



FACULTAD DE CIENCIAS  
**EXACTAS**  
UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CENTRO  
DE LA PROVINCIA DE BUENOS AIRES

# **ELECTRICIDAD Y MAGNETISMO**

## **2017**

**SEPTIMA CLASE**

# ELECTRICIDAD Y MAGNETISMO

## Electrostática

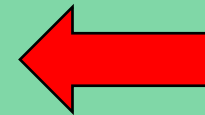
Cargas – Campo Eléctrico – Ley de Gauss

Potencial Eléctrico

Campo eléctrico en los conductores

Campos eléctricos en la materia

Corrientes eléctricas – Circuitos



Campo magnético – Ley de Ampere

Ley de Gauss para el campo magnético

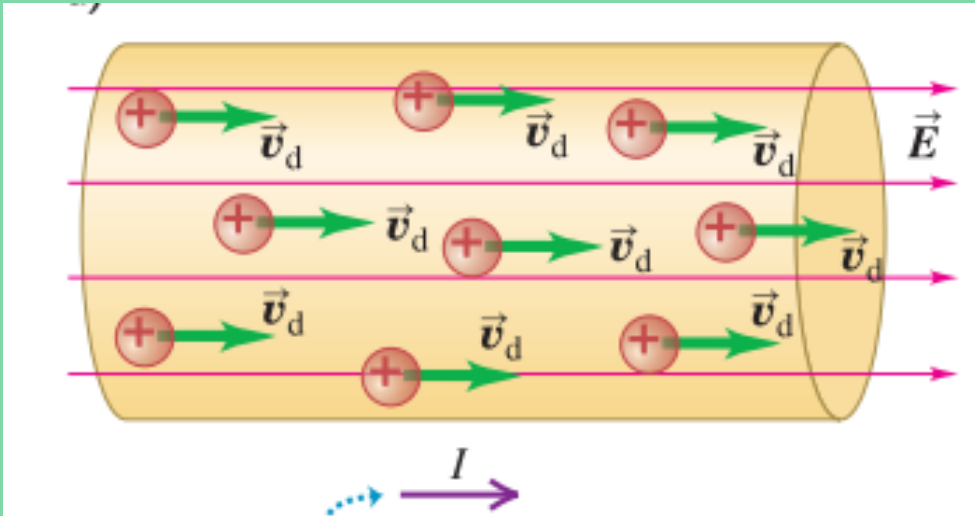
Campos magnéticos en la materia

Fuerza electromotriz inducida – Ley de Faraday

Circuitos de corriente alterna

# Corriente eléctrica

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



**Carga total por  
unidad de tiempo  
que atraviesa una  
superficie**

**Unidad de I**

$$1 \text{ amperio} = \frac{1 \text{ culombio}}{1 \text{ segundo}} ; 1 \text{ A} = 1 \text{ C/s.}$$

**Algunos  
números.....**

miliampere  $1 \text{ mA} = 10^{-3} \text{ A}$

microampere  $1 \mu\text{A} = 10^{-6} \text{ A}$

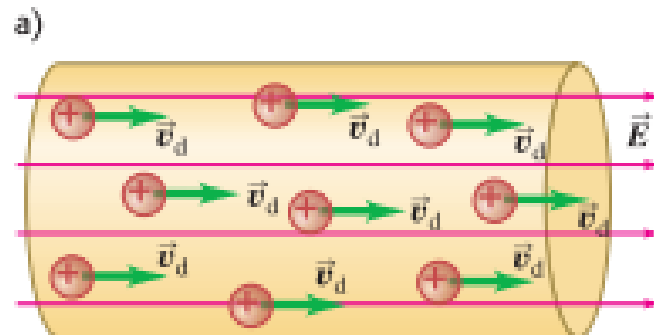
nanoamperes ( $1 \text{ nA} = 10^{-9} \text{ A}$ )

picoamperes ( $1 \text{ pA} = 10^{-12} \text{ A}$ ).

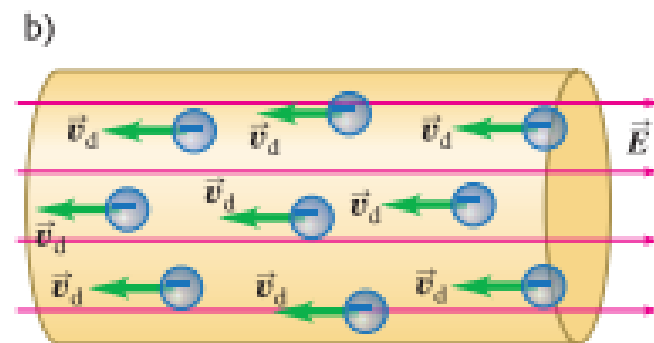
**corrientes en los circuitos de  
radio y televisión**

**corrientes en los circuitos de  
computadoras**

La misma corriente es producida por a) cargas positivas que se trasladan en dirección del campo eléctrico  $\vec{E}$ , o b) el mismo número de cargas negativas que se desplazan con la misma rapidez en la dirección opuesta a  $\vec{E}$ .

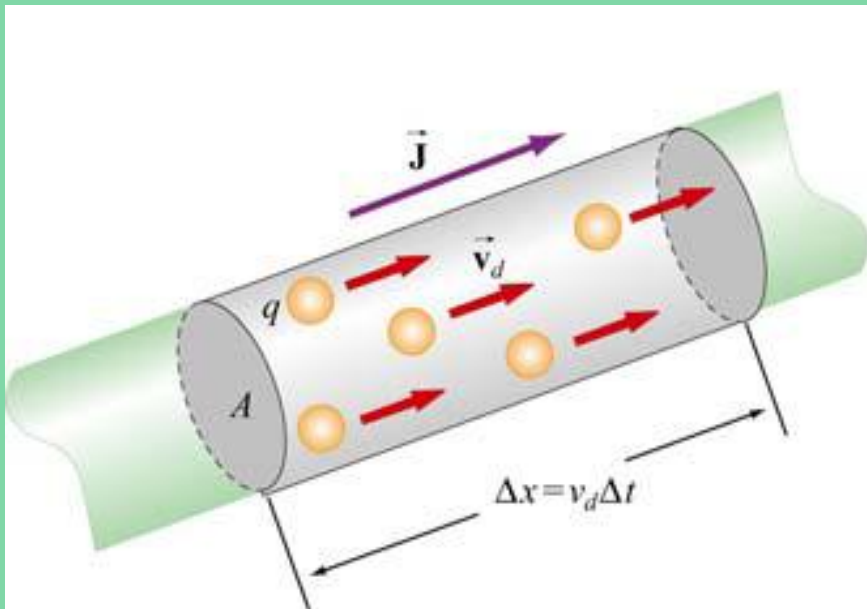


Una corriente convencional  $I$  es tratada como un flujo de cargas positivas, sin importar si las cargas libres en el conductor son positivas, negativas o ambas.



En un conductor metálico, las cargas en movimiento son electrones, pero la corriente aún apunta en la dirección en que fluirían las cargas positivas.

# Calculemos I



Concentración de partículas ( $\text{m}^{-3}$ )

Area de sección transversal ( $\text{m}^2$ )

$$dQ = q(nAv_d dt) = nqv_d A dt$$

$$I = \frac{dQ}{dt} = nqv_d A$$

Densidad de corriente  $J$  : corriente por unidad de área de la sección transversal

La corriente  $I$  y la densidad de corriente  $J$  no dependen del signo de la carga

$$I = \frac{dQ}{dt} = n|q|v_d A$$

$$J = \frac{I}{A} = n|q|v_d$$

$$J = \frac{I}{A} = nqv_d$$

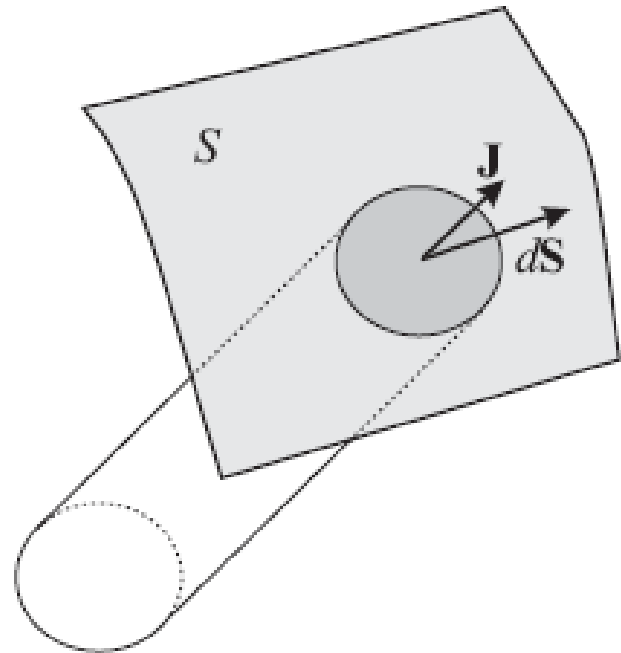
La densidad de corriente vectorial incluye la dirección de la velocidad de deriva

$$\vec{J} = nq\vec{v}_d$$

$$I = \int_S dI = \int_S nq\mathbf{v}_d \cdot d\mathbf{S}.$$

$$\mathbf{J} = nq\mathbf{v}_d.$$

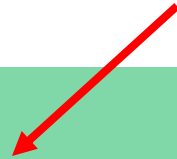
$$I = \int_S \mathbf{J} \cdot d\mathbf{S}$$



La densidad de corriente en un conductor depende del campo eléctrico y de las propiedades del material. En general, esta dependencia es muy compleja.

Pero para muchos materiales

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



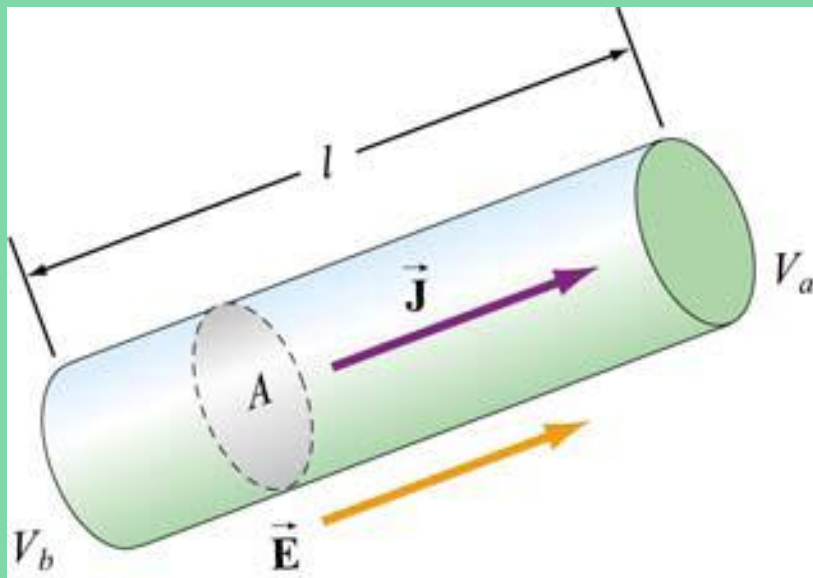
Conductividad eléctrica

**Ley de Ohm**  
(microscópica)

Descubierta en 1826 por el físico alemán Georg Simon Ohm (1787-1854).

Cuando se cumple la ley de Ohm,  $\sigma$  es constante e independiente de la magnitud del campo eléctrico, por lo que  $E$  es directamente proporcional a  $J$

## Otra forma de la ley de Ohm



$$\Delta V = V_b - V_a = -\int_a^b \vec{E} \cdot d\vec{s} = El$$

$$J = \sigma E = \sigma \left( \frac{\Delta V}{l} \right)$$

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

Resistencia eléctrica

$$R = \frac{\Delta V}{I} = \frac{l}{\sigma A}$$

$$1 \Omega \equiv \frac{1 \text{ V}}{1 \text{ A}}$$

$$\Delta V = IR$$

**Ley de Ohm**

(Macroscópica)



# Resistividad eléctrica

$$\rho = \frac{1}{\sigma}$$

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

## Unidades de $\rho$

$$(\text{V/m}) / (\text{A/m}^2) = \text{V} \cdot \text{m/A.}$$

$$\text{V/A} = \Omega \text{ (ohm)}$$

$$\Omega \cdot \text{m}$$

$$\rho = \frac{E}{J}$$

Sustancia		$\rho$ ( $\Omega \cdot \text{m}$ )	Sustancia		$\rho$ ( $\Omega \cdot \text{m}$ )	
<b>Conductores</b>			<b>Semiconductores</b>			
Metales	Plata	$1.47 \times 10^{-8}$	Carbono puro (grafito)	$3.5 \times 10^{-5}$		
	Cobre	$1.72 \times 10^{-8}$	Germanio puro	0.60		
	Oro	$2.44 \times 10^{-8}$	Silicio puro	2300		
	Aluminio	$2.75 \times 10^{-8}$	<b>Aislantes</b>			
	Tungsteno	$5.25 \times 10^{-8}$	Ámbar	$5 \times 10^{14}$		
	Acero	$20 \times 10^{-8}$	Vidrio	$10^{10}-10^{14}$		
	Plomo	$22 \times 10^{-8}$	Lucita	$>10^{13}$		
	Mercurio	$95 \times 10^{-8}$	Mica	$10^{11}-10^{15}$		
	Aleaciones	Manganina (84% Cu, 12% Mn, 4% Ni)	$44 \times 10^{-8}$	Cuarzo (fundido)	$75 \times 10^{16}$	
		Constantán (60% Cu, 40% Ni)	$49 \times 10^{-8}$	Azufre	$10^{15}$	
Nicromel		$100 \times 10^{-8}$	Teflón	$>10^{13}$		
			Madera	$10^8-10^{11}$		

