

# ANUNCIOS

Por motivos de la realización del parcial de matemáticas, el martes 3 de setiembre se realizarán los siguientes cambios:

Teórico de la mañana se realizará de 8:00 a 10:00 en el salón 201/203.

Teórico de la tarde: se realizará en el horario habitual pero en el salón 101/03.

Quedaron fijadas las fechas definitivas de los parciales  
Primer parcial: sábado 5 de octubre hora 14:00.

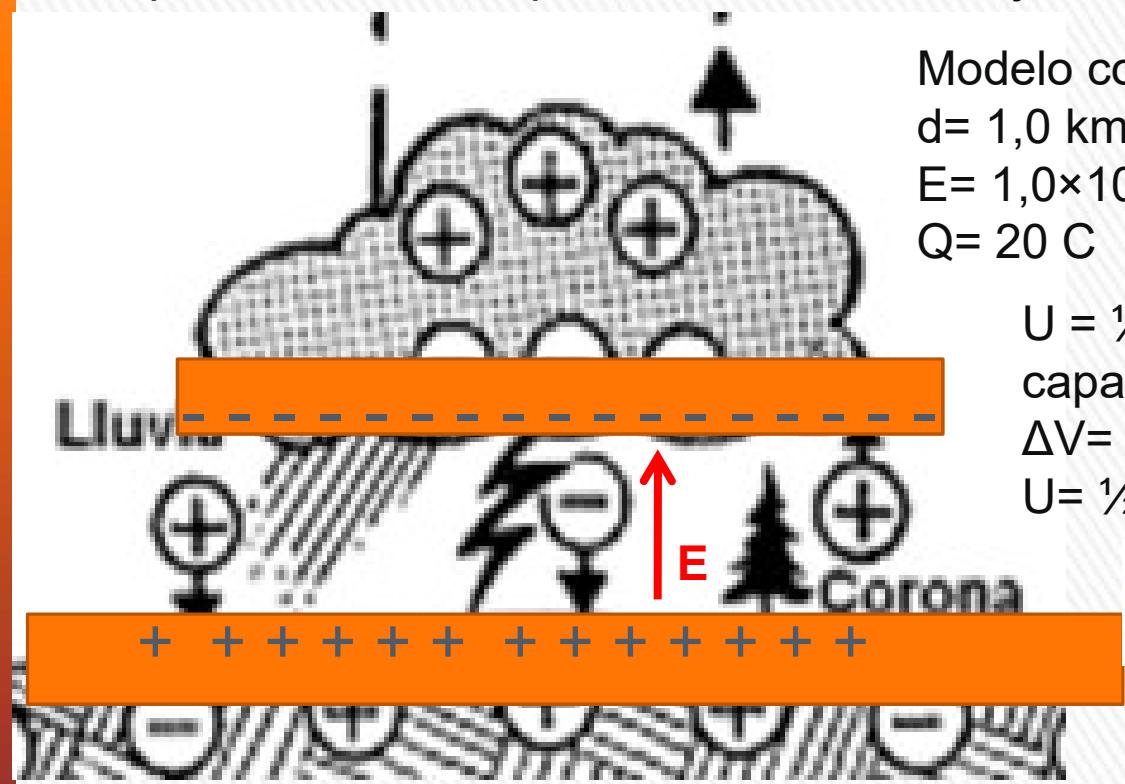
Primer evaluación corta: desde el jueves 5 de setiembre a la medianoche del sábado 14.

Temas: Los correspondientes a toda la Unidad 1.

## EJEMPLO- Ejercicio 1.2.6

En una tormenta eléctrica, las nubes se encuentran a una altura de 1,0 km sobre el suelo, y se mide un campo eléctrico promedio de  $10^4$  V/m. La zona más baja de las nubes se descarga mediante un rayo que transporta una carga de -20 C a la Tierra.

- a) Si inmediatamente después el campo eléctrico desciende a un valor cercano a cero ¿cuál era la energía almacenada en el sistema formado por las nubes y la Tierra?
- b) ¿Cuál es el área de las nubes que fueron descargadas por el rayo?
- c) El campo eléctrico promedio tiene una intensidad mucho menor que el campo de ruptura del aire (de  $3,0 \times 10^6$  V/m), ¿cómo es posible que se presenten rayos cuando el valor promedio del campo eléctrico es “tan bajo”?



Modelo como capacitor plano paralelo.

$$d = 1,0 \text{ km} = 1,0 \times 10^3 \text{ m}$$

$$E = 1,0 \times 10^4 \text{ V/m}$$

$$Q = 20 \text{ C}$$

$U = \frac{1}{2} Q.V$  (energía almacenada en un capacitor, modelo de nube-tierra)

$$\Delta V = E.d = 10^4 \text{ V/m} \times 10^3 \text{ m} = 1,0 \times 10^7 \text{ V}$$

$$U = \frac{1}{2} (20) \cdot (1,0 \times 10^7) = 1,0 \times 10^8 \text{ J}$$

$$C = \frac{q}{\Delta V} = \frac{\epsilon_0 A}{d}$$



## EJEMPLO- Ejercicio 1.2.6

$$C = \frac{q}{\Delta V} = \frac{\epsilon_0 A}{d} \quad A = \frac{qd}{\epsilon_0 \Delta V}$$

$$A = \frac{qd}{\epsilon_0 V} = \frac{(20)(1,0 \times 10^{-3})}{(8,85 \times 10^{-12})(1,0 \times 10^7)} = 2,26 \times 10^8 \text{ m}^2$$

$$\mathbf{A=2,3 \times 10^8 \text{ m}^2 = 230 \text{ km}^2}$$

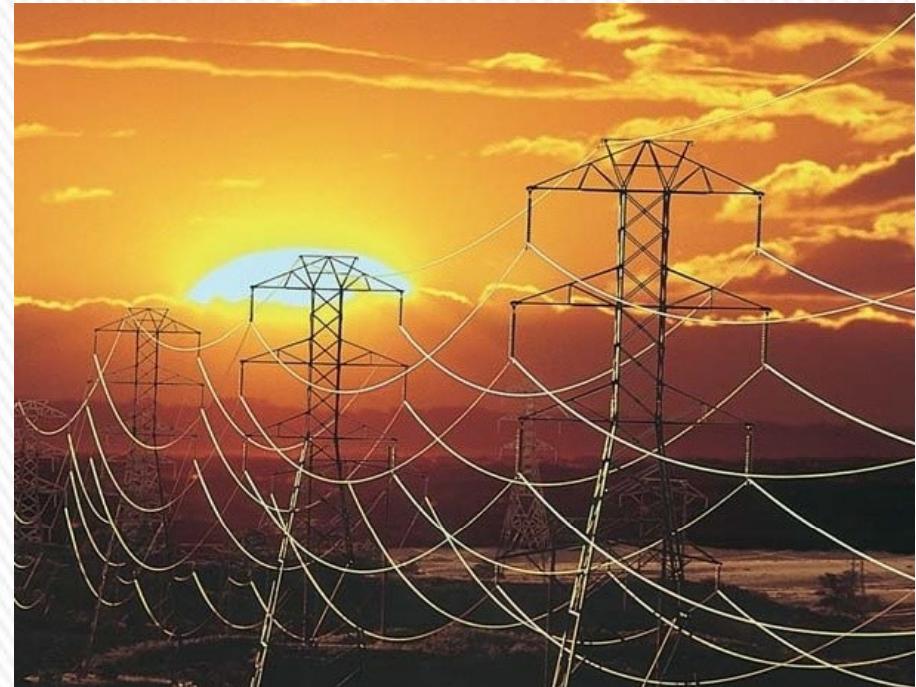
- c) El campo dado es un valor medio (espacial y temporal). Esto no impide que localmente se alcancen valores mucho mayores superiores a la rigidiz dieléctrica del aire



## 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.*

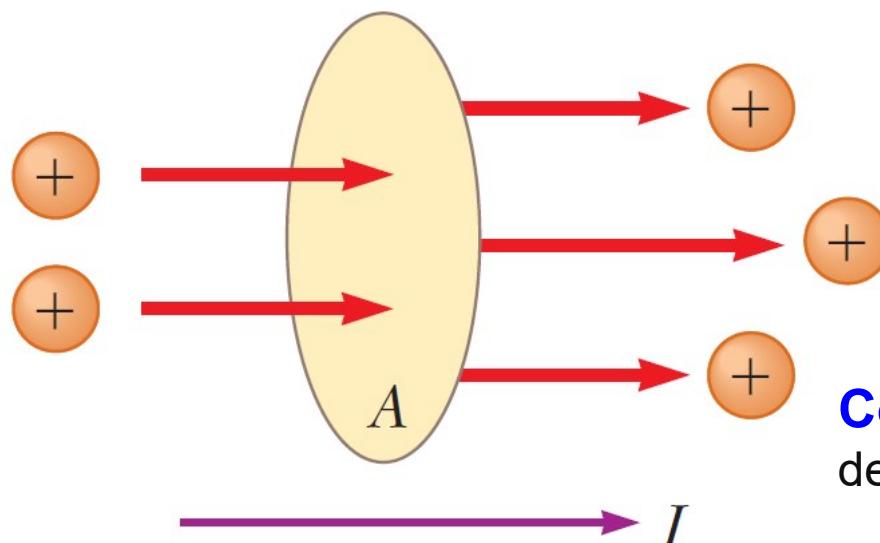
**Corriente eléctrica:** cargas eléctricas que se mueven de una región a otra, si la trayectoria de conducción es cerrada: **circuito eléctrico.**

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*:

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

**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.**

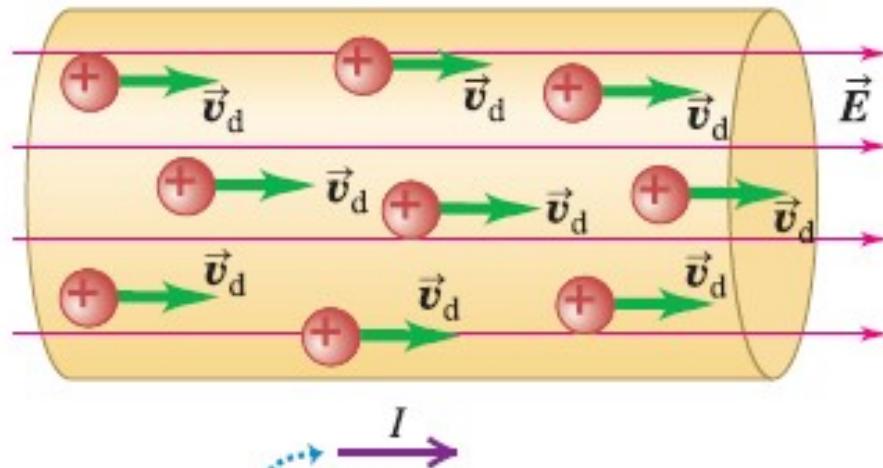
En conductores eléctricos metálicos (cobre o aluminio) la corriente se origina por el movimiento de electrones con carga negativa.

