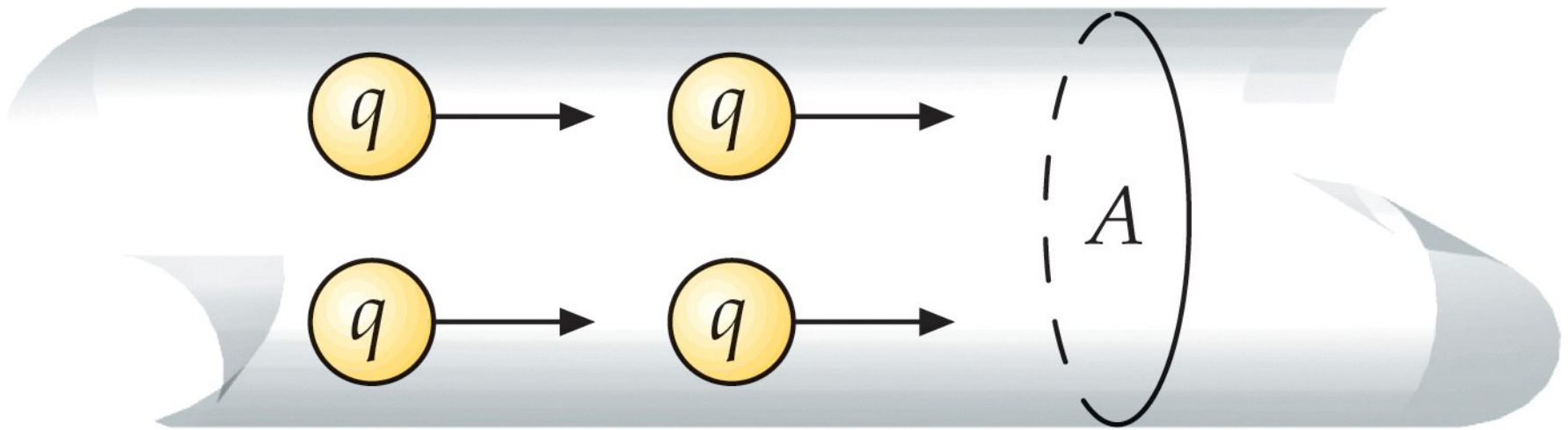


# Capítulo 4:

## Circuitos de corriente continua





$$I_m = \frac{\Delta q}{\Delta t}$$

**Corriente promedio: carga que pasa por A por unidad de tiempo**

$$I = \frac{dq}{dt}$$

**Corriente Instantánea**

**[ I ] = C/s = A (Ampere)**

$$\vec{J} = q \mathbf{n} \vec{v}_d$$

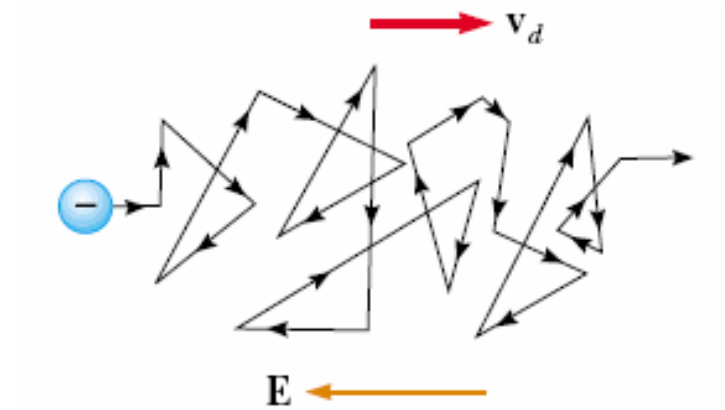
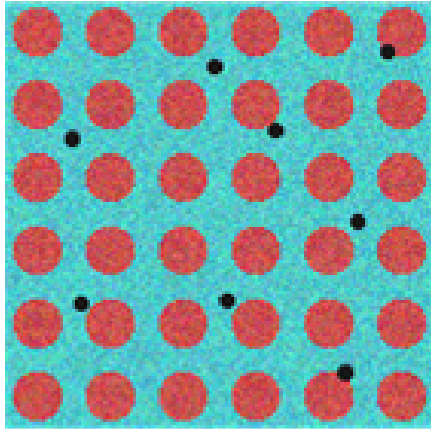
$$I = \int_S \vec{j} \cdot d\vec{S}$$

# Ley de Ohm



**George Simon Ohm (1789-1854)**

# Modelo microscópico para la conducción eléctrica



$$\mathbf{a} = \frac{q\mathbf{E}}{m_e}$$

$$\mathbf{v}_f = \mathbf{v}_i + \mathbf{a}t = \mathbf{v}_i + \frac{q\mathbf{E}}{m_e} t$$

$$\overline{\mathbf{v}_f} = \mathbf{v}_d = \frac{q\mathbf{E}}{m_e} \tau$$

$$\mathbf{J} = nq\mathbf{v}_d = \frac{nq^2\mathbf{E}}{m_e} \tau$$

$$\sigma = \frac{nq^2\tau}{m_e}$$

**conductividad eléctrica**

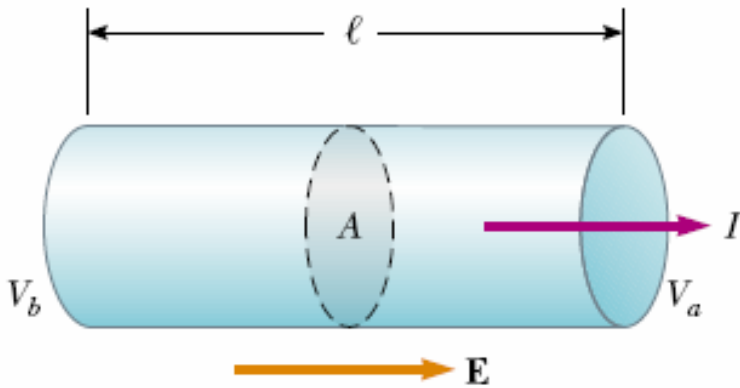
tiempo entre choques

$$\mathbf{J} = \sigma\mathbf{E}$$

**Ley de Ohm**

relación empírica válida para ciertos materiales

## Otro forma de la ley útil para aplicaciones prácticas:



$$\Delta V = V_b - V_a$$

$$\Delta V = E\ell$$

$$J = \sigma E = \sigma \frac{\Delta V}{\ell}$$

$$\Delta V = \frac{\ell}{\sigma} J = \left( \frac{\ell}{\sigma A} \right) I = RI$$

$$\rho = \frac{1}{\sigma} \quad \rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{m_e}{nq^2\tau}$$

resistividad  
eléctrica

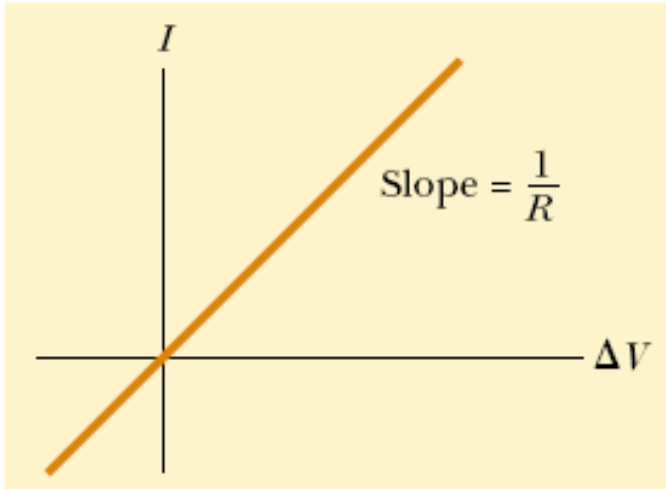
$$R \equiv \frac{\Delta V}{I}$$

$$R = \rho \frac{\ell}{A}$$

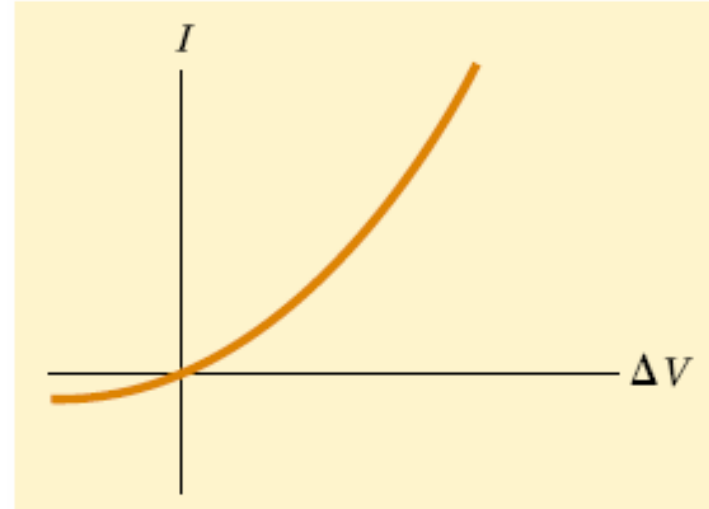
Ley de Ohm

$$R \equiv \frac{\Delta V}{I}$$

Ley de Ohm

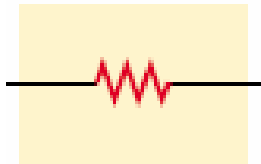


**material ohmico**



**material no-ohmico  
(ej.: diodo)**

**Símbolo:**



$$[R] = V/A = \Omega \quad (\text{Ohm})$$

### Resistivities and Temperature Coefficients of Resistivity for Various Materials

Material	Resistivity <sup>a</sup> ( $\Omega \cdot \text{m}$ )	Temperature Coefficient <sup>b</sup> $\alpha$ [( $^{\circ}\text{C}$ ) <sup>-1</sup> ]
Silver	$1.59 \times 10^{-8}$	$3.8 \times 10^{-3}$
Copper	$1.7 \times 10^{-8}$	$3.9 \times 10^{-3}$
Gold	$2.44 \times 10^{-8}$	$3.4 \times 10^{-3}$
Aluminum	$2.82 \times 10^{-8}$	$3.9 \times 10^{-3}$
Tungsten	$5.6 \times 10^{-8}$	$4.5 \times 10^{-3}$
Iron	$10 \times 10^{-8}$	$5.0 \times 10^{-3}$
Platinum	$11 \times 10^{-8}$	$3.92 \times 10^{-3}$
Lead	$22 \times 10^{-8}$	$3.9 \times 10^{-3}$
Nichrome <sup>c</sup>	$1.50 \times 10^{-6}$	$0.4 \times 10^{-3}$
Carbon	$3.5 \times 10^{-5}$	$-0.5 \times 10^{-3}$
Germanium	0.46	$-48 \times 10^{-3}$
Silicon	640	$-75 \times 10^{-3}$
Glass	$10^{10}$ to $10^{14}$	
Hard rubber	$\sim 10^{13}$	
Sulfur	$10^{15}$	
Quartz (fused)	$75 \times 10^{16}$	

<sup>a</sup> All values at 20°C.

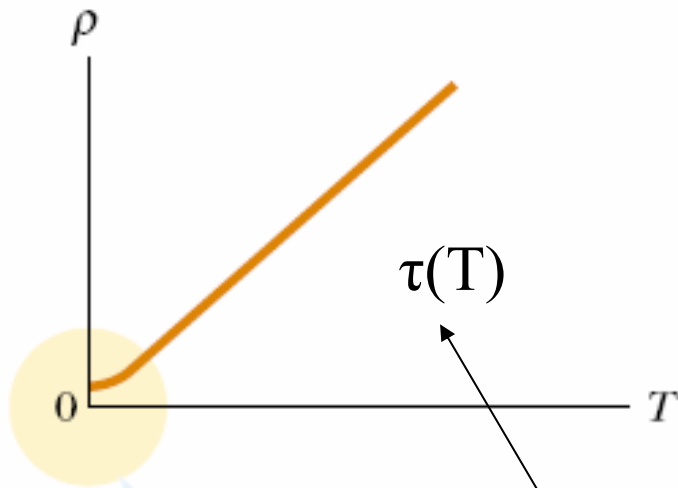
<sup>b</sup> See Section 27.4.

<sup>c</sup> A nickel–chromium alloy commonly used in heating elements.

