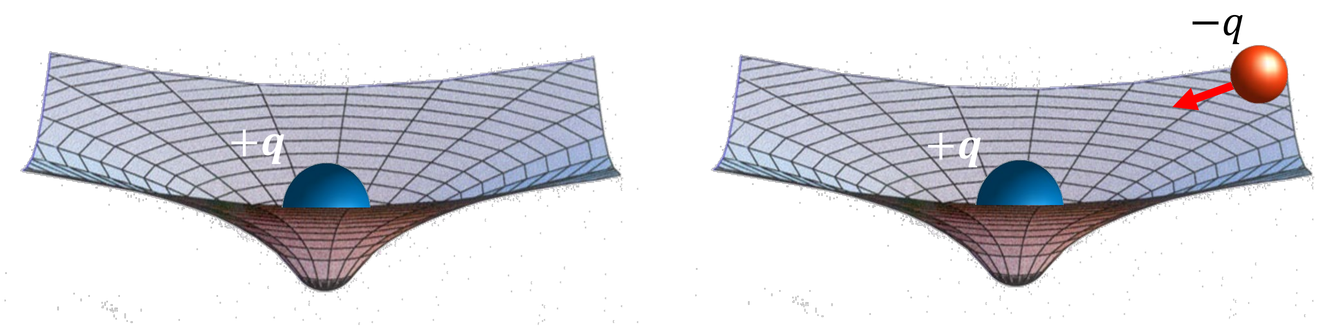
$$\vec{F}_4 = k\left(\frac{q_1 q_4}{{r_{14}}^2}\hat{u}_{14} + \frac{q_2 q_4}{{r_{24}}^2}\hat{u}_{24} + \frac{q_3 q_4}{{r_{34}}^2}\hat{u}_{34}\right)$$

ACTIVIDADES

4. Tres cargas, $q_1 = +4\,\mu C$, $q_2 = -10\,\mu C$ y $q_3 = -6\,\mu C$, están situadas, respectivamente, en los puntos $(0, 0'3), (0, 0)\ y\ (0'2, 0)$. Determina la fuerza que actúa sobre la carga q_3.
   Datos: $k = 9 \cdot 10^9\ N\ m^2\ C^{-2}$
   Sol: $\vec{F}_3 = 12{,}58\ \hat{\imath} + 1{,}38\ \hat{\jmath}; F = 12{,}65\ N$

5. Dos cargas, q_1 y q_2, de $+10\,nC$ se encuentran en los puntos (0, 0) y (8, 0) de un sistema de referencia XY medido en metros. Determina la fuerza neta que ambas cargas ejercen sobre una tercera, q_3, de $+5\,nC$ cuando esta se encuentra situada en los puntos: i) A (4, 0); ii) B (4, 4)
   Datos: $k = 9 \cdot 10^9\ N\ m^2\ C^{-2}$
   Sol: a) $0\ N$; b) $2 \cdot 10^{-8}\ \hat{\jmath}\ N$

Campo eléctrico es la región del espacio cuyas propiedades son alteradas por la presencia de una carga.



El **campo** esta definido por:

- Su **intensidad** en cada punto (desde una perspectiva dinámica)
- Su **potencial** en cada punto (desde un punto de vista energético)

Efecto del campo sobre una carga testigo:

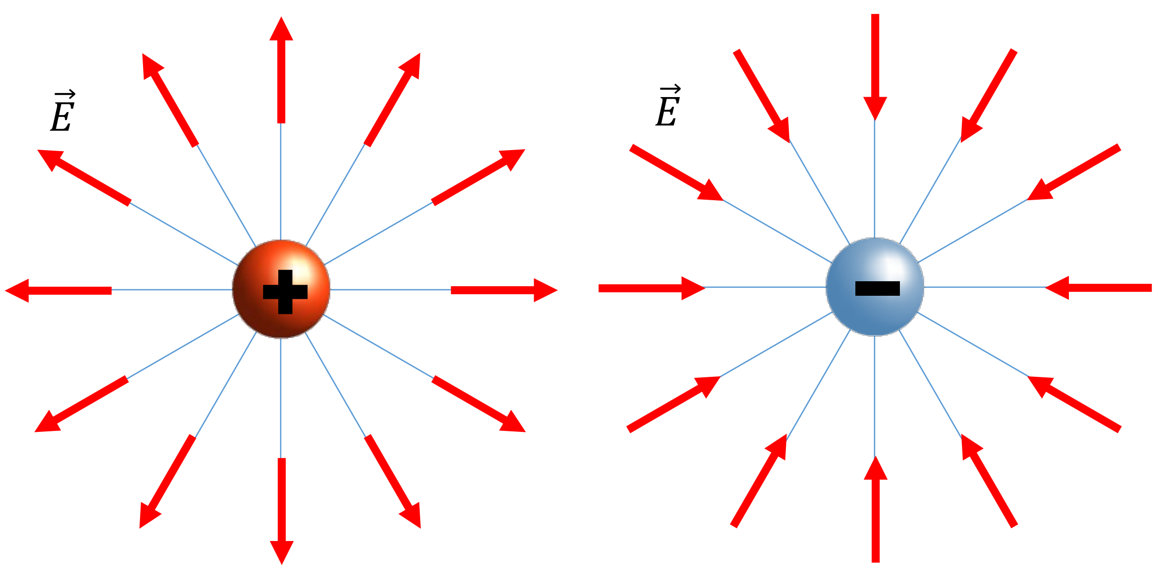
- La **fuerza** que actúa sobre la carga (desde un punto de vista dinámico)
- La **energía potencial** (desde un punto de vista energético)

3.1. Intensidad del campo eléctrico

Se define intensidad del campo eléctrico, $\vec{\boldsymbol{E}}$, en un punto como la fuerza que actúa sobre la unidad de carga testigo positiva colocada en dicho punto,

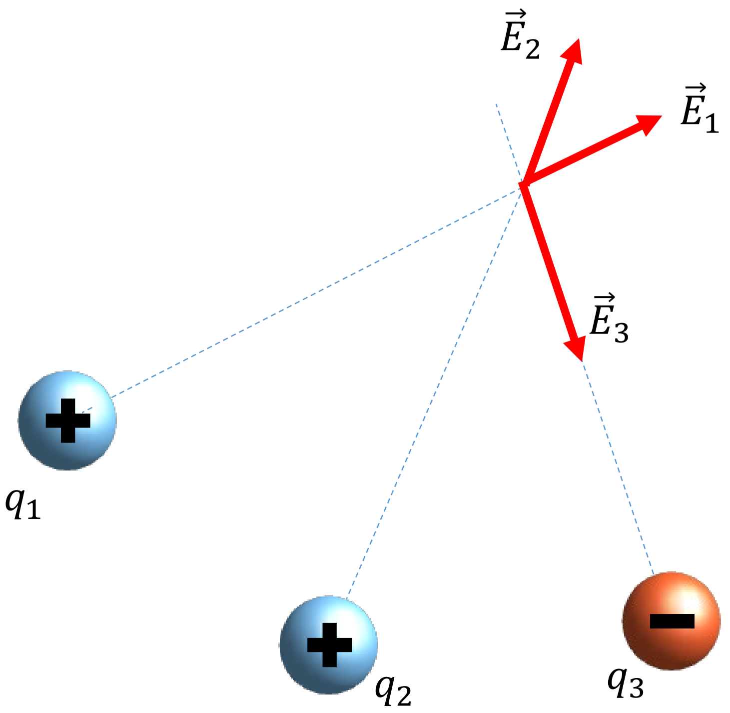
$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q'} \qquad (unidad\ es\ N\ C^{-1})$$

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q'} = \frac{k\,\frac{qq'}{r^2}\,\hat{u}_r}{q'} \qquad \Longrightarrow \qquad \vec{E} = k\,\frac{q}{r^2}\,\hat{u}_r$$



El sentido del campo coincide con el sentido del movimiento que adquiriría una carga testigo positiva colocada en reposo en un punto del campo.

Principio de superposición

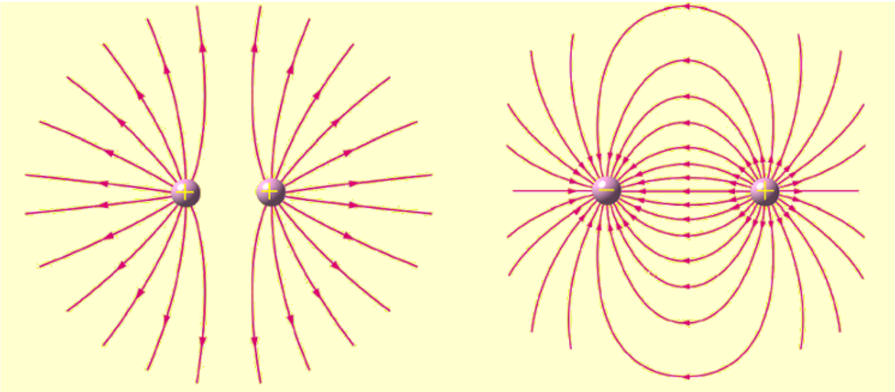


La intensidad del campo creado por un número cualquiera de cargas puntuales es igual a la suma de los campos originados individualmente por cada una de las cargas.