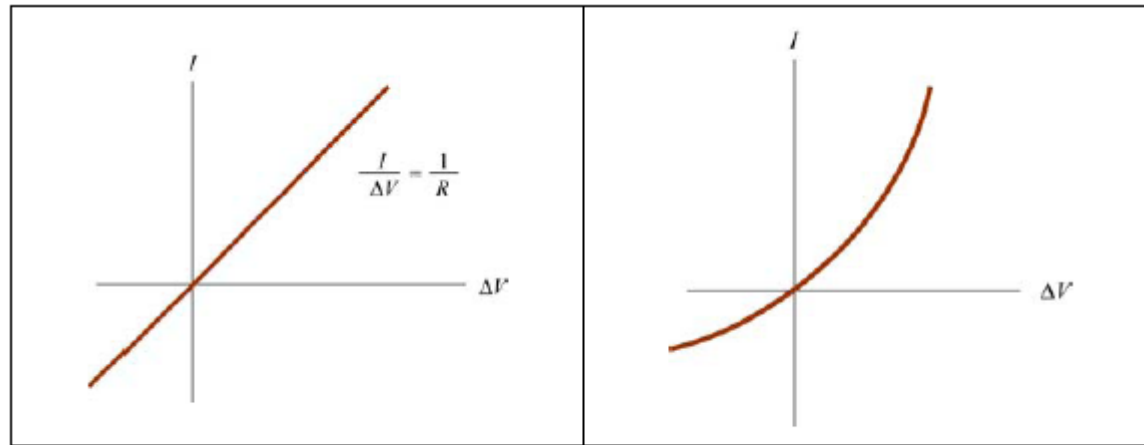


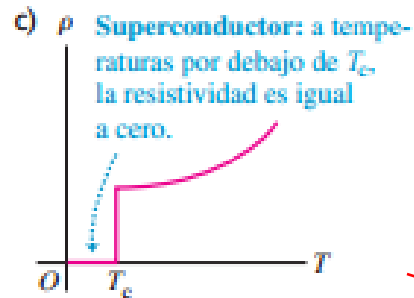
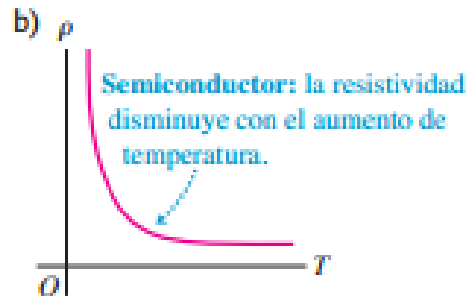
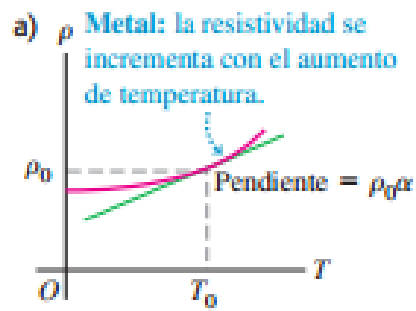
Figure 6.2.2 Ohmic vs. Non-ohmic behavior.

Otra definición de  
Resistividad eléctrica

$$\rho = \frac{E}{J} = \frac{\Delta V / l}{I / A} = \frac{RA}{l}$$

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

# Resistividad y temperatura



Variación de la resistividad  $\rho$  con la temperatura absoluta  $T$  para a) un metal normal, b) un semiconductor y c) un superconductor. En a), la aproximación lineal a  $\rho$  como función de  $T$  se muestra con línea color verde; la aproximación coincide exactamente en  $T = T_0$ , donde  $\rho = \rho_0$ .

Valores en punto de referencia  $0^\circ\text{C}$  o  $20^\circ\text{C}$

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

coeficiente de temperatura de la resistividad

**Tabla 25.2** Coeficientes de temperatura de la resistividad (valores aproximados cerca de la temperatura ambiente)

Material	$\alpha [(\text{°C})^{-1}]$	Material	$\alpha [(\text{°C})^{-1}]$
Aluminio	0.0039	Plomo	0.0043
Latón	0.0020	Manganina	Indep de T 0.00000
Carbono (grafito)	-0.0005	Mercurio	0.00088
Constantán	0.00001	Nicromel	0.0004
Cobre	0.00393	Plata	0.0038
Hierro	0.0050	Tungsteno	0.0045

1911 Onnes  $T < 4.2\text{K}$  (mercurio, costoso y peligroso enfriar)

.....

1986 Muller y Bednorz – ox de bario, lantano y cobre  $T \sim 40\text{K}$

1987, ox de itrio, cobre y bario  $T > 77\text{K}$  (nitrógeno líquido)

Actual (2006) hay materiales con  $T \sim 138\text{K}$

Implicancias en distribución energía, diseño computadoras y sistemas de transporte.

# Resumiendo...

## Corriente eléctrica

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

## Corriente promedio en un conductor

$$I_{\text{avg}} = nqv_d A$$

Número de cargas  
por unidad de  
volumen

Velocidad de  
arrastre

Área sección  
transversal

## Densidad de corriente

$$\vec{J} = nq\vec{v}_d$$

## Ley de Ohm microscópica

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

conductividad

resistividad

$$\rho = \frac{1}{\sigma}$$

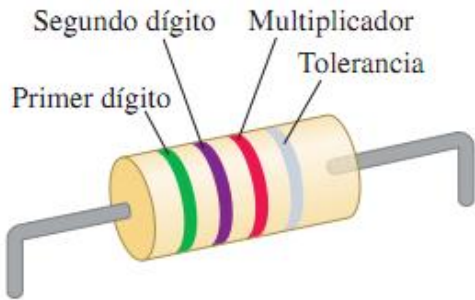
## Ley de Ohm macroscópica

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

Resistencia

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

Color	Valor como dígito	Valor como multiplicador
Negro	0	1
Café	1	10
Rojo	2	$10^2$
Naranja	3	$10^3$
Amarillo	4	$10^4$
Verde	5	$10^5$
Azul	6	$10^6$
Violeta	7	$10^7$
Gris	8	$10^8$
Blanco	9	$10^9$

