

1.5-CORRIENTE, RESISTENCIA Y FUERZA ELECTROMOTRIZ



Dos lamparillas de luz: de igual potencia de salida lumínica, pero la lámpara fluorescente de la izquierda, produce esta iluminación con mucho menos potencia eléctrica que la incandescente de la derecha. Las lámparas fluorescentes (“de bajo consumo”), es menos costosa de operar, pues consume menos potencia y resulta más económica.



Líneas de transmisión eléctrica transportan energía a hogares e industrias. La energía se transfiere a un voltaje muy elevado, hasta de cientos de miles de volts. Si bien es peligroso, el elevado voltaje origina una menor pérdida de energía, debido a la resistencia en los alambres.

INTRODUCCIÓN

Hasta ahora vimos electrostática (cargas eléctricas *en reposo*) *ahora empezamos a estudiar **cargas en movimiento***.

Corriente eléctrica: *cargas eléctricas que se mueven de una región a otra*, si la trayectoria de conducción es cerrada: **circuito eléctrico**.

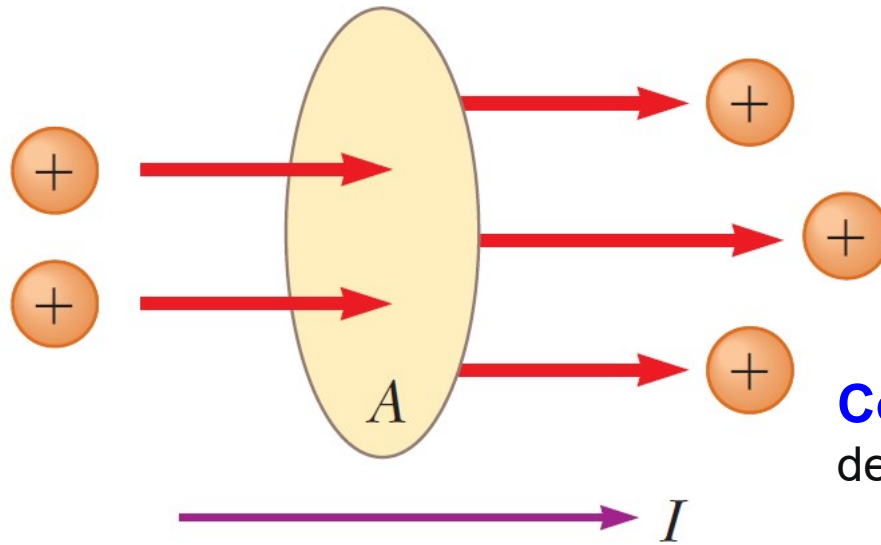
Describiremos a los **conductores eléctricos** y saber cómo los afecta su composición, las dimensiones y la temperatura.

Veremos las **fuentes de fuerza electromotriz**, es decir las **baterías** como fuente de energía en el circuito y cómo generan corriente y transfieren energía en un circuito.

Nuevos conceptos de: **corriente eléctrica, diferencia de potencial (o voltaje), resistencia y fuerza electromotriz.**

Nos remitiremos a la **corriente continua...**

CORRIENTE ELÉCTRICA



Corriente eléctrica a través de un área de sección transversal A es *la carga neta que fluye a través del área por unidad de tiempo*:

$$I_{prom} = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

Corriente instantánea I límite diferencial de la corriente promedio cuando $\Delta t \rightarrow 0$

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

Convencionalmente se asigna a la corriente el mismo sentido que el del flujo de la carga positiva.

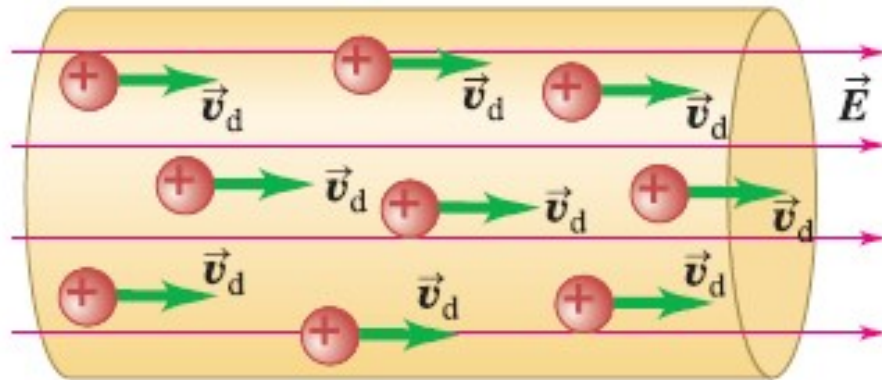
En conductores eléctricos metálicos (cobre o aluminio) la corriente se origina por el movimiento de electrones con carga negativa.

En cualquier conductor, **el sentido de la corriente es la opuesta al sentido del flujo de los electrones.**

Unidad en SI para la corriente: **ampere (A): $1 \text{ A} = 1 \text{ C/s}$**

CORRIENTE ELÉCTRICA

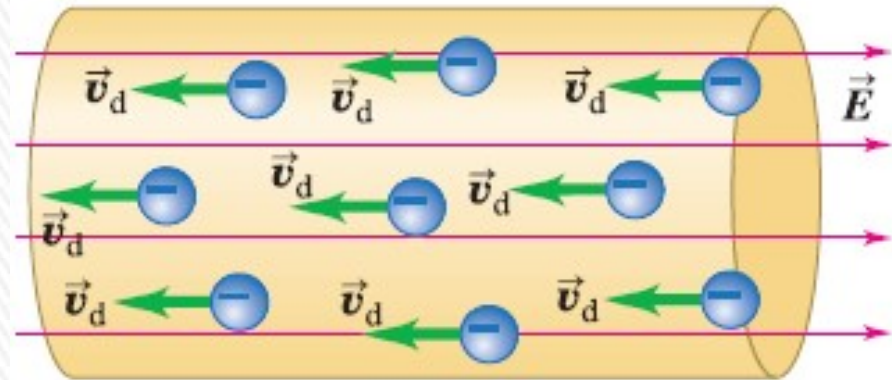
a)