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 = \sum_{i=1}^{n} \vec{E}_i = k\left(\sum_{i=1}^{n} \frac{q_i}{{r_i}^2}\hat{u}_i\right)$$

3.2. Representación del campo eléctrico mediante líneas de fuerza

Las **líneas de fuerza** se trazan de modo que su dirección y sentido coinciden en cada punto del espacio con los de la fuerza que actuaría sobre una carga testigo positiva.



- Son radiales y simétricas en cargas puntuales (**fuentes** y **sumideros**)
- Su número es proporcional al valor de la carga.
- Son tangentes al vector $\vec{E}$ en cada punto.
- Dos líneas no pueden cortarse nuca.

ACTIVIDADES

6. Un electrón y un protón son abandonados en reposo en una región donde el campo eléctrico es $\vec{E} = 200\,\hat{\imath}\,N\,C^{-1}$. Determina: i) La fuerza que actúa sobre cada partícula; ii) La aceleración que adquieren; iii) La distancia que habrán recorrido en $1\,\mu s$.
   Datos: $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}\,C;\ m_e = 9{,}1 \cdot 10^{-31}\,kg; m_p = 1{,}67 \cdot 10^{-27}\,kg$
   Sol: i) $\vec{F}_e = -3{,}2 \cdot 10^{-17}\,\hat{\imath}\,N; \vec{F}_p = 3{,}2 \cdot 10^{-17}\,\hat{\imath}\,N$; ii) $\vec{a}_e = -3{,}5 \cdot 10^{13}\,\hat{\imath}\ m\,s^{-2};\ \vec{a}_p = 1{,}91 \cdot 10^{10}\,\hat{\imath}\ m\,s^{-2}$; iii) $\Delta x_e = 17{,}5\,m;\ \Delta x_p = 9{,}55 \cdot 10^{-3}\,m$.

7. Se aplica un campo de $500\,N\,C^{-1}$ a una disolución de cloruro de sodio. Compara las aceleraciones que adquieren los iones cloruro y los iones sodio. Ten en cuenta que la masa atómica relativa del cloro es 35,5, y la del sodio, 23.
   Datos: $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}\,C; 1\,F = 96\,352\,C$
   Sol: $a_{Cl^-} = -1{,}357 \cdot 10^9 m\,s^{-2}; a_{Na^+} = 2{,}094 \cdot 10^9\,m\,s^{-2}$

8. Dos pequeñas esferas cargadas están separadas una distancia de 5 cm. La carga de una de las esferas es cuatro veces la de la otra y entre ambas existe una fuerza de atracción de 0,15 N. Calcule la carga de cada esfera y el módulo del campo eléctrico en el punto medio del segmento que las une.
   Dato: $k = 9 \cdot 10^9\,N\,m^2\,C^{-2}$
   Sol: $q_1 = 1{,}02 \cdot 10^{-7}\,C;\ q_2 = 4{,}08 \cdot 10^{-7}\,C; E = 4406400\,N\,C^{-1}$

ACTIVIDADES

9. Determine la carga negativa de una partícula, cuya masa es 3,8 g, para que permanezca suspendida en un campo eléctrico de $4500\,N\,C^{-1}$. Haga una representación gráfica de las fuerzas que actúan sobre la partícula.
   Dato: $g = 9{,}8\,m\,s^{-2}$
   Sol: $q = -8{,}28 \cdot 10^{-6}\,C$

10. Dos cargas de $-2 \cdot 10^{-6}\,C$ y $+4 \cdot 10^{-6}\,C$ y se encuentran fijas en los puntos (0, 0) y (0, 2) m, respectivamente. Calcule el valor del campo eléctrico en el punto (1, 1) m.
    Dato: $k = 9 \cdot 10^{9}\,N\,m^{2}\,C^{-2}$
    Sol: $\vec{E} = 6363{,}96\,\hat{\imath} - 19091{,}88\,\hat{\jmath}\,N\,C^{-1}$

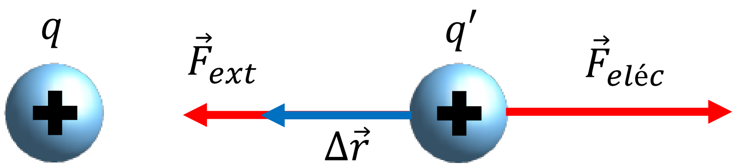
11. Dos partículas puntuales iguales, de 5 g y cargadas eléctricamente, están suspendidas del mismo punto por medio de hilos, aislantes e iguales, de 20 cm de longitud. El ángulo que forma cada hilo con la vertical es de 12^{0}. i) Calcule la carga de cada partícula y la tensión en los hilos; ii) Determine razonadamente cuánto debería variar la carga de las partículas para que el ángulo permaneciera constante si duplicáramos su masa.
    Dato: $k = 9 \cdot 10^{9}\,N\,m^{2}\,C^{-2}$
    Sol: i) $q = 8{,}94 \cdot 10^{-8} C; T = 0{,}05\,N$; ii) $q' = \sqrt{2}\,q$

4.1. Energía potencial electrostática

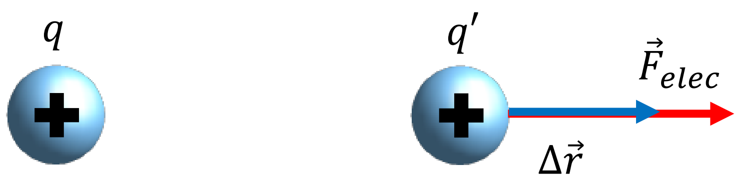
Trabajo realizado por un campo eléctrico

$$W=\int_{\infty}^{r}\vec{F}\cdot d\vec{r}=\int_{\infty}^{r}k\frac{qq'}{r^2}\hat{u}_r\cdot d\vec{r}=kqq'\int_{\infty}^{r}\frac{dr}{r^2}=kqq'\left[-\frac{1}{r}+\frac{1}{\infty}\right]\quad\Longrightarrow\quad W=-k\frac{qq'}{r}$$

- $\boldsymbol{Si\ sig(q)=sig(q')}\qquad \boldsymbol{W=-\Delta E_P}\qquad\Longrightarrow\qquad \boldsymbol{E_P=k\frac{qq'}{r}}$

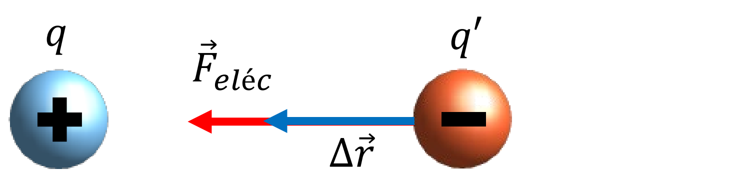


Realizamos trabajo contra el campo (aumentamos su energía potencial)

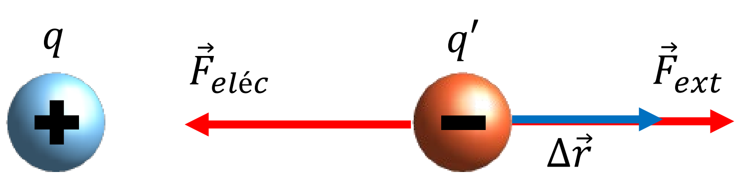


El campo realiza trabajo (disminuye su energía potencial)

- $\boldsymbol{Si\ sig(q)\neq sig(q')}\qquad \boldsymbol{W=-\Delta E_P}\qquad\Longrightarrow\qquad \boldsymbol{E_P=-k\frac{qq'}{r}}$

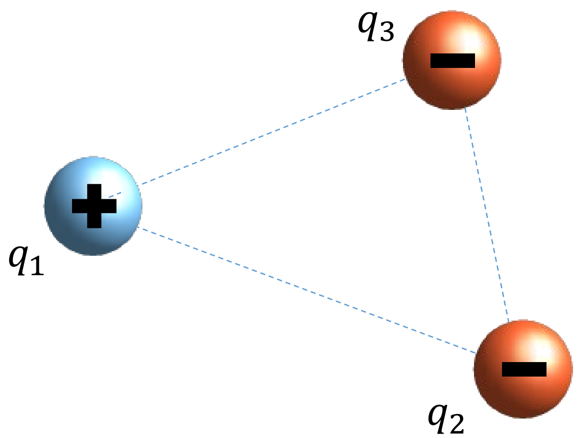


El campo realiza trabajo (disminuye su energía potencial)