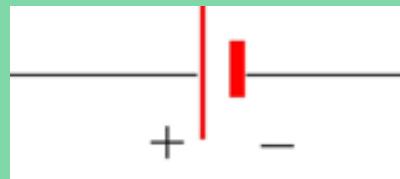


**Resistencia eléctrica**

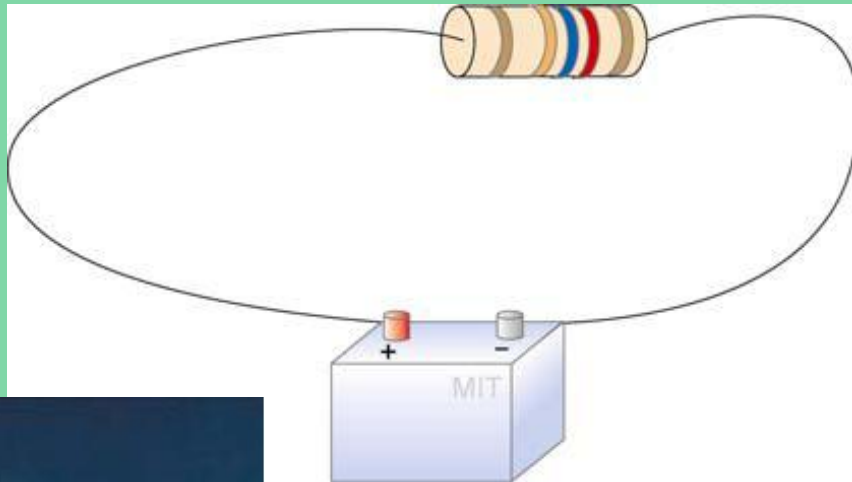


**Interruptor**

**Símbolos  
convencionales**



**Batería, pila, fuente  
de voltaje**

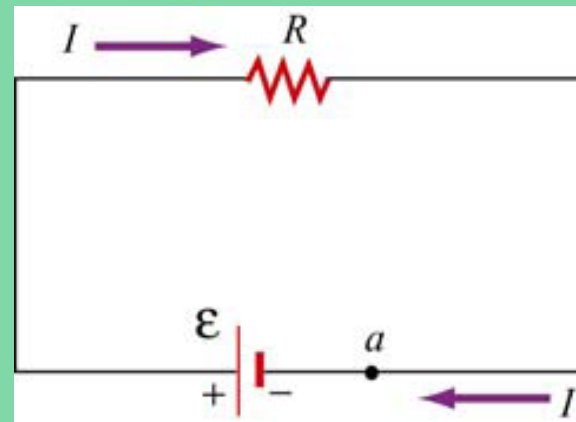


$$\varepsilon - I \cdot R = 0$$

Por lo tanto:  $I = \varepsilon / R$

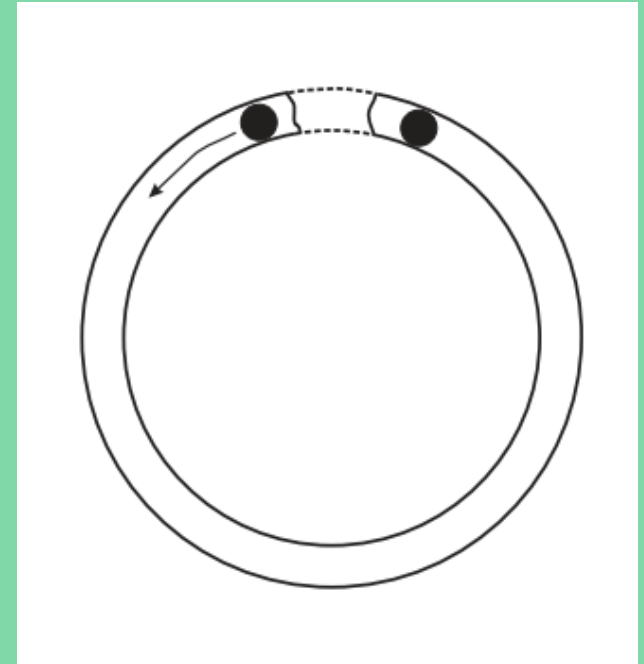
?

$$\varepsilon \equiv \frac{dW}{dq}$$



## Analogía mecánica

**el campo gravitatorio, que es conservativo, no es capaz de mantener una corriente continua de masa.**



**Para conseguir una corriente continua de masa se necesita un “empuje” adicional, que produce un campo de naturaleza distinta al gravitatorio (esto es, no conservativo)**

La misma cuestión puede ahora plantearse respecto al mantenimiento de una corriente de cargas eléctricas por un campo electrostático.

$$\frac{W}{q} = \oint \mathbf{E}_{\text{els}} \cdot d\mathbf{l} = 0 ,$$

Para mantener un movimiento continuo de cargas debemos introducir un elemento externo que proporcione a las cargas móviles el “impulso externo” necesario para compensar esta pérdida constante de energía.

**Fuerza electromotriz “fem”**

$$\mathcal{E} = \oint_{\text{circuito}} \mathbf{f} \cdot d\mathbf{l} ,$$

La fuerza tangencial por unidad de carga integrada sobre la longitud del circuito completo (esta cantidad es igual a la energía por unidad de carga suministrada en cada ciclo por el agente externo).

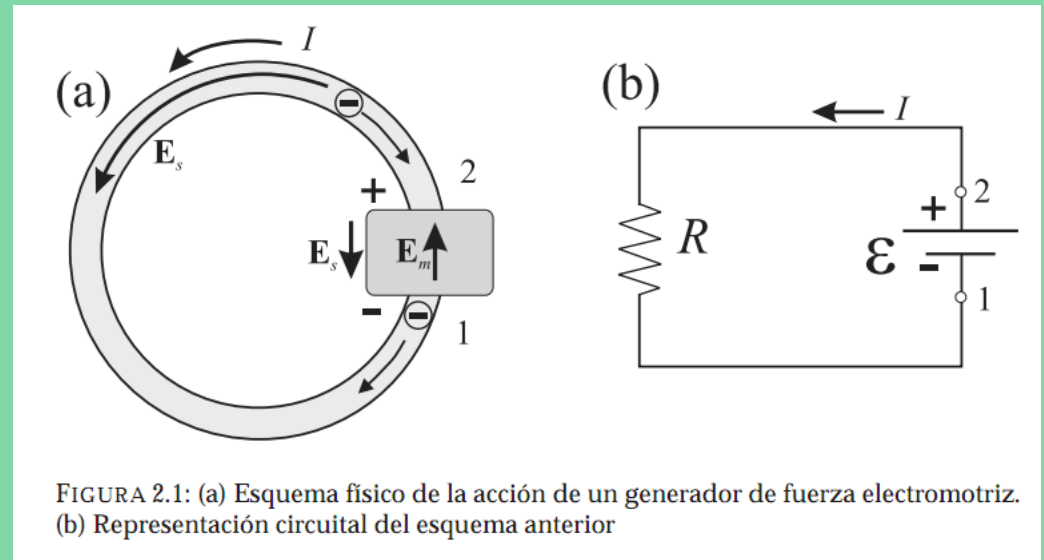


Las unidades de fuerza electromotriz son voltios.

Es importante aclarar que la fuerza electromotriz NO es una diferencia de potencial, puesto que el agente de fem no puede ser un campo electrostático, (campo de circulación nula), sino un campo de naturaleza no electrostática

$$\mathcal{E} \neq \Delta V ,$$

La existencia de una corriente eléctrica continua en un circuito requiere la acción de un agente externo, usualmente denominado generador de fem (o también, fuente de tensión), que proporcione el campo electromotor necesario para “empujar” las cargas positivas/negativas hacia potenciales crecientes/decrecientes en contra del efecto del campo electrostático.



## Potencia suministrada por el generador

El trabajo que realiza el generador (en concreto, el campo electromotor,  $\mathbf{E}_m$ ) para mover un diferencial de carga  $dq$  vendrá dado por

$$dW = dq \oint \mathbf{E}_m \cdot d\mathbf{l} = dq\mathcal{E} .$$

Puesto que este diferencial de carga forma parte de una corriente, tendremos que  $dq = Idt$  y por tanto

$$dW = I\mathcal{E}dt .$$

De la expresión anterior podemos deducir que la potencia,  $P$ , suministrada por el generador es

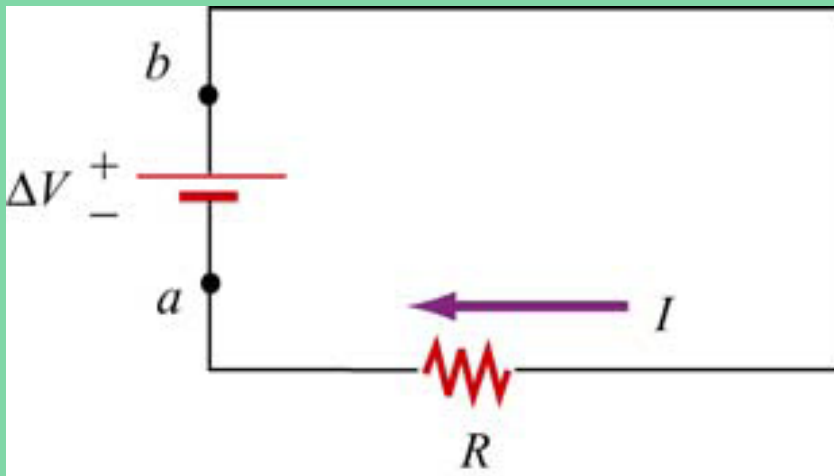
$$P = I\mathcal{E} .$$

# Potencia y energía eléctrica

$$\Delta U = \Delta q \Delta V$$

$$\Delta V = V_b - V_a > 0.$$

$$P = \frac{\Delta U}{\Delta t} = \left( \frac{\Delta q}{\Delta t} \right) \Delta V = I \Delta V$$



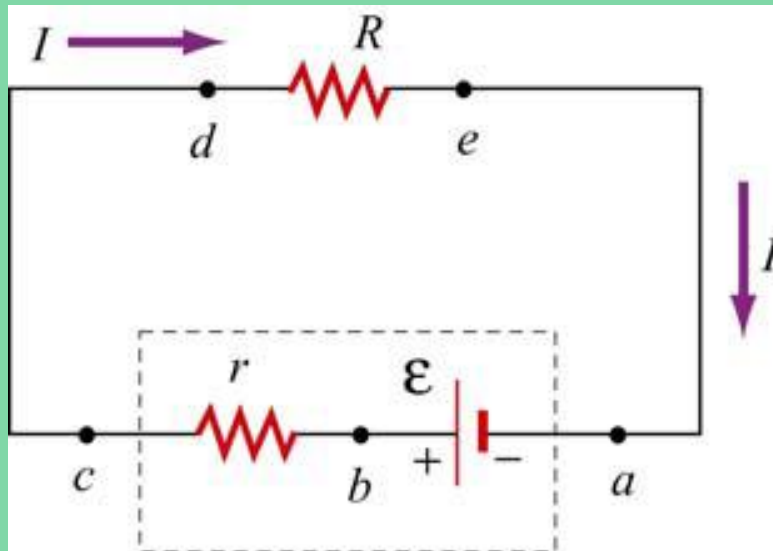
$$\Delta V = IR,$$

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

**LEY DE JOULE**

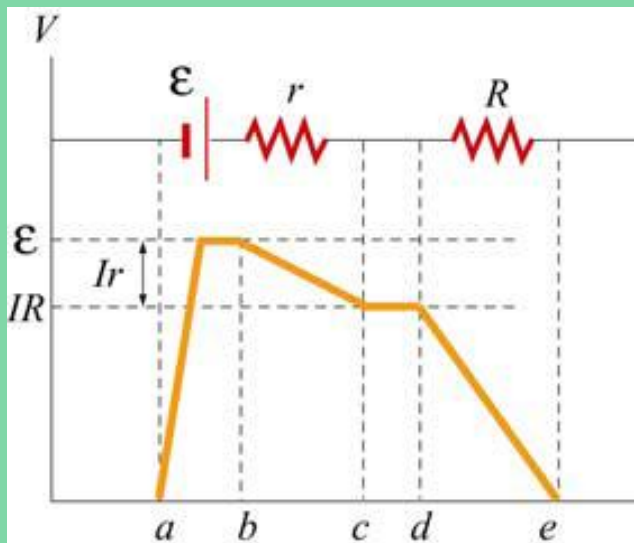
Esta ley para la potencia disipada en una resistencia fue deducida experimentalmente por J.P. Joule sobre 1841.

# Circuito real la fuente tiene una resistencia interna



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

$$\mathcal{E} - Ir - IR = 0$$



Por lo tanto ...

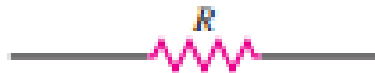
$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}$$

$$P = I\mathcal{E} = I(IR + Ir) = I^2R + I^2r$$

**Tabla 25.4** Símbolos para diagramas de circuito



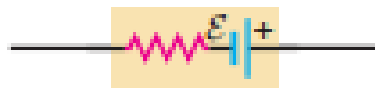
Conductor con resistencia despreciable.



Resistor.



Fuente de fem (la línea vertical más larga representa la terminal positiva, por lo general aquella con el mayor potencial).

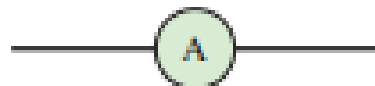


Fuente de fem con resistencia interna  $r$  (la  $r$  se puede colocar en cualquier lado).

o bien

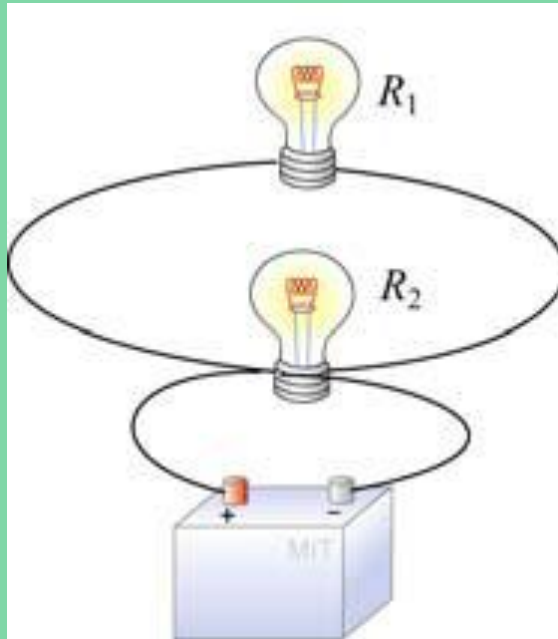


Voltímetro (mide la diferencia de potencial entre sus terminales).

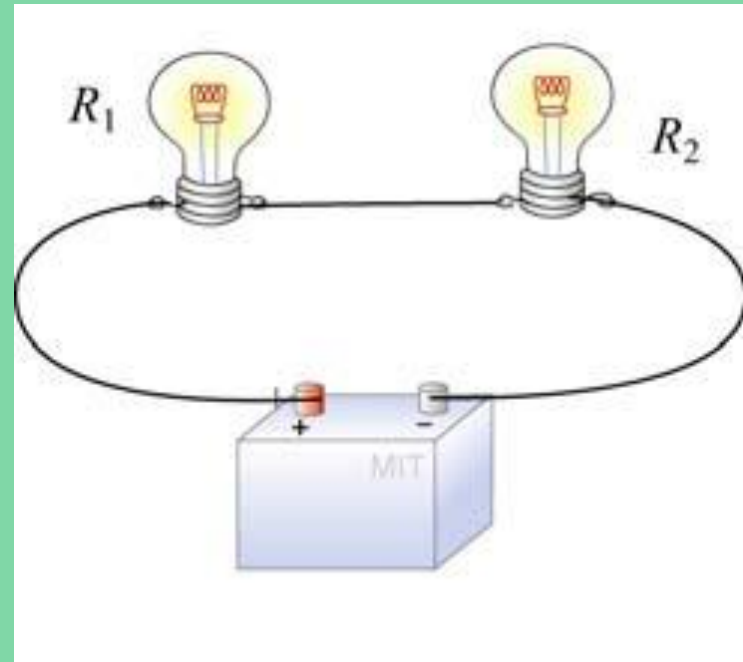


Amperímetro (mide la corriente que pasa a través suyo).

# Circuitos eléctricos

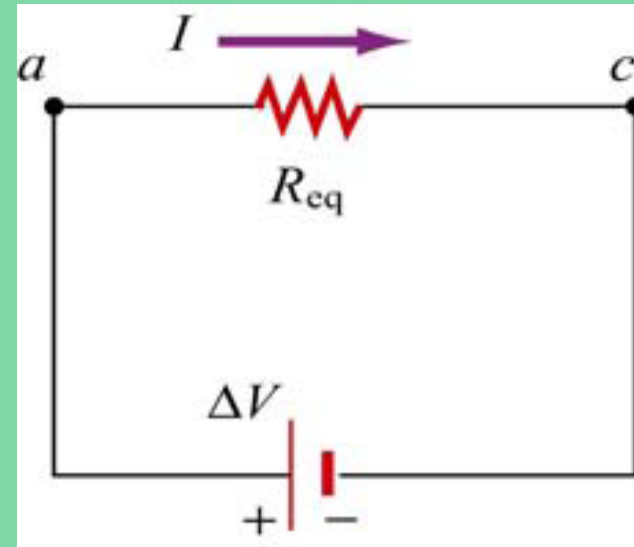
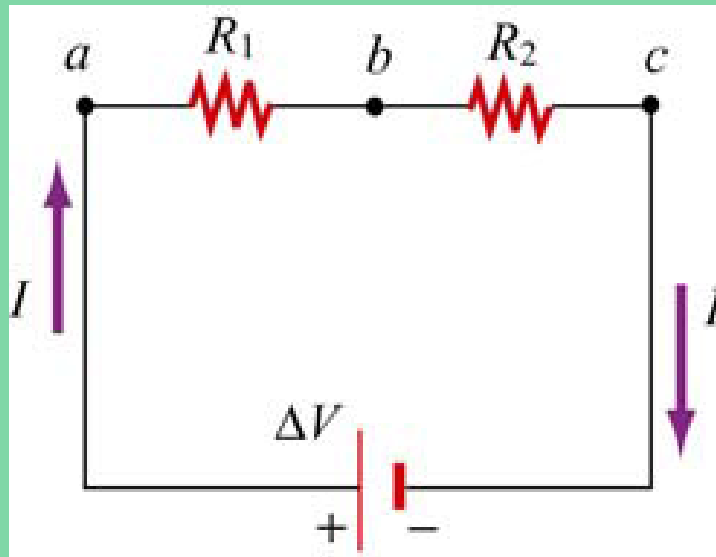


**Conexión paralelo**



**Conexión serie**

## Resistencias en serie



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

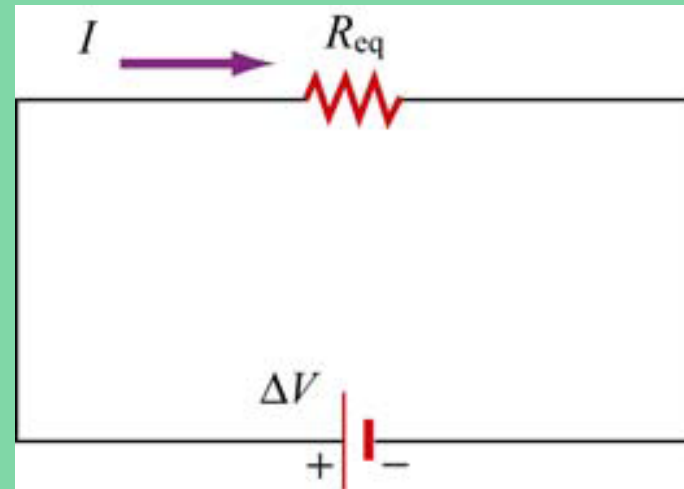
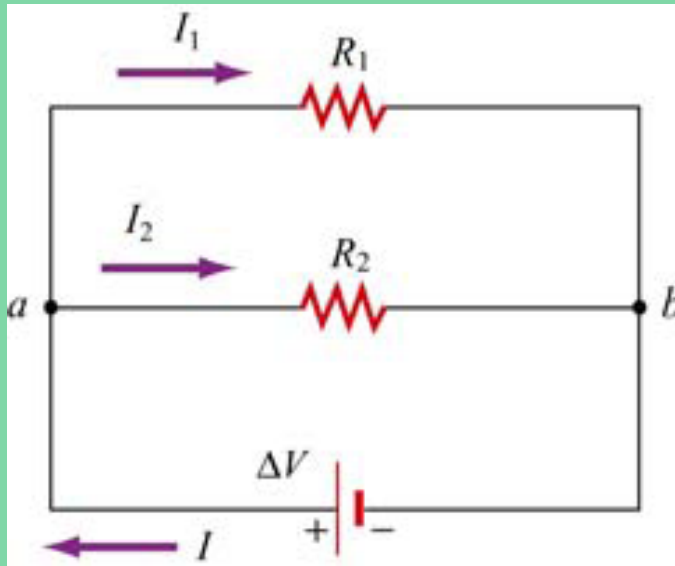
siendo

$$R_{eq} = R_1 + R_2$$

En general.....

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + \dots = \sum_{i=1}^N R_i$$

# Resistencias en paralelo



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

siendo

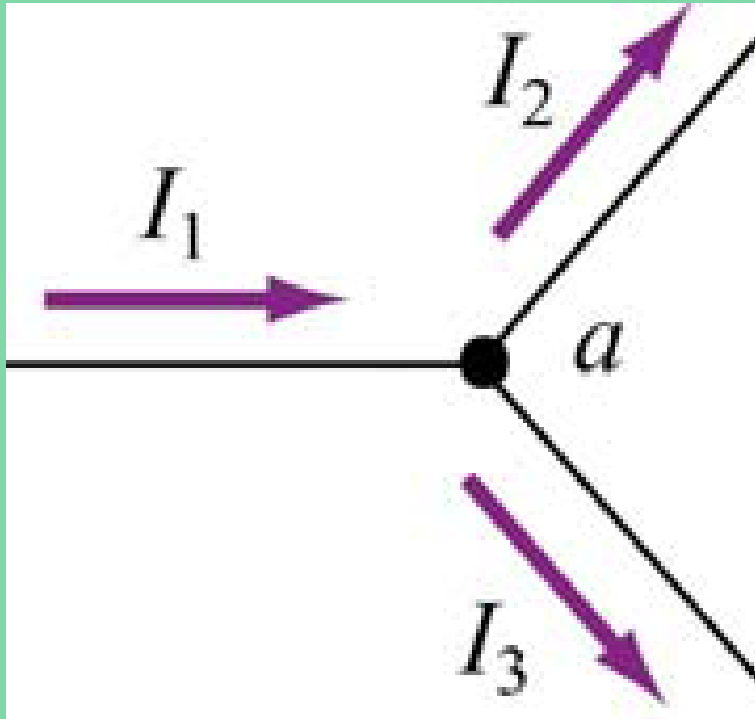
$$\frac{1}{R_{\text{eq}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

En general.....

$$\frac{1}{R_{\text{eq}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots = \sum_{i=1}^N \frac{1}{R_i}$$



# Leyes de Kirchhoff



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

**Primera: Ley de nodos**

$$I_1 = I_2 + I_3$$

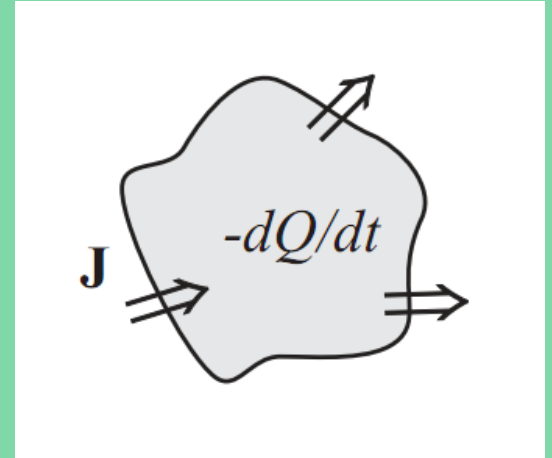
## Basados en el principio de conservación local de la carga

*La intensidad de corriente que atraviesa la superficie cerrada de un recinto es igual a menos la variación temporal de la carga móvil en su interior.*

## ECUACION DE CONTINUIDAD DE LA CARGA

$$\oint_S \mathbf{J} \cdot d\mathbf{S} = -\frac{dQ}{dt},$$

Indica que carga saliendo del recinto esta relacionado con disminución en el interior



$$\oint_S \mathbf{J} \cdot d\mathbf{S} = -\frac{d}{dt} \int_V \rho d\mathcal{V} = -\int_V \frac{\partial \rho}{\partial t} d\mathcal{V}.$$

**Para corrientes continuas**

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0,$$

**El flujo de corriente a través de un recinto cerrado es nulo; o lo que es lo mismo, la misma cantidad de carga que entra en el recinto sale de él.**

