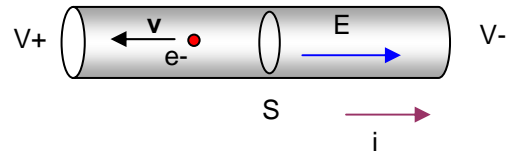


Capítulo 3. Corriente Eléctrica

3.1 Intensidad de la Corriente

El flujo de portadores de carga de una región a otra de un conductor se denomina *corriente eléctrica*.

Considere un alambre conductor metálico macizo como el de la figura, en el que se ha establecido una diferencia de potencial en sus extremos. Se acostumbra designar la región de mayor potencial, independientemente de que su valor sea positivo o negativo, como V_+ . La de menor potencial se designa por V_- .



De capítulos anteriores se sabe que $E = -dV/dx$, y la intensidad de campo estará dirigida desde la región de mayor potencial a la de menor potencial. Por tanto, los electrones serán atraídos a la región de mayor potencial con una fuerza $F = q_e E$, donde q_e es la carga del electrón.

Si esta fuerza fuera la única actuando sobre las cargas, los electrones se moverían aceleradamente hacia la izquierda. Sin embargo, esto no ocurre así porque además de la fuerza eléctrica existen otras fuerzas que se oponen al movimiento, originadas por la interacción de los electrones con los núcleos atómicos durante su movimiento. Estas fuerzas equilibran la fuerza eléctrica, de manera que la velocidad v de los portadores de carga es esencialmente constante. La velocidad promedio de los portadores de carga se denomina *velocidad de arrastre*.

Designemos por S una sección transversal arbitraria en el conductor (ver figura). Llamando Δq al número de cargas que atraviesan la superficie en un intervalo de tiempo Δt , se define la intensidad media de la corriente en el intervalo Δt considerado por la expresión

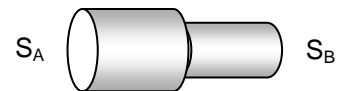
$$i = \frac{\Delta q}{\Delta t} .$$

Por razones históricas, el *sentido de la corriente* se toma contrario al movimiento de los electrones, tal como se muestra en la figura. Si la corriente no se mantiene constante y varía con el tiempo, es necesario definirla para un instante dado. Para eso, tomando límites y haciendo $\Delta t \rightarrow 0$, se obtiene para la definición:

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

En el caso particular que q se mantiene constante, tomando $q = 0$ cuando $t = 0$ se obtiene $i = q/t$.

Note que si la sección transversal del conductor varía, el valor de la corriente no depende de la sección escogida. Para un Δt determinado, Δq será el mismo en S_A y S_B , porque las cargas no pueden aparecer o desaparecer en el tramo intermedio. La *densidad de corriente* si variará en general. Ésta se define por la expresión



$$j = \frac{i}{S}$$

Es posible demostrar que la densidad de corriente se relaciona con la velocidad de arrastre de los portadores de carga por la expresión

$$\vec{j} = nq_e \vec{v} .$$

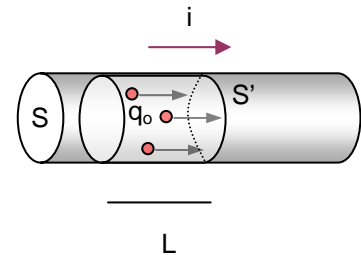
donde n es el número de portadores por unidad de volumen dentro del conductor y nq_e representa, por

tanto, la densidad de cargas “libres” dentro del conductor. Conociendo el valor de la densidad de corriente y la densidad de cargas dentro del conductor, es posible calcular el valor de la velocidad de arrastre.

No se debe confundir la velocidad de arrastre de los electrones (un valor típico es del orden de 0.01 cm/s) con la velocidad de propagación de la señal del campo eléctrico dentro del alambre, muy cercana a la velocidad de la luz (300 000 km/s). De aquí que en la mayoría de las aplicaciones prácticas la propagación de la señal eléctrica pueda considerarse instantánea.

Demostración $\vec{j} = nq_e \vec{v}$

Para simplificar el análisis, consideremos cargas positivas moviéndose en el sentido de la corriente con una cierta velocidad v (velocidad de arrastre o “drift”). Si hay N cargas de valor q_0 en el volumen $V = SL$, entonces:



- $n = N/V$ es el número de cargas por unidad de volumen
- $q = Nq_0 = nSLq_0$ es la carga total encerrada en ese volumen
- $t = L/v$ es el tiempo que tarda el volumen SL en atravesar la superficie transversal S'

Por tanto, sustituyendo en la definición de corriente, suponiendo que ésta se mantiene constante:

$$i = \frac{q}{t} = \frac{nSLq_0}{L/v} = nq_0Sv$$

Dividiendo por S y considerando el carácter vectorial de la velocidad, con $q_e = q_0$ en el caso de una corriente de electrones, se llega finalmente a lo que se quería demostrar:

$$\vec{j} = nq_e \vec{v}$$

Cuando q_e es (-), como en el caso de los electrones, los vectores \vec{j} y \vec{v} tendrán distinto sentido.