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)**:  $1 \text{ A} = 1 \text{ C/s}$

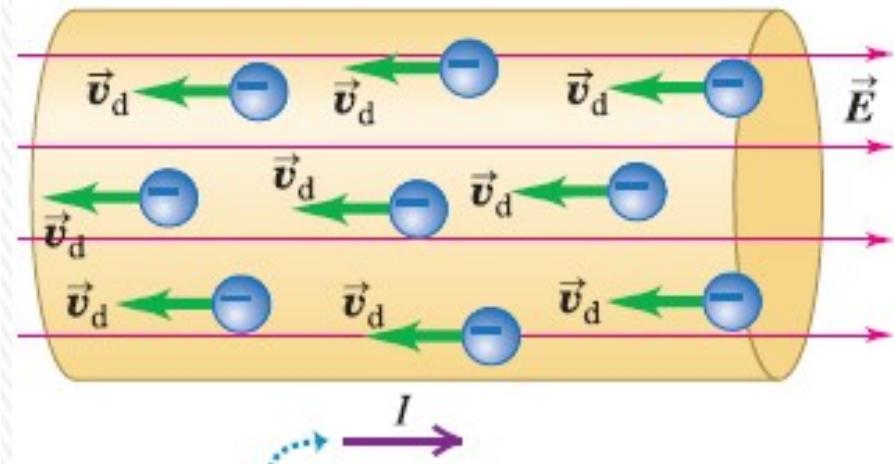
# CORRIENTE ELÉCTRICA

a)



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)



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:

- cargas positivas que se trasladan en sentido del campo eléctrico  $\vec{E}$ , o
- el mismo número de cargas negativas que se desplazan con la misma rapidez en el sentido opuesto a  $\vec{E}$ .

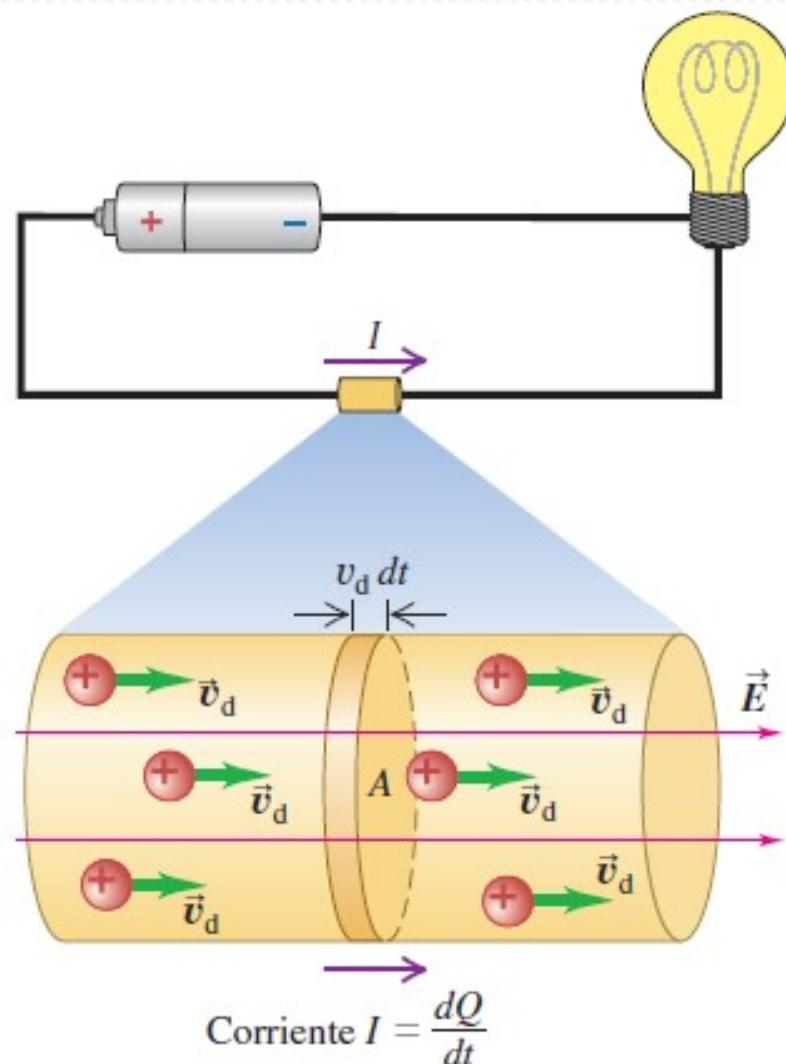
# Corriente, velocidad de arrastre y densidad de corriente