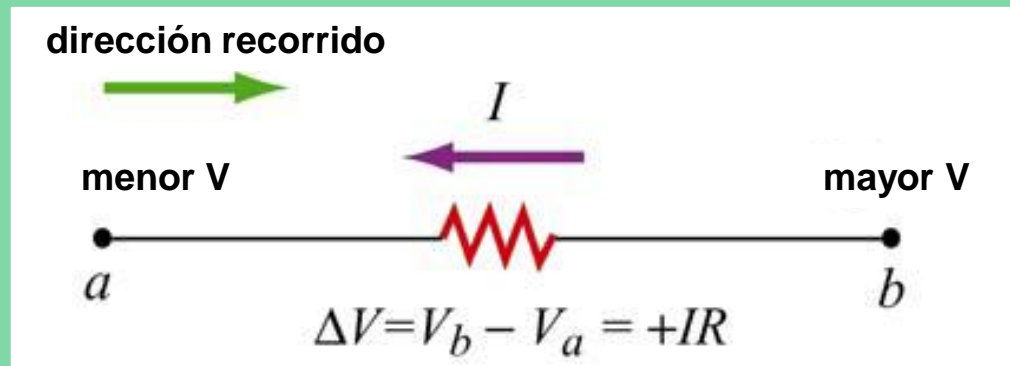
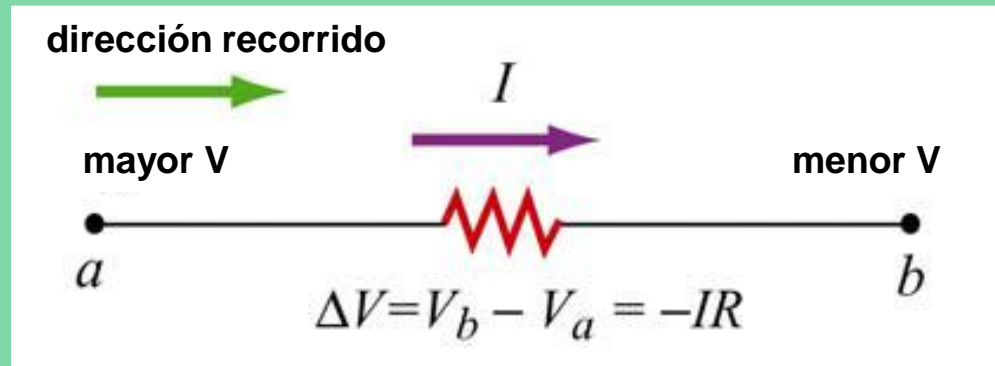
$$\oint_S \mathbf{J} \cdot d\mathbf{S} = 0$$

## Segunda: ley de mallas

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

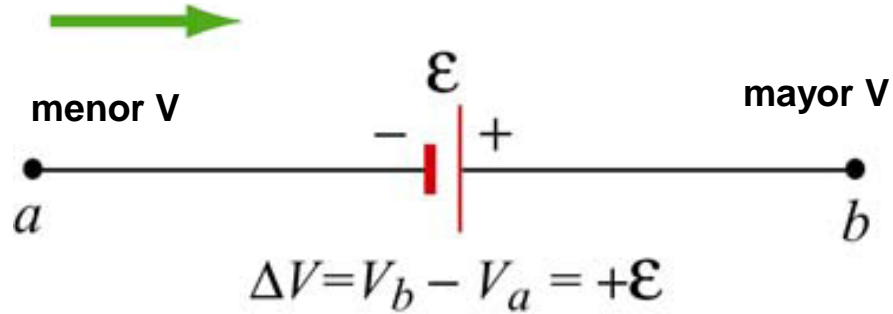
Basada en el principio de conservación de la energía

### Convención para determinar $\Delta V$

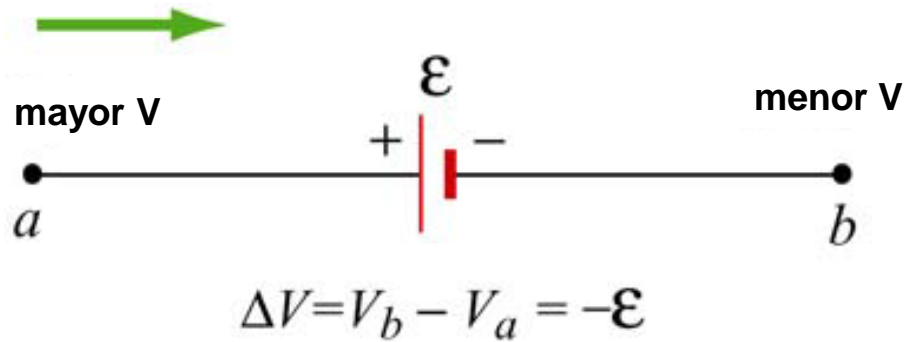


# Que sucede en la fuente de fem $\epsilon$ ?

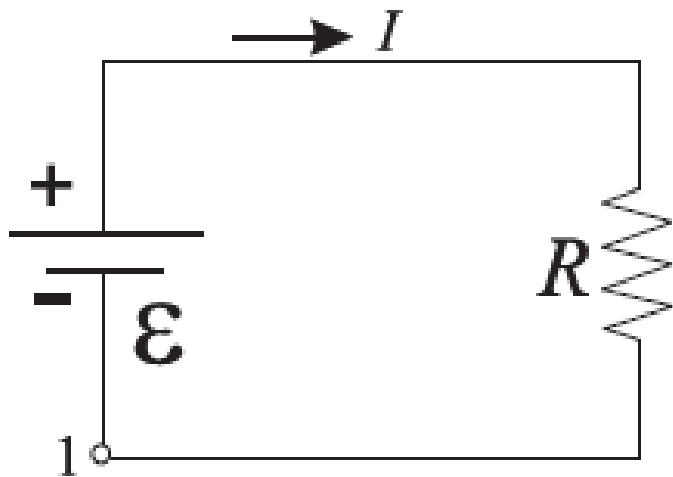
dirección recorrido



dirección recorrido

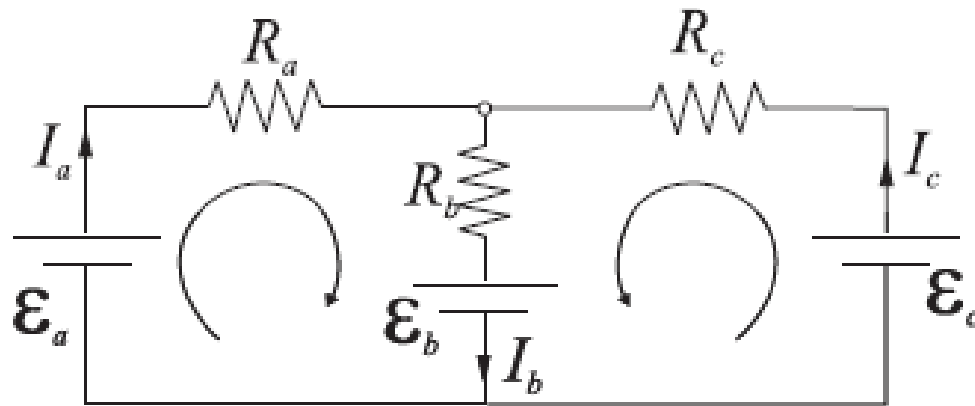


## Aplicación a circuitos de corriente continua



$$V_{11} = 0 = IR - \mathcal{E} ,$$

$$I = \mathcal{E} / R .$$



$$I_a R_a + I_b R_b = \mathcal{E}_a - \mathcal{E}_b$$

$$I_c R_c + I_b R_b = \mathcal{E}_c - \mathcal{E}_b$$

$$I_b = I_a + I_c ;$$

$$I_a (R_a + R_b) + I_c R_b = \mathcal{E}_a - \mathcal{E}_b$$

$$I_a R_a + I_c (R_b + R_c) = \mathcal{E}_c - \mathcal{E}_b .$$