Unidad de la Intensidad de Corriente

En el SI de unidades, $[i] = [q]/[t] = C/s = \text{ampere (A)}$. Un ampere es la corriente que se obtiene cuando una carga de un coulomb atraviesa la superficie transversal del alambre cada segundo.

André Marie Ampère, (1775-1836), científico francés, conocido por sus importantes aportaciones al estudio de la electrodinámica. La unidad de intensidad de corriente toma su nombre de él.

Su teoría electrodinámica y sus interpretaciones sobre la relación entre electricidad y magnetismo se publicaron en su *Colección de observaciones sobre electrodinámica* (1822) y en su *Teoría de los fenómenos electrodinámicos* (1826).

Ampère inventó la *aguja astática*, que hizo posible el moderno galvanómetro. Fue el primero en demostrar que dos conductores paralelos por los que circula una corriente en el mismo sentido se atraen, mientras que si los sentidos de la corriente son opuestos, se repelen.

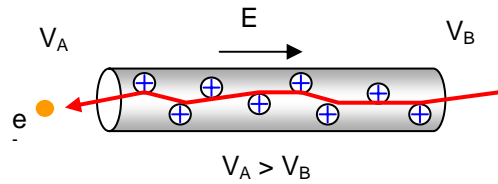


3.2 Ley de Ohm

Las cargas dentro del conductor se mueven bajo la acción de la fuerza eléctrica $\vec{F} = q_e \vec{E}$ y una fuerza media contraria \vec{f} , originada por la interacción de los electrones con los núcleos atómicos durante su movimiento. Cuando se alcanza el régimen estacionario ambas fuerzas se equilibran, y la velocidad de

los portadores (y la corriente eléctrica) se mantiene constante para una diferencia de potencial determinada.

Un resultado experimental ampliamente comprobado es que la densidad de corriente es proporcional al campo eléctrico en el interior del conductor, y se conoce como *ley de Ohm*:



$$\vec{j} = \sigma \vec{E} \quad (3.2.1)$$

La constante σ es la *conductividad*, y depende del medio por el que se mueven las cargas. Es un parámetro característico de cada material; varía apreciablemente con la temperatura. El inverso de la conductividad es la *resistividad*,

$$\rho = 1/\sigma$$

La resistividad depende de la temperatura mediante una expresión del tipo $\rho = \rho_0\{1 + \alpha(T-T_0)\}$, donde α es una constante para cada material. La ley de Ohm expresada de esta forma tiene carácter microscópico, pues es válida punto a punto dentro de cualquier material. Existe una forma alternativa de expresar la ley de Ohm, en función de variables macroscópicas.

Para obtener esa expresión, considere una porción de longitud L del alambre de la figura, y expresemos la intensidad de campo como $E = -dV/dx = -\Delta V/\Delta x = V_{ab}/L$. Sustituyendo estas expresiones en (3.2.1):

$$\frac{i}{S} = \frac{1}{\rho} \frac{V_{AB}}{L}$$

y despejando V_{AB} :

$$V_{AB} = i \frac{\rho L}{S}$$

La *resistencia* de la porción de alambre considerado se define por la expresión

$$R = \rho L/S$$

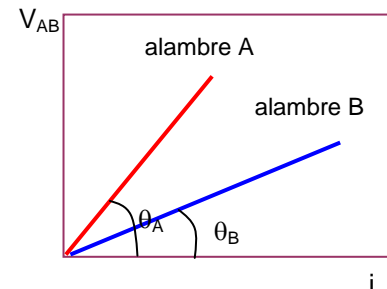
conocida también como "Ley de Pouillet", mientras que la ley de Ohm en forma macroscópica toma la forma

$$V_{AB} = iR \quad (3.2.2)$$

Es decir, la diferencia de potencial en los extremos del alambre es igual al producto de la corriente por la resistencia. El inverso de la resistencia se denomina *conductancia*, y se utiliza usualmente para caracterizar las propiedades eléctricas de las disoluciones.

Análisis gráfico

En un gráfico de diferencia de potencial vs. intensidad de la corriente, la ecuación (3.2.2) representa una recta que pasa por el origen y posee pendiente R . En la figura, $\tan\theta = V_{AB}/i = R$. La resistencia, y la correspondiente pendiente, serán diferentes para cada alambre considerado, en caso de que no sean alambres idénticos.



Un conductor se denomina *óhmico* cuando el gráfico de V_{AB} vs. i proporciona una recta como las de la figura. Sin embargo, no todos

los conductores son óhmicos y cumplen la ley de Ohm. También existen los conductores *no óhmicos* en los que la dependencia no es una línea recta.

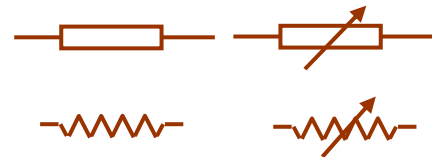
La ley de Ohm no se cumple estrictamente en todas las sustancias o dispositivos, y es común referirse a los conductores como *óhmicos* y *no óhmicos*, para especificar si cumplen o no la ley de Ohm.

Las válvulas electrónicas, transistores, termistores y otros dispositivos semiconductores no cumplen la ley de Ohm. En ese caso el gráfico de i vs. V_{ab} no proporciona una línea recta.

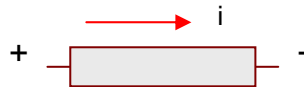


Símbolos de los resistores

Se acostumbra representar la resistencia de los alambres y otros dispositivos con cualquiera de los símbolos de la figura (la flecha indica un valor variable de la resistencia). Es común designar como *resistor* a los dispositivos construidos para ser utilizados específicamente como resistencias. Los más corrientes se construyen de cerámica aislante con una capa muy fina de grafito semiconductor como material conductor.



En cualquier resistor siempre se considera que el sentido de la corriente es de la región de mayor potencial (representada con un signo +) a la de menor potencial (representada con un signo -);



Unidades

resistencia	$[R] = [V]/[i] = V/A$	Ohm	Ω
conductancia	$[\Lambda] = 1/[R] = 1/\Omega$	Siemens (ó Mho)	S
resistividad	$[\rho] = [R][S]/[L] = \Omega m$	Ohm-metro	Ωm
conductividad	$[\sigma] = 1/[\rho] = 1/\Omega m = S/m$	Siemens/metro	S/m

En la tabla siguiente aparecen algunos valores típicos de la resistividad.

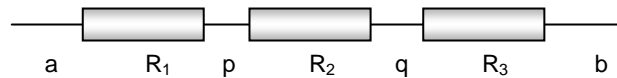
Sustancia	$\rho(\Omega m)$	Características
Plata	1.47×10^{-8}	conductor
Cobre	1.69×10^{-8}	
Aluminio	2.83×10^{-8}	
Silicio	640	semi-conductor
Madera	$10^8 - 10^{11}$	dieléctrico
Vidrio	$10^{10} - 10^{14}$	

La tabla anterior se refiere a las sustancias secas. Cuando cualquier sustancia se humedece la resistividad cae bruscamente. La piel seca presenta una resistencia de varios $M\Omega$. Esta resistencia cae bruscamente cuando la piel está húmeda.

3.3 Resistencias en Serie y Paralelo

Serie

Es posible demostrar que la resistencia equivalente de varias resistencias conectadas en serie es aquella cuyo valor es igual a la suma de las resistencias consideradas. La resistencia equivalente se define como aquella resistencia que, al sustituir a varias, mantiene la misma diferencia de potencial V_{ab} en los extremos sin alterar la corriente.



En la figura, el trabajo por unidad de carga necesario para llevar una carga de prueba desde a hasta b será igual a la suma de los trabajos realizados desde a hasta p, p hasta q y q hasta b. Es decir,

$$V_{ab} = V_{ap} + V_{pq} + V_{qb}$$

Dividiendo por la corriente que atraviesa el circuito en un instante dado, considerando la definición de resistencia equivalente y aplicando la ley de Ohm en cada caso particular, se obtiene:

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3 .$$

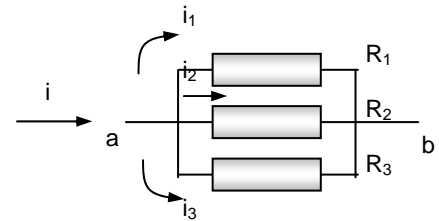
De existir más resistencias en serie, la generalización es inmediata. Entonces es posible expresar el resultado anterior de la forma siguiente: cuando las resistencias están en serie,

$$R_{eq} = \sum_i R_i$$

Paralelo

Cuando las resistencias están conectadas como se muestra en la figura adjunta, se dice que están *en paralelo*. La corriente de cargas que entra por la izquierda en la figura, se divide en tres corrientes, una por cada resistencia. Se cumple entonces que

$$i = i_1 + i_2 + i_3 .$$



La diferencia de potencial V_{ab} es independiente de la trayectoria donde se calcule desde a hasta b., por tanto, dividiendo la expresión anterior por V_{ab} , tomando en cuenta la ley de Ohm y la definición de resistencia equivalente, se obtiene:

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

Si existieran más resistencias en paralelo, la generalización es inmediata. Generalizando y expresando el resultado en notación compacta, se obtiene para las resistencias en paralelo:

$$\frac{1}{R_{eq}} = \sum_i \frac{1}{R_i}$$

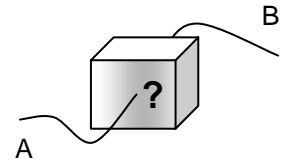
3.4 Potencia Entregada a un Circuito

Un circuito es un sistema conductor cerrado que puede incluir resistencias, motores, instrumentos de medición y otros dispositivos. Cuando se establece una diferencia de potencial en los extremos de un circuito, en el mismo se establecerá una corriente eléctrica. Esa corriente puede hacer girar, por ejemplo,

las paletas de un ventilador. Para mantener girando las paletas es necesario entregar energía continuamente (más adelante se analizarán las posibles fuentes de energía).

Sin embargo, no es necesario conocer las características particulares del circuito para calcular la energía entregada (o consumida) por él. Considere un segmento AB de un circuito y una porción de carga que se mueve desde A hasta B bajo la acción de la diferencia de potencial V_{AB} . Según la definición de variación de potencial,

$$V_{AB} = \frac{\Delta E_p}{q} = \frac{W_{A \rightarrow B}}{q}$$



Si q es pequeña (δq) y V_{ab} se mantiene constante durante el proceso, el trabajo realizado también será uninfinitesimal δW . Despejando en la expresión anterior se obtiene

$$\delta W_{A-B} = V_{AB} \delta q$$

La potencia instantánea involucrada en el proceso vendrá dada, según la definición, por

$$P = \frac{\delta W_{A-B}}{dt} = V_{AB} \frac{\delta q}{\delta t}$$

pero este último término no es más que la corriente instantánea, medida en un intervalo de tiempo δt tan pequeño como se quiera. Por tanto,

$$P = V_{ab} i$$

(3.4.1)

Esta expresión nos da la energía por unidad de tiempo que se está entregando a la porción de circuito considerada para mantener la corriente. Esta energía debe ser entregada por una fuente externa (sección 3.6).

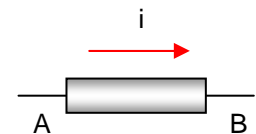
Unidades. $[P] = [E]/[t] = J/s = \text{watt (W)}$

También, como $P = Vi$, es posible expresar: watt = volt x ampere. Es decir: $1W = 1 VA$. El kilowatt-hora es una medida de *energía* que se utiliza mucho en ingeniería. Es la cantidad de Joules entrega en una hora.

$$1 \text{ kW.h} = 10^3 \text{ W} \times 3600 \text{ s} = 3.6 \times 10^6 \text{ J}$$

3.5 Ley de Joule – Lenz

Considere un circuito formado por una sola resistencia de valor R . Si $V_a > V_b$ la corriente estará dirigida desde a hacia b. Es conocido que cuando por una resistencia circula corriente, ésta incrementa su temperatura. Esto se debe a que la potencia entregada para mantener la corriente circulando se disipa continuamente en forma de calor en la resistencia (principio de conservación de la energía). En la resistencia se cumple la ley de Ohm, y $V_{ab} = iR$. Sustituyendo esta expresión en (3.4.1) se obtiene



$$P = i^2 R$$

Este resultado se conoce como *ley de Joule-Lenz*. Si se sustituye $i = V_{ab}/R$, también se puede expresar como

$$P = V^2/R$$

Es posible comprender el proceso mediante el cual se lleva a cabo el incremento de temperatura por efecto Joule si se considera el gráfico al inicio de la sección 3.2. Los electrones, al moverse bajo la acción del campo aplica-

do, van “chocando” con los núcleos atómicos fijos en el conductor, transfiriéndoles parte de su energía¹. Estos “choques” impiden la aceleración de los electrones y son el origen de la resistencia del material al paso de la corriente. Por otra parte, la energía entregada en los choques hace que los núcleos atómicos, que normalmente se encuentran oscilando alrededor de sus posiciones de equilibrio, aumenten la amplitud de sus oscilaciones, lo que a nivel macroscópico se traduce como un incremento de temperatura. Al elevarse la temperatura por encima de la temperatura ambiente, el resistor radiará calor al medio ambiente. La cantidad de calor Q radiada por la resistencia a los alrededores en un intervalo de tiempo Δt se puede entonces calcular directamente a partir de la expresión de la potencia:

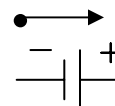
$$Q = \Delta E = P\Delta t = i^2 R\Delta t .$$

3.6 Fuerza Electromotriz

Una fuerza electromotriz (FEM) es cualquier fuente de energía capaz de establecer una diferencia de potencial, o una corriente, en una resistencia u otro dispositivo. Se designa usualmente por la letra ε . El valor de la FEM es la diferencia de potencial en los bornes o electrodos del dispositivo que la genera cuando por la misma no circula corriente; es decir;

$$\varepsilon = V_{ab} \text{ a circuito abierto}$$

En los esquemas de circuitos eléctricos, las FEM se simbolizan como se ve en la figura adjunta, donde $V_+ > V_-$. El *sentido* de la FEM se toma de $-$ a $+$. En la tabla siguiente aparecen los diferentes tipos de FEM conocidos.



Tipo de FEM	Fuente de Energía
pila o batería	química
generador	mecánica
celda solar	luminosa
termoelectricidad	térmica

Baterías

Las baterías o pilas aprovechan la electricidad de una reacción química espontánea para generar una corriente eléctrica. Se pueden conectar *en serie*, una a continuación de la otra, para incrementar el valor de la FEM que proporcionan.

La primera batería conocida, la llamada *pila de Volta* o *pila voltaica*, utiliza tiras de cinc y cobre sumergidas en disoluciones de ácido sulfúrico y sulfato de cobre respectivamente, que actúan como electrodos. Un puente salino de cloruro de potasio permite a los electrones fluir entre las cubetas sin que se mezclen las disoluciones. Cuando el circuito entre los dos sistemas se completa con un conductor, la reacción genera una corriente capaz de encender una bombilla (ver figura). Durante la reacción química el metal de la tira de cinc se consume (oxidación), mientras que la tira de cobre aumenta de grosor al reaccionar los electrones con el sulfato de cobre para producir metal adicional (reducción).

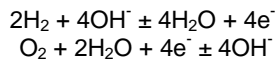


Existen muchos tipos de baterías en dependencia de las disoluciones utilizadas y de los metales que se usen como electrodos. Las diferencias de potencial o *voltajes* capaces de ser entregados por las baterías también son diferentes. Las pilas más utilizadas hoy en día aparecen en la tabla siguiente.

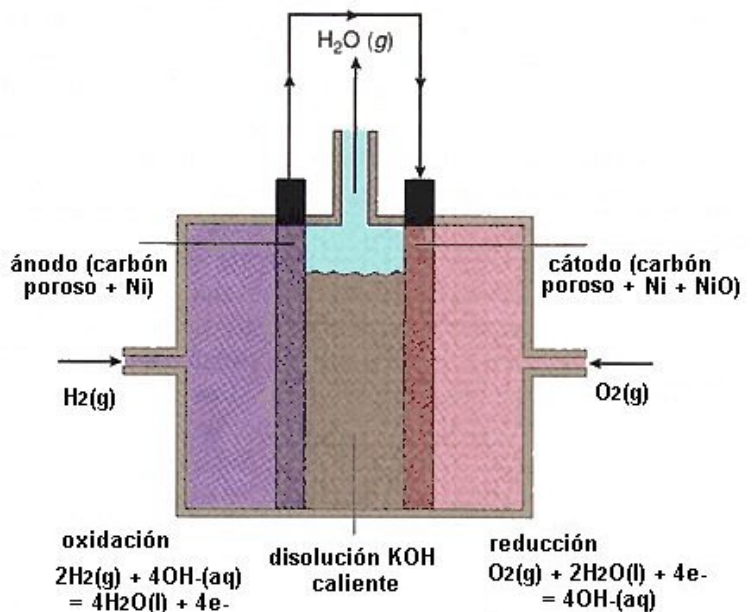
¹ En realidad, algún tipo de interacción tiene lugar entre los electrones y los núcleos, con un resultado similar al de un choque (inelástico).

Pila	Electrodos	Electrolito	ϵ
seca	cinc y carbono-MnO ₂	cloruro de amonio + cloruro de zinc	1.5 V
acumulador de plomo	plomo y oxido de plomo	ácido sulfúrico	2 V
alcalina	níquel y hierro o cadmio	hidróxido de potasio	1.15 V
mercurio	cinc y óxido de Hg	hidróxido de potasio	1.34 V
combustible	hidrógeno y oxígeno	hidróxido de potasio	1.2 V

Una *pila de combustible* consiste en un ánodo en el que se inyecta el combustible (hidrógeno, amoníaco o hidracina) y un cátodo en el que se introduce un oxidante (normalmente aire u oxígeno). Los electrodos están separados por un electrolito iónico conductor. En la pila de hidrógeno-oxígeno las reacciones en el ánodo y el cátodo son, respectivamente:



Los electrones producidos en el ánodo se mueven por un circuito externo, donde la energía generada se puede aprovechar, y pasan al cátodo. Los iones OH⁻ producidos en el cátodo son conducidos por el electrolito al ánodo, donde se combinan con el hidrógeno y forman agua, que debe ser extraída continuamente para evitar que inunde la pila. La FEM de esta pila de combustible es de 1.2 V.



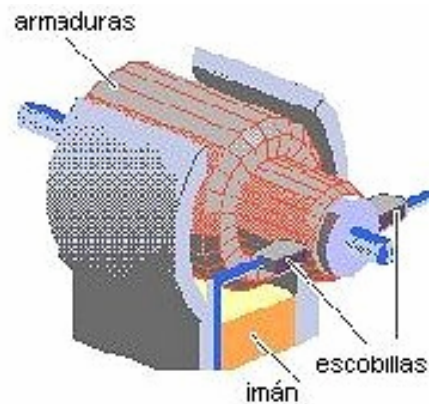
Las pilas de combustible de hidrógeno-oxígeno fueron utilizadas en los programas espaciales norteamericanos *Géminis* y *Apolo* porque, para una masa dada, son capaces de generar mucha más energía que cualquier otro tipo de batería. La *Apolo 11* realizó el primer descenso en la Luna el 20 de julio de 1969. El programa lunar culminó con el *Apolo 17*, en diciembre de 1972. La temperatura de trabajo de la pila hidrógeno-oxígeno varía entre 60 y 200°C. Utilizando un conjunto de baterías en serie es posible obtener hasta 2 kW de potencia a bajo voltaje. Las pilas de combustible atraen mucho la atención como posibles fuentes de energía porque poseen una alta eficiencia, del orden del 50-60%, y no contribuyen a la contaminación ambiental, generando solamente agua y calor como productos de desecho.

También es posible encontrar fuentes de voltaje químico en los organismos vivos. Por ejemplo, el *pez torpedo* o *raya eléctrica* es capaz de generar energía eléctrica con unas columnas de células apiladas con forma de placas, llamadas *electroplacas*, que se disponen dentro de paquetes musculares muy pequeños a ambos lados de su cabeza. Unos nervios ramificados por todos los órganos eléctricos inician la descarga eléctrica, que se amplifica al pasar a través de las columnas. El pez torpedo rodea a sus presas con sus aletas pectorales y las paraliza con una descarga de unos 200 volt.

Los peces eléctricos más importantes, además del pez torpedo, son las anguilas eléctricas y los peces gato. Las anguilas eléctricas de mayor tamaño pueden emitir descargas de 450 a 600 volt.

Generadores

Un generador es un dispositivo que permite convertir la energía mecánica a energía eléctrica, basado en el fenómeno de *inducción magnética*, descubierto por Michel Faraday en 1831. Cuando se hace rotar el eje del dispositivo mediante algún agente mecánico, las armaduras barren el campo magnético generado por el imán permanente y se establece una diferencia de potencial en los extremos de las armaduras. Las escobillas sirven para transmitir la diferencia de potencial hasta los terminales o *bornes* y de ahí a un circuito externo, donde se genera una corriente.

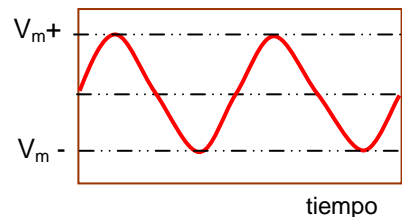


Existen generadores de corriente continua y de corriente alterna. Estos últimos resultan más eficaces por tener menos pérdidas de energía. Un *motor* es, esencialmente, un generador trabajando a la inversa. Es decir, un dispositivo que consume energía eléctrica, a partir de la cual es capaz de realizar un trabajo mecánico.

La electricidad generada para la red comercial utiliza exclusivamente generadores de corriente alterna de gran tamaño. En una central *termoeléctrica*, se utiliza gas o petróleo para generar vapor de agua a presión; el vapor mueve grandes ventiladores o turbinas, que a su vez son las que hacen rotar los generadores. Los países que cuentan con ríos caudalosos poseen centrales *hidroeléctricas*, donde se aprovecha la energía cinética y potencial de la masa de agua para hacer rotar las turbinas.

A diferencia de la *corriente continua* entregada por una batería, donde la *polaridad* de los bornes no varía (el borne de mayor potencial o positivo es siempre el mismo), en la *corriente alterna* la polaridad de los bornes varía continuamente con una determinada frecuencia.

La frecuencia de la red comercial en Cuba y el resto de América es $f = 60$ Hz. Al graficar la diferencia de potencial o *voltaje* en función del tiempo se obtiene una dependencia sinusoidal (ver figura adjunta). En otros países la frecuencia comercial es de 50 Hz, pero en cualquiera de los casos el voltaje instantáneo puede expresarse como $V = V_m \text{sen} \omega t$, donde V_m es la amplitud del voltaje y $\omega = 2\pi f$. La corriente que aparece en una resistencia u otro dispositivo conectado a la FEM invierte su sentido continuamente y tiene una dependencia similar:



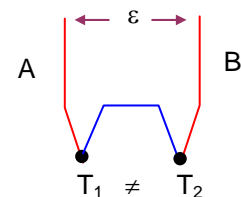
$i = i_m \text{sen}(\omega t + \phi)$, donde ϕ es el desfase entre el voltaje y la corriente.

Celdas solares

Las celdas solares producen electricidad por un proceso de conversión fotoeléctrica. La fuente de electricidad es una sustancia semiconductor fotosensible, como un cristal de silicio al que se le han añadido impurezas. Cuando la luz incide contra el cristal, los electrones se liberan de la superficie de éste y se dirigen a la superficie opuesta, generando una diferencia de potencial. Las celdas solares tienen una vida muy larga y poseen muchas aplicaciones como, por ejemplo, como fuente de electricidad para el equipo de a bordo en los aviones de gran altura, y en toda la tecnología espacial. Actualmente se dispone de celdas solares con eficiencias de conversión del 30%.

Termoelectricidad

Se denomina así a la electricidad generada por la aplicación del calor a la unión de dos materiales diferentes. Un dispositivo de este tipo se denomina *termopar*. Por ejemplo, si se sueldan por ambos extremos dos alambres metálicos de distinto material A y B y las uniones se mantienen a diferentes temperaturas, aparece una FEM en los extremos de los alambres. El fenómeno fue observado por primera vez en 1821 por el físico alemán Thomas Seebeck, y se conoce como *efecto Seebeck*.



Para una pareja de materiales determinada, el valor de la FEM es aproximadamente proporcional a la diferencia de temperaturas y se cumple una relación del tipo $\Delta T = \alpha \varepsilon$, donde α es constante en un intervalo no muy grande de temperaturas. Esta propiedad permite emplear el termopar para la medida precisa de temperaturas, manteniendo una de las uniones a una temperatura conocida (por ejemplo, un baño de hielo) y colocando la otra en el lugar cuya temperatura quiere medirse. En dependencia del metal utilizado, esta temperatura puede llegar a ser muy alta (hasta 1600° C utilizando termopares de platino-platino/rodio).

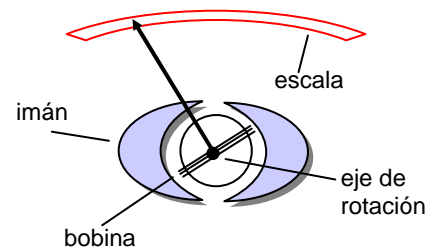
La corriente generada puede aumentarse empleando semiconductores en lugar de metales, creándose un *generador termoeléctrico*. Los generadores termoeléctricos calentados con quemadores de queroseno son muy utilizados en zonas remotas de Rusia y otras repúblicas de la Comunidad de Estados Independientes para alimentar receptores de radio.

Cuando se hace pasar una corriente por un circuito compuesto de materiales diferentes cuyas uniones están a la misma temperatura, se produce el efecto inverso. En este caso, se absorbe calor en una unión y se desprende en la otra. Este fenómeno se conoce como efecto Peltier en honor al físico francés Jean Peltier, que lo descubrió en 1834. Es posible usar sistemas de semiconductores basados en el efecto Peltier para construir refrigeradores de aplicaciones especiales.

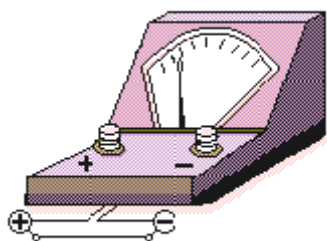
3.7 Amperímetros y Voltímetros

La intensidad de la corriente y la diferencia de potencial entre dos puntos cualesquiera de un circuito se miden mediante los amperímetros y voltímetros, respectivamente. Los más antiguos son variaciones del *galvanómetro*, uno de los primeros instrumentos utilizado en las mediciones eléctricas.

El galvanómetro basa su funcionamiento en las propiedades magnéticas de las sustancias, que serán analizadas en el capítulo siguiente. En un galvanómetro, un imán crea un campo magnético radial uniforme que actúa sobre una bobina móvil, conectada a una aguja, de forma tal que ésta puede rotar alrededor de un eje fijo.



Elementos de un galvanómetro



Amperímetro

Al pasar una corriente por la bobina, aparecen torques que originan la desviación de la aguja. Como la desviación es proporcional a la corriente, se puede utilizar una escala calibrada para medir la rotación de la aguja y la intensidad de la corriente. El principio de funcionamiento del voltímetro es muy similar al del amperímetro; lo que varía es la calibración de la escala.

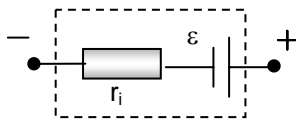
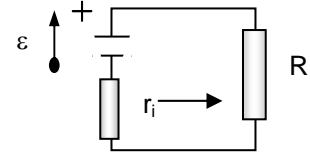
El amperímetro se conecta *en serie* de forma que la corriente a medir pase por él. Su resistencia interna debe ser muy pequeña, para que no altere la corriente que se desea medir. El voltímetro, en cambio, se conecta *en paralelo* al dispositivo o segmento de circuito a medir, y solo toma una pequeña parte de la corriente que pasa por el dispositivo, para no alterar la diferencia de potencial que se desea medir. Por esta razón su resistencia interna debe ser muy alta.

Los voltímetros y amperímetros modernos miden la corriente y el voltaje por medios electrónicos, sin utilizar la aguja móvil. La escala es *digital*, porque permite leer directamente los dígitos o valores numéricos de la magnitud medida. No obstante, para garantizar su correcto funcionamiento, necesitan ser calibrados o contrastados utilizando un galvanómetro convencional.

Los amperímetros y voltímetros para corriente alterna miden los valores *eficaces* del voltaje y la corriente. El voltaje eficaz se define por la expresión $V_e = V_m/\sqrt{2}$, donde V_m es la amplitud del voltaje alterno. La corriente eficaz se define por una expresión análoga: $i_e = i_m/\sqrt{2}$.

3.8 Circuitos Simples de Corriente Continua

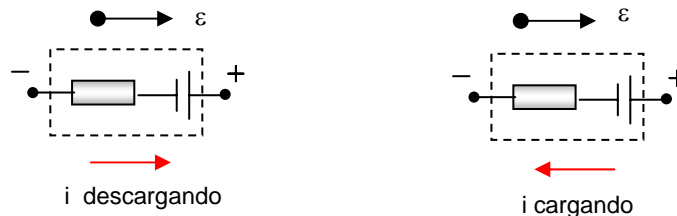
Un circuito es cualquier sistema conductor cerrado que incluye resistencias, motores, una o más FEM, instrumentos de medición o cualquier otro dispositivo eléctrico. En la figura se muestra un ejemplo de *circuito simple*, que no tiene nudos². Un nudo es un punto del circuito donde se unen 3 ó más conductores. Si el circuito tiene nudos, no es un circuito simple y se requiere de métodos especiales para su análisis. Estos métodos no se estudian en esta sección.



Cuando una batería como la representada en la figura genera corriente, los mismos procesos que generan la corriente también generan calor. El calor disipado se puede tomar en cuenta mediante una resistencia interna r_i que usualmente es muy pequeña, pero no totalmente despreciable en algunas ocasiones.

Si no hay corriente en el circuito, $V_{ab} = \epsilon$. Pero si en el circuito circula una corriente, a causa de la resistencia interna tendremos que $V_{ab} < \epsilon$, aunque la diferencia suele ser muy pequeña.

Una batería que forma parte de un circuito puede estar descargándose, pero también se puede estar cargando. Durante el proceso de descarga la corriente tiene el mismo sentido que la FEM. Durante el proceso de carga, la FEM y la corriente tendrán distinto sentido. Sin embargo, el sentido de la FEM no depende del sentido de la corriente; el borne de mayor potencial siempre será el positivo ($V+ > V-$).



Ecuación del Circuito

Considere el circuito al inicio de la sección. El balance energético indica que la energía por unidad de tiempo entregada por la FEM debe ser igual a la energía disipada en las resistencias. Es decir,

$$P_{ent} = P_{dis}$$

$$\epsilon i = i^2 r_i + i^2 R$$

$$i = \frac{\epsilon}{r_i + R}$$

Si se conocen los valores de la FEM y las resistencias es posible obtener la corriente en el circuito. Este circuito se puede generalizar fácilmente a otros que incluyan más de una FEM y varias resistencias. En este caso la FEM de mayor valor se descargará, mientras que las restantes almacenarán carga. Para analizar un ejemplo concreto, considere el circuito de la figura, donde se sabe que $\epsilon_2 > \epsilon_1$. En ese caso la corriente irá en sentido contrario a las agujas del reloj. La batería ϵ_2 se está descargan-

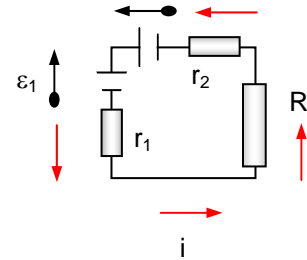
² Algunos textos los designan por "nodos".

do, mientras que la ε_1 se carga. El balance energético de este circuito queda entonces de la siguiente forma:

$$P_{\text{ent}} = P_{\text{dis}} + P_{\text{alm}}$$

$$\varepsilon_2 i = i^2 r_1 + i^2 r_2 + i^2 R + \varepsilon_1 i$$

$$i = \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{r_1 + r_2 + R}$$



La expresión anterior se generaliza fácilmente a cuando hay más de dos FEM y tres resistencias:

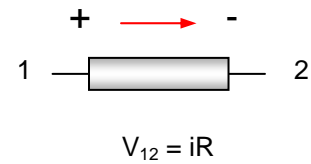
$$i = \frac{\sum \varepsilon_i}{\sum R_i}$$

Las resistencias siempre son positivas. Las FEM serán positivas si están en el mismo sentido que la corriente, y negativas en caso contrario.

3.9 Diferencia de Potencial entre dos Puntos de un Circuito

En la ley de Ohm siempre se considera que la corriente va de la región de mayor potencial a la de menor potencial; es decir:

$$V_1 - V_2 = iR$$

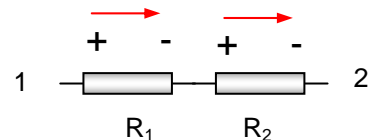


Esta expresión también se puede escribir de la siguiente forma: $V_1 - iR = V_2$. Significa que si nos trasladamos desde 1 hasta 2 podemos obtener el potencial en (2) *restando* del potencial en (1) el valor iR , que coincide con el hecho de que vamos de (+) a (-) en la figura. El análisis se puede llevar a cabo igualmente partiendo de (2). En este caso hay que sumar iR , porque vamos de la región de menor potencial a la de mayor; es decir:

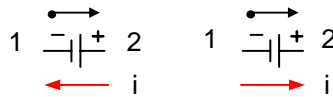
$$V_2 + iR = V_1$$

En el caso de que haya dos resistencias en serie, se puede calcular la diferencia de potencial en los extremos mediante un análisis similar:

$$V_1 - iR_1 - iR_2 = V_2$$

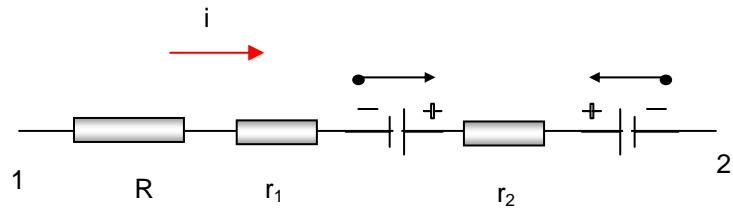


El resultado al analizar una FEM es diferente, ya que el borne de mayor diferencial siempre es el mismo, independiente del sentido de la corriente. En la figura, en ambos casos, $V_1 + \varepsilon = V_2$. Por tanto: $\varepsilon = V_2 - V_1$



Finalmente, el siguiente ejemplo resume cómo calcular la diferencia de potencial en un segmento cualquiera de un circuito conteniendo resistencias y FEM.

ε_2



$$V_1 - iR - ir_1 + \varepsilon_1 - ir_2 - \varepsilon_2 = V_2$$

$$V_1 - V_2 = \varepsilon_2 - \varepsilon_1 + i(r_1 + r_2 + R)$$