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

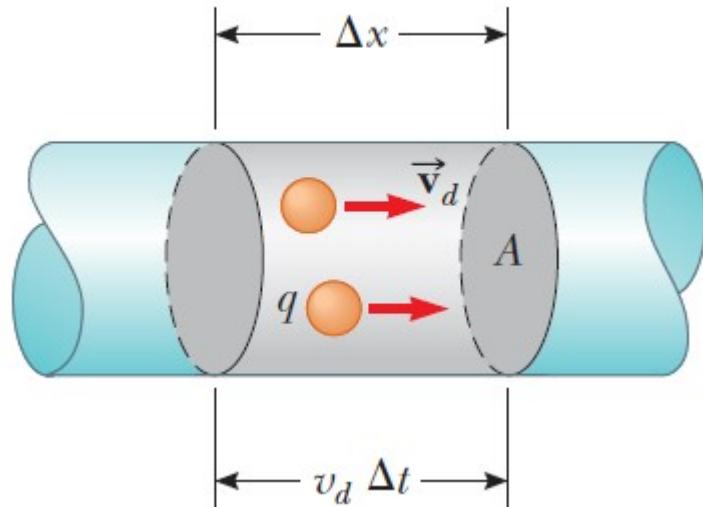
Suponemos cargas libres en el conductor positivas; por lo que la velocidad de arrastre ( $v_d$ ) tiene el mismo sentido del campo; y hay  $n$  partículas con carga en movimiento por unidad de volumen: ***n a la concentración de partículas*** (unidad en SI es  $\text{m}^{-3}$  ó  $1/\text{m}^3$ ).

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  $\Delta Q$  del volumen es igual a

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

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

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

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

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

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 ( $A/m^2$ ). Si las cargas en movimiento son negativas en vez de positivas, *la velocidad de arrastre es opuesta a  $E$* .

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  $\bar{J}$**  que incluye el sentido de la velocidad de arrastre:

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

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  $\text{Na}^+$  como por los iones negativos de  $\text{Cl}^-$  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:

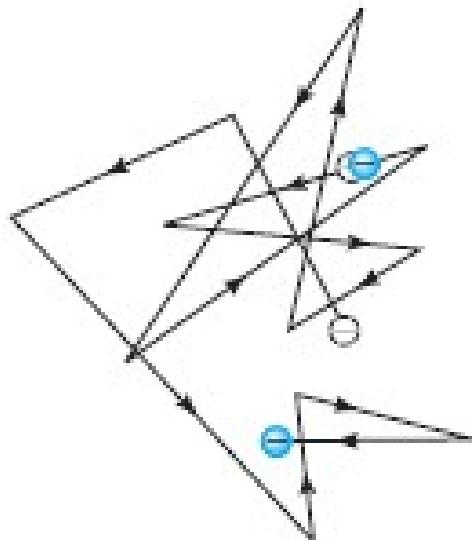
Una **corriente estacionaria** (es decir, constante en el tiempo) se obtiene únicamente si el material conductor forma un circuito cerrado, llamado **circuito eléctrico**.

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.

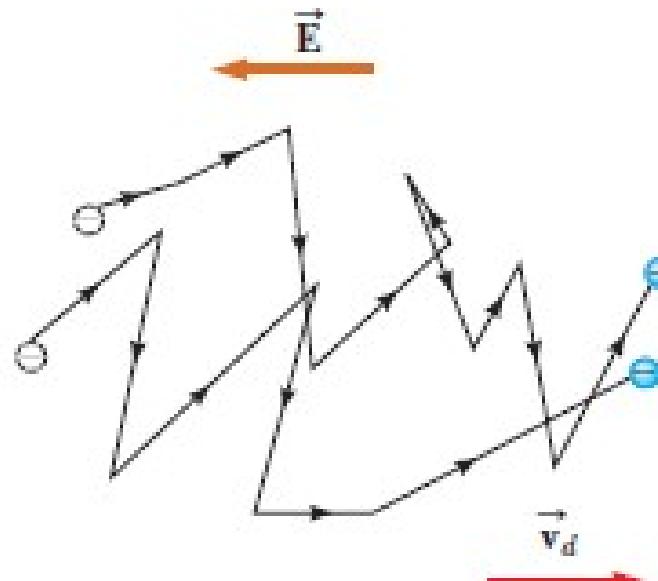
En circuitos con **corriente directa o continua** el sentido de la corriente siempre es la misma; y la fuente de energía es una pila o batería.

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

# Corriente, velocidad de arrastre y densidad de corriente



a)



b)

- 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!!!.)

## PREGUNTA RÁPIDA (QUICK QUIZ)

Suponga que un alambre portador de corriente tiene un área transversal que gradualmente se vuelve más pequeña a lo largo del alambre, de modo que el alambre tiene la forma de un cono truncado muy largo. ¿Cómo varía la velocidad de deriva a lo largo del alambre?

- a) Baja conforme la sección transversal se vuelve cada vez menor.
- b) Aumenta conforme la sección transversal se vuelve cada vez menor.
- c) No cambia.
- d) Se necesita más información.

**Respuesta: b)**

Como la carga no se acumula en el alambre, la corriente debe aumentar al disminuir la sección, y por tanto la velocidad de deriva debe aumentar.



## 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 g/cm<sup>3</sup>; masa molar del cobre: 63,5 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)

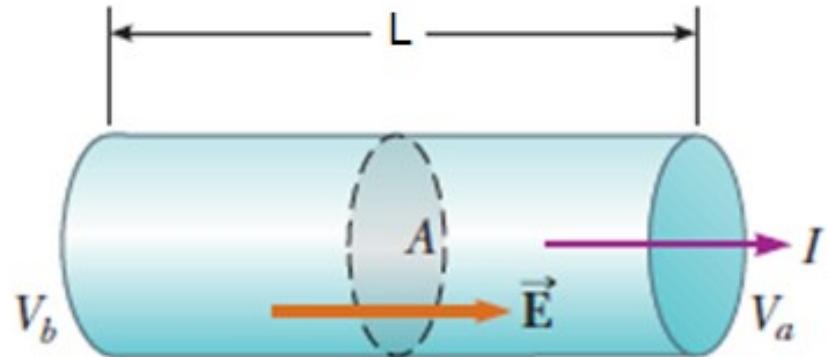
$$n = \frac{1,3 \times 6,02 \times 10^{23} \text{ electrones}}{7,095 \text{ cm}^3} \times \frac{10^6 \text{ cm}^3}{1 \text{ m}^3} = 1,10 \times 10^{29} \text{ e/m}^3$$

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

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

**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 potencial  $\Delta V = V_b - V_a$  que se mantiene de un extremo al otro del conductor establece un campo eléctrico  $E$ , 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 ( $\Omega$ )**



# RESISTIVIDAD Y LEY DE OHM

La densidad de corriente  $J$  en un conductor depende del campo eléctrico  $E$  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,

**$J$  es casi directamente proporcional a  $E$  y la razón de las magnitudes de  $E$  y  $J$  es constante.**

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

**Resistividad  $\rho$**  de un material: es el cociente entre las magnitudes del campo eléctrico y la densidad de corriente:

la unidades de  $\rho$  es  $\Omega \cdot m$  (ohm.metro).

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



## Resistencia y resistividad

La resistividad es una propiedad de una *sustancia*, en tanto que la resistencia es la propiedad de un *objeto*. Para una temperatura dada, la resistividad será la misma para un elemento determinado.