## Metales

$$\rho = \rho_0[1 + \alpha(T - T_0)]$$

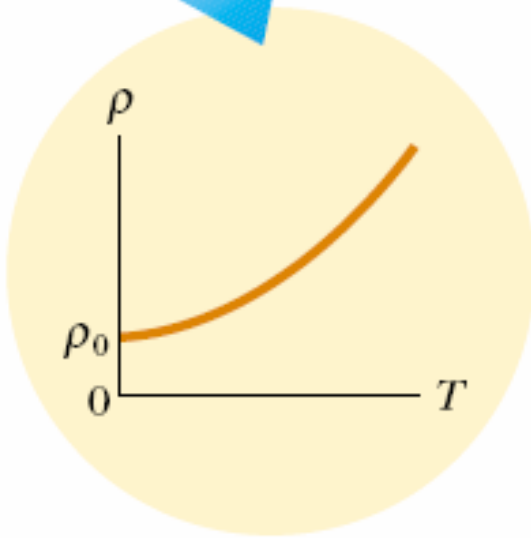
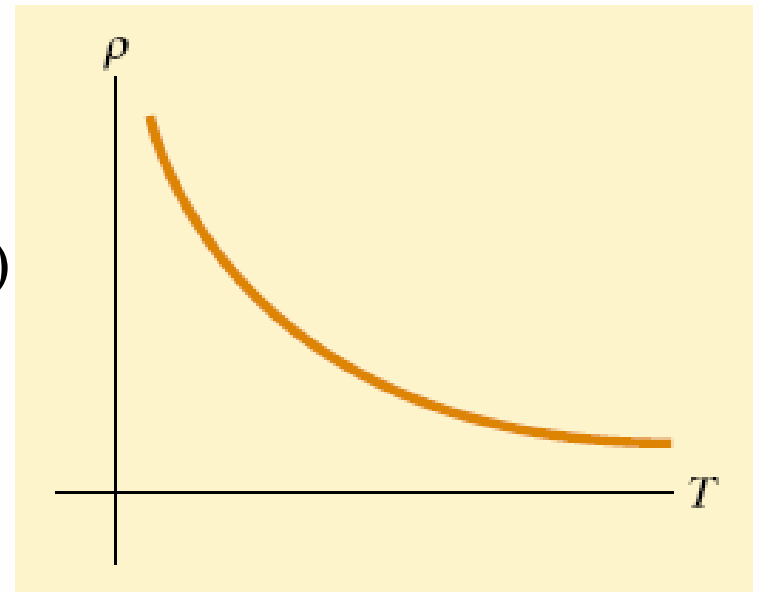
$$R = R_0[1 + \alpha(T - T_0)]$$



$$\sigma = \frac{nq^2\tau}{m_e}$$

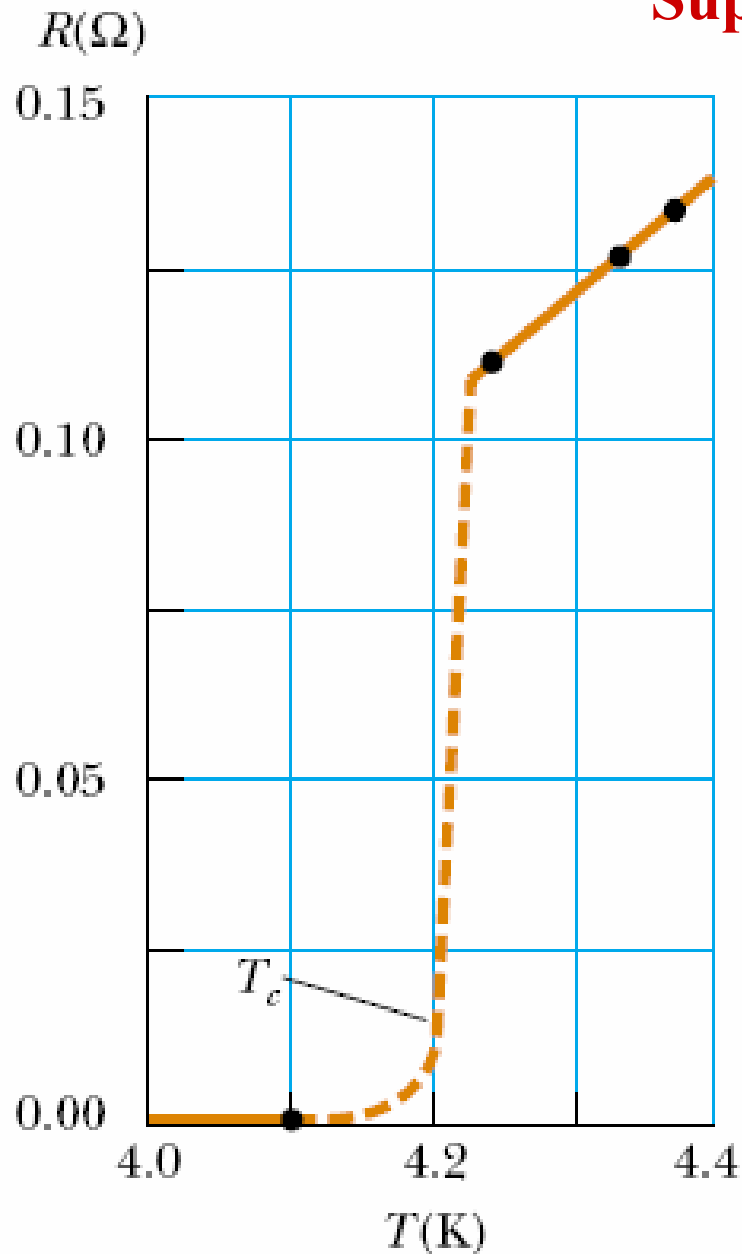
$n(T)$

## Semiconductores





# Superconductores

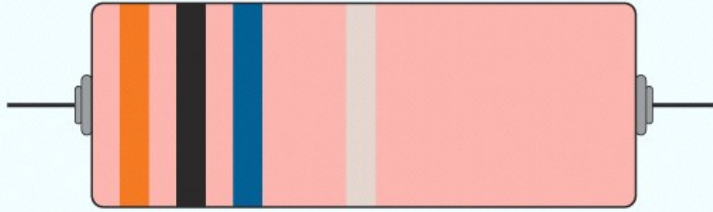


## Critical Temperatures for Various Superconductors

Material	$T_c$ (K)
HgBa <sub>2</sub> Ca <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	134
Tl-Ba-Ca-Cu-O	125
Bi-Sr-Ca-Cu-O	105
YBa <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>7</sub>	92
Nb <sub>3</sub> Ge	23.2
Nb <sub>3</sub> Sn	18.05
Nb	9.46
Pb	7.18
Hg	4.15
Sn	3.72
Al	1.19
Zn	0.88



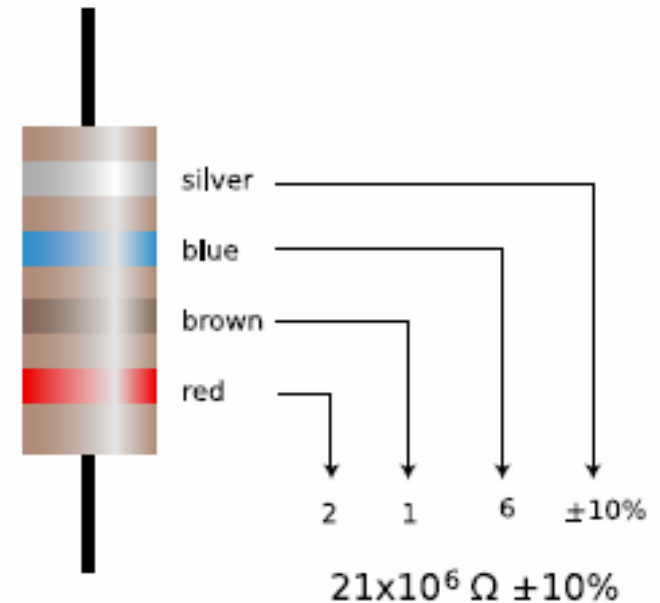
# Código de colores



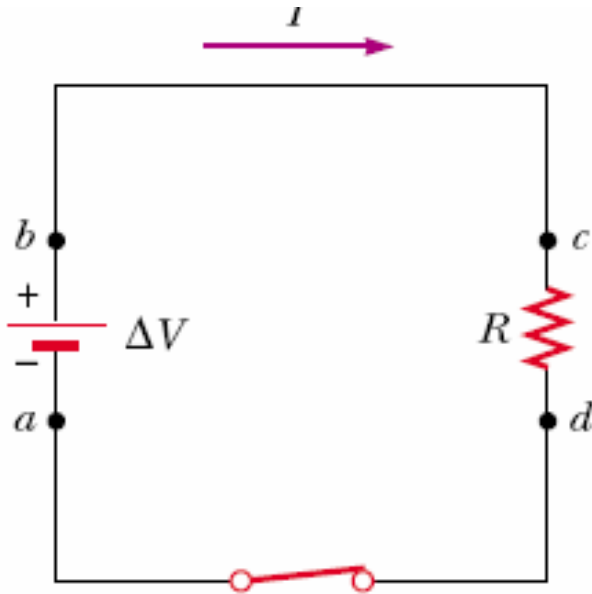
## Color Coding for Resistors

Color	Number	Multiplier	Tolerance
Black	0	1	
Brown	1	$10^1$	
Red	2	$10^2$	
Orange	3	$10^3$	
Yellow	4	$10^4$	
Green	5	$10^5$	
Blue	6	$10^6$	
Violet	7	$10^7$	
Gray	8	$10^8$	
White	9	$10^9$	
Gold		$10^{-1}$	5%
Silver		$10^{-2}$	10%
Colorless			20%

**Primer dígito**  
**Segundo dígito**  
**Multiplicador**  
**Tolerancia**



# Ley de Joule



Energía Química → Energía Eléctrica → Energía Térmica

Mantener una corriente requiere un gasto de energía

$$\frac{dU}{dt} = \frac{d}{dt} (Q \Delta V) = \frac{dQ}{dt} \Delta V = I \Delta V$$

$$\mathcal{P} = I \Delta V$$

$$\mathcal{P} = I^2 R = \frac{(\Delta V)^2}{R}$$

Ley de Joule

$$[\mathcal{P}] = \text{V} \cdot \text{A} = \text{A}^2 \cdot \Omega = \text{V}^2 / \Omega = \text{W (watt)}$$

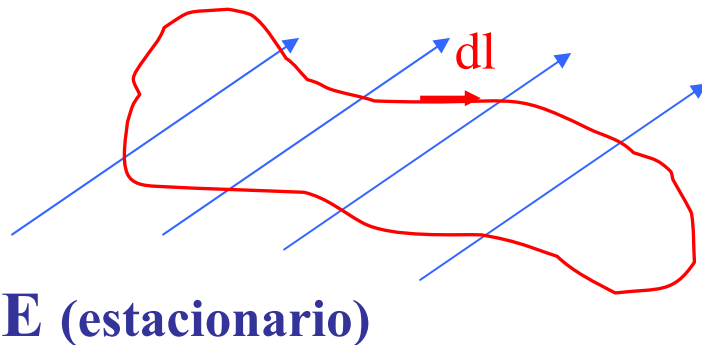
# Fuerza Electromotriz



La fuerza electromotriz (**fem**) es el trabajo necesario para desplazar la unidad de carga a lo largo de una trayectoria cerrada.

$$fem = \epsilon = \oint_c \vec{E}_{ef} \cdot d\vec{l}.$$

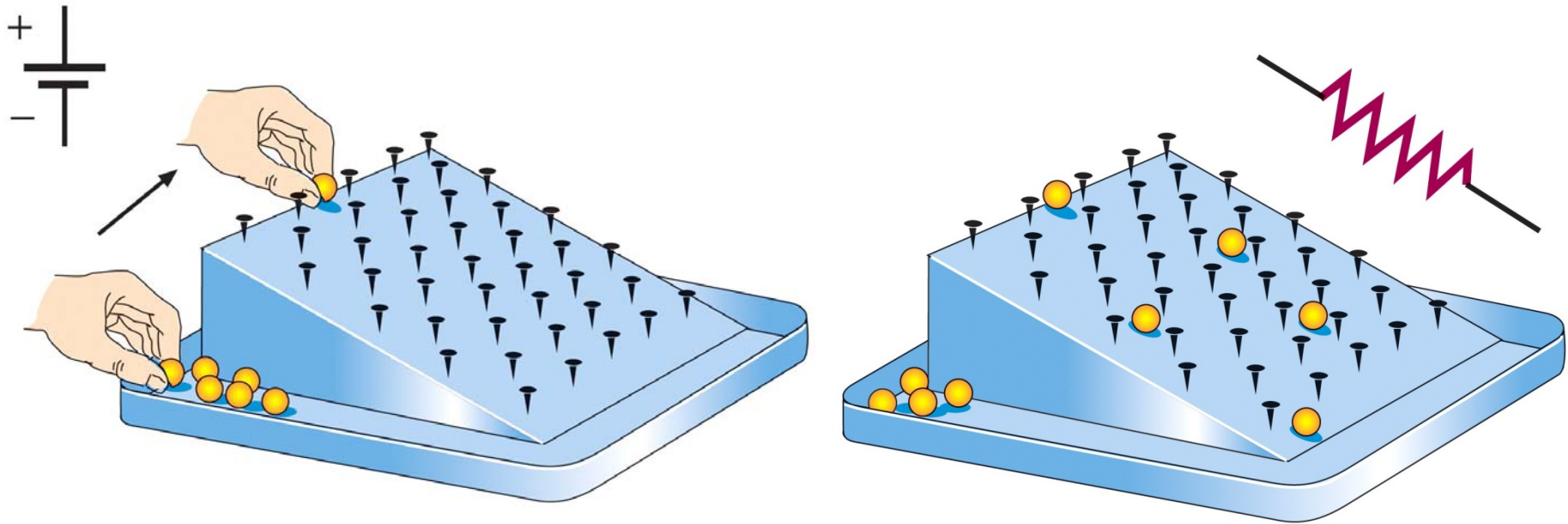
$$[\epsilon] = V$$



$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = 0$$

Un campo eléctrico estacionario no puede mantener una corriente en un circuito cerrado

Se denomina fuente de **fem** a cualquier fuente, medio o dispositivo que origina un campo eléctrico y produce una corriente eléctrica en un circuito cerrado.



**Análogo mecánico de fem y resistencia**

# Pilas y Baterías

energía química → eléctrica





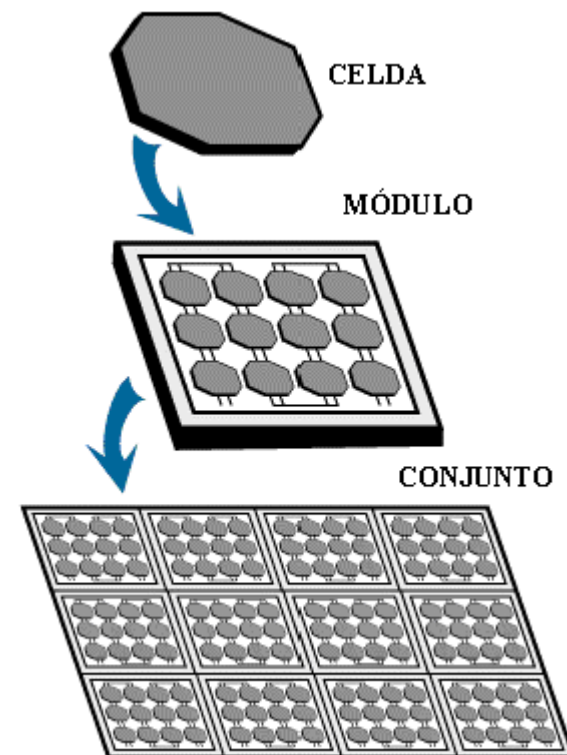
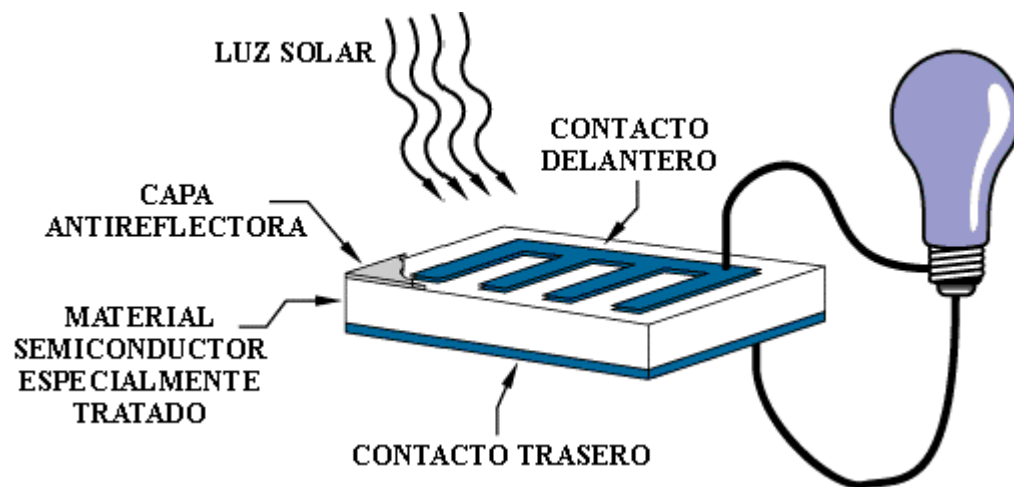
# Generadores y Dínamos

energía mecánica → eléctrica

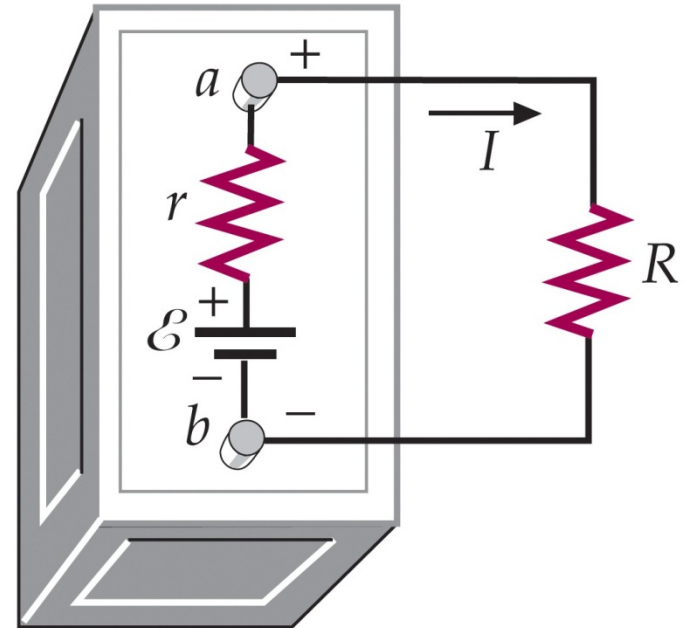
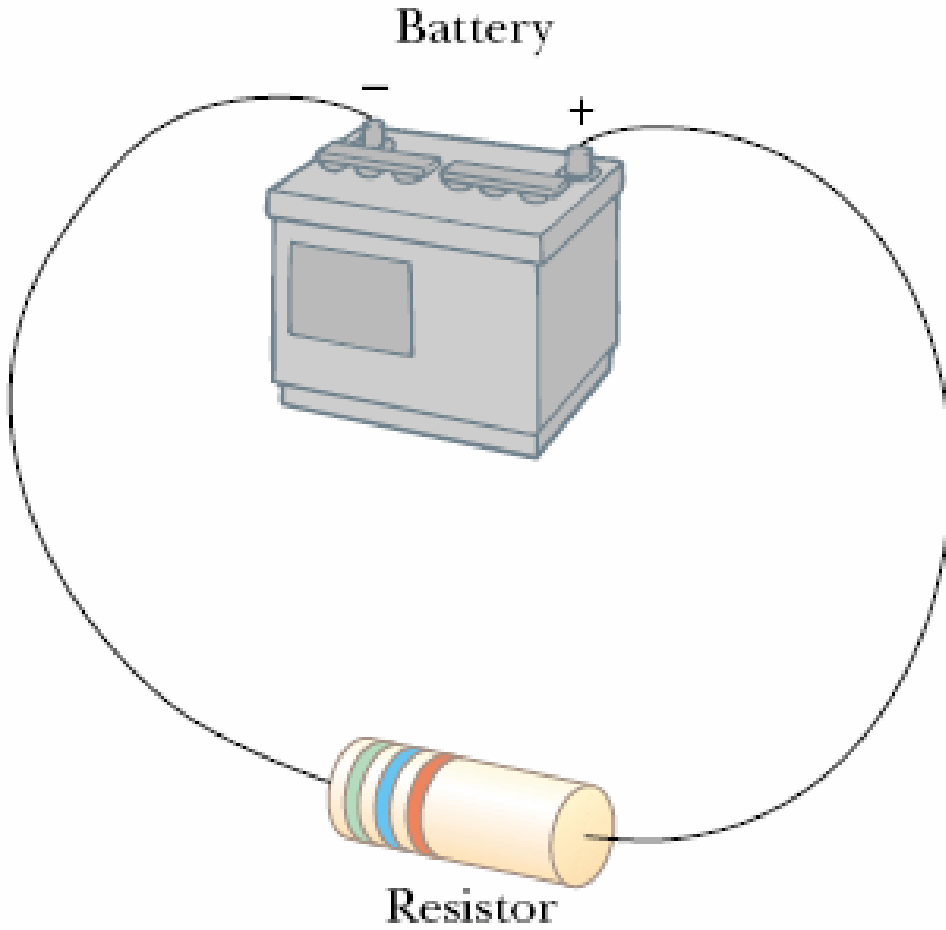


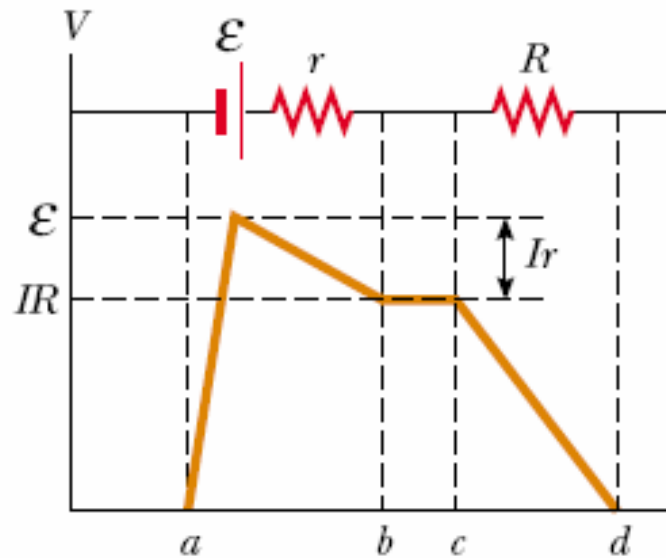
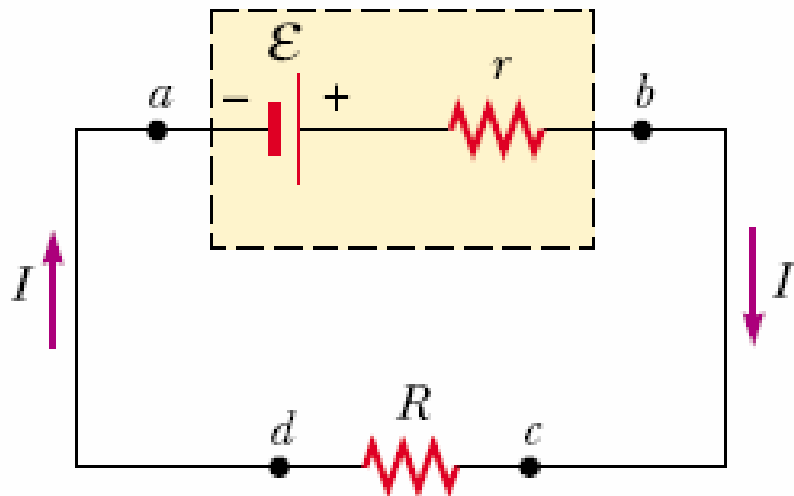
# Celdas Fotovoltaicas

energía solar → eléctrica



# Resistencia interna de una fuente de fem



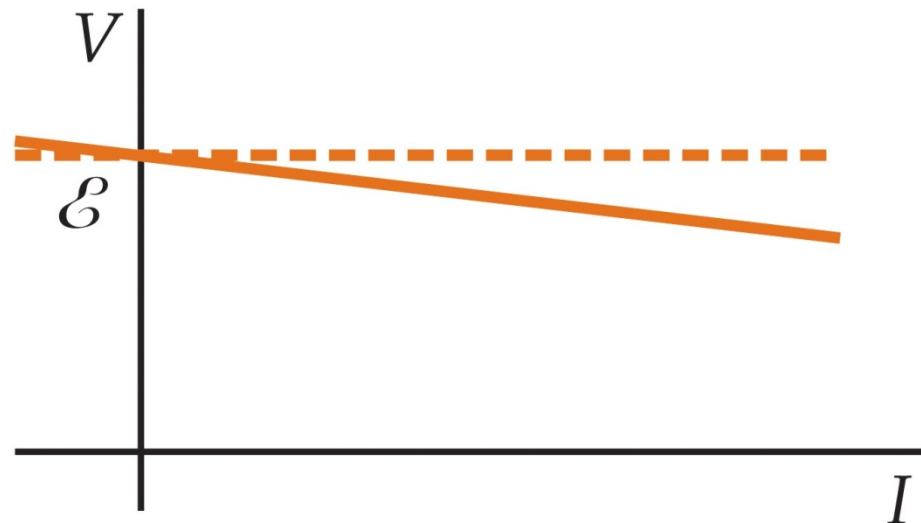


$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}$$

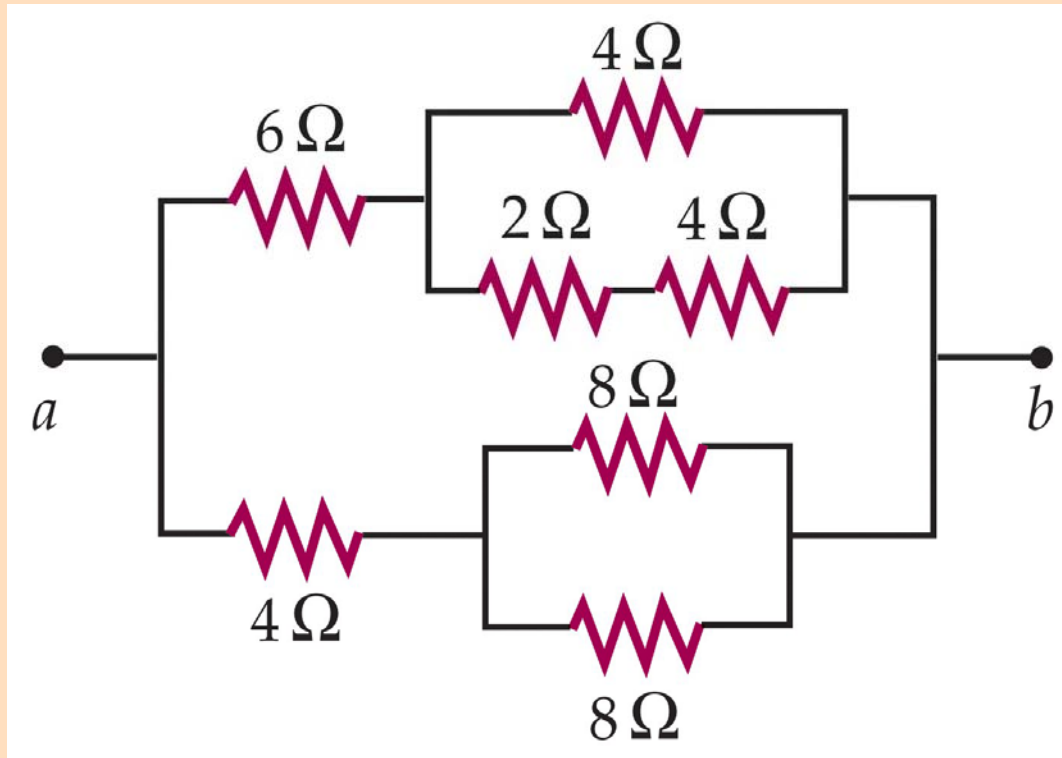
$$\mathcal{E} = IR + Ir$$

$$\Delta V = \mathcal{E} - Ir$$

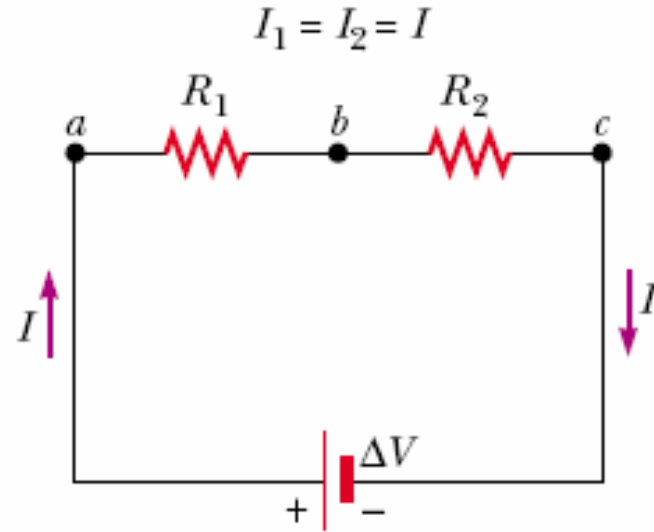
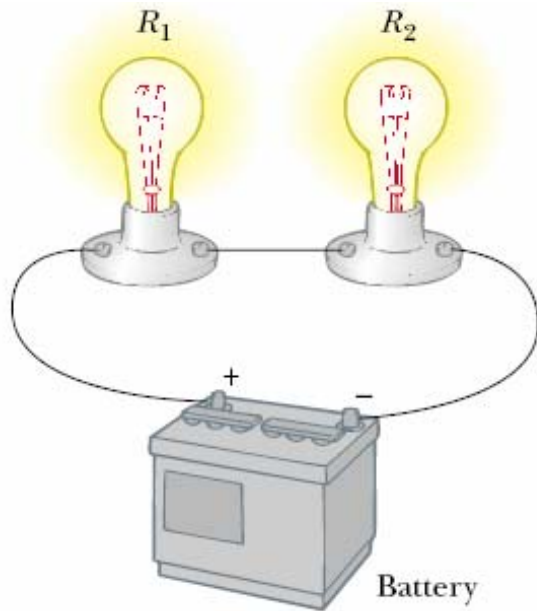
$$I\mathcal{E} = I^2R + I^2r$$



# Combinación de Resistencias



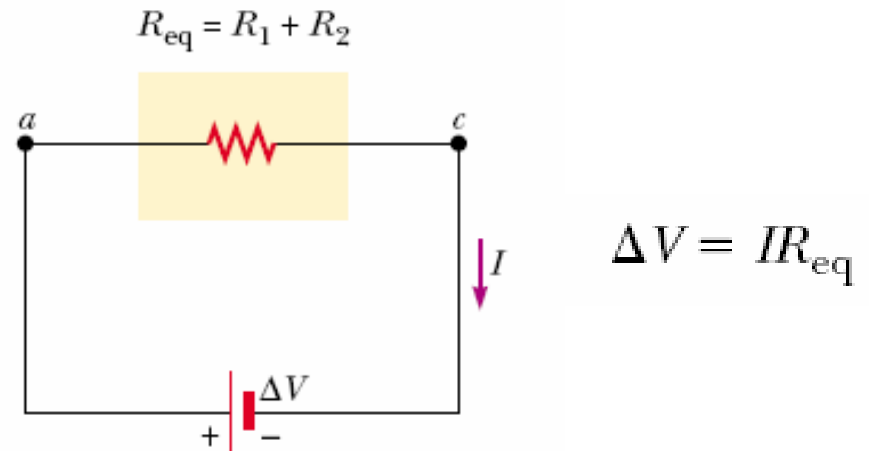
# Resistencias en serie



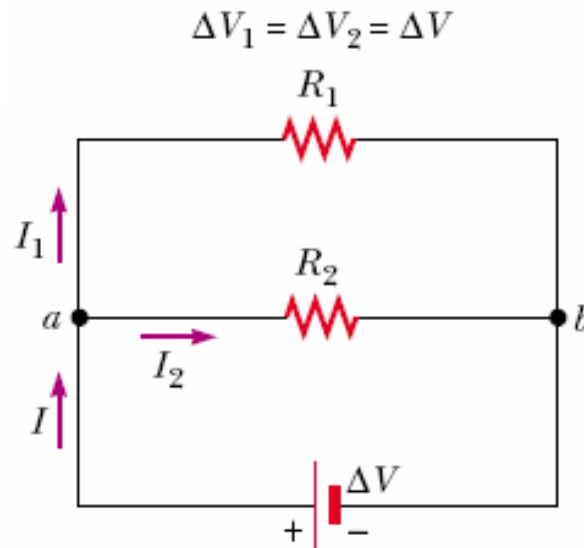
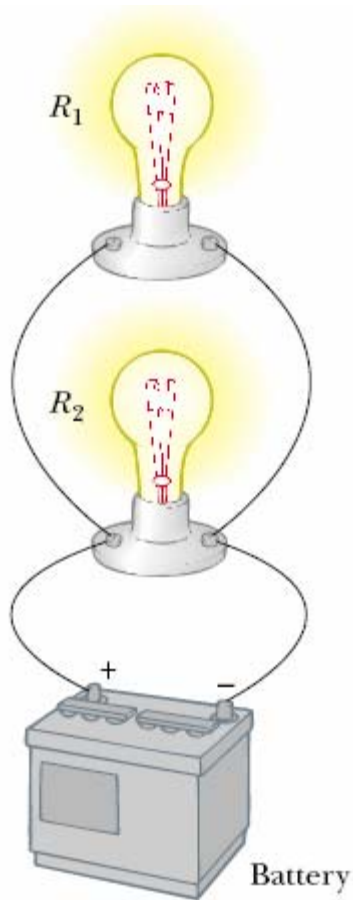
$$\Delta V = IR_1 + IR_2 = I(R_1 + R_2)$$

$$\Delta V = IR_{\text{eq}} = I(R_1 + R_2) \longrightarrow R_{\text{eq}} = R_1 + R_2$$

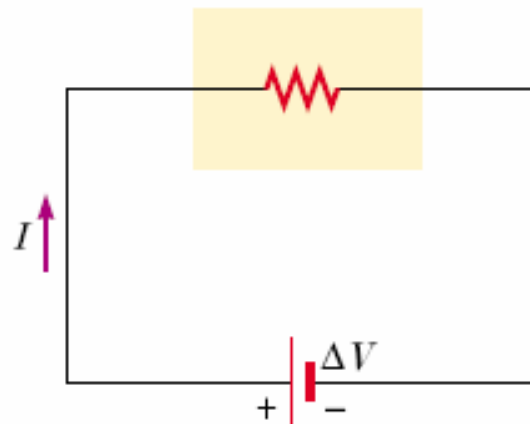
$$R_{\text{eq}} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots$$



# Resistencias en paralelo



$$\frac{1}{R_{\text{eq}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$



$$I = I_1 + I_2$$

$$I = I_1 + I_2 = \frac{\Delta V}{R_1} + \frac{\Delta V}{R_2}$$
$$= \Delta V \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) = \frac{\Delta V}{R_{\text{eq}}}$$

$$\frac{1}{R_{\text{eq}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

$$R_{\text{eq}} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

$$\frac{1}{R_{\text{eq}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots$$

# Leyes de Kirchhoff

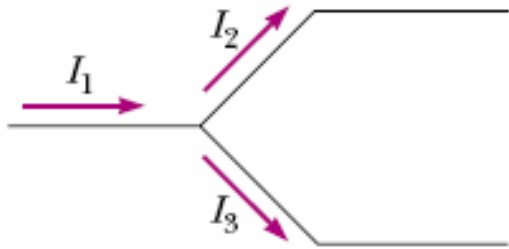


**Gustav Kirchhoff (1824-1887)**



## Primera ley de Kirchhoff

La suma de las corrientes que entran a un nodo es igual a la suma de las corrientes que salen.



$$I_1 = I_2 + I_3$$

$$\sum I_{\text{in}} = \sum I_{\text{out}}$$

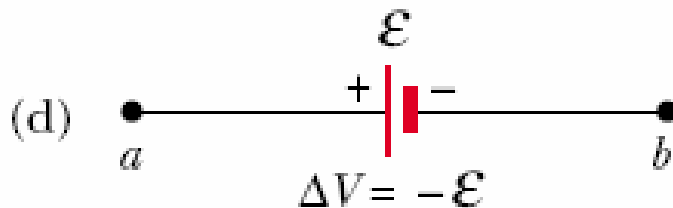
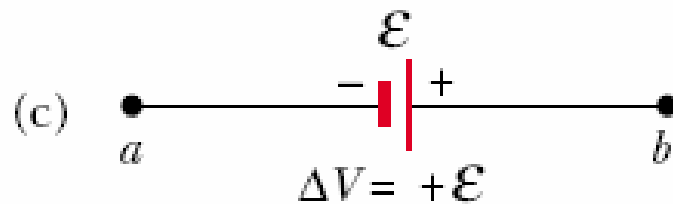
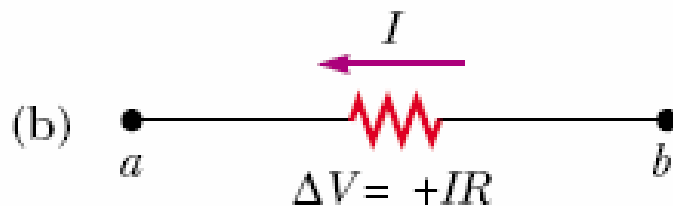
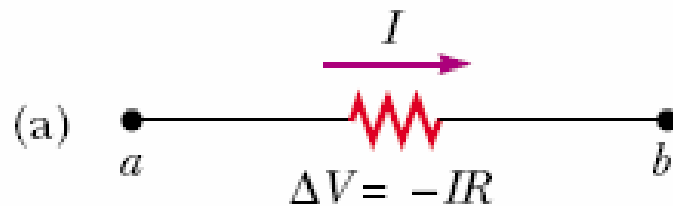
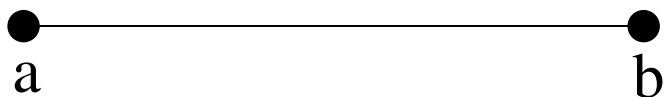
## Segunda ley de Kirchhoff

La suma de las diferencias de potencial a través de todos los elementos en cualquier lazo cerrado (o malla) de un circuito es cero.

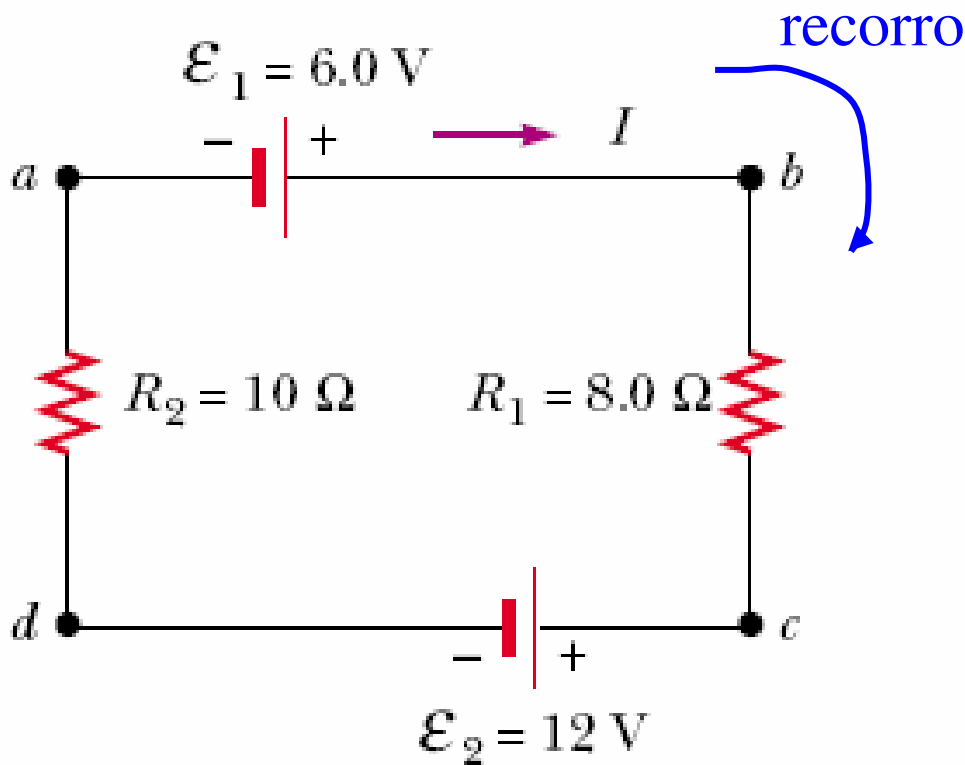
$$\sum_{\text{closed loop}} \Delta V = 0$$

# Convenio de signos

**dirección de recorrido**



## Circuito con una sola malla



1) Asigno un sentido a  $I$

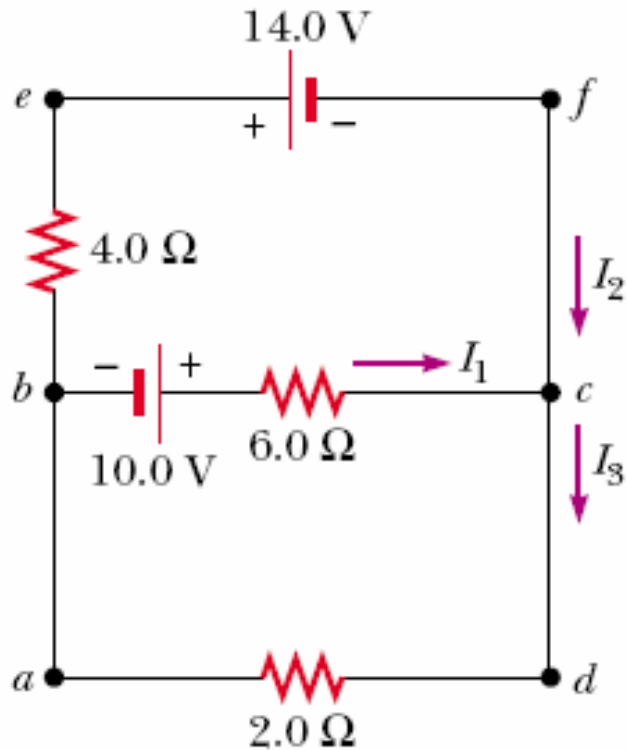
$$\sum \Delta V = 0$$

$$\mathcal{E}_1 - IR_1 - \mathcal{E}_2 - IR_2 = 0$$

$$I = \frac{\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2}{R_1 + R_2} = \frac{6.0 \text{ V} - 12 \text{ V}}{8.0 \ \Omega + 10 \ \Omega} = -0.33 \text{ A}$$

$I < 0$   $\implies$  sentido opuesto al asignado

## Circuito con dos mallas



$$I_1 + I_2 = I_3$$

*abcda*

$$10.0 \text{ V} - (6.0 \ \Omega) I_1 - (2.0 \ \Omega) I_3 = 0$$

*befcb*

$$-14.0 \text{ V} + (6.0 \ \Omega) I_1 - 10.0 \text{ V} - (4.0 \ \Omega) I_2 = 0$$

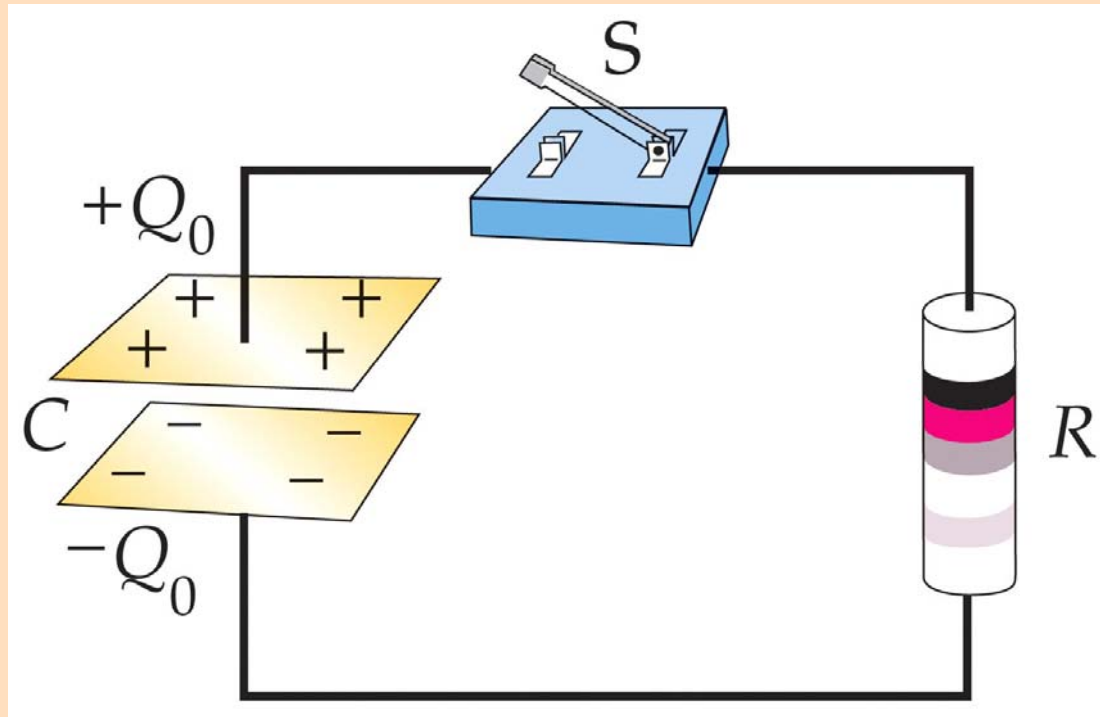
$$I_1 = 2.0 \text{ A}$$

$$I_2 = -3.0 \text{ A}$$

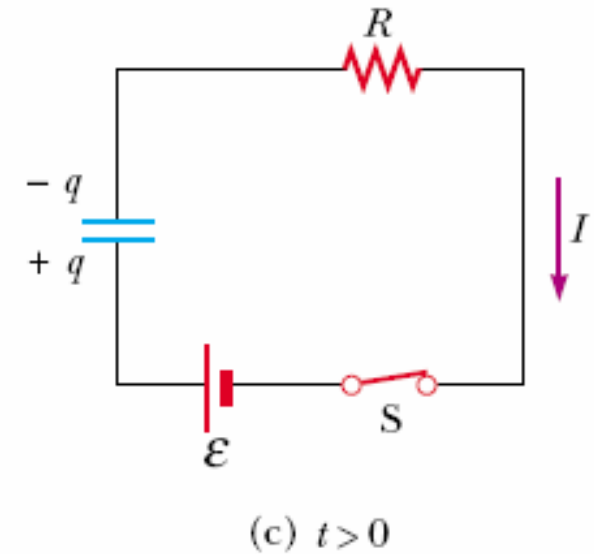
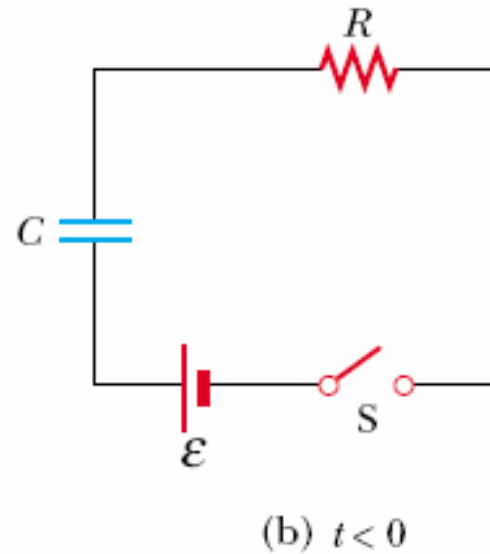
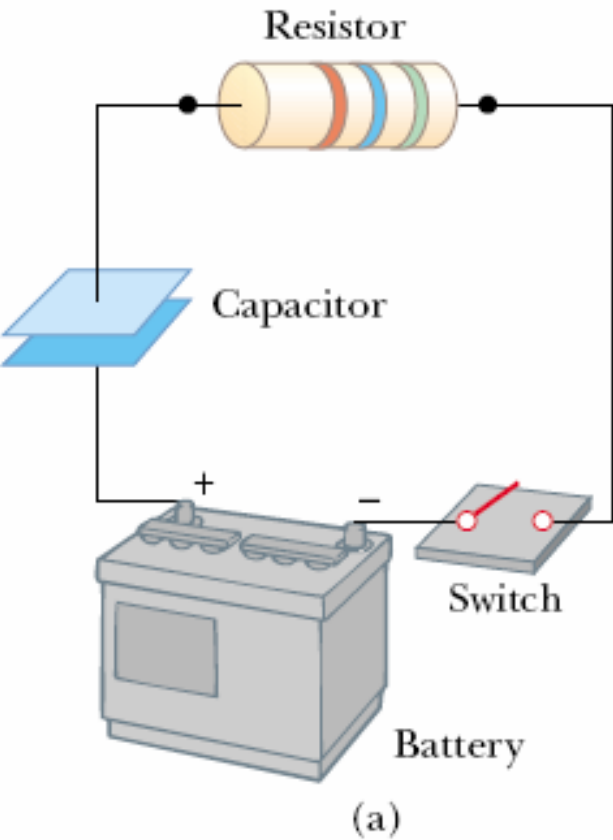
$$I_3 = I_1 + I_2 = -1.0 \text{ A}$$

**Sentido  $I_2$   $I_3$  opuestos a los indicados**

# Circuitos RC



## Carga de un capacitor



$$\mathcal{E} - \frac{q}{C} - IR = 0 \quad \xrightarrow{I = dq/dt} \quad \frac{dq}{dt} = \frac{\mathcal{E}}{R} - \frac{q}{RC}$$

$$\frac{dq}{dt} = \frac{C\mathcal{E}}{RC} - \frac{q}{RC} = -\frac{q - C\mathcal{E}}{RC}$$

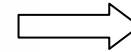
$$\frac{dq}{q - C\mathcal{E}} = -\frac{1}{RC} dt$$

$$\int_0^q \frac{dq}{(q - C\mathcal{E})} = -\frac{1}{RC} \int_0^t dt$$

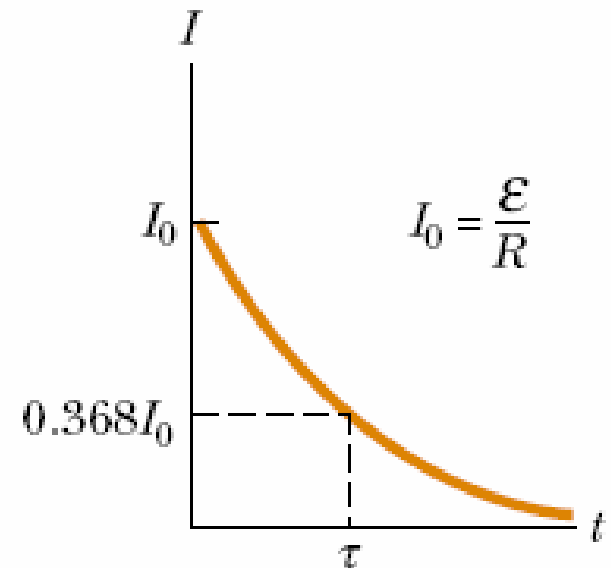
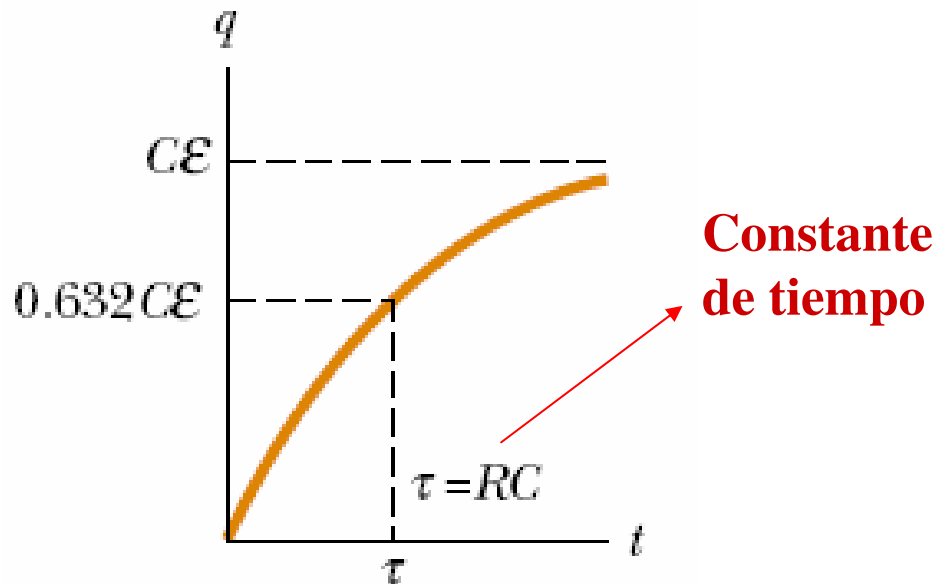
$$\ln\left(\frac{q - C\mathcal{E}}{-C\mathcal{E}}\right) = -\frac{t}{RC}$$

**Llamamos:**  $I_0 = \frac{\mathcal{E}}{R}$      $Q = C\mathcal{E}$

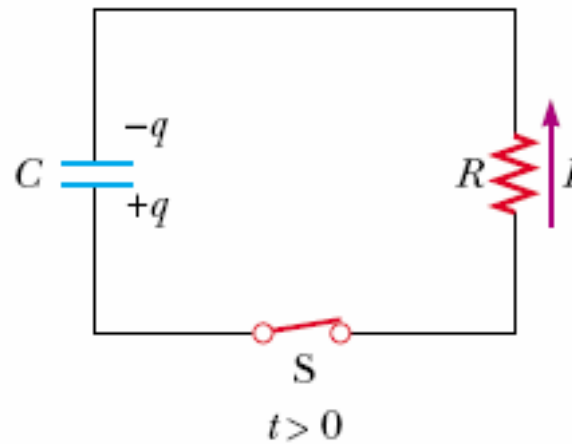
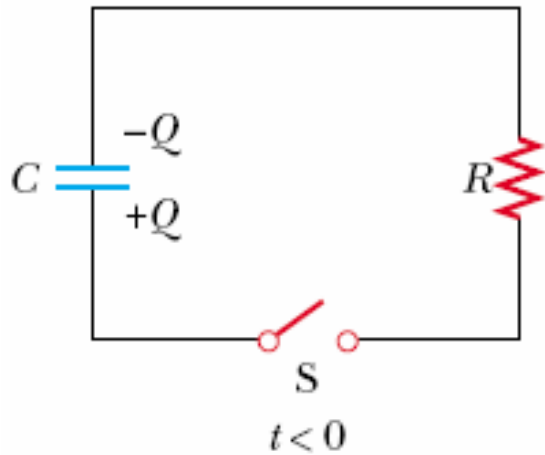
$$q(t) = C\mathcal{E}(1 - e^{-t/RC}) = Q(1 - e^{-t/RC})$$



$$I(t) = \frac{\mathcal{E}}{R} e^{-t/RC}$$



## Descarga de un capacitor



$$-\frac{q}{C} - IR = 0$$

$$I = -\frac{dq}{dt}$$

$$-R \frac{dq}{dt} = \frac{q}{C}$$

$$\int_Q^q \frac{dq}{q} = -\frac{1}{RC} \int_0^t dt$$

$$\frac{dq}{q} = -\frac{1}{RC} dt$$

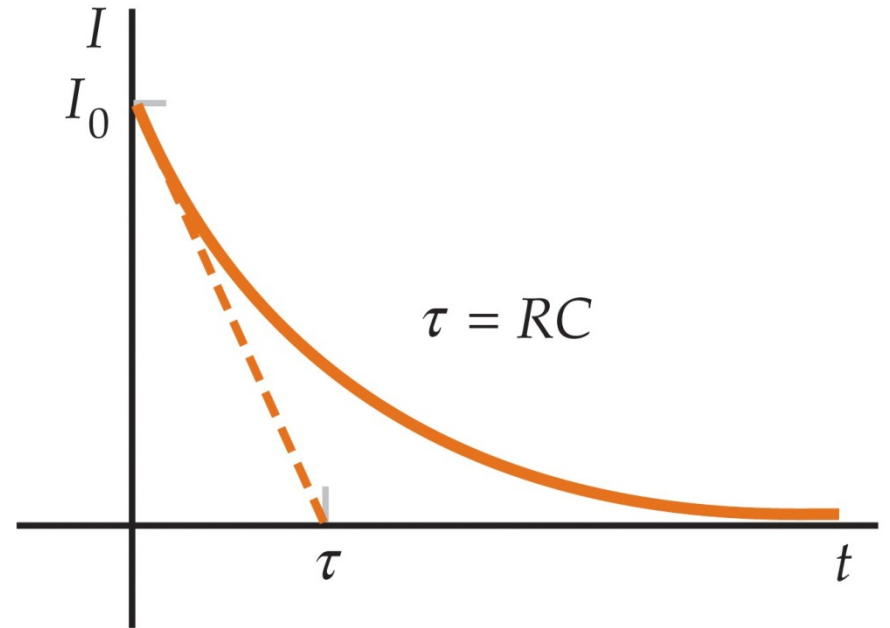
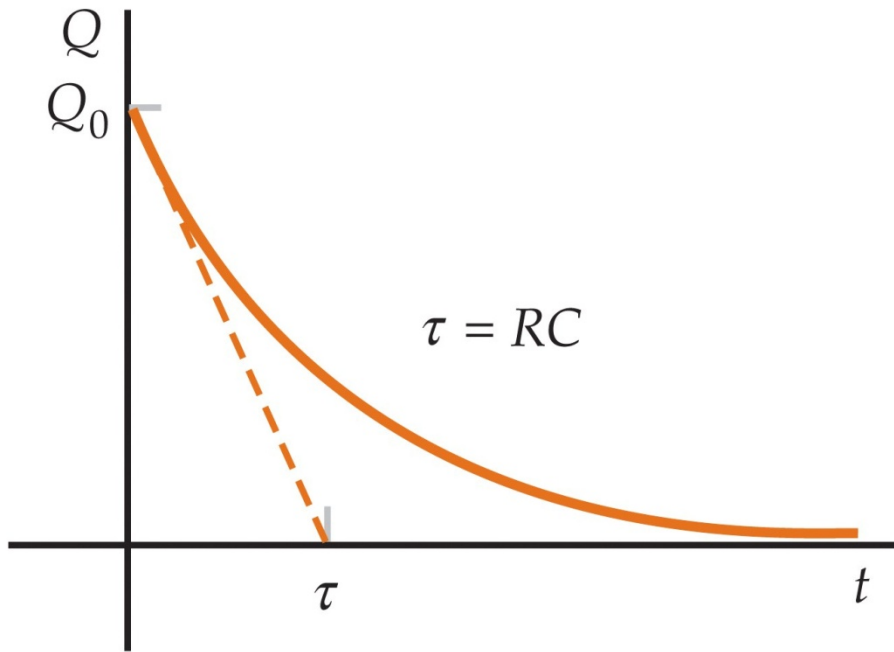
$$\ln\left(\frac{q}{Q}\right) = -\frac{t}{RC}$$

$$q(t) = Qe^{-t/RC}$$



$$q(t) = Qe^{-t/RC}$$

$$I(t) = \frac{-dq}{dt} = \frac{-d}{dt} (Qe^{-t/RC}) = \frac{Q}{RC} e^{-t/RC}$$



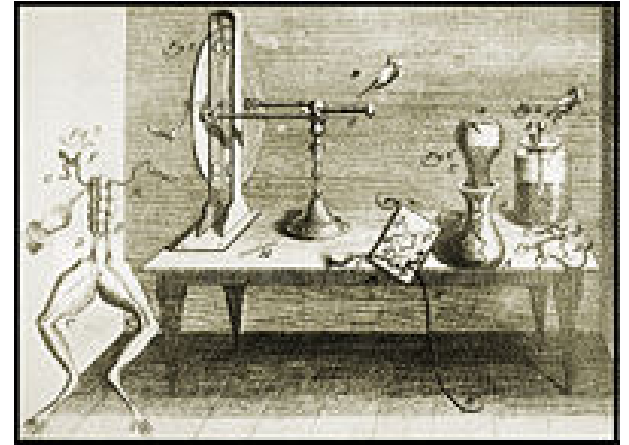
# Electroquímica (Pilas y Baterías)



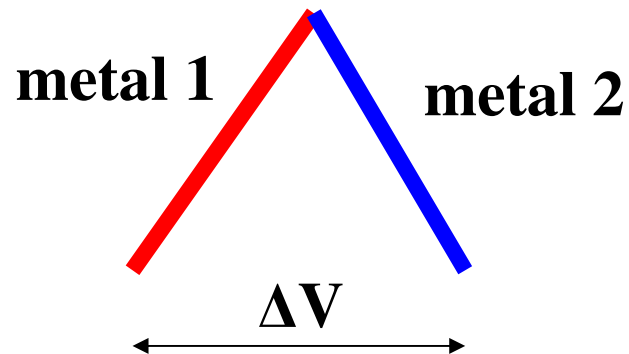
## Luigi Galvani (1737-1798)



**Electricidad  
animal**



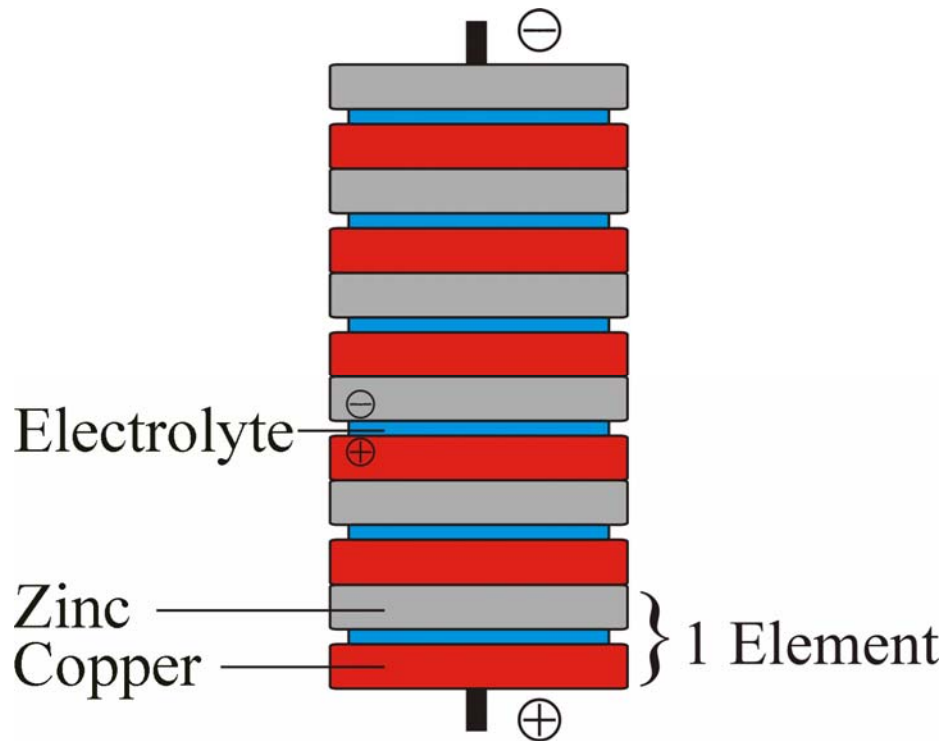
**Mientras disecaba una pata de rana, su bisturí tocó accidentalmente un gancho de bronce del que colgaba la pata. Se produjo una pequeña descarga, y la pata se contrajo espontáneamente.**





## Alessandro Volta (1745-1827)

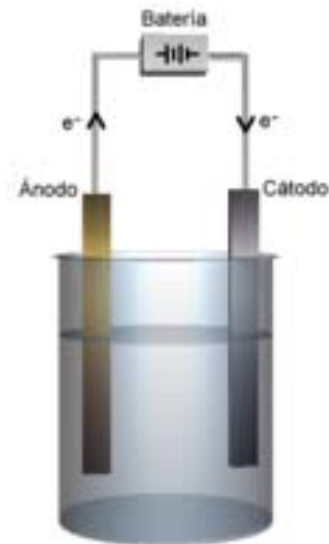
**Pila de Volta: Apilamiento de discos de cinc y cobre, separados por discos de cartón humedecidos con un electrolito.**



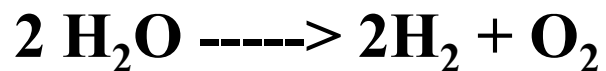


## Michael Faraday (1791-1867)

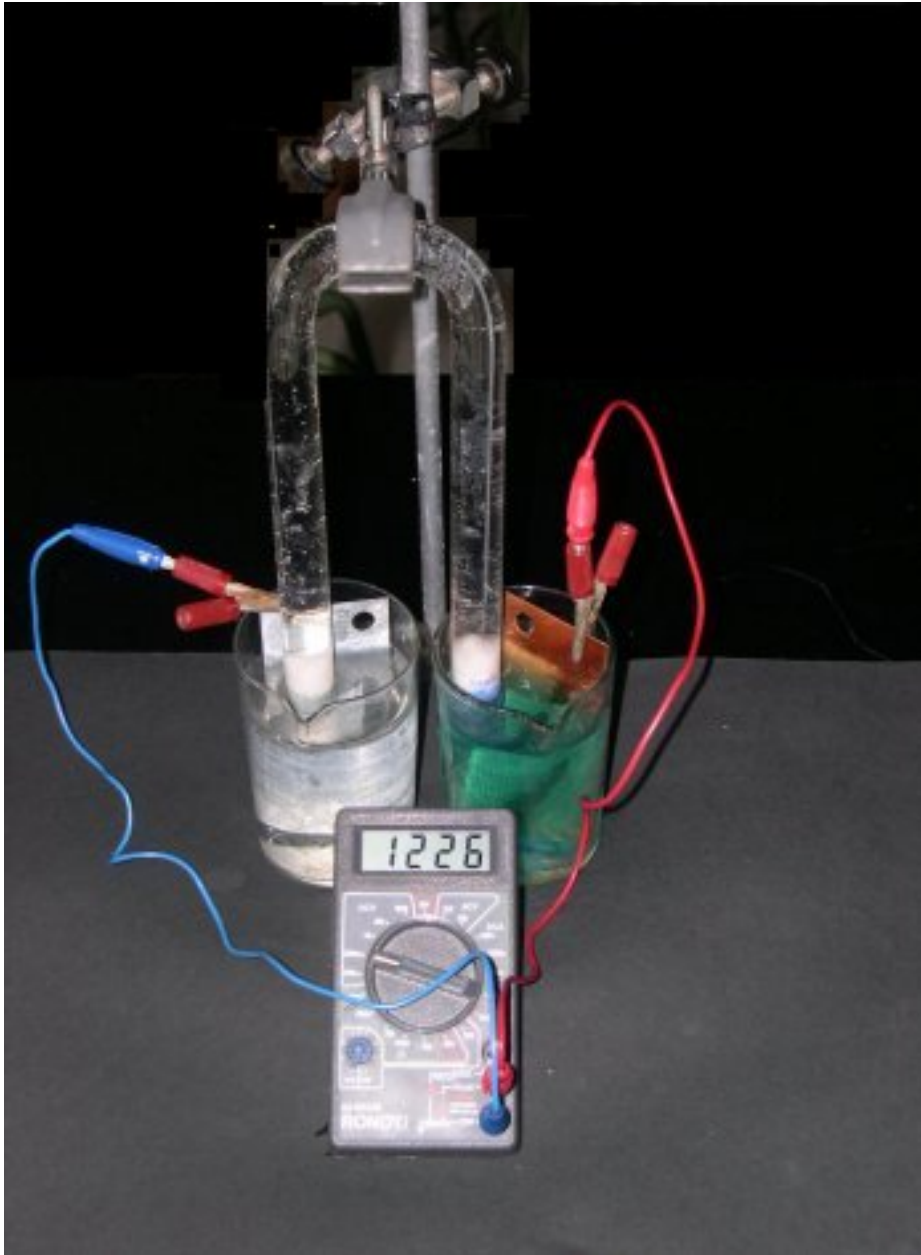
**Electrólisis:** consiste en la descomposición mediante una corriente eléctrica de sustancias ionizadas denominadas electrolitos.



**Ejemplo:**  
electrólisis del agua

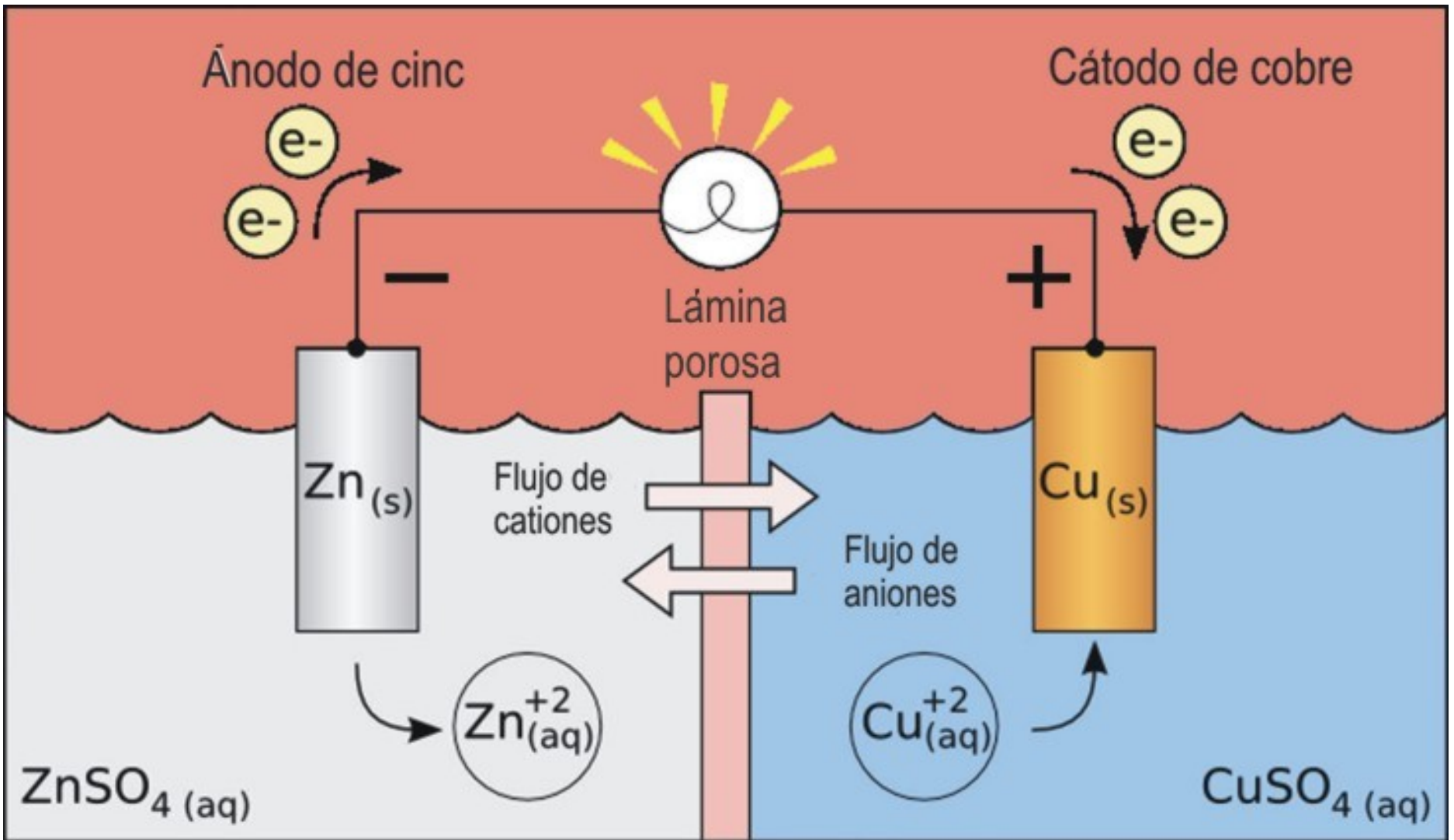


# Proceso inverso



**John Daniell (1790-1845)**

# Pila de Daniell

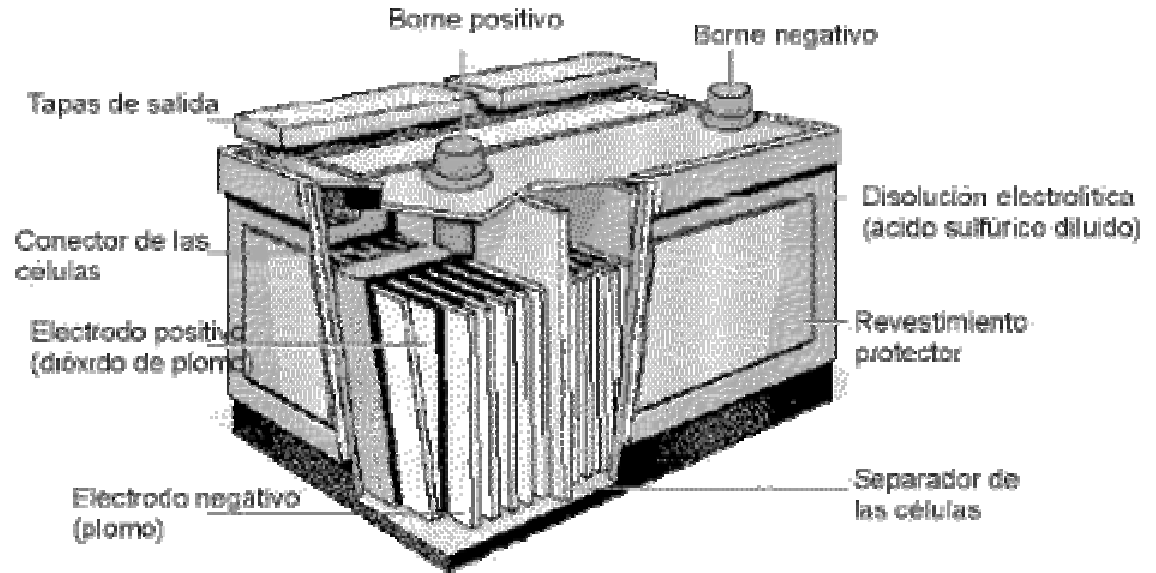


# Batería de un automóvil

**Electrodos: plomo,**

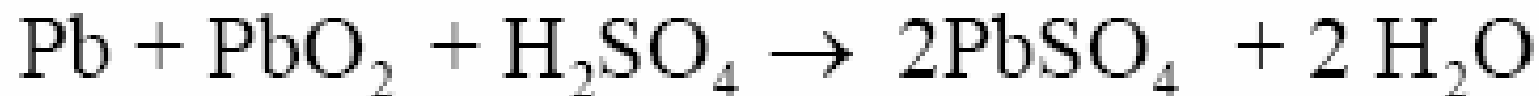
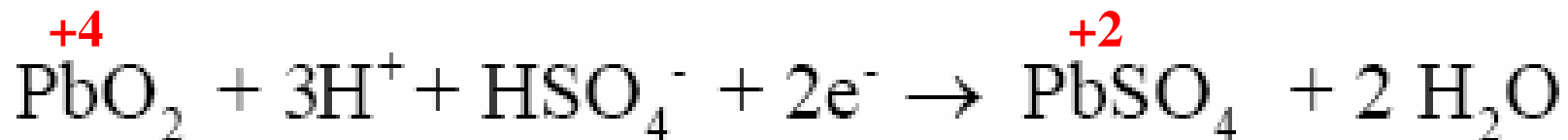
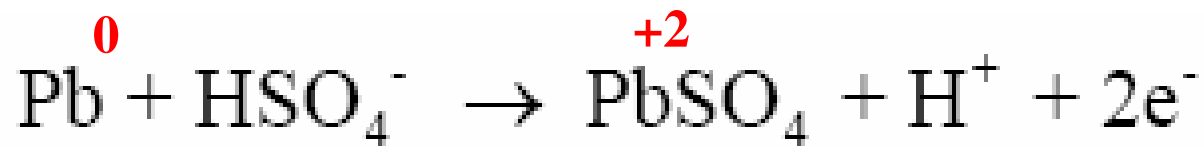
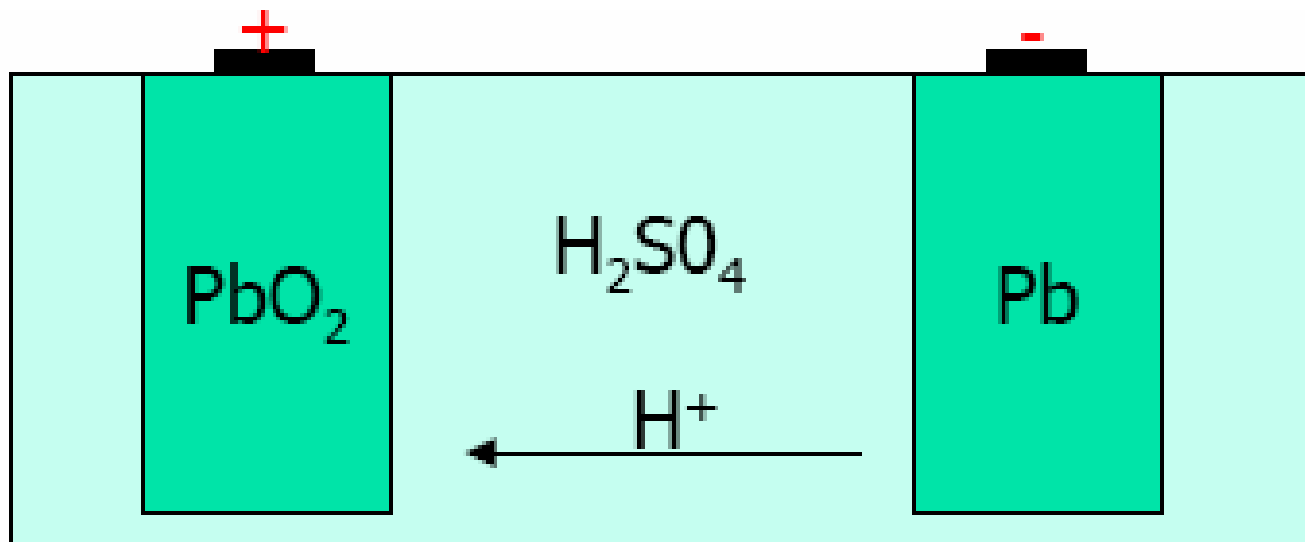
**Electrolito: solución de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ).**