I

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

b)



I

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

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

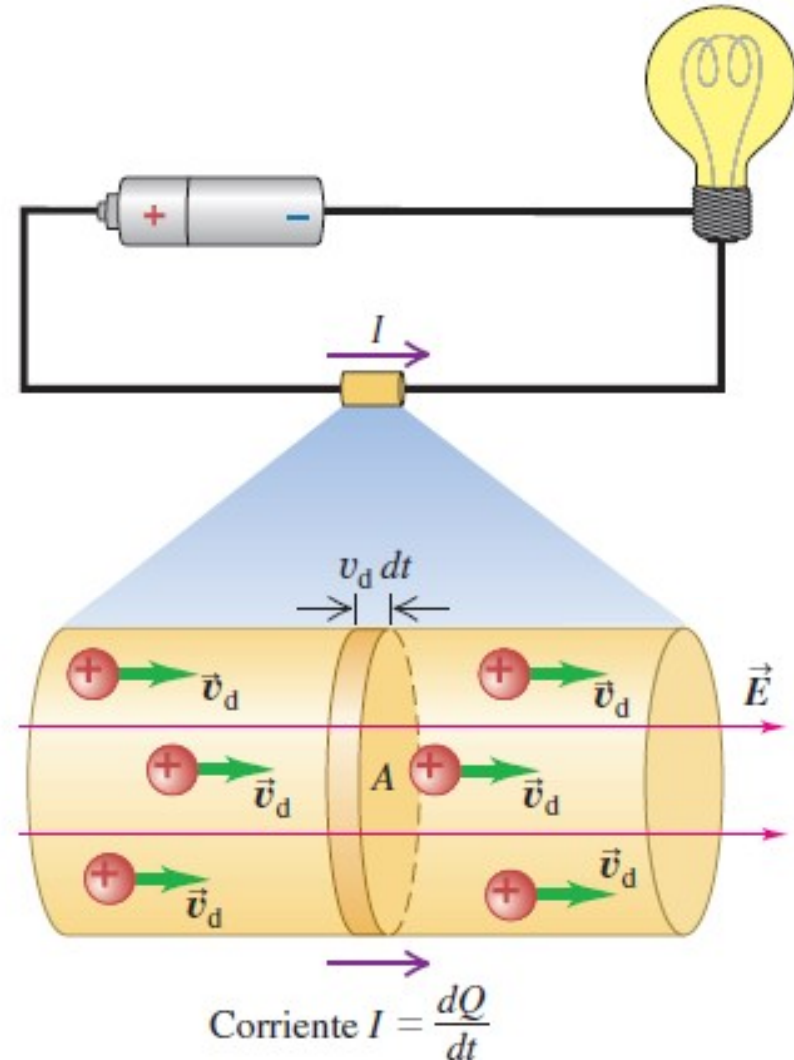
Corriente, velocidad de arrastre y densidad de corriente

Conductor con área de sección transversal A y un campo eléctrico dirigido de izquierda a derecha.

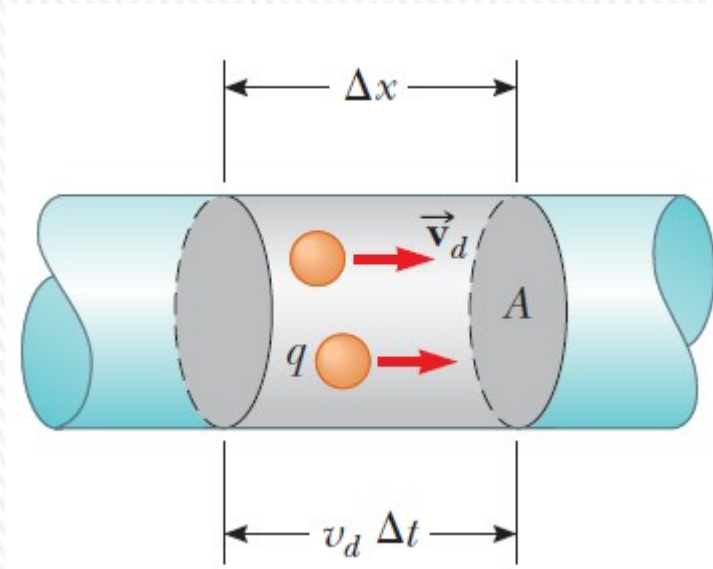
Suponemos que las cargas libres en el conductor son positivas; por lo que la velocidad de arrastre (v_d) tiene el mismo sentido del campo; y hay n partículas con carga en movimiento por unidad de volumen: n a la concentración de partículas, cuya unidad correspondiente del SI es m^{-3} .

Suponemos que todas las partículas se mueven con la misma v_d .

En un intervalo de tiempo dt , cada partícula se mueve una distancia $v_d dt$.