Realizamos trabajo contra el campo (aumentamos su energía potencial)

Energía potencial de un sistema de partículas



$$E_P = k\left(\frac{q_1 q_2}{r_{12}} + \frac{q_1 q_3}{r_{13}} + \frac{q_2 q_3}{r_{23}}\right)$$

La **energía potencial** de un sistema de partículas es el que mide el trabajo necesario para aproximar dichas cargas a sus posiciones desde el infinito

ACTIVIDADES

12. En el átomo de hidrógeno, el electrón se encuentra sometido al campo eléctrico creado por el protón. Calcule el trabajo realizado por el campo eléctrico para llevar el electrón desde un punto P_1, situado a $5{,}3 \cdot 10^{-11}\ m$ del núcleo, hasta otro punto P_2, situado a $4{,}76 \cdot 10^{-10}\ m$ del núcleo. Comente el signo del trabajo.
    Datos: $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ C; k = 9 \cdot 10^{9}\ N\ m^2\ C^{-2}$
    Sol: $W = -3{,}86 \cdot 10^{-18}\ J$

13. Una carga de $3 \cdot 10^{-6}\ C$ se encuentra en el origen de coordenadas y otra carga de $-3 \cdot 10^{-6}\ C$ está situada en el punto (1, 1) m. Calcule el trabajo para desplazar una carga de $5 \cdot 10^{-6}\ C$ desde el punto A (1, 0) m hasta el punto B (2, 0) m, e interprete el resultado.
    Dato: $k = 9 \cdot 10^{9}\ N\ m^2\ C^{-2}$
    Sol: $W = 0{,}028\ J$

14. Determina la energía potencial electrostática de un sistema formado por cuatro partículas cargadas, $q_1 = +2\ \mu C$, $q_2 = -2\ \mu C$, $q_3 = +2\ \mu C$ y $q_4 = -2\ \mu C$, situadas en los vértices de un cuadrado de 1 m de lado. Razona el significado físico del signo del resultado.
    Dato: $k = 9 \cdot 10^{9}\ N\ m^2\ C^{-2}$
    Sol: $E_P = -0{,}0931\ J$

4.2. Potencial electrostático

El **potencial del campo eléctrico**, **V**, **en un punto**, es la energía potencial que corresponde a la energía potencial que corresponde a la unidad de carga positiva colocada en ese punto.

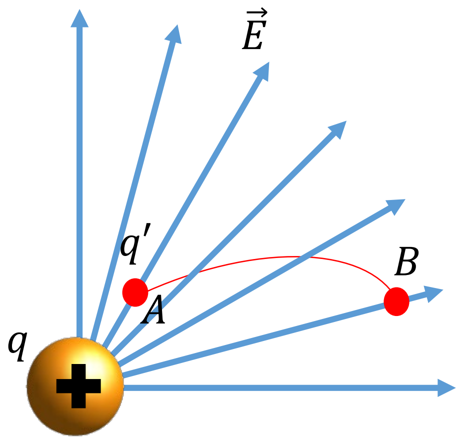
$$V(r) = \frac{E_P(r)}{q'} = k\,\frac{q}{r}$$

- El potencial en un punto es positivo si la carga que origina el campo es positiva.
- El potencial e un punto es negativo si la carga que origina el campo es negativa.

La unidad de potencial eléctrico en el SI es el J/C que se denomina **voltio** (V).

$$1\,V = 1\,J/C$$

4.3. Diferencia de potencial



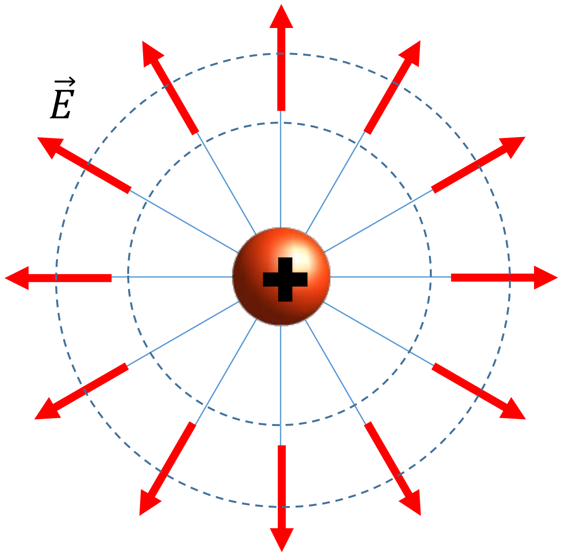
$$W = \int_A^B \vec{F} \cdot d\vec{r} = q' \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{r} = -\Delta E_P$$

$$E_P(B) - E_P(A) = -q' \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{r}$$

$$\frac{E_P(B) - E_P(A)}{q'} = V_B - V_A = -\int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{r}$$

La **diferencia de potencial** entre dos puntos A y B equivale al trabajo que debe realizarse contra el campo para desplazar la unidad de carga testigo desde A hasta B, suponiendo que no varía su energía cinética:

$$V_B - V_A = -\int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{r}$$



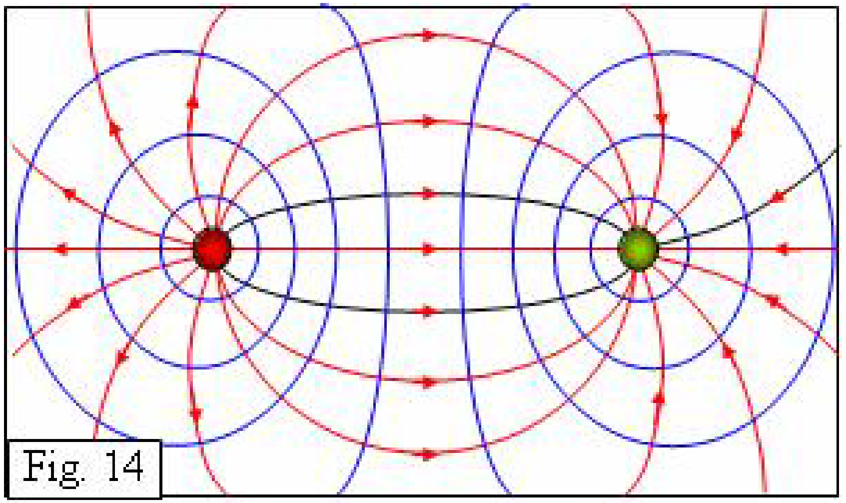


Fig. 14

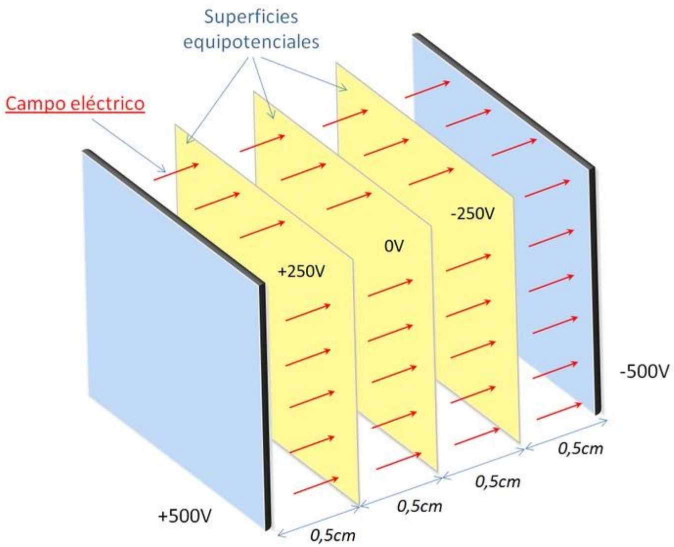
- Todos los puntos que tienen el mismo potencial conforman una **superficie equipotencial**.

- En cada punto de una superficie equipotencial el vector $\vec{E}$ es perpendicular a ella.

- Cuando una carga se desplaza por una superficie equipotencial, el campo eléctrico no realiza trabajo alguno sobre ella.

