

ÍNDICE GENERAL

1 CORRIENTE ELÉCTRICA	11
Corriente eléctrica. Ecuación de continuidad: Primera ley de Kirchhoff. Ley de Ohm. Ley de Joule. Fuerza electromotriz. Segunda ley de Kirchhoff. Asociación de resistencias. Análisis de redes. Teoremas de redes.	
2 CIRCUITOS ELÉCTRICOS LINEALES I	45
RÉGIMEN TRANSITORIO	
Circuito $R-L$ serie. Circuito $R-C$ serie. Circuito $R-L-C$ serie. Transitorios debidos a cambios bruscos de R , L o C .	
3 CIRCUITOS ELÉCTRