

Campos Electromagnéticos

“Corriente Eléctrica”



Profesor: Pedro Labraña
Departamento de Física,
Universidad del Bío-Bío

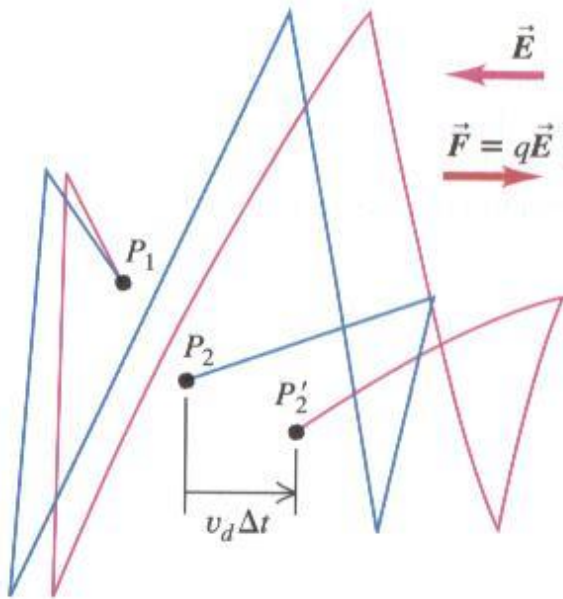
Corriente Eléctrica

Corriente eléctrica y densidad de corriente, Resistencia y Ley de Ohm, Resistencia y temperatura. Superconductores, Un modelo para la conducción eléctrica. Energía eléctrica y Potencial.

Corriente eléctrica y densidad de corriente

- Los electrones libres en un material conductor aislado (Ej. Cobre) se encuentran en un movimiento irregular como las moléculas de un gas encerrado en un recipiente. No tiene ninguna dirección definida a lo largo del alambre.
- Si se hace pasar un plano hipotético a través del alambre, la rapidez con la cual pasan los electrones de derecha a izquierda es la misma que la que la rapidez con la cual pasan de izquierda a derecha; luego la rapidez neta es cero. (ver pizarra)
- Si los extremos del alambre se conectan a una batería, se establece un campo eléctrico en el interior del alambre. Este campo \mathbf{E} actuará sobre los electrones y les dará un movimiento resultante en la dirección de $-\mathbf{E}$. Decimos que se ha establecido una corriente eléctrica I ; si pasa una carga neta q por una sección transversal cualquiera del conductor en el tiempo t , la corriente, supuesta constante, es:

$$I = q/t$$



— Trayectoria típica de un electrón en un conductor *sin* campo eléctrico:

- Ninguna fuerza eléctrica neta sobre los electrones
- Los electrones se trasladan al azar dentro del conductor
- No hay una corriente neta

— Trayectoria típica de un electrón en un conductor *con* campo eléctrico:

- La fuerza eléctrica $\vec{F} = q\vec{E}$ impone una pequeña deriva al movimiento aleatorio del electrón
- Hay una corriente neta

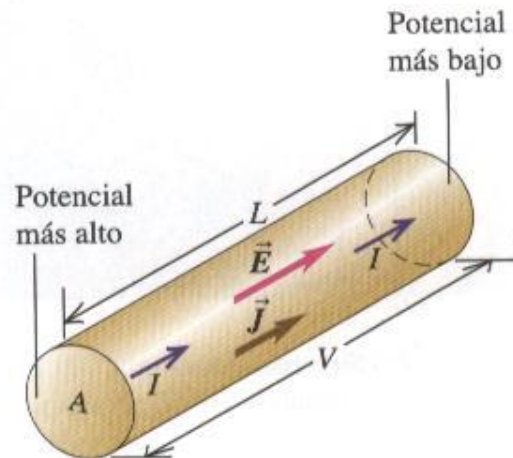
25.1 Si no hay un campo eléctrico en el in-

En el sistema MKS la corriente eléctrica se mide en amperes $[A] = [C]/[s]$

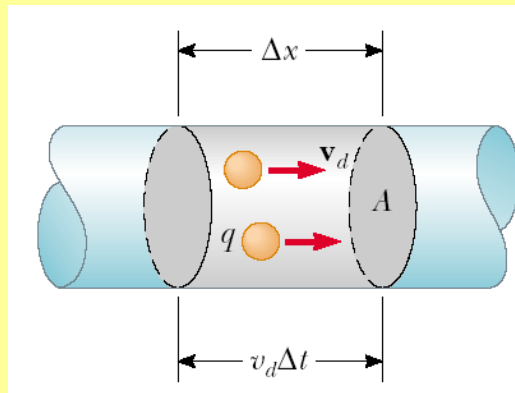
Si la rapidez de flujo de carga no es constante al transcurrir el tiempo, la corriente varía con el tiempo y está dada por la expresión:

$$I = dq/dt$$

Nosotros por el momento sólo consideraremos corrientes que son constantes en el tiempo.



Modelo microscópico para la corriente eléctrica



Podemos relacionar el valor de la corriente con el movimiento de los portadores de carga libres en el conductor.

Consideremos la corriente en un material conductor de sección transversal A . El volumen de la sección del conductor de largo Δx es $A\Delta x$. Si n es el número de portadores de carga libre por unidad de volumen, entonces el número de portadores de carga libre en la sección gris será: $nA\Delta x$. Luego la carga en esta sección será $\Delta Q = nA\Delta xq$, donde q es la carga de los portadores de carga. Si la velocidad de cada portador de carga es v_d , entonces:

$$\Delta Q = (nAv_d \Delta t) q$$

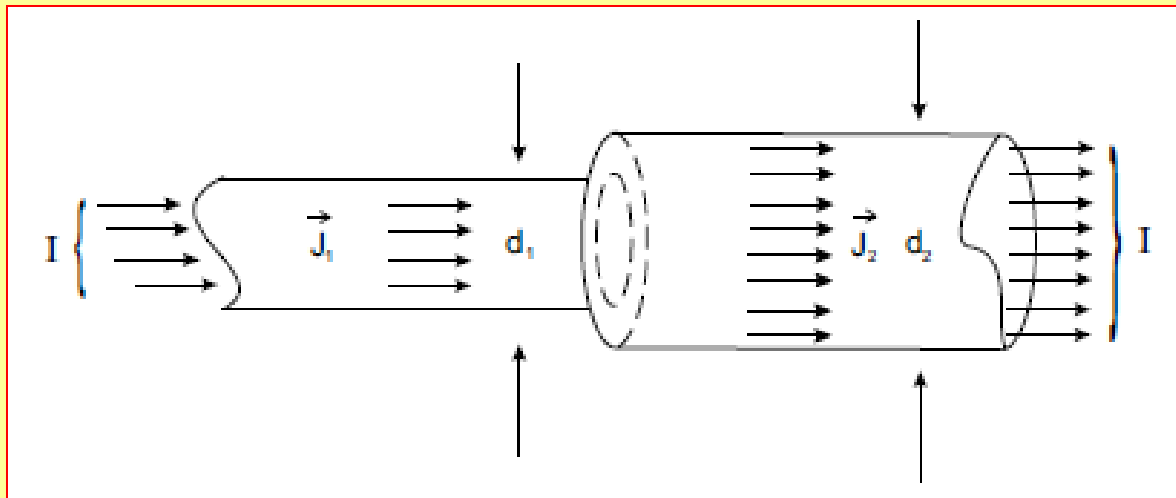
Luego

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

La corriente I es la misma para todas las secciones transversales de un conductor, aun cuando el área de de la sección transversal pueda ser distinta en diferentes puntos. De igual manera que la rapidez con la cual el agua fluye a través de una sección transversal cualquiera de un tubo, es la misma aun cuando cambie la sección.

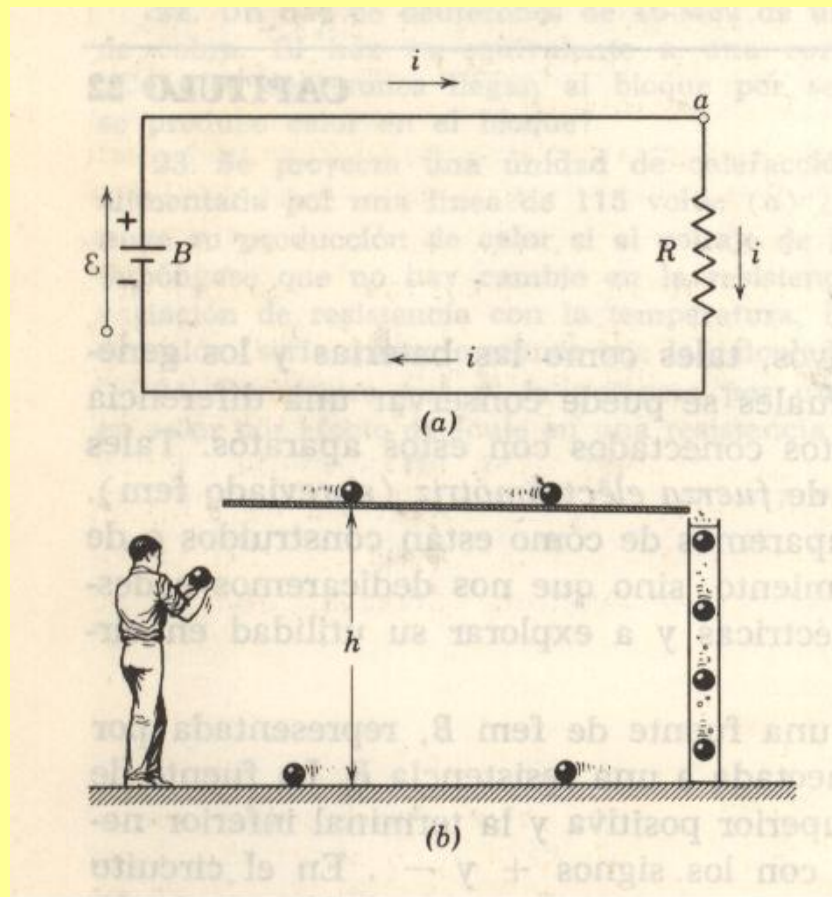
La constancia de la corriente eléctrica se deduce del hecho experimental de que la carga eléctrica debe conservarse.

Luego en un régimen estable, la carga eléctrica, ni se acumula continuamente en un punto del conductor, ni se pierde continuamente en un punto de él.



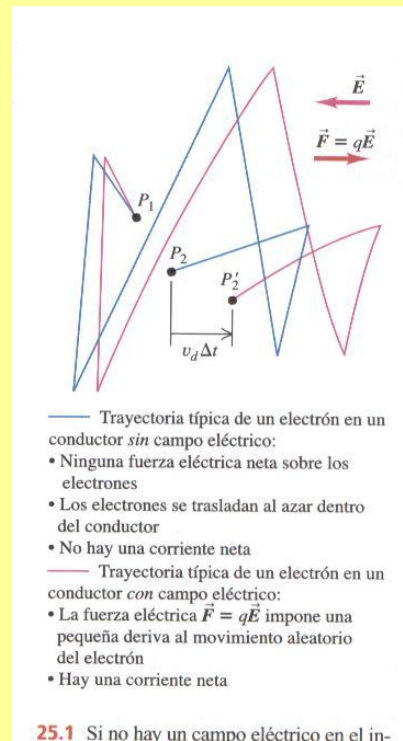
Notemos que:

1) Estamos asumiendo la existencia de un campo eléctrico no nulo en el interior de un material conductor. Esto ocurre porque ahora estamos suponiendo que el conductor no está aislado y además no se encuentra en equilibrio electrostático. Ver pizarra y dibujo.



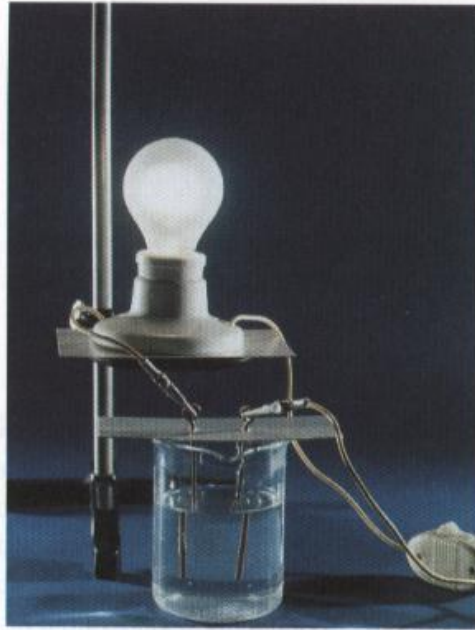
2) El campo eléctrico que actúa sobre los electrones no genera una aceleración neta en ellos. Esto es debido a los “choques” entre los electrones y los átomos (iones en estricto rigor) que constituyen el conductor. La estructura de estos iones forman lo que se denomina la red a través de la cual se mueven los electrones de conducción. Las interacciones de los electrones de conducción con la red son las que generan que los electrones de conducción en promedio no se aceleren.

El efecto total de los choques de los electrones con la red es la pérdida de energía cinética de los electrones que aceleran, la cual pasa a energía de vibración de la red. El efecto neto es que los electrones adquieren una velocidad de arrastre constante media V_d en la dirección de $-\mathbf{E}$.



Convención sobre la dirección de la corriente eléctrica (o el signo de los portadores de carga)

- En los metales son los electrones (de carga negativa) los portadores de carga.
- En los electrolitos (cualquier sustancia que contenga iones libres Ej. Agua con sal) o en los materiales conductores gaseosos los portadores de carga pueden ser iones positivos, iones negativos o ambos.

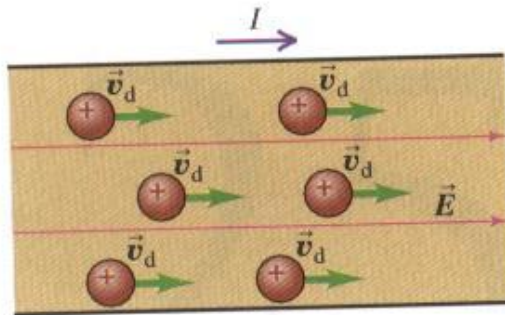


25.4 Parte del circuito eléctrico que incluye este foco pasa por un vaso con una solución de cloruro de sodio. En la solución, la corriente es transportada tanto por cargas positivas (iones Na^+) como por cargas negativas (iones Cl^-).

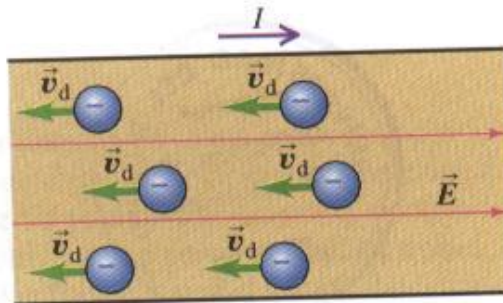
Adoptamos la siguiente convención:

Suponemos que los portadores de carga son positivos y dibujamos las flechas de las corriente en el sentido en el cual se moverían tales cargas.

Si los portadores de carga son negativos entonces estos se mueven en sentido contrario a las flechas de la corriente.



(a)



(b)

25.2 Una misma corriente puede ser producto de (a) cargas positivas que se trasladan en la dirección del campo eléctrico \vec{E} o (b) el mismo número de cargas negativas que se desplazan con la misma rapidez en dirección opuesta a \vec{E} .

La densidad de corriente eléctrica \mathbf{J}

La corriente es una cantidad macroscópica. A partir de la definición de corriente podemos definir una cantidad vectorial microscópica que nos indica como se mueven los portadores de carga. Esta cantidad es la densidad de corriente eléctrica \mathbf{J} (notar que es un vector). La densidad de corriente es un campo vectorial que a cada punto le asigna un vector que corresponde al valor del diferencial de carga en ese punto por la velocidad que este tiene (ver pizarra).

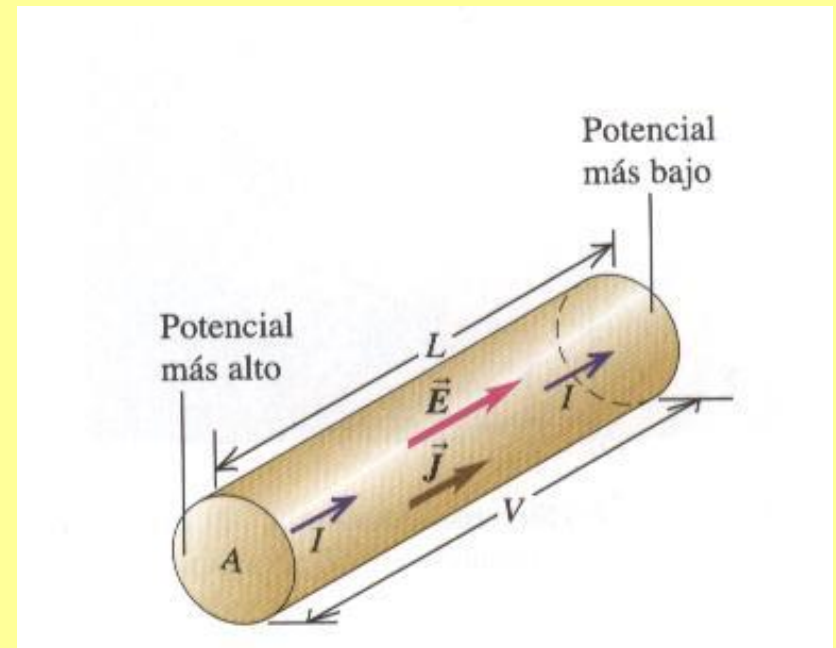
\mathbf{J} corresponde a una corriente por unidad de área y tiene unidades A/m^2 .

Si la corriente está distribuida en forma uniforme a través del conductor de sección transversal A , entonces la magnitud de la densidad de corriente para todos los puntos de esa sección transversal es:

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

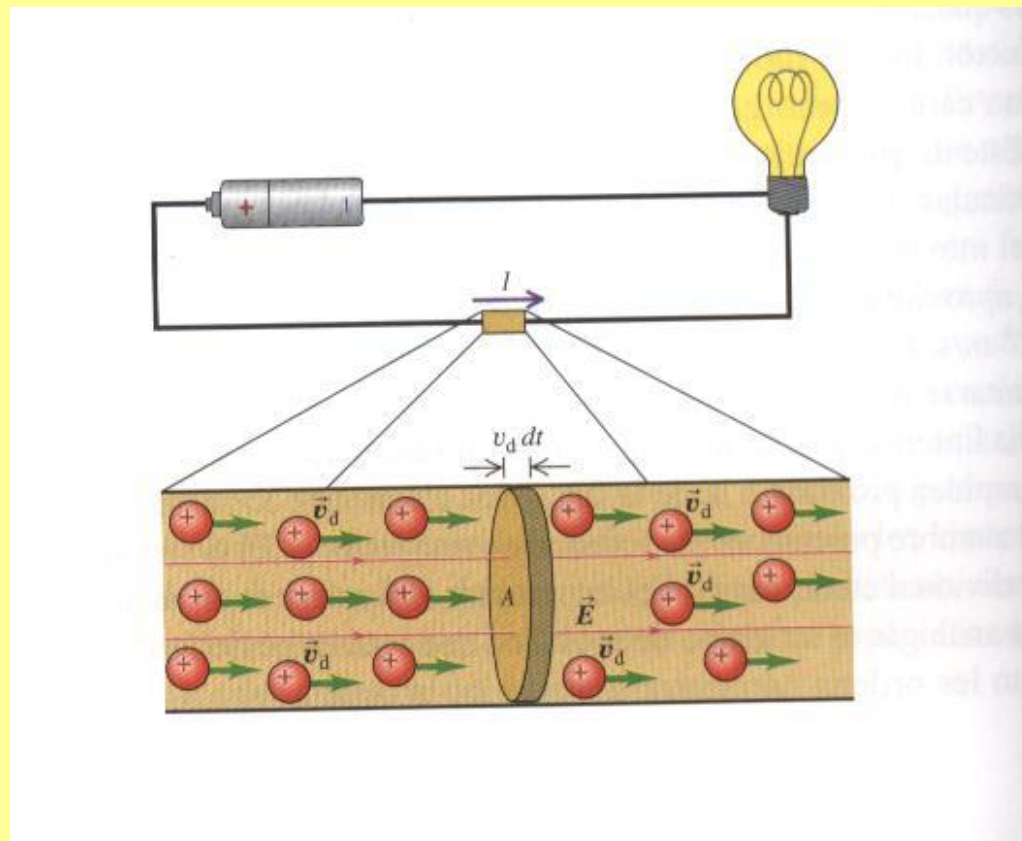
Notar: El vector \vec{J} en un punto cualquiera está orientado en la dirección en que los portadores positivos de carga se moverían en ese punto.

Un electrón en ese punto se movería en la dirección $-\mathbf{J}$.

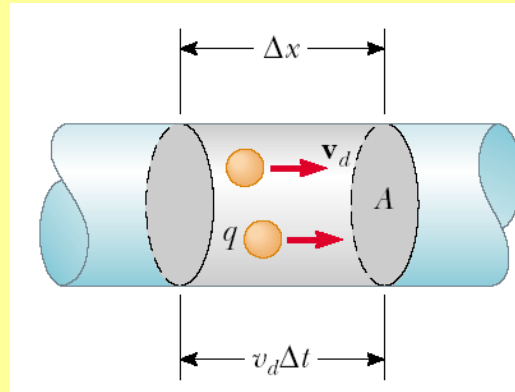


En general la relación entre una superficie arbitraria por la cual pasa una cantidad de corriente I y la densidad de corriente \mathbf{J} está dada por la expresión

$$I = \int_S \vec{J} \cdot d\vec{s}$$



Modelo microscópico para la densidad de corriente eléctrica \mathbf{J}



$$I_{\text{av}} = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = nq v_d A$$

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

$$J \equiv \frac{I}{A} = nq v_d$$

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

Resistencia eléctrica y Ley de Ohm

Resistencia eléctrica y resistividad:

Si se aplica la misma diferencia de potencial entre los extremos de una barra de cobre y de una barra de madera se producen corrientes eléctricas muy diferentes. La característica del conductor que interviene en este caso es la Resistencia Eléctrica (o resistencia).

Definimos la resistencia eléctrica de un conductor entre dos puntos como como el cuociente entre la diferencia de potencial aplicado entre esos dos puntos V (voltaje) y la corriente que genera ese voltaje:

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

En el sistema MKS la resistencia se mide en Ohm $[\Omega] = [V]/[A]$

La resistividad

Relacionada con la resistencia (propiedad global o macroscópica del material) está la resistividad ρ que es una característica microscópica del material.

Para una material isótropo se define de la siguiente manera:

$$\vec{J} = \frac{1}{\rho} \vec{E}$$

En el sistema MKS la resistividad se mide en Ohm-Metro [Ω][m].

En general ρ puede es función de la temperatura así como del campo eléctrico.

TABLA 31-1

PROPIEDADES DE LOS METALES COMO CONDUCTORES

	Resistividad a 20°C ohm-m	Coefficiente de temperatura para la resis- tividad, * α , por C°	Densidad gm/cm ³	Punto de fusión, °C
Aluminio	2.8×10^{-8}	3.9×10^{-3}	2.7	659
Cobre	1.7×10^{-8}	3.9×10^{-3}	8.9	1080
Carbono (amorfo)	3.5×10^{-5}	-5×10^{-4}	1.9	3500
Hierro	1.0×10^{-7}	5.0×10^{-3}	7.8	1530
Manganina	4.4×10^{-7}	1×10^{-5}	8.4	910
Níquel	7.8×10^{-8}	6×10^{-3}	8.9	1450
Plata	1.6×10^{-8}	3.8×10^{-3}	10.5	960
Acero	1.8×10^{-7}	3×10^{-3}	7.7	1510
Volframio (tungsteno)	5.6×10^{-8}	4.5×10^{-3}	19	3400

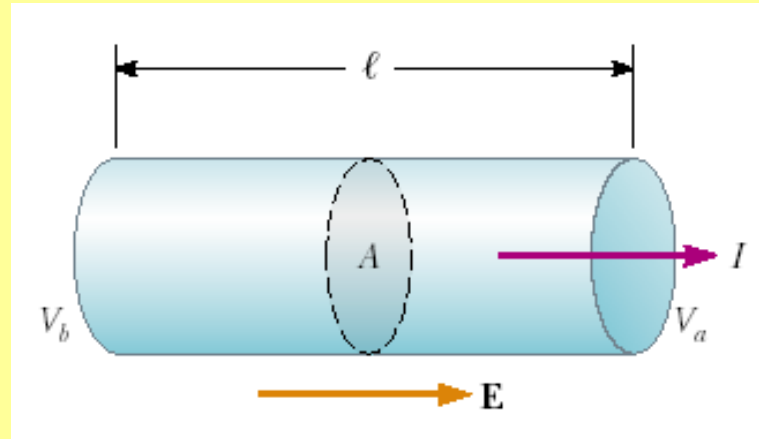
* Esta cantidad, definida por la expresión

$$\alpha = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT} \quad (31-8)$$

es la fracción que cambia la resistividad ($d\rho/\rho$) por unidad de cambio de temperatura. Varía con la temperatura, los valores que aquí se consignan son para 20°C. Para el cobre ($\alpha = 3.9 \times 10^{-3}/\text{C}^\circ$) la resistividad aumenta en 0.39×100 para un aumento de temperatura de 1C° cerca de 20°C. Nótese que α para el carbón es negativa, o sea que la resistividad *disminuye* al aumentar la temperatura.

Relación ente la resistencia y la resistividad:

Ej.1 Para un material conductor cilíndrico de sección transversal A y longitud l determine la resistencia R de éste a temperatura ambiente, si la resistividad del material es ρ . (Ver pizarra).



$$\Delta V = V_b - V_a$$

$$\Delta V = E\ell$$

$$\vec{J} = \frac{1}{\rho} \vec{E}$$

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

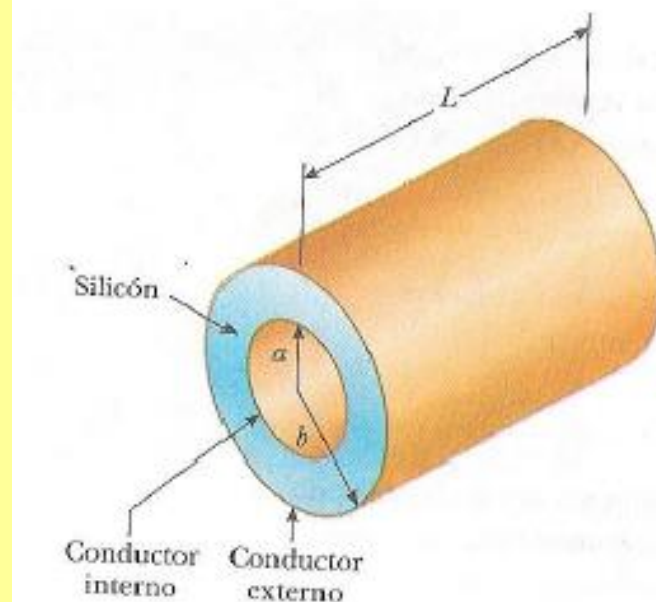
Luego en este caso obtenemos

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

Ej. Guía 5

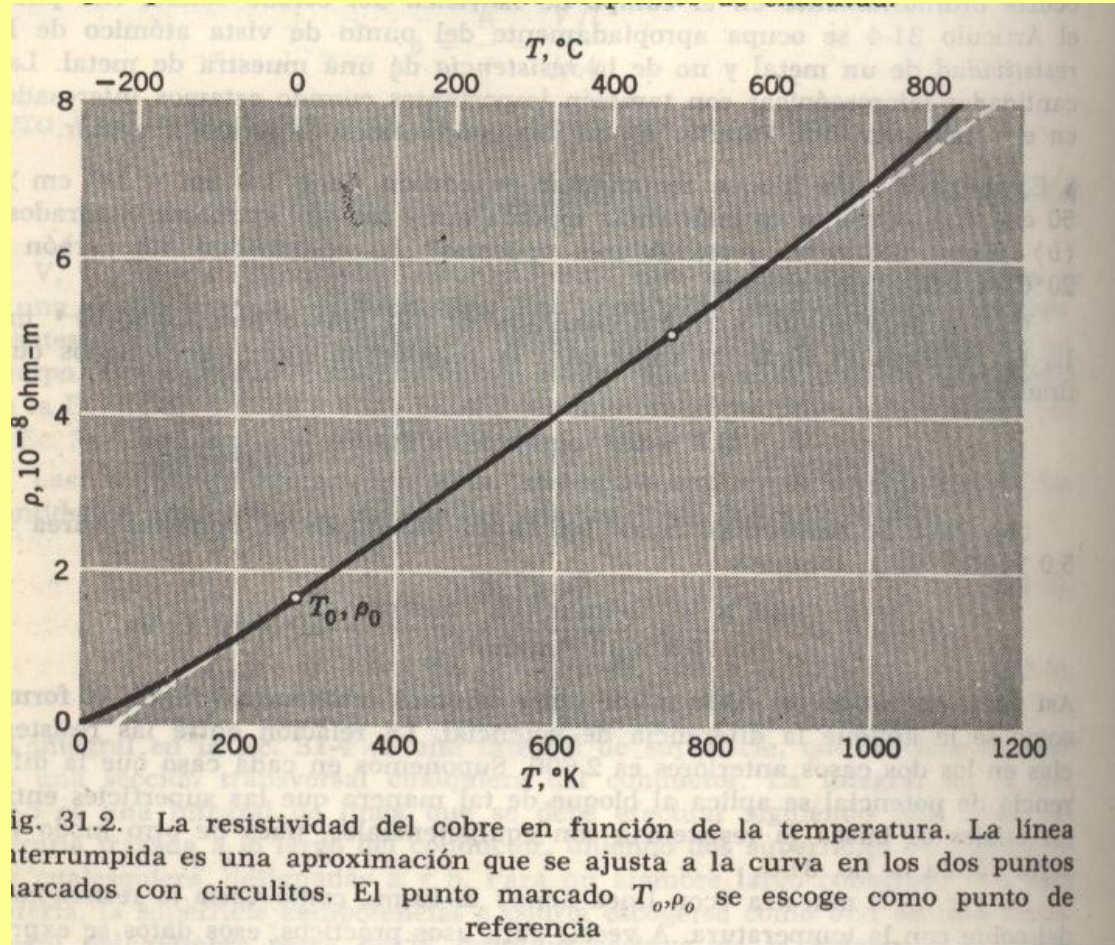
1-Un cable coaxial está constituido por dos conductores cilíndricos . La región entre los conductores está totalmente llena de silicón, como se observa en la Figura 1.La fuga de corriente a través del silicón es radial. El radio del conductor interno es a y el radio externo es b , siendo la longitud L .Calcule la resistencia del silicón entre los conductores.

$$\text{Respuesta: } R = \frac{\rho}{2\pi L} \ln\left(\frac{b}{a}\right)$$

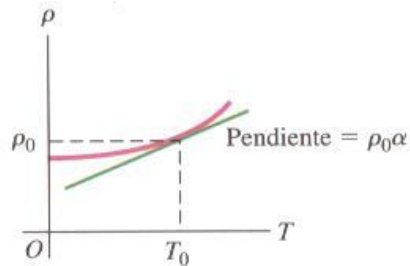


Dependencia de ρ con la temperatura y superconductividad:

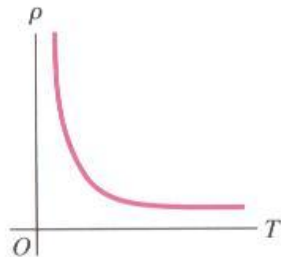
Para un metal (Ej. Cobre) la resistividad aumenta con la temperatura



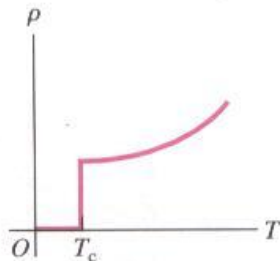
- Pero en $T = 0$ la resistividad no se anula si no que va a un valor constante.
- Para materiales semiconductores (grafito) ρ disminuye al aumentar la temperatura.



(a) Metal:
 ρ aumenta con
el incremento de T



(b) Semiconductor:
 ρ disminuye
al aumentar T



(c) Superconductor:
 $\rho = 0$ cuando $T < T_c$

Para algunos materiales muy particulares (generalmente no muy buenos conductores a temperatura ambiente) ocurre un fenómeno muy extraño a abajas temperaturas. Para estos materiales (Ej. Mercurio) la resistividad se hace cero para temperaturas menores que una temperatura crítica (T_c) la cual depende del material en cuestión. Estos materiales se denominan **superconductores** ya que no presenta resistencia eléctrica cuando la temperatura es menor que la temperatura crítica. Por ejemplo para el mercurio la temperatura crítica es cercana a 4 K.

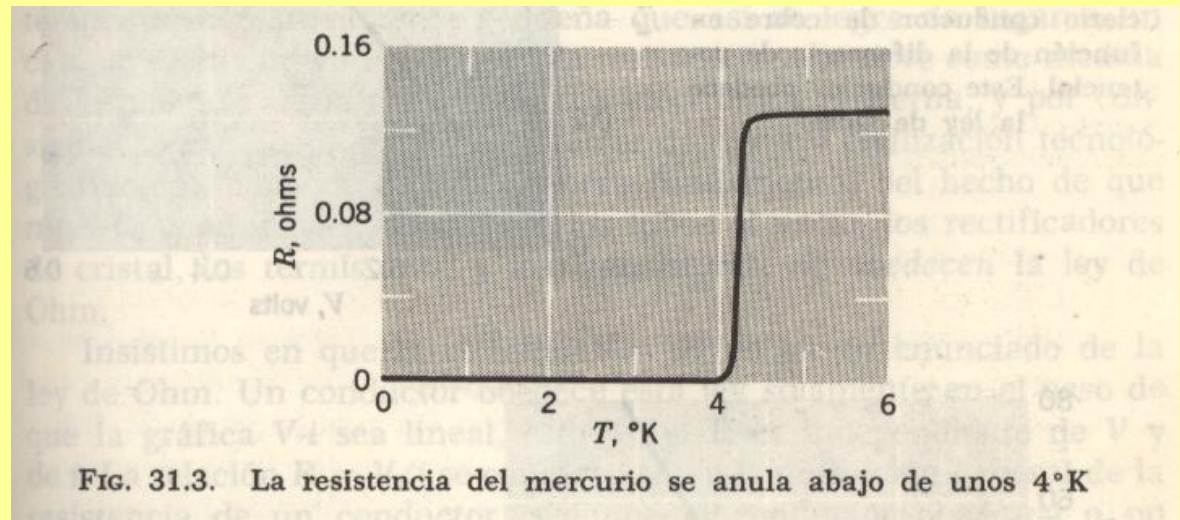


FIG. 31.3. La resistencia del mercurio se anula abajo de unos 4°K

Una de las magias del campo magnético y un superconductor



[Ver video](#)

La Ley de Ohm

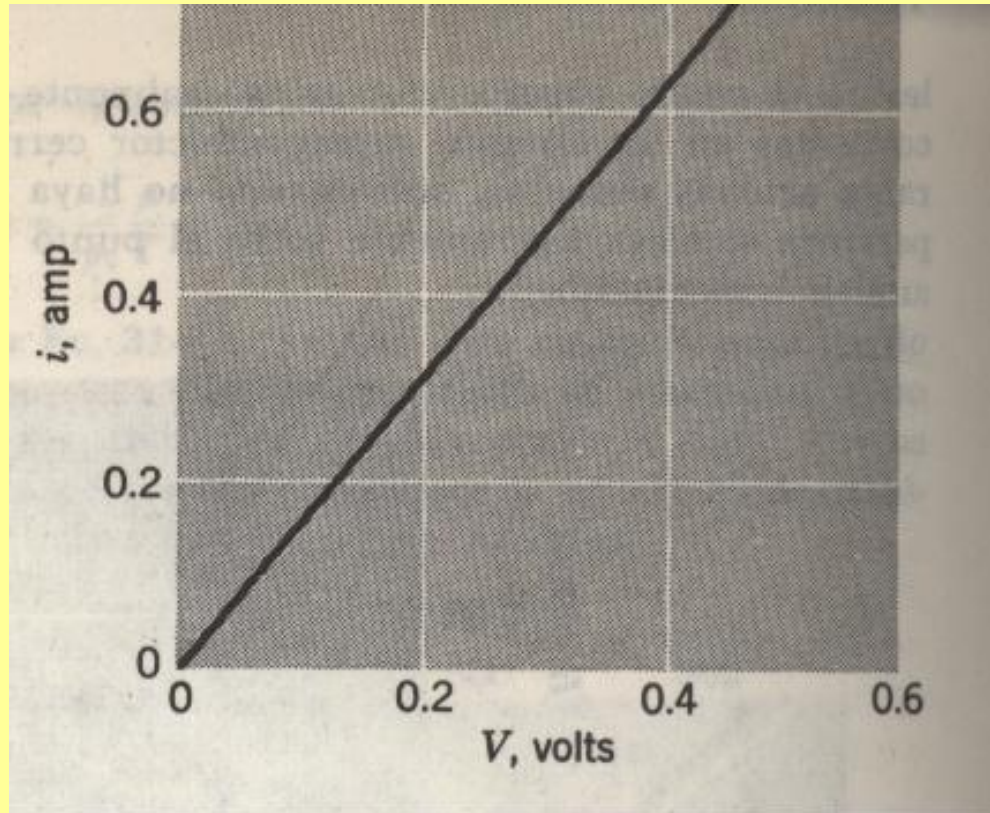
Para el caso particular en que la resistividad ρ no depende de el campo eléctrico, entonces para una temperatura dada (fija) tenemos una relación lineal entre el campo eléctrico y la densidad de corriente

$$\vec{J} = \frac{1}{\rho} \vec{E} \quad \rho = \text{Cte.}$$

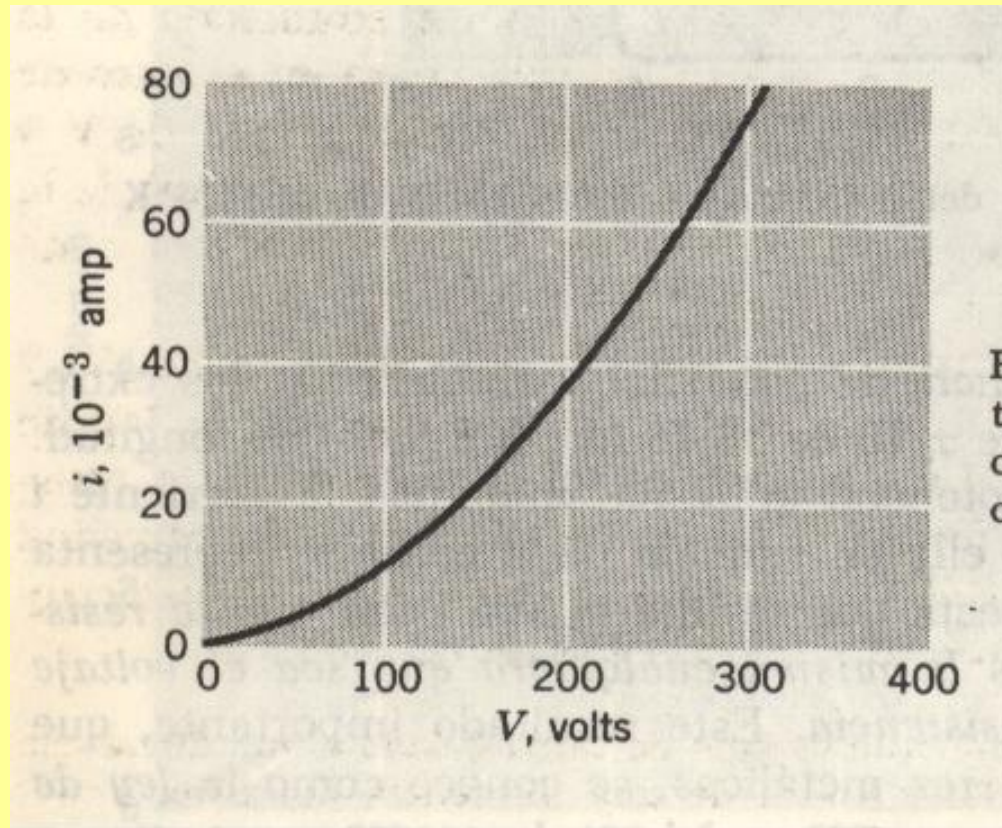
Esto implica que tenemos una relación lineal entre la corriente I y el voltaje V , donde la constante de proporcionalidad es R .

$$V = R I$$

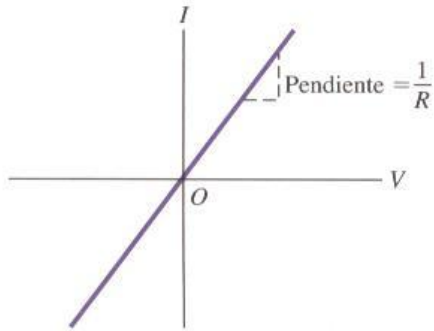
Donde R es constante



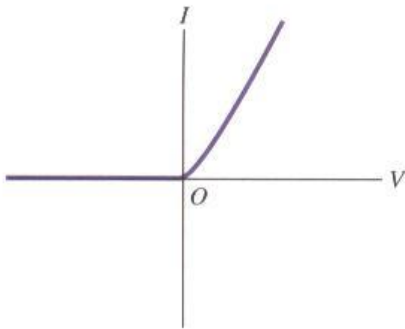
Material conductor que satisface la ley de Ohm (en este caso el material es cobre)



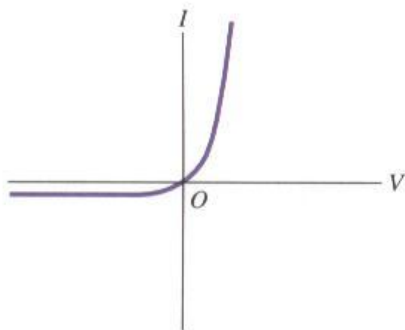
Caso de un conductor que no satisface la ley de Ohm. (Tubo al vacío)



(a) Resistor que obedece la ley de Ohm



(b) Diodo de vacío (no obedece la ley de Ohm)

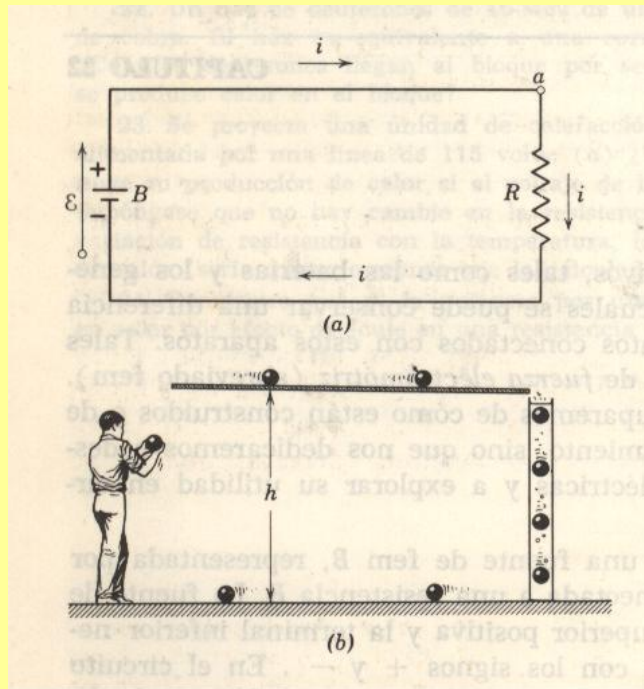


(c) Diodo semiconductor (no obedece la ley de Ohm)

Los materiales que no obedecen la ley de Ohm como por ejemplo los diodos de vacío o diodos semiconductores pueden ser utilizados como puertas de un solo sentido (válvulas), conducen la electricidad en una dirección pero no en la contraria.

Los diodos de vacío pueden utilizarse para transformar corriente alterna de alto voltaje en corriente continua.

Fuerza electromotriz (fem)



Una corriente eléctrica I constante puede mantenerse en un circuito cerrado por medio de una fem. Una fem es un dispositivo (como una batería o un generador) que produce un campo eléctrico el cual posibilita a las cargas a moverse a lo largo del circuito.

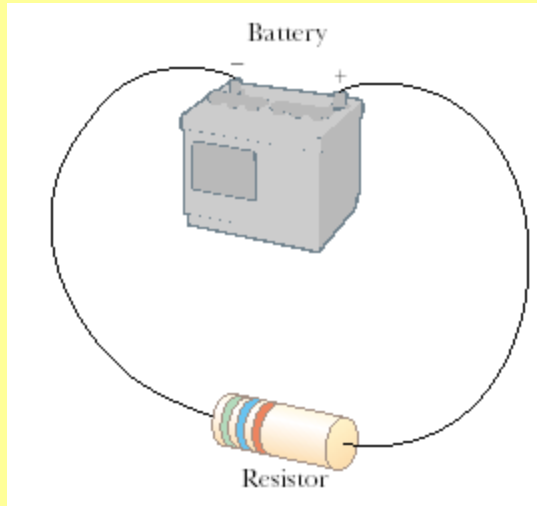
Podemos pensar a la fem como un “bomba” de cargas eléctricas.

Cuando una diferencia de potencial electrostático existe entre dos puntos la fem mueve las cargas desde un potencial menor a otro mayor.

La fem describe el trabajo por unidad de carga que se debe realizar para mover las cargas del menor potencial al mayor potencial. Sus unidades son Volt (V).

Si la fem es una batería, en ese caso la energía química de la pila es la que hace el trabajo de mover los portadores de carga de un menor potencial al potencial mayor. En este caso estamos transformando la energía química de la pila en energía cinética de los portadores de carga

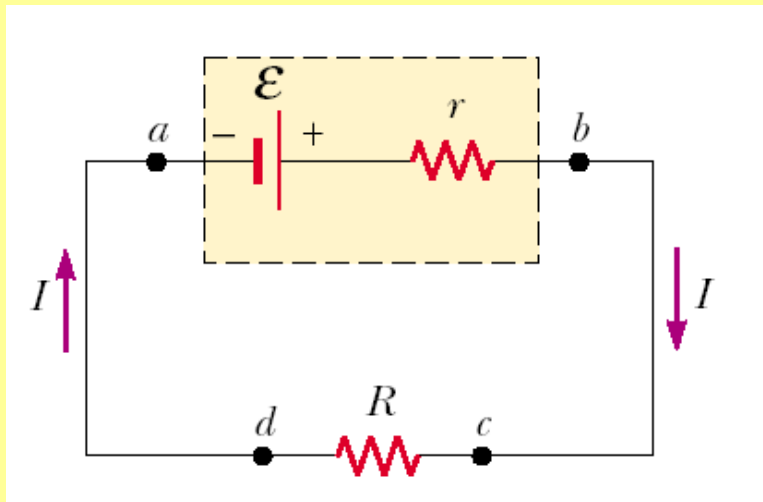
Relación entre una batería y una fem



En el mundo real una batería o una pila no utiliza todo el trabajo que realiza en mover los portadores de carga desde un potencial menor a otro mayor, debido a que tiene pérdidas.

Una batería real no es completamente eficiente y siempre pierde energía que podría aprovechar en mover las cargas. Por ejemplo podemos notar que una batería conectada a un circuito se calienta.

Podemos modelar esta situación al incluir una resistencia interna r para la batería (o pila).



Imaginemos que nos movemos desde a hasta b a través de la batería midiendo el potencial electrostático V . Al pasar desde el terminal negativo al positivo el potencial aumenta en \mathcal{E} . Luego al pasar por la resistencia r el potencial decrece en un monto $-Ir$, donde I es la corriente que circula por el circuito. Luego la diferencia de potencial entre los punto a y b será

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

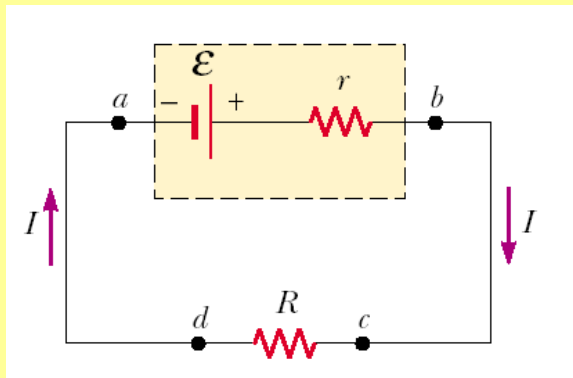
Podemos notar que \mathcal{E} es equivalente con el valor el voltaje cuando el circuito está abierto. Este valor es el que viene etiquetado en la batería o pila (12V o 1.5V)

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



La diferencia de potencial a través de la resistencia externa R será

$$\Delta V = IR$$



Luego tenemos que

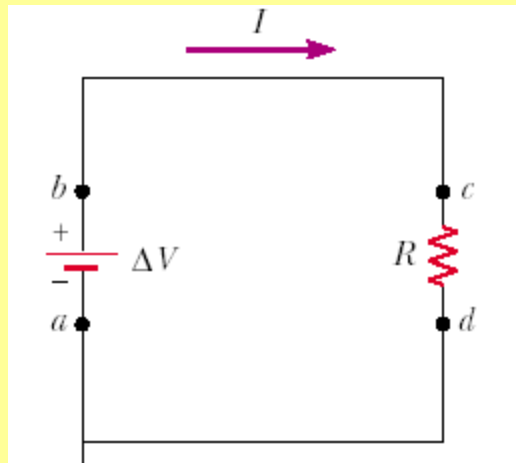
$$\mathcal{E} = IR + Ir$$

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

Por lo tanto la corriente que circula por el circuito dependerá tanto de la resistencia R como de la resistencia interna de la pila r . Normalmente $R \gg r$.

Energía Eléctrica y Potencia

Si usamos una batería para generar una corriente en un circuito entonces la energía química almacenada en la batería es continuamente transformada en energía cinética de los portadores de carga. En el medio conductor de resistencia R esta energía es disipada debido a las colisiones de los portadores de carga con los átomos del material conductor, lo que produce que el conductor se caliente.



Consideremos el movimiento de una carga ΔQ que se mueve en dirección horaria a lo largo del circuito. Al pasar del punto a al b su energía potencial U aumenta en $\Delta V \Delta Q$ y la batería pierde un monto de energía igual a ese valor.

Sin embargo ΔQ pierde esta energía al moverse por la resistencia. Podemos determinar cuanto vale la tasa de cambio de su energía potencial:

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

La carga ΔQ vuelve a ganar esa energía cuando vuelve a pasar por la batería.

Como la tasa a la cual la carga pierde su energía es igual a la potencia entregada por la resistencia P , tenemos que:

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

Esta ecuación también se puede escribir de las siguientes maneras

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

En este caso la potencia P es entregada a la resistencia por la batería

No olvidar que la potencia se mide en unidades de energía/tiempo.

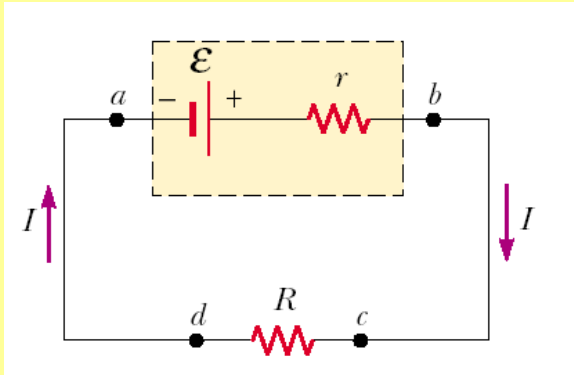
En el sistema MKS la potencia se mide en Watts = [W] = [J/s]

Potencia entregada por una pila no-ideal

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

Luego de examinar el circuito obtuvimos que

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



Multiplicando por I obtenemos el valor de la potencia entregada por la fem

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

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

Podemos notar que del total de la potencia entregada por la fem parte de esa potencia es disipada por la resistencia externa R (aprovechada por el circuito) y parte es disipada por la resistencia interna (potencia que no podemos aprovechar).

Fin