4.3. Diferencia de potencial

Diferencia de potencial en un campo eléctrico uniforme



$$V_B - V_A = -\int_A^B \vec{E}\cdot d\vec{r} = -\vec{E}\int_A^B d\vec{r} = -\vec{E}\cdot(\vec{r}_B - \vec{r}_A)$$

$$\begin{cases} \vec{E} = E\hat{\imath} \\ (\vec{r}_B - \vec{r}_A) = (x_B - x_A)\hat{\imath} + (y_B - x_A)\hat{\jmath} + (z_B - z_A)\hat{k} \end{cases}$$

$$\boxed{V_B - V_A = -E(x_B - x_A) = -Ed}$$

Cuando una carga testigo q’ se desplaza en un campo eléctrico uniforme, varía su energía potencial, de modo que:

$$E_P(B) - E_P(A) = -q'Ed$$

$$1\ eV = q'V_{AB} = 1{,}6\cdot 10^{-19}\ C\cdot 1\ V = 1{,}6\cdot 10^{-19}\ J$$

4.4. Relación entre la intensidad del campo y el potencial

Supongamos un campo eléctrico constante en la dirección del eje X:

$$V_B - V_A = -E_x(x_B - x_A) = -E_x \Delta x \qquad \Longrightarrow \qquad dV = -E_x dx$$

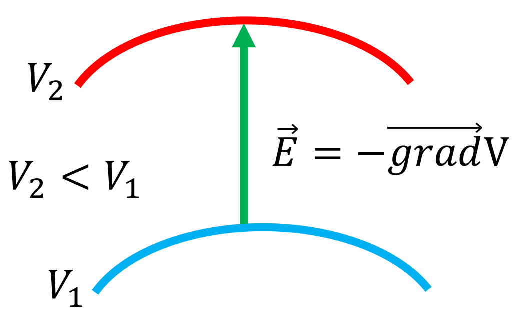
Podemos conocer el valor de un campo eléctrico uniforme derivando la expresión del potencial con respecto a la coordenada en función de la cual varía y anteponiendo el signo negativo:

$$E_x = -\frac{dV}{dx} \qquad \Longrightarrow \qquad \vec{E} = -\frac{dV}{dx}\hat{\imath}$$

Como el potencial varía en función de las tres coordenadas:

$$E_x = -\frac{\partial V}{\partial x}; \quad E_y = -\frac{\partial V}{\partial y}; \quad E_z = -\frac{\partial V}{\partial z}$$

$$\vec{E} = -\left(\frac{\partial V}{\partial x}\hat{\imath} + \frac{\partial V}{\partial y}\hat{\jmath} + \frac{\partial V}{\partial z}\hat{k}\right) = -\overrightarrow{grad}V = -\vec{\nabla}V$$



ACTIVIDADES

15. Una carga puntual de $q_1 = -5\,\mu C$ está localizada en el punto de coordenadas $(4,-2)$ m, mientras que una segunda partícula de $q_2 = +12\,\mu C$, se encuentra en el punto $(1,2)$ m. Calcula el potencial en el punto $(-1,0)$ m, así como la magnitud y dirección del campo eléctrico en dicho punto.
Dato: $k = 9 \cdot 10^9\ N\ m^2\ C^{-2}$
Sol: $V = 29800\ V$; $\vec{E} = -8105{,}3\ \hat{\imath} - 10\,122{,}24\ \hat{\jmath}\ N\ C^{-1}$; $E = 14\,938{,}77\ N\ C^{-1}$

16. Una carga puntual de $q = +10\,\mu C$se encuentra situada en el punto de coordenadas $(0,0)$, en el seno de un campo eléctrico uniforme de valor 500 V/m, dirigido hacia valores positivos del eje X. Esta carga ha sido desplazada, a velocidad constante, hasta el punto $(4,2)$ cm, y desde aquí hasta el punto $(6,-1)$ cm. Calcula el trabajo realizado por el campo eléctrico en cada uno de los desplazamientos.
Sol: $W_{(0,0)\to(4,2)} = 0{,}02\ J$; $W_{(4,2)\to(6,-1)} = 0{,}01\ J$; $W_{(0,0)\to(6,-1)} = 0{,}03\ J$

17. El potencial a lo largo del eje X varía según la expresión $V = x^2 + 2x - 8\ V$. i) Representa la gráfica del potencial; ii) Deduce la expresión del campo eléctrico en cualquier punto; iii) Calcula y representa el vector $\vec{E}$ en los puntos $(-4,0)$ y $(0,0)$.
Sol: ii) $\vec{E} = -(2x+2)\ \hat{\imath}$; iii) $\vec{E}(-4,0) = +6\ \hat{\imath}$; $\vec{E}(0,0) = -2\ \hat{\imath}$

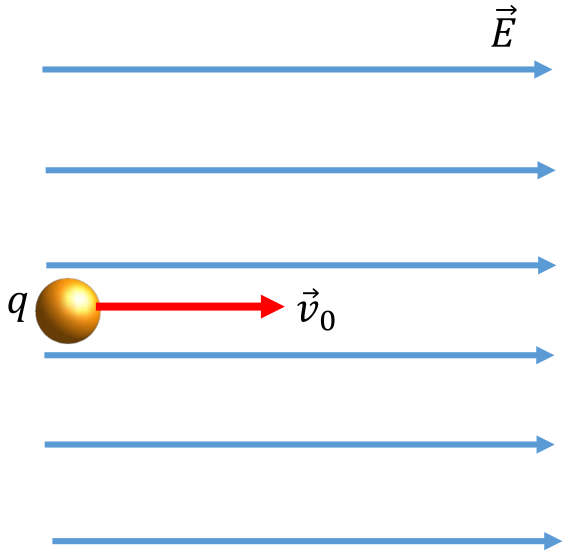
ACTIVIDADES

18. Se coloca una carga puntual de $4 \cdot 10^{-9}\ C$ en el origen de coordenadas y otra carga puntual de $-3 \cdot 10^{-9}\ C$ en el punto $(0,1)$ m. Calcule el trabajo que hay que realizar para trasladar una carga de $2 \cdot 10^{-9}\ C$ desde el punto $(1,2)$ m hasta el punto $(2,2)$ m.
    Dato: $k = 9 \cdot 10^{9}\ N\ m^{2}\ C^{-2}$
    Sol: $W = -7{,}29 \cdot 10^{-9}\ J$

19. Una carga de $2{,}5 \cdot 10^{-8}\ C$ se coloca en una región donde hay un campo eléctrico de intensidad $5 \cdot 10^{4}\ N\ C^{-1}$, dirigido en el sentido positivo del eje Y. Calcule el trabajo que la fuerza eléctrica efectúa sobre la carga cuando ésta se desplaza $0{,}5$ m en una dirección que forma un ángulo de 30^{0} con el eje X.
    Sol: $W = 3{,}125 \cdot 10^{-4}\ J$

20. Dos cargas puntuales iguales, de $-3 \cdot 10^{-6}\ C$ cada una, están situadas en los puntos A $(2,5)$ m y B $(8,2)$ m. i) Represente en un esquema las fuerzas que se ejercen entre las cargas y calcule la intensidad de campo eléctrico en el punto P $(2,0)$ m; ii) Determine el trabajo necesario para trasladar una carga de $1 \cdot 10^{-6}\ C$ desde el punto P $(2,0)$ m hasta el punto O $(0,0)$. Comente el resultado obtenido.
    Sol: i) $\vec{E} = 640{,}36\ \hat{\imath} + 1293{,}45\ \hat{\jmath}$; ii) $W = -0{,}00138\ J$

5.1. Partículas que inciden en la dirección del campo



Aparece una fuerza:

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

Que realiza un trabajo cuando se desplaza una distancia d:

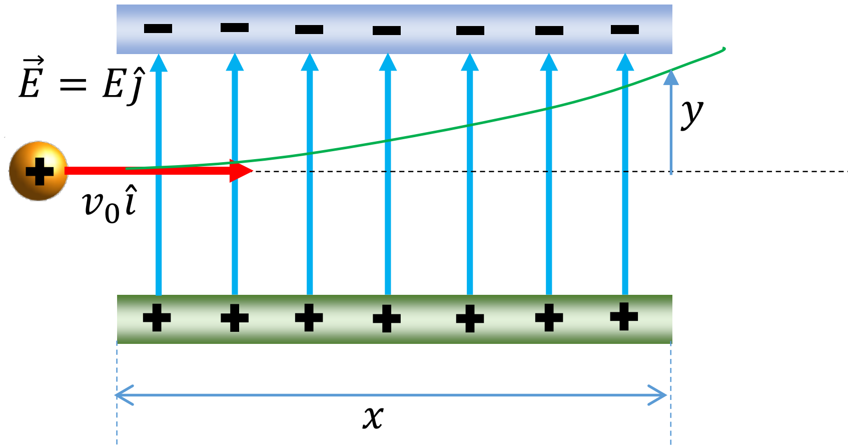
$$W = qEd$$

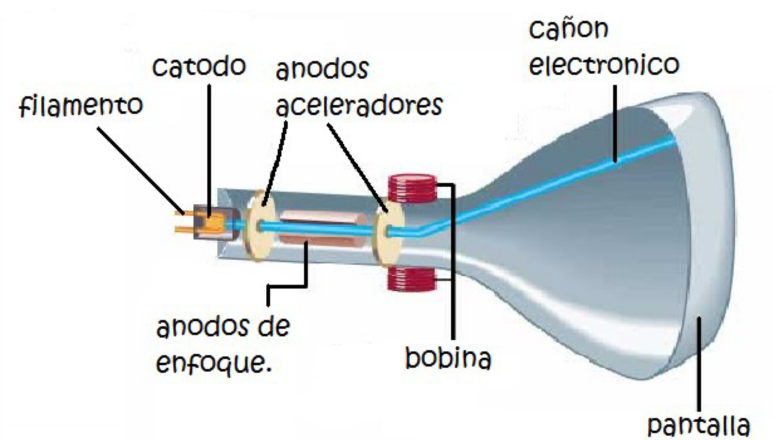
Que se invierte en una ΔE_c:

$$\frac{1}{2}mv^2 - \frac{1}{2}m{v_0}^2 = qEd \quad \Longrightarrow \quad v = \sqrt{{v_0}^2 + \frac{2qEd}{m}}$$

- Si la carga es positiva, su velocidad irá aumentando.
- Si la carga es negativa, su velocidad irá disminuyendo.

5.2. Partículas que inciden perpendicularmente a la dirección del campo





Al entrar en el campo:

$$qE = ma_y \quad \Longrightarrow \quad a_y = \frac{qE}{m}$$

Por tanto:

$$x = v_0 t \qquad y = \frac{1}{2}a_y t^2 = \frac{qE}{2m}t^2$$

Combinando ambas ecuaciones:

$$y = \frac{qE}{2m{v_0}^2}x^2$$

La trayectoria es una **parábola**.

ACTIVIDADES

21. Un electrón que tiene una velocidad inicial de $5 \cdot 10^5\ m\, s^{-1}$ se introduce en una región en la que existe un campo eléctrico uniforme dirigido a lo largo de la dirección del movimiento del electrón. ¿Cuál es la intensidad del campo eléctrico si el electrón recorre 5 cm desde su posición inicial antes de detenerse?
Datos: $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ C$; $m_e = 9{,}1 \cdot 10^{-31}\ kg$
Sol: $E = 14{,}22\ N\, C^{-1}$

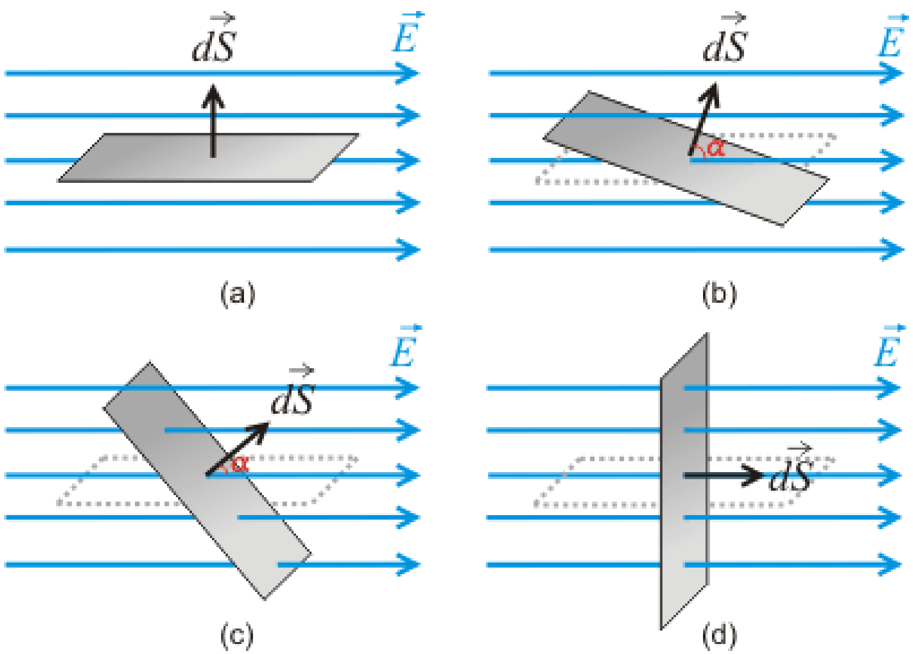
22. Un electrón es introducido en un campo eléctrico uniforme en dirección perpendicular a sus líneas de fuerza con una velocidad inicial de $10^4\ m\ s^{-1}$. La intensidad del campo es de $10^5\ V\, m^{-1}$. Calcula: i) La aceleración que experimenta el electrón; ii) La ecuación de la trayectoria.
Datos: $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ C$; $m_e = 9{,}1 \cdot 10^{-31}\ kg$
Sol: i) $a_y = 1{,}75 \cdot 10^{16}\ m\, s^{-2}$; ii) $y = 8{,}79 \cdot 10^7\ x^2$

23. Un electrón se proyecta en el interior de un campo eléctrico uniforme $\vec{E} = -\,2000\ \hat{\jmath}\ N\, C^{-1}$ con una velocidad de $10^6\ m\, s^{-1}$. Determina la desviación que sufre el electrón después de haber recorrido 5 cm en la dirección X, indicando la dirección y el sentido de dicha desviación.
Datos: $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ C$; $m_e = 9{,}1 \cdot 10^{-31}\ kg$
Sol: $\vec{y} = 0{,}44\ \hat{\jmath}\ m$

6.1. Flujo del campo eléctrico

El **flujo del campo eléctrico** es una medida del número de líneas de fuerza que atraviesan una superficie dada.

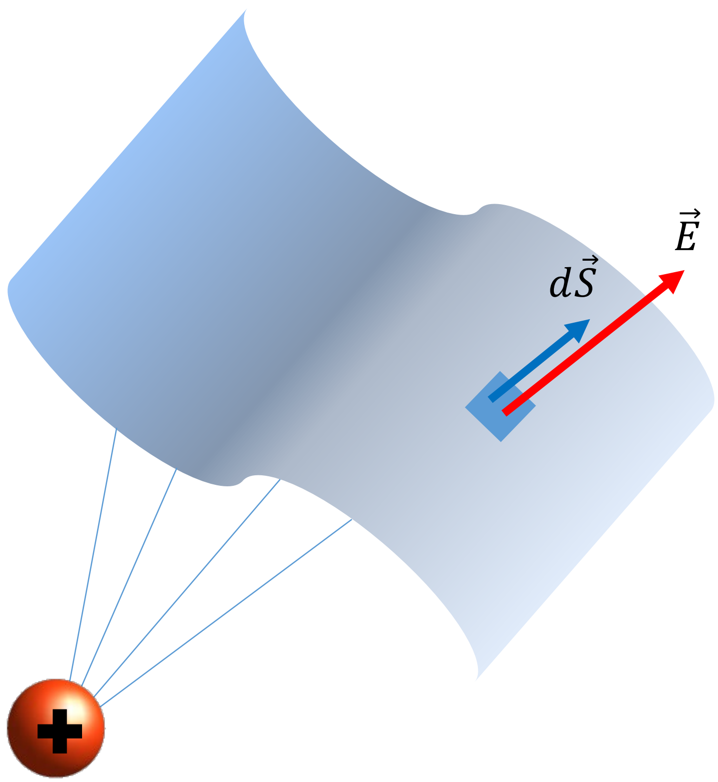
Flujo de un campo eléctrico uniforme



- El **número de líneas de fuerza** es proporcional a la intensidad del campo eléctrico.
- La **superficie** representarse mediante un vector perpendicular a la misma.
- El flujo se define como:

$$\Phi = \vec{E} \cdot \vec{S} \qquad \left(\frac{N \cdot m^2}{C}\right)$$

Flujo de un campo eléctrico no uniforme



- Se divide la superficie en elementos diferenciales donde podemos considerar que el campo eléctrico a su través es prácticamente constante.

- Se define el flujo elemental como:

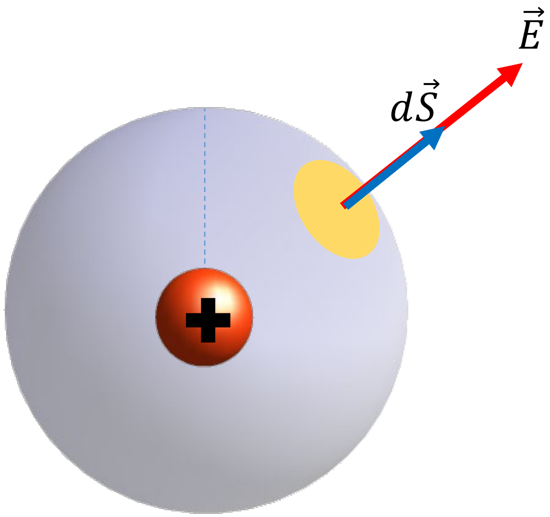
$$d\Phi = \vec{E} \cdot d\vec{S}$$

- El flujo total:

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

6.2. Teorema de Gauss

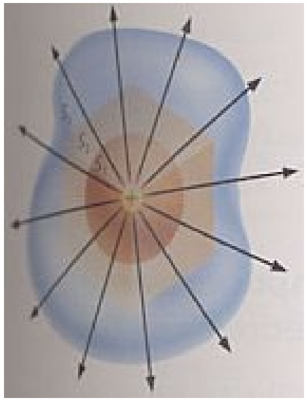
Relaciona el flujo a través de una superficie cerrada con la carga contenida en su interior.



$$\Phi = \int_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \oint E dS = E \oint dS$$

Sustituyendo el valor del campo en los puntos de la superficie e integrando dS:

$$\Phi = E \oint dS = k\frac{q}{r^2} 4\pi r^2 = 4\pi k q = \frac{q}{\varepsilon_0}$$

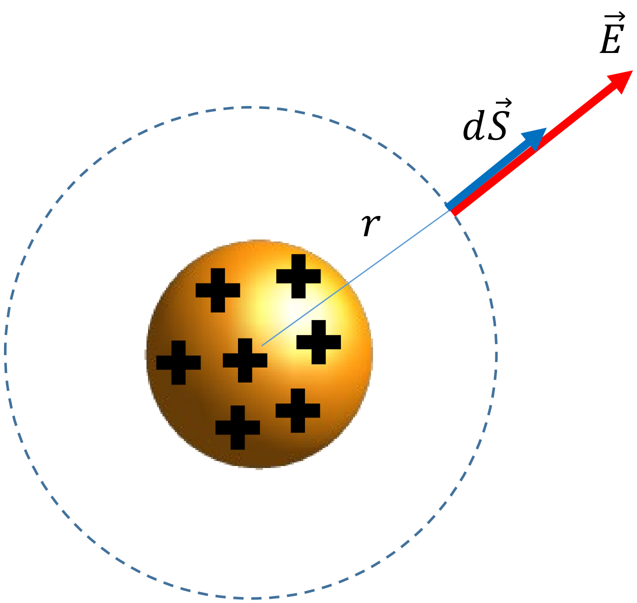


El flujo del campo eléctrico a través de cualquier superficie cerrada es independiente de la forma de la superficie e igual a la carga contenida dividida por ε_0.

6.3. Calculo de campos eléctricos a partir del teorema de Gauss

- Se elige la superficie cerrada de área conocida, de modo que el campo sea perpendicular a ella (superficie gaussiana).
- Se evalúa el flujo a través de ella.
- Se iguala el flujo obtenido a la expresión del teorema de Gauss.

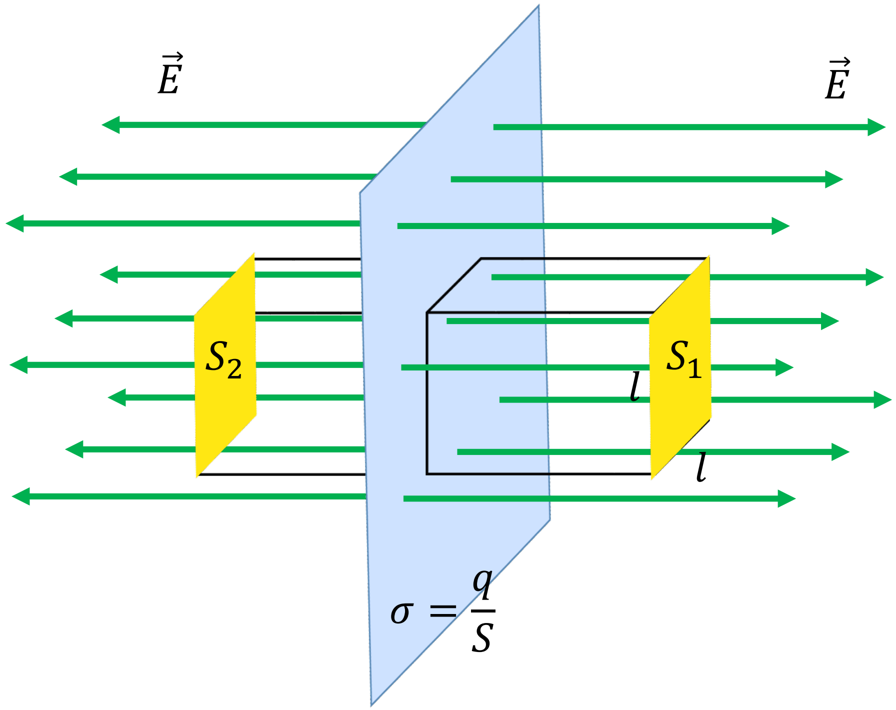
Campo creado en el exterior de una esfera uniformemente cargada



$$\left\{ \begin{array}{l} \Phi = E \oint dS = E 4\pi r^2 \\ \Phi = \dfrac{q}{\varepsilon_0} \end{array} \right.$$

$$E 4\pi r^2 = \frac{q}{\varepsilon_0} \quad \Longrightarrow \quad E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{r^2}$$

Campo originado por una placa uniformemente cargada



$$q = \sigma S = \sigma l^2$$

$$\begin{cases} \Phi = ES_1 + ES_2 = 2ES = 2El^2 \\ \Phi = \dfrac{q}{\varepsilon_0} = \dfrac{\sigma l^2}{\varepsilon_0} \end{cases}$$

$$2El^2 = \frac{\sigma l^2}{\varepsilon_0} \quad \Longrightarrow \quad E = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0}$$

6.4. Protección frente a campos externos

Conductor en equilibrio electrostático

$$\vec{E}_{neto\ en\ interior} = \vec{E} - \vec{E}_{int} = 0$$

- El flujo a través de una superficie gaussiana interior pero muy próxima a la superficie es cero.

Todo exceso de carga en un conductor aislado en equilibrio electrostático se reparte por su superficie.

Jaula de Faraday

En el interior de una superficie conductora, se está protegido frente a los campos externos.

ACTIVIDADES

24. Si se coloca de forma vertical una superficie plana cargada uniformemente y se cuelga de ella, mediante un hilo de seda de masa despreciable, una esfera de $2\ g$ con una carga de $4\ nC$, observamos que el ángulo que forma el hilo es de 35^0. ¿Cuál es la densidad superficial de carga de dicha superficie?
    Datos: $k = 9 \cdot 10^9\ N\ m^2\ C^{-2}$; $g = 9{,}8\ m\ s^{-2}$
    Sol: $\sigma = 6{,}07 \cdot 10^{-5}\ C\ m^{-2}$

25. Se tiene un plano de grandes dimensiones cuya densidad superficial de carga es $+\,3 \cdot 10^{-9}\ C\ m^{-2}$; calcula: i) el campo eléctrico uniforme que genera; ii) El trabajo que se realiza al desplazar una carga de $-2\ \mu C$ desde A, a $2\ cm$ de la placa, hasta B, a $8\ cm$ de la misma.
    Dato: $k = 9 \cdot 10^9\ N\ m^2\ C^{-2}$
    Sol: i) $E = 169{,}6\ N\ C^{-1}$; ii) $W = -2 \cdot 10^{-5}\ J$

La **corriente eléctrica** es el flujo de cargas que se establece cuando existe una diferencia de potencial entre dos puntos de un conductor.

7.1. Generadores de corriente

Un **generador de corriente** es un dispositivo que establece de forma permanente una diferencia de potencial entre los extremos de un conductor.

- La **fuerza electromotriz (ε) de un generador** es la energía que se transfiere a la unidad de carga que se mueve por el circuito:

$$\varepsilon = \frac{\Delta E}{q}$$

- La fem se mide en **voltios** (V) en el Sistema Internacional.

Los generadores transforman diversos tipos de energía en energía eléctrica:

- Pilas o generadores electroquímicos (e. química).
- Dinamo (energía mecánica).
- Paneles solares (energía solar).
- Molinos de viento (energía eólica).



7.2. El circuito eléctrico

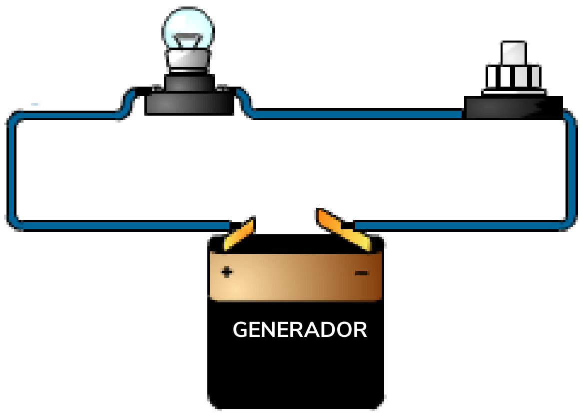
- Un **circuito eléctrico** es un dispositivo que consta de un **generador** y un **conductor** que une los polos del generador.

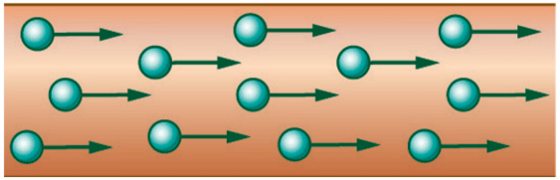
- Se puede intercalar un **interruptor** y un **receptor**.

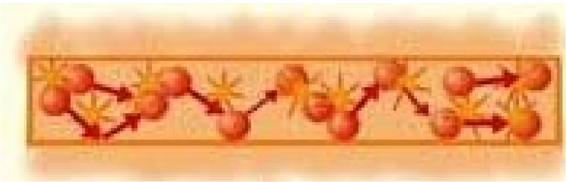
- La magnitud que mide la corriente que circula se denomina **intensidad de corriente**.

- El medio material que constituye el conductor o el propio generador ofrece una **resistencia** al paso de la corriente.

- En la resistencia se disipa energía: **efecto Joule**.







7.3. Intensidad de corriente

- La **intensidad de la corriente** es la cantidad de carga eléctrica que atraviesa una sección transversal de un conductor por unidad de tiempo.

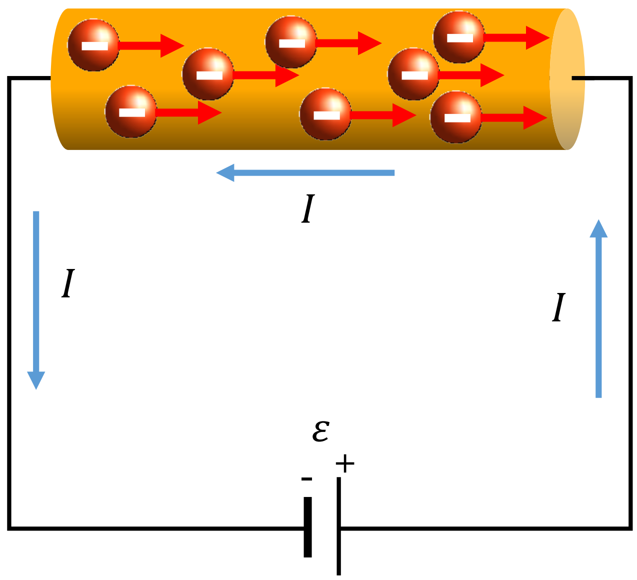
$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

- La unidad en el SI es el **amperio** (**A**).

El sentido de la intensidad de corriente

Por convenio, se considera como sentido de la corriente el que llevaría un flujo de cargas positivas.

- Las cargas se mueven hacia donde su energía potencial es menor.

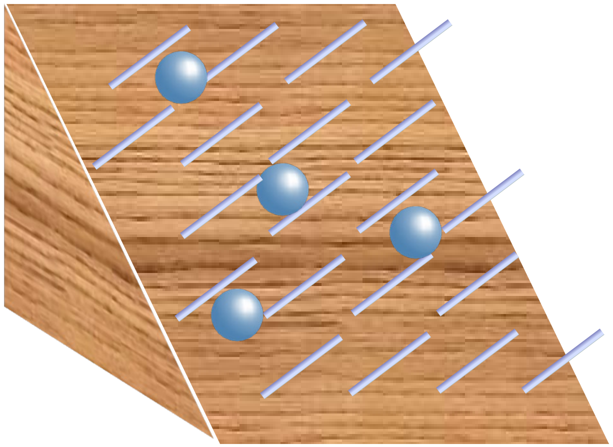


7.4. Resistencia eléctrica

- Todo conductor presenta cierta resistencia al paso de la corriente.
- La causa son las continuas desviaciones que sufren los electrones debido a los movimientos vibratorios de los iones positivos que constituyen la red metálica.
- Experimentalmente se puede demostrar que la resistencia de un conductor depende de:

$$R = \rho \frac{l}{S}$$

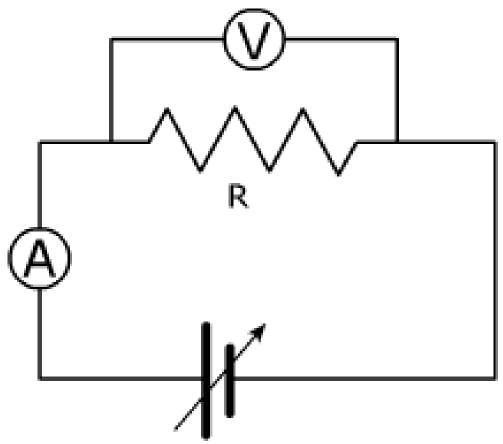
- Donde: ρ es la **resistividad**; l, la **longitud** del conductor, y **S**, la **sección recta** del mismo.
- La unidad es el **ohmio** (Ω).
- Se representa por:

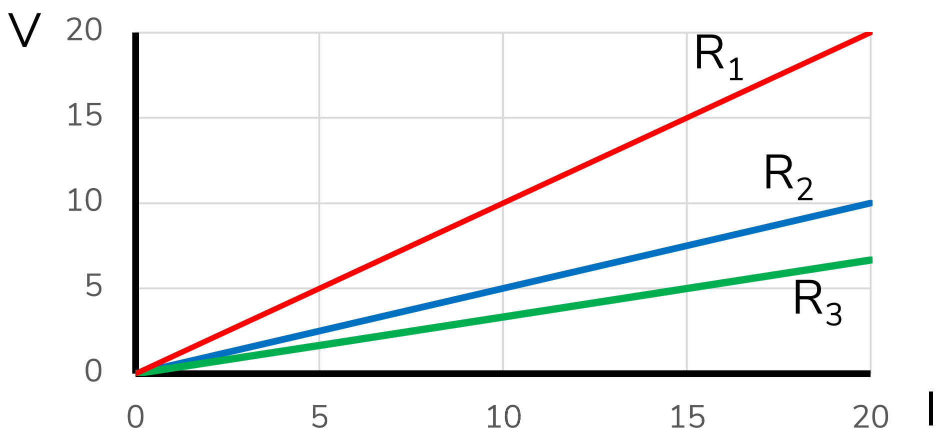


Material	ρ a 20 ºC (Ω m)
Plata	$1{,}6\cdot10^{-8}$
Cobre	$1{,}7\cdot10^{-8}$
Aluminio	$2{,}8\cdot10^{-8}$
Hierro	$10\cdot10^{-8}$
Plomo	$22\cdot10^{-8}$
Nicromo	$100\cdot10^{-8}$
Carbono	$3\,500\cdot10^{-8}$

7.5. Ley de Ohm

En 1826, **Georg Simon Ohm**, publicó los resultados de sus investigaciones acerca de la relación entre la intensidad de corriente y el voltaje aplicado:





La intensidad de corriente que circula es directamente proporcional al voltaje aplicado e inversamente proporcional a la resistencia.

$$I = \frac{V_{ab}}{R} \quad \Longrightarrow \quad V_{ab} = RI$$

Los materiales que cumplen la ley de Ohm se denominan **óhmicos**.

ACTIVIDADES

26. ¿Cuál es la carga que atraviesa una sección de conductor en 1 minuto si la intensidad de la corriente es de 15 mA? ¿Cuántos electrones han atravesado dicha sección en ese tiempo?
Sol: $q = 0{,}9\,;N = 5{,}63 \cdot 10^{18}\ e^-$

27. Por un hilo de nicromo de 50 cm de longitud y 0,5 mm de diámetro circula una corriente de 10 mA. ¿Cuál es la diferencia de potencial que se ha establecido entre los extremos del hilo?
Dato: $\rho_{nicromo} = 100 \cdot 10^{-8}\ \Omega\, m$
Sol: $\Delta V = 0{,}025\ V$

28. Un alambre presenta una resistividad de $5 \cdot 10^{-7}\ \Omega\, m$ y tiene 10 m de longitud y $1\ mm^2$ de sección. Calcula la intensidad de la corriente que lo atraviesa si se conecta a una diferencia de potencial de 12 V.
Sol: $I = 2{,}4\ A$

- En un circuito eléctrico, la energía potencial se transforma en cinética de los potadores de carga.
- La energía cinética puede transformarse en: mecánica, química, etc.
- Sin embargo la mayor parte se pierde en las colisiones con los átomos de la red.

8.1. Energía disipada: efecto Joule

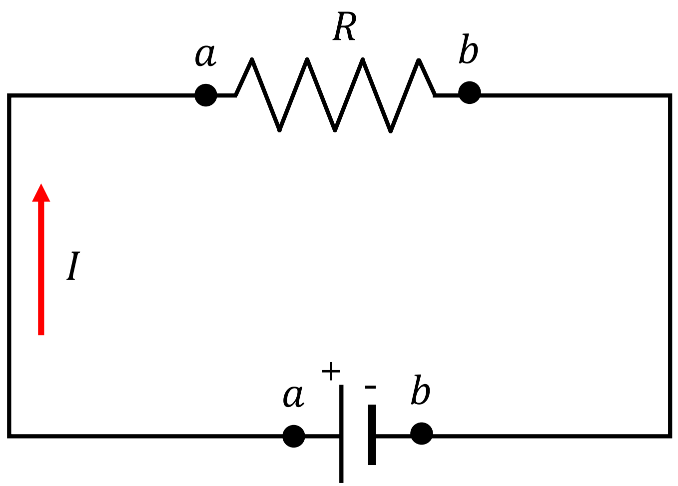
- El trabajo que se realiza para transportar la carga de a a b:

$$W = -Q(V_b - V_a) = Q(V_a - V_b) = QV_{ab}$$

$$W = I\Delta t V_{ab}$$

- Este trabajo se transforma íntegramente en calor:

$$W = RI^2\Delta t$$



El calor desarrollado cuando una corriente atraviesa una resistencia es proporcional al cuadrado de la intensidad, a la resistencia y al tiempo.

8.2. Potencia consumida

- Llamamos potencia consumida a la rapidez con que se disipa la energía:

$$P = \frac{W}{\Delta t} = \frac{RI^2 \Delta t}{\Delta t}$$

$$P = RI^2 \qquad\qquad P = IV_{ab}$$

- La unidad de potencia es el **vatio** (**W**).

Aparato	Potencia (W)
TV en color 21”	77
Campana extractora	150
Lavavajillas	1 500
Horno de cocina	2 000
Plancha	1 100
Secador de pelo	1 000
Aspiradora	1 300
Nevera	800
Calculadora	8

ACTIVIDADES

29. Construimos una resistencia enrollando 3 m de hilo de nicromo de 0,5 mm de diámetro alrededor de un tubo de material refractario. La intensidad que circula por la resistencia es de 2,5 A. ¿Cuál es la energía disipada en la resistencia al cabo de 20 min?
Dato: $\rho_{nicromo} = 100 \cdot 10^{-8}\ \Omega\, m$
Sol: $E = 114\,592\ J$

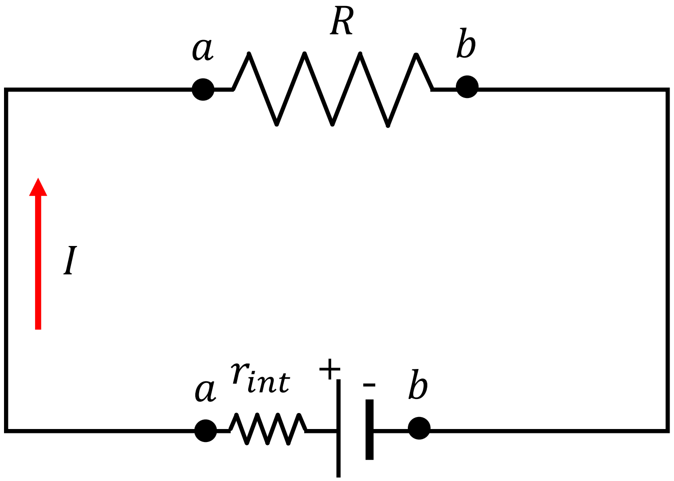
30. Un calefactor de resistencia, de 2 000 W, que funciona a 220 V ha estado conectado durante 8 h. Calcula: i) La resistencia del calefactor; ii) La energía consumida en kW h; iii) El coste de mantener encendido el calefactor si el kW h se factura a 0,10 €.
Sol: i) $R = 24{,}2\ \Omega$; ii) $E = 16\ kW\ h$; iii) $1{,}6$ €

8.3. Conservación de la energía en circuitos sencillos

- La energía que se consume o disipa en un circuito proviene del generador.
- Recordando el concepto de fuerza electromotriz (fem):

$$\varepsilon = \frac{W}{Q} \quad \Longrightarrow \quad W = Q\varepsilon = \varepsilon I \Delta t \qquad\qquad P_{generador} = I\varepsilon$$

- La energía aportada por el generador se disipa en la resistencia externa y en el propio generador:



$$W_{gene} = E_{disipada\ en\ R\ ext} + E_{disipada\ en\ r\ int}$$

$$\varepsilon I \Delta t = R I^2 \Delta t + r I^2 \Delta t \quad \Rightarrow \quad \varepsilon = RI + rI$$

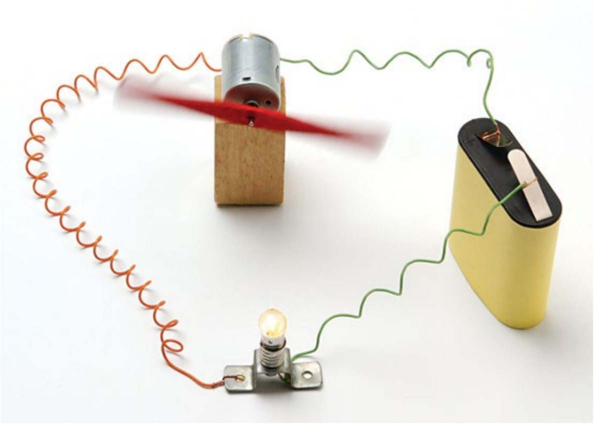
$$\varepsilon = V_{ab} + rI \quad \Rightarrow \quad V_{ab} = \varepsilon - rI$$

- Al termino $\boldsymbol{rI}$ se le conoce con el nombre de **caída óhmica del generador**.

El voltaje real que suministra un generador es igual a la diferencia de su fuerza electromotriz y la caída óhmica debida a su resistencia interna.

Circuitos que intercalan motores

Un motor es un dispositivo que transforma energía eléctrica en otras formas de energía, como, por ejemplo, energía mecánica.

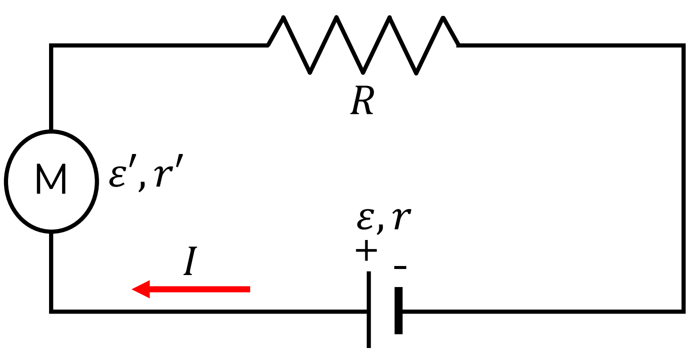


- La característica de un motor es su **fuerza contraelectromotriz**, ε', entendida como la cantidad de energía transformada por unidad de carga que llega al motor.

$$W_{gene} = E_{disipada\ en\ R\ ext} + E_{disipada\ en\ r\ int} + E_{transformada} + E_{disipada\ en\ r'motor}$$

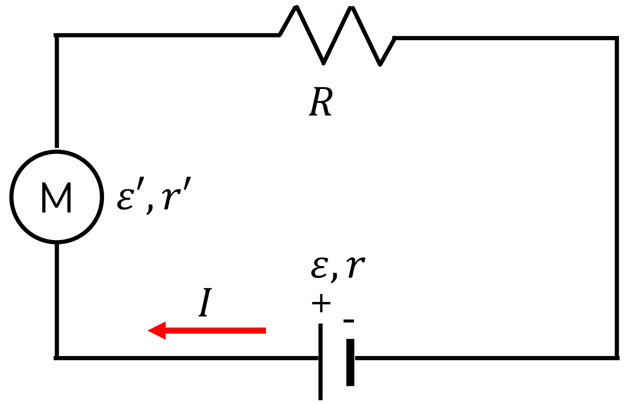
$$\varepsilon I \Delta t = R I^2 \Delta t + r I^2 \Delta t + \varepsilon' I \Delta t + r' I^2 \Delta t$$

$$\varepsilon = \varepsilon' + I(R + r + r') \qquad I = \frac{\varepsilon - \varepsilon'}{R + r + r'}$$



ACTIVIDADES

31. En el circuito de la figura, un motor de ε' = 4,5 V y de 1,5 Ω es alimentado por una batería de 12 V y 2 Ω. Si la resistencia externa es de 6 Ω, calcula: i) La intensidad del circuito; ii) El voltaje real entre los bornes del generador; iii) La energía transformada por el motor en el intervalo de 10 min; iv) La energía disipada en cada dispositivo en estos 10 min.



Sol :i) $0{,}79\ A$; ii) $10{,}42\ V$; iii) $2133\ J$; iv) $E_{generador} = 748{,}92\ J$; $E_{resistencia} = 2\,246,76\ J$; $E_{motor} = 561{,}69\ J$

Información de Contacto

Rafael Artacho Cañadas
Dpto. de Física y Química
I.E.S. Padre Manjón

Gonzalo Gallas, s/n
18003 · Granada

artacho1955@gmail.com