**Cuando el aparato está descargado, se encuentra en forma de sulfato de plomo ( $PbSO_4$ ) incrustado en una matriz de plomo metálico ( $Pb$ ).**



**Durante el proceso de carga inicial, el sulfato de plomo es reducido a plomo metálico en el polo negativo, mientras que en el ánodo se forma óxido de plomo (IV) ( $PbO_2$ ).**

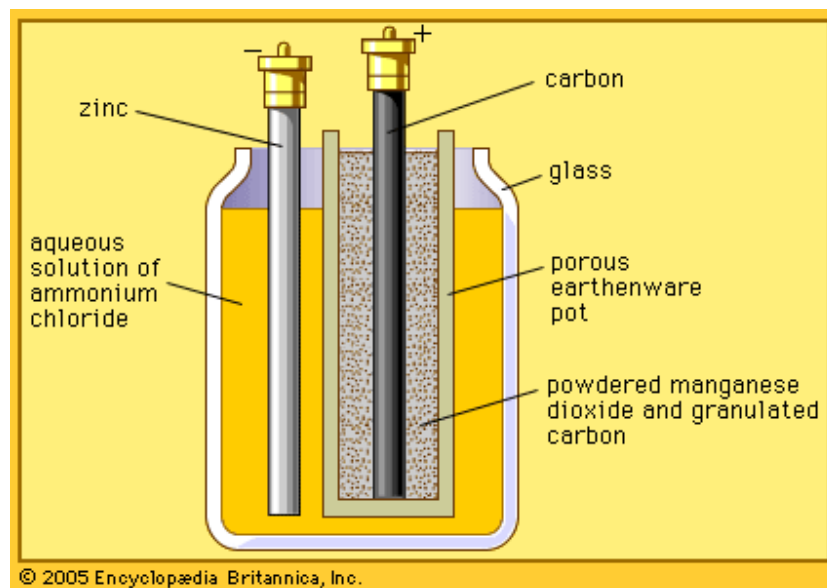




# Pila de Leclanché



En 1866, George Leclanché inventa en Francia la “pila seca” (Zinc-Dióxido de Manganeso).

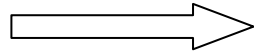


ánodo:  $\text{Zn}$  - cátodo:  $\text{MnO}_2 + \text{C}$  - electrolito:  $\text{NH}_4\text{Cl} + \text{H}_2\text{O}$

ánodo:  $\text{Zn} + 2 \text{OH}^- \rightarrow \text{ZnO} + \text{H}_2\text{O} + 2 \text{e}^-$

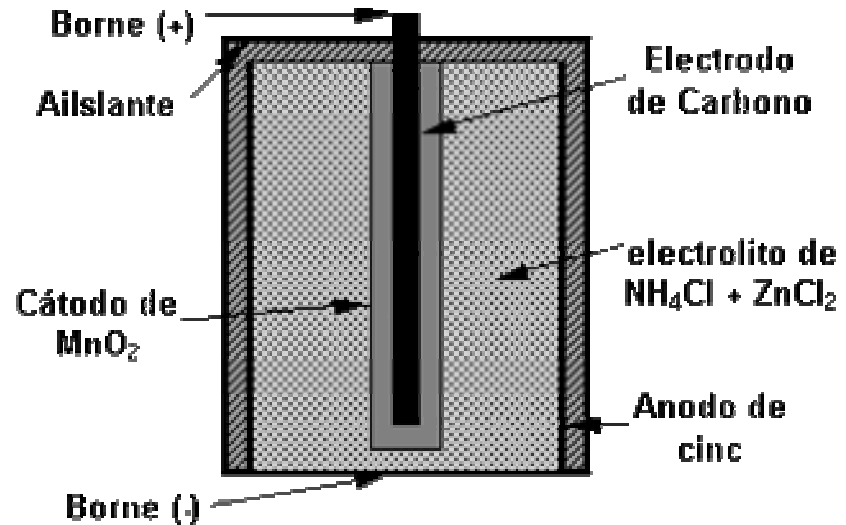
cátodo:  $\text{MnO}_2 + \text{H}_2\text{O} + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{MnO} + 2\text{OH}^-$

# Pila seca



Se estabiliza el electrolito con una sustancia gelatinosa

La pila seca que se utiliza hoy es muy similar al invento original. El electrolito es una pasta consistente en una mezcla de cloruro de amonio y cloruro de cinc. El electrodo negativo es de cinc, igual que la parte exterior de la pila, y el electrodo positivo es una varilla de carbono rodeada por una mezcla de carbono y dióxido de manganeso.



Anodo:

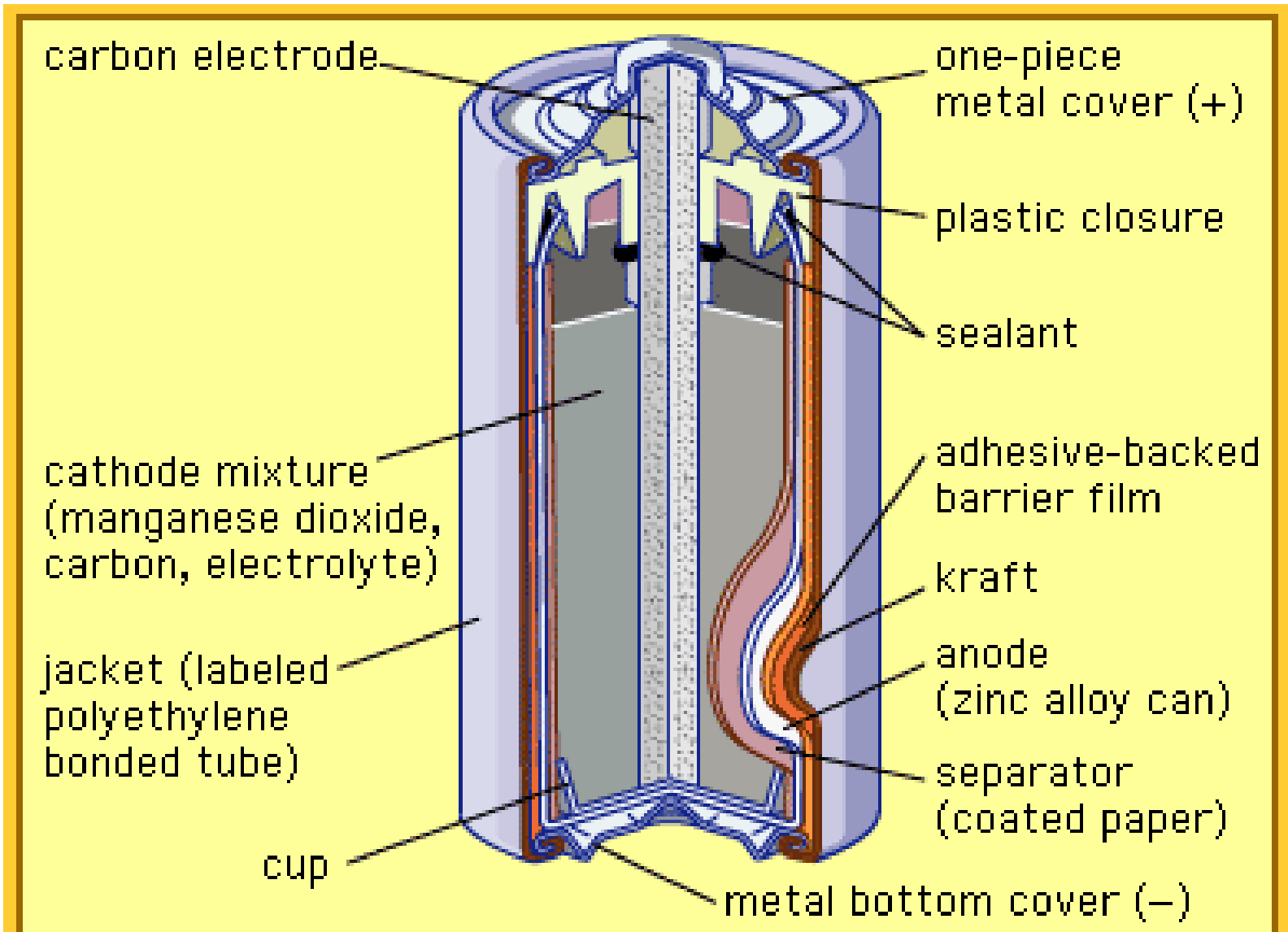


Cátodo:

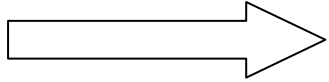


Reacción Global:





## Pilas alcalinas (larga vida)



**Duran más porque el zinc no está expuesto a un ambiente ácido como el que provocan los iones amonio en la pila convencional. Como los iones se mueven más fácilmente a través del electrolito, produce más potencia y una corriente más estable.**

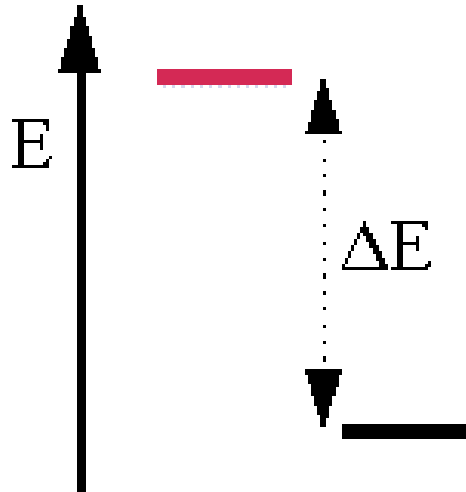
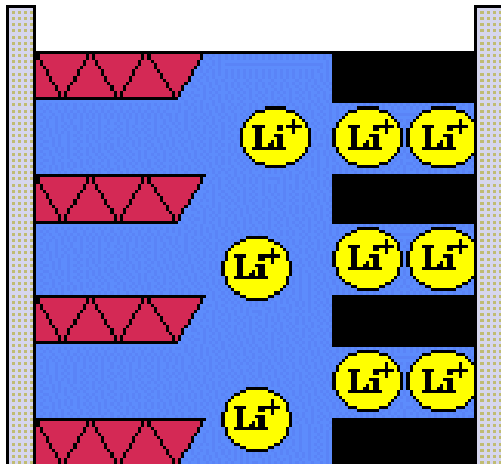
# Baterías de litio

Emplea como electrolito una sal de litio que procura los iones necesarios para la reacción electroquímica reversible que tiene lugar entre el cátodo y el ánodo. Las propiedades de las baterías de Li-ion, como la ligereza de sus componentes, su elevada capacidad energética y resistencia a la descarga, han permitido el diseño de acumuladores livianos, de pequeño tamaño y variadas formas, con un alto rendimiento.



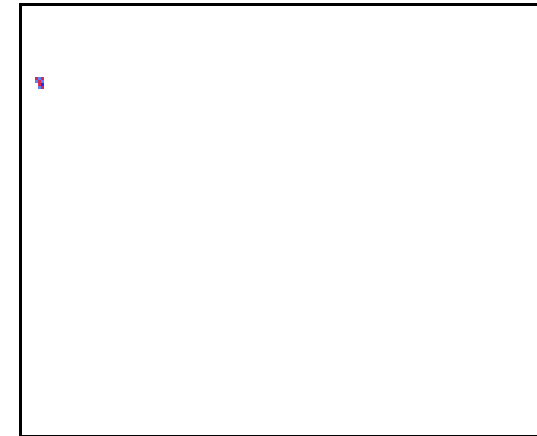
+

-



$\Delta E$

$\Delta E$



Q

# Celda de combustible

Está diseñada para permitir el reabastecimiento continuo de los reactivos consumidos; es decir, produce electricidad de una fuente externa de combustible y de oxígeno en contraposición a la capacidad limitada de almacenamiento de energía que posee una batería.