Corriente, velocidad de arrastre y densidad de corriente



$$\Delta Q = n(A\Delta x)q = n(Av_d\Delta t)q$$

n : portadores de carga móviles por unidad de volumen (**densidad de portadores de carga**).

q carga de cada portador

La carga total ΔQ del volumen es igual a

$$\Delta Q = n(A\Delta x)q$$

Si los portadores se mueven con una rapidez v_d , el desplazamiento $\Delta x = v_d \Delta t$

$$I_{prom} = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = nqAv_d$$

La rapidez de los portadores de carga v_d es una rapidez promedio que se conoce como **rapidez de arrastre (v_d)**

$$v_d = \frac{I_{prom}}{nqA}$$

En un alambre de cobre de 2 mm de diámetro, cuando se conduce una corriente de 10 A, la velocidad de arrastres de los electrones es de $2,2 \times 10^{-4}$ m/s (0,22 mm/s), En una hora recorren sólo 80 cm!!!

Corriente, velocidad de arrastre y densidad de corriente

La corriente *por unidad de área de la sección transversal* se denomina **densidad de corriente J** :

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

Unidades de la densidad de corriente son amperes por metro cuadrado (A/m²). Si las cargas en movimiento son negativas en vez de positivas, *la velocidad de arrastre es opuesta a E* .

Sin embargo, la corriente aún tiene el mismo sentido que E en cada punto del conductor.

Entonces, la corriente I y la densidad de corriente J *no dependen del signo de la carga, por lo que en las expresiones anteriores para I y J , la carga q se sustituye por su valor absoluto q :*

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

Se define también el **vector densidad de corriente J** que incluye el sentido de la velocidad de arrastre:

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

En esta ecuación *no hay signos de valor absoluto.*

Si q es positiva v_d tiene el mismo sentido que E , si q es negativa v_d es opuesta a E . En cualquier caso J y E tienen el mismo sentido.

Corriente, velocidad de arrastre y densidad de corriente

Un conductor puede contener varias clases diferentes de partículas con carga en movimiento q_1, q_2, \dots , concentraciones n_1, n_2, \dots y velocidades de arrastre con magnitudes v_{d1}, v_{d2}, \dots

Por ejemplo es el flujo de corriente en una solución iónica, en una solución de cloruro de sodio, la corriente es transportada tanto por los iones Na^+ como por los iones negativos de Cl^- la corriente total I se calcula sumando las corrientes debidas a cada clase de partícula con carga:

$$I = n|q|v_d A$$

El vector densidad de corriente se calcula $\bar{J} = n_1 q_1 \bar{v}_{d1} + n_2 q_2 \bar{v}_{d2} + \dots$ para cada tipo de partícula con carga:

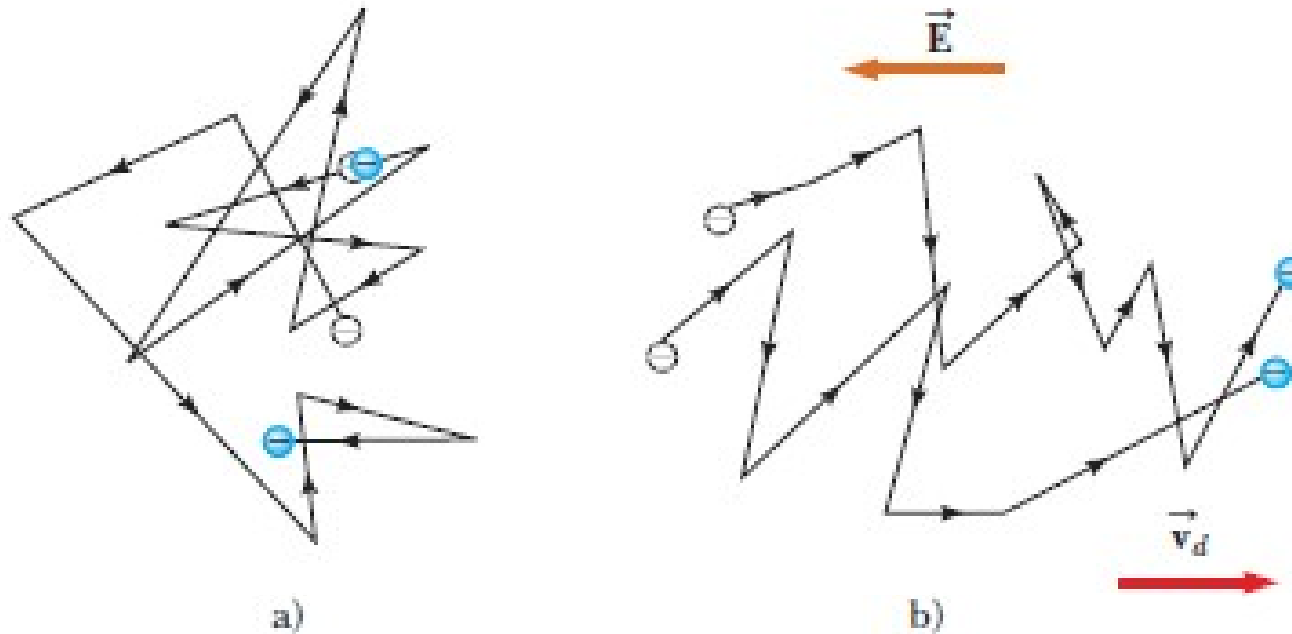
Una **corriente estacionaria** (es decir, constante en el tiempo) se obtiene únicamente si el material conductor forma un circuito cerrado, llamado **circuito eléctrico**.

En esta situación, es constante la carga total en cada segmento del conductor: el flujo de carga hacia afuera en el extremo de un segmento en cualquier instante es igual al flujo de carga hacia dentro en el otro extremo del segmento, y la corriente es la misma en todas las secciones transversales del circuito.

En circuitos con **corriente directa o continua** el sentido de la corriente siempre es la misma; y la fuente de energía es una pila o batería.

Pero los aparatos conectados a redes comerciales de electricidas usan **corriente alterna**, lo cual significa que la corriente cambia de sentido continuamente.

Corriente, velocidad de arrastre y densidad de corriente



a) Movimiento aleatorio (térmico) de dos portadores de carga en un conductor en ausencia de un campo eléctrico. La velocidad de arrastre es cero.

b) Movimiento de portadores de carga en conductor en presencia de campo eléctrico. El movimiento aleatorio modificado por el campo y los portadores de carga tienen una velocidad de arrastre opuesta al sentido del campo eléctrico.

Sin embargo, la rapidez de arrastre es mucho menor que la rapidez promedio de origen térmico ($1/(1.000.000.000)$ un mil millonésimo!!!.)

EJEMPLO: Ejercicio 2.1.4

Los electrones móviles que circulan por un conductor tienen una componente importante de energía cinética debida a la agitación térmica (aunque en promedio les da velocidad cero), y otra componente pequeña de energía cinética debida a la diferencia de potencial entre los extremos del alambre (que les da una velocidad neta de deriva v_d).

Considere un alambre de cobre ($\rho_{\text{cobre}} = 1,7 \times 10^{-8} \Omega \text{ m}$) de longitud 1,0 m y diámetro 1,0 mm, por el que circula una corriente de 1,0 A.

¿Cuál es la velocidad de deriva v_d de los electrones en el alambre?

Datos: densidad del cobre: $8,95 \text{ g/cm}^3$; masa molar del cobre: $63,5 \text{ g/mol}$; número promedio de electrones móviles por átomo de cobre: 1,3

Volumen de un mol de cobre:

$$V_{\text{molar}} = \frac{\text{masa molar}}{\text{densidad}} = \frac{63,5 \text{ g/mol}}{8,95 \text{ g/cm}^3} = 7,095 \text{ cm}^3$$

Densidad de electrones del cobre (1,3 electrones/átomo)

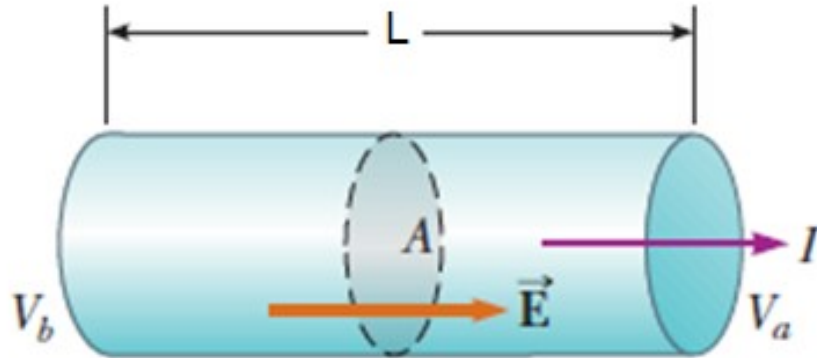
$$n = \frac{1,3 \times 6,02 \times 10^{23} \text{ electrones}}{7,095 \text{ cm}^3} \times \frac{10^6 \text{ cm}^3}{1 \text{ m}^3} = 1,10 \times 10^{29} \text{ e/m}^3$$

$$v_d = \frac{I}{nqA} = \frac{1,0 \text{ A}}{\left(1,10 \times 10^{29} \frac{\text{e}}{\text{m}^3}\right) (1,602 \times 10^{-19} \text{ C}) \left(\frac{\pi}{4} \times 0,0010^2 \text{ m}^2\right)}$$

$$v_d = 7,2 \times 10^{-5} \text{ m/s} = 72 \mu\text{m/s}$$

Se requiere más de 3 horas y 51 minutos para recorrer 1 metro!

RESISTENCIA



Conductor uniforme de longitud L y área de sección transversal A .

La diferencia de potencia $\Delta V = V_b - V_a$ que se mantiene de un extremo al otro del conductor establece un campo eléctrico \vec{E} , que produce una corriente I .

Definición: **resistencia (R) del conductor** - relación de la diferencia de potencial aplicada a un conductor entre la corriente que pasa por el mismo

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

Unidad de resistencia en el S.I. **ohm (Ω)**



RESISTIVIDAD Y LEY DE OHM

La densidad de corriente \mathbf{J} en un conductor depende del campo eléctrico \mathbf{E} y de las propiedades del material. En general, esta dependencia es muy compleja. Pero para ciertos materiales, sobre todo los metálicos, a una temperatura dada, \mathbf{J} es casi *directamente proporcional a \mathbf{E} y la razón de las magnitudes de \mathbf{E} y \mathbf{J} es constante.*

Esta relación, llamada **ley de Ohm**, fue descubierta en 1826 por el físico alemán Georg Simon Ohm (1787-1854).

En realidad, la palabra “ley” debería escribirse entre comillas, ya que la ley de Ohm, al igual que la ecuación de los gases ideales y la ley de Hooke, son *modelos idealizados que describe muy bien el comportamiento de ciertos materiales*, pero no es una descripción general de *toda la materia*.

Supondremos que la ley de Ohm es válida, aun cuando existen muchos casos donde no lo es.



RESISTIVIDAD Y LEY DE OHM

Resistividad ρ de un material: es el cociente entre las magnitudes del campo eléctrico y la densidad de corriente: las unidades de ρ son $(V/m)/(A/m^2) = V \cdot m/A$.

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

1 V/A se conoce como un *ohm* (1Ω ; se usa la letra griega Ω , omega, ya que corresponde al fonema "ohm").

Por consiguiente, las unidades del SI para ρ son $\Omega \cdot m$ (ohm.metros).

Tabla 25.1 Resistividades a temperatura ambiente (20°C)

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

Axoplasma: citoplasma contenido dentro del axón (fibra nerviosa), fluido viscoso
 $\rho_a = 2,0 \Omega \cdot m$



x: exponente del factor $\times 10^x$

X	Resistividad eléctrica (Ω/m)
$-\infty$	Superconductores. http://es.wikipedia.org/wiki/Superconductividad
-8	Metales comunes a 20°C. Desde la plata (1.59) al Litio (9.28)
-6	Nicromo a 20°C (1.1). http://es.wikipedia.org/wiki/Nicromo . Grafito (2.5-5.0)
-1	Agua del mar a 20°C (2.0)
0	Atomizador de vapor (1.5). http://www.provaping.com/esp/index/item/5/29/atomizador-pv510-lr-15ohm
1	Resistencia mínima del agua potable a 20°C (2)
3	Madera húmeda a 20°C (1-9). Resistividad máxima del agua potable a 20°C (2) Cuerpo humano con piel húmeda a 20°C (1)
5	Cuerpo humano con piel seca a 20°C (1) Agua desionizada a 20°C (1.8). http://www.aguadestilada.info/2012/04/diferencias-entre-agua-destilada-agua.html
11	Resistividad mínima del vidrio a 20°C (1)
15	Resistividad máxima del vidrio a 20°C (1)
16	Aire a 20°C (1.3-3.3)
23	Resistividad mínima del teflón a 20°C (1) http://www.uv.es/~jaguilar/curioso/teflon.html
25	Resistividad máxima del teflón a 20°C (1)

RESISTIVIDAD Y CONDUCTIVIDAD

El inverso de la resistividad es la **conductividad (σ)**: $\sigma = 1/\rho$ $J = \sigma E$

Un material que cumple razonablemente bien la ley de Ohm se llama **conductor óhmico** o **conductor lineal**.

Para esos materiales, a una temperatura dada, ρ es una *constante que no depende del valor de E* .

*Muchos materiales cuyo comportamiento se aparta mucho de la ley de Ohm se denominan **no óhmicos** o **no lineales**.*

En estos materiales, J depende de E de forma más compleja

La resistividad de un material aumenta con la temperatura.

En un intervalo limitado de temperatura, la resistividad de un conductor varía prácticamente de manera lineal con la temperatura:

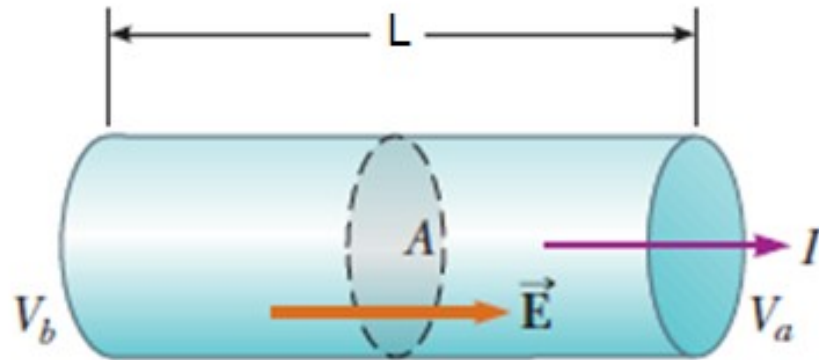
$$\rho = \rho_0 [1 + \alpha(T - T_0)]$$

ρ resistividad a temperatura T (en grados Celsius), ρ_0 resistividad a temperatura de referencia T_0 (20°C), y α **coeficiente de temperatura de resistividad**.

Para el cobre $\alpha = 3,9 \times 10^{-3} / ^\circ\text{C}$

LEY DE OHM: En muchos materiales (la mayor parte de los metales) la relación de la densidad de corriente al campo eléctrico es una constante σ que es independiente del campo eléctrico que produce la corriente.

RESISTENCIA



Conductor uniforme de longitud L y área de sección transversal A .

La diferencia de potencia $\Delta V = V_b - V_a$ que se mantiene de un extremo al otro del conductor establece un campo eléctrico \vec{E} , que produce una corriente I .

Supongo que el campo es uniforme: $E = \Delta V / L$.

Como: $J = \sigma E = \sigma \Delta V / L$.

Entonces: $(I/A) = \sigma \Delta V / L$

$$\Delta V = \left(\frac{L}{\sigma A} \right) I = R I$$

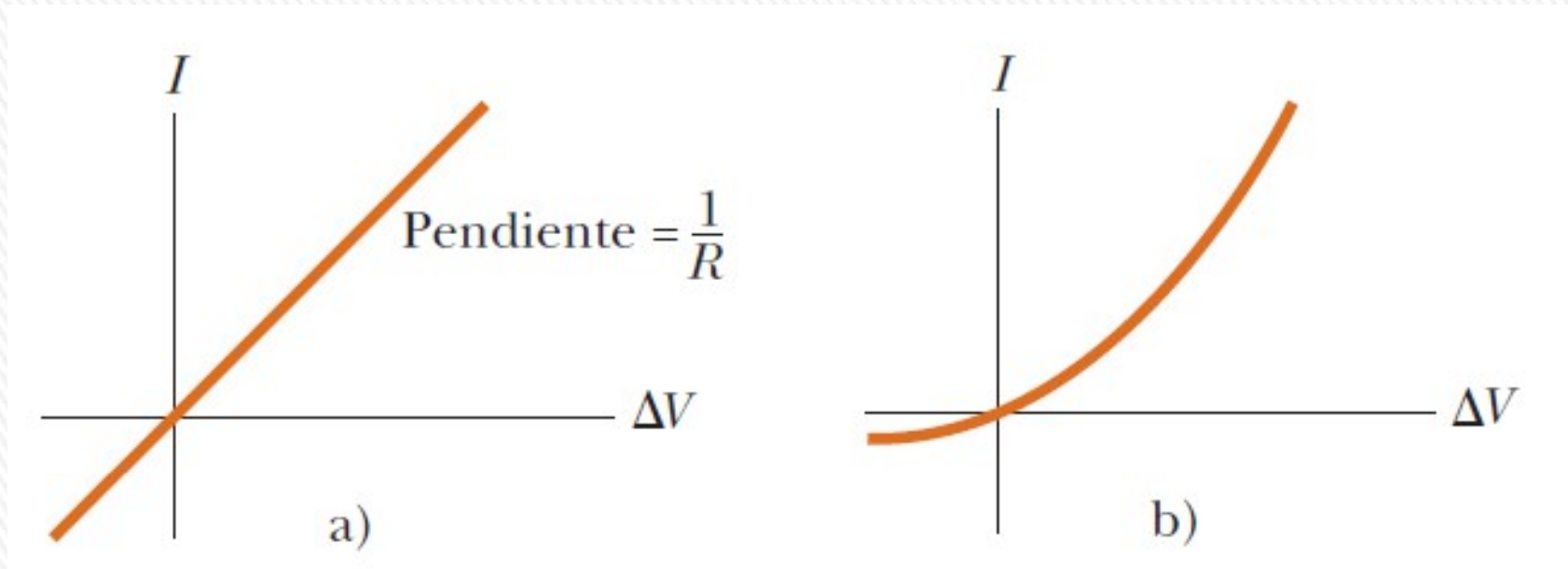
$$R \equiv \frac{\Delta V}{I}$$

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

Unidad de resistencia en el S.I. **ohm (Ω)**

La ecuación: $\Delta V = R \cdot I$ suele conocerse como la ley de Ohm, pero es importante entender que el contenido real de la ley de Ohm es la proporcionalidad directa (para ciertos materiales) de V con respecto a I o de J con E .

MATERIAL ÓHMICO Y NO ÓHMICO



a) Curva corriente-diferencia de potencial para un **material óhmico**. La curva es lineal y la pendiente es igual al recíproco de la resistencia del conductor.

b) Curva no lineal corriente-diferencia de potencial correspondiente a un diodo de unión. Este dispositivo no sigue la ley de Ohm.

EJEMPLO: Ejercicio 2.1.3

Un alambre de resistencia R , longitud L y sección transversal constante se estira para formar otro cuya longitud es tres veces la original. Encuentre la resistencia del nuevo alambre en función de R suponiendo que la resistividad y la densidad del material no cambian durante el estiramiento

Sean L' y A' las nuevas dimensiones del material estirado y R' la nueva resistencia.

$$R = \frac{\rho L}{A} \quad R' = \frac{\rho L'}{A'}$$

Al estirarse, la masa y por tanto en volumen se mantiene por lo que: $L.A = L'.A'$

$$L' = 3L \quad A' = A/3$$

$$R' = \frac{\rho 3L}{\frac{A}{3}} = 9 \frac{\rho L}{A} = 9R$$

$$R' = 9R$$

FUERZA ELECTROMOTRIZ

En un circuito eléctrico debe haber un dispositivo que actúe de modo que una carga se mueva desde el lugar donde hay menos energía potencial hacia donde hay más, a pesar de que la fuerza electrostática trate de llevarla de la mayor energía potencial a la menor (como una bomba de agua que eleva la misma a un depósito)

La corriente fluye del potencial menor al mayor debido a lo que se denomina **fuerza electromotriz (fem)** y se simboliza \mathcal{E} , aunque no es una fuerza...

La unidad del SI de la fem es la misma que la del potencial, el volt ($1 \text{ V} = 1 \text{ J/C}$).

Todo circuito completo con corriente constante debe incluir algún dispositivo que provea una fem.

Tal dispositivo recibe el nombre de **fuerza de fem**.

Ejemplos: baterías, generadores eléctricos, celdas solares, termopares y celdas de combustible.

Estos dispositivos convierten energía de algún tipo (mecánica, química, térmica, etc.) en energía potencial eléctrica y la transfieren al circuito al que está conectado el dispositivo.

FUERZA ELECTROMOTRIZ

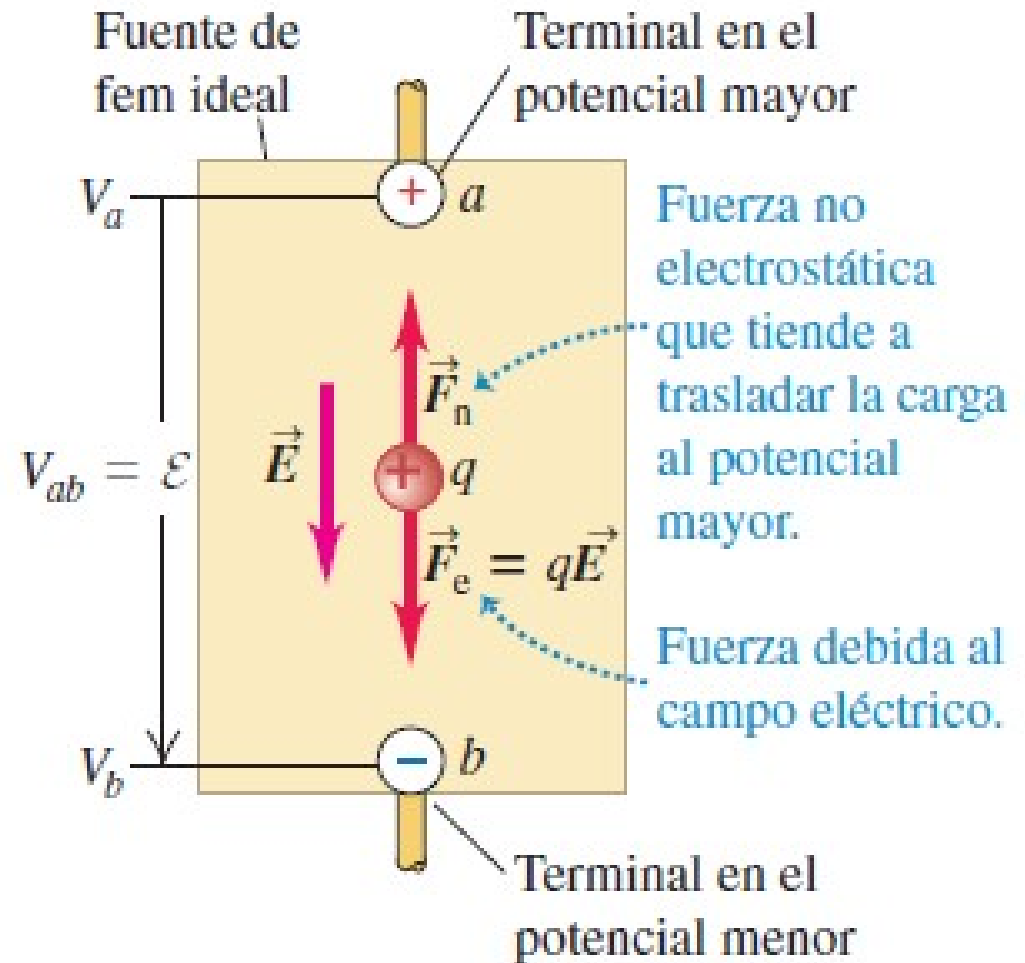
Modelo de una **fuerza ideal de fem** mantiene una diferencia de potencial constante entre sus terminales, independientemente de la corriente que pase a través de ella.

Una fuente de fem ideal que mantiene una diferencia de potencial entre los conductores a y b , **llamados terminales del dispositivo**.

La terminal a , marcada con $+$, se mantiene a un potencial mayor que la terminal b , marcada con $-$.

El incremento en la energía potencial es igual al trabajo no electrostático que realiza la fuente

$$V_{ab} = \mathcal{E}$$



Cuando la fuente de fem no es parte de un circuito cerrado, $F_n = F_e$ y no hay movimiento neto de carga entre las terminales.

FUERZA ELECTROMOTRIZ

Ahora, consideremos un circuito completo conectando un alambre con resistencia R a las terminales de una fuente.

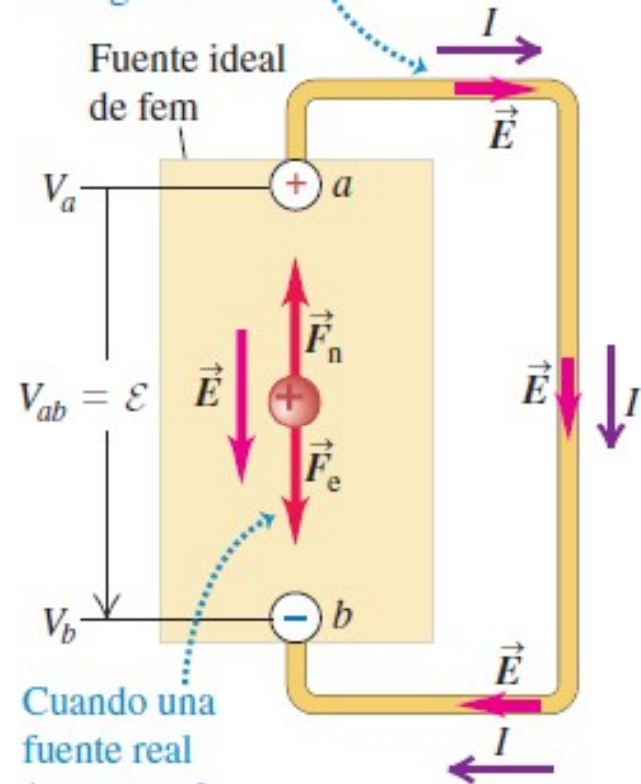
La diferencia de potencial entre las terminales a y b genera un campo eléctrico dentro del alambre; esto hace que la corriente fluya alrededor del circuito de a hacia b , del potencial más alto al más bajo.

La diferencia de potencial entre los extremos del alambre en la figura está dada por $V_{ab} = IR$.

$$\mathcal{E} = V_{ab} = IR$$

Cuando una carga positiva q fluye alrededor del circuito, el aumento de potencial \mathcal{E} conforme pasa a través de la fuente ideal, es numéricamente igual a la caída de potencial $V_{ab} = IR$ conforme pasa por el resto del circuito.

El potencial a través de las terminales crea un campo eléctrico en el circuito, lo que hace que la carga se mueva.



Cuando una fuente real (opuesta a la ideal) de fem se conecta a un circuito, disminuye V_{ab} y por lo tanto F_e de modo que $F_n > F_e$ y \vec{F}_n realiza trabajo sobre las cargas.

RESISTENCIA INTERNA

Las fuentes reales de fem en un circuito no se comportan exactamente del modo descrito; **la diferencia de potencial a través de una fuente real en un circuito no es igual a la fem.**

La razón es que la carga en movimiento a través del material de cualquier fuente real encuentra una *resistencia*: la **resistencia interna de la fuente (r)**.

Si esta resistencia se comporta de acuerdo con la ley de Ohm, r es constante e independiente de la corriente I .

Conforme la corriente avanza a través de r , experimenta una caída de potencial asociada que es igual a Ir .