Por ejemplo alambres de cobre tendrán la misma resistividad, pero su resistencia variará de las dimensiones que tengan (largo y diámetro).

# RESISTIVIDAD Y LEY DE OHM

**Tabla 25.1 Resistividades a temperatura ambiente (20°C)**

Sustancia		$\rho$ ( $\Omega \cdot m$ )	Sustancia	$\rho$ ( $\Omega \cdot m$ )
<b>Conductores</b>			<b>Semiconductores</b>	
Metáles	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	$2.75 \times 10^{-8}$		
	Tungsteno	$5.25 \times 10^{-8}$		
	Acero	$20 \times 10^{-8}$	<b>Aislantes</b>	
	Plomo	$22 \times 10^{-8}$	Ámbar	$5 \times 10^{14}$
	Mercurio	$95 \times 10^{-8}$	Vidrio	$10^{10}-10^{14}$
Aleaciones	Manganina (84% Cu, 12% Mn, 4% Ni)	$44 \times 10^{-8}$	Lucita	$>10^{13}$
	Constantán (60% Cu, 40% Ni)	$49 \times 10^{-8}$	Mica	$10^{11}-10^{15}$
	Nicromo	$100 \times 10^{-8}$	Cuarzo (fundido)	$75 \times 10^{16}$
			Azufre	$10^{15}$
			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 ( $\Omega/m$ )
$-\infty$	Superconductores. <a href="http://es.wikipedia.org/wiki/Superconductividad">http://es.wikipedia.org/wiki/Superconductividad</a>
-8	Metales comunes a 20°C. Desde la plata (1.59) al Litio (9.28)
-6	Nicromo a 20°C (1.1). <a href="http://es.wikipedia.org/wiki/Nicromo">http://es.wikipedia.org/wiki/Nicromo</a> . Grafito (2.5-5.0)
-1	Agua del mar a 20°C (2.0)
0	Atomizador de vapor (1.5). <a href="http://www.provaping.com/esp/index/item/5/29/atomizador-pv510-lr-15ohm">http://www.provaping.com/esp/index/item/5/29/atomizador-pv510-lr-15ohm</a>
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). <a href="http://www.aguadestilada.info/2012/04/diferencias-entre-agua-destilada-agua.html">http://www.aguadestilada.info/2012/04/diferencias-entre-agua-destilada-agua.html</a>
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) <a href="http://www.uv.es/~jaguilar/curioso/teflon.html">http://www.uv.es/~jaguilar/curioso/teflon.html</a>
25	Resistividad máxima del teflón a 20°C (1)

# RESISTIVIDAD Y CONDUCTIVIDAD

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

$$J = \sigma E$$

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

Para esos materiales, a una temperatura dada,  $\rho$  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:

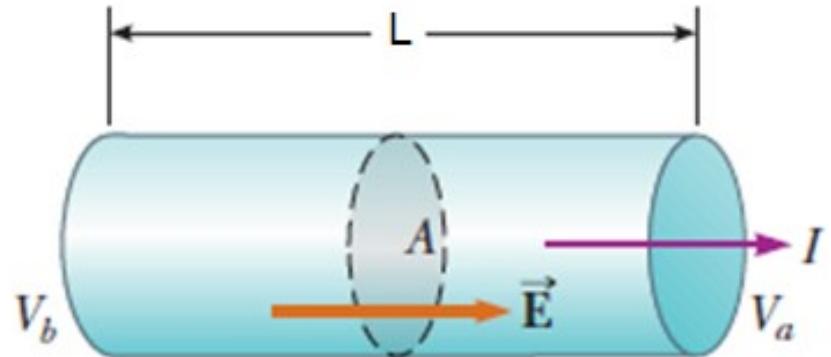
$$\rho = \rho_0 [1 + \alpha(T - T_0)]$$

$\rho$  resistividad a temperatura  $T$  (en grados Celsius),  $\rho_0$  resistividad a temperatura de referencia  $T_0$  ( $20^{\circ}\text{C}$ ), y  $\alpha$  **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  $\sigma$  que es independiente del campo eléctrico que produce la corriente.

# Resistencia de un conductor uniforme



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  $E$ , que produce una corriente  $I$ .

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

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

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

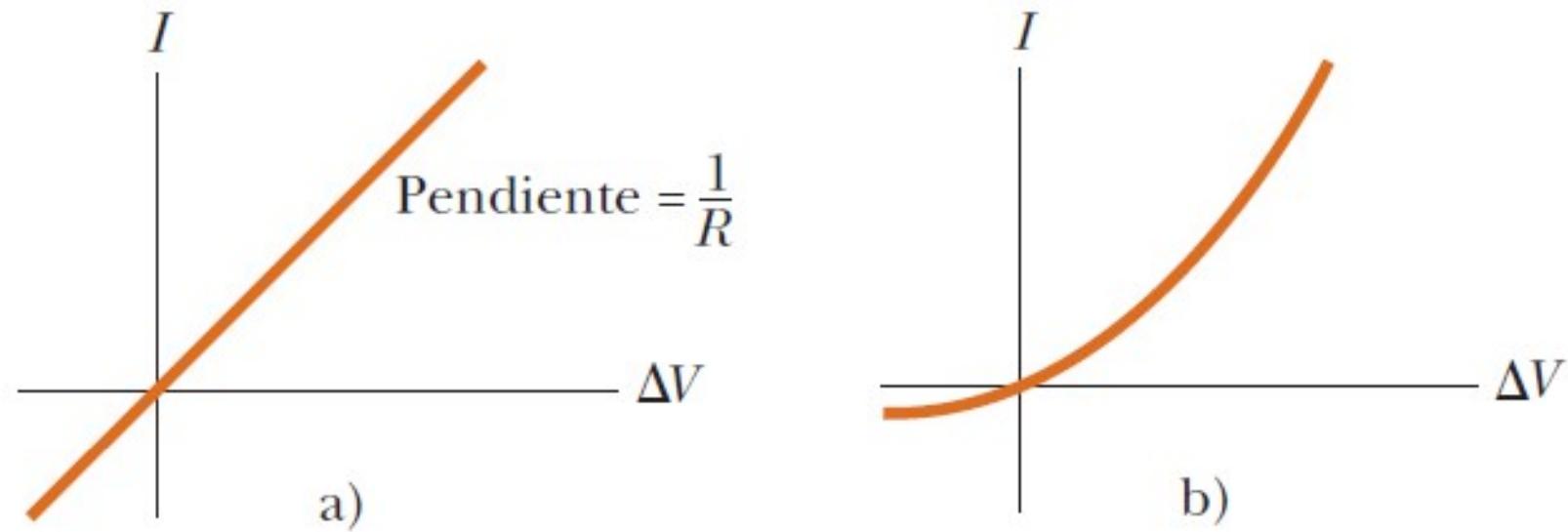
$$\Delta V = \left( \frac{L}{\sigma A} \right) I = R I$$

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

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

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.

## PREGUNTA RÁPIDA (QUICK QUIZ)

Un pájaro se sostiene con una pata apoyada en una línea de alta tensión. ¿Qué pasa cuando pone la otra pata sobre la misma línea? ¿Qué pasaría si el pájaro pusiera su otra pata sobre un conductor conectado a tierra?

**Respuesta: Cuando apoya la segunda pata sobre la misma línea de alta tensión, ambas quedan al mismo potencial y todo el pájaro queda al mismo potencial, por tanto no circula corriente y no le sucede nada.**

**En cambio, si apoya la segunda pata sobre un conductor a tierra, tendrá la diferencia de potencial de la línea de alta tensión respecto a tierra, y circulará una corriente muy alta, que muy probablemente le ocasione la muerte.**