Cuando una corriente fluye a través de una fuente de la terminal negativa b a la terminal positiva a , la diferencia de potencial V_{ab} entre las terminales es:

$$V_{ab} = \mathcal{E} - Ir$$

El **potencial V_{ab}** , llamado **voltaje terminal**, es menor que la fem ya que el término Ir representa la caída de potencial a través de la resistencia interna r .

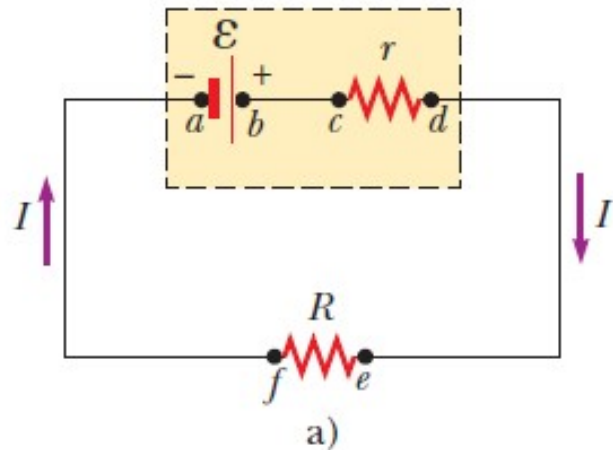
Una batería de 1,5 V tiene una fem de 1,5 V, pero el voltaje terminal V_{ab} de la batería es igual a 1,5 V únicamente si no hay corriente que fluya a través de ella.

Si la batería forma parte de un circuito completo a través del cual fluye corriente, el voltaje terminal será menor de 1,5 V.

Como: $V_{ab} = \mathcal{E} - Ir$ y además $V_{ab} = IR$ se tiene que:

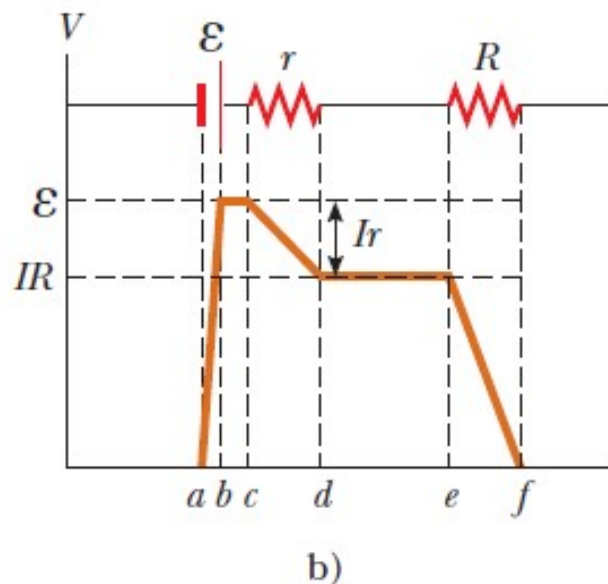
$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}$$

FUERZA ELECTROMOTRIZ



a) Diagrama de un circuito de una fuente de fem \mathcal{E} (en este caso, una batería), de resistencia interna r , conectada a un resistor externo, de resistencia R .

b) Gráfica variación del potencial eléctrico a lo largo del circuito en a) en sentido de las manecillas del reloj.

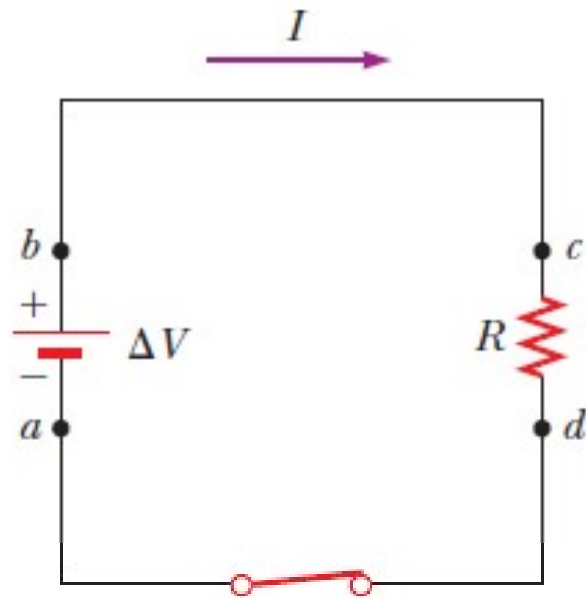


El voltaje entre las terminales de la batería ΔV vale: $\Delta V = \mathcal{E} - Ir$

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

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

POTENCIA ELÉCTRICA



Cuando una carga se mueve de ***a*** a ***b*** a través de la batería, la **energía potencial eléctrica del sistema *U*** aumenta en $Q \cdot \Delta V$ (a expensas de la energía potencial química de la batería que se reduce en la misma cantidad).

La rapidez a la cual el sistema pierde energía potencial eléctrica conforme la carga Q pasa a través del resistor:

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

Circuito constituido por un resistor de resistencia R y una batería con una diferencia de potencial ΔV entre sus terminales.

La carga positiva fluye en dirección de las manecillas del reloj.

I es la corriente en el circuito.

El sistema recupera su energía potencial cuando la carga pasa a través de la batería, a expensas de la energía química de la misma.

La potencia \mathcal{P} , que representa la rapidez a la cual se entrega energía al resistor, es

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

POTENCIA ELÉCTRICA

Potencia entregada por una fuente de voltaje a *cualquier dispositivo que tenga una corriente I y esté sujeto a una diferencia de potencial ΔV entre sus terminales.*

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

Unidad SI de potencia es el **watt (W)**

El proceso mediante el que se pierde potencia en forma de energía interna en un conductor de resistencia R , a menudo se llama **calentamiento Joule**; esta transformación también es conocida como una **pérdida $I^2 R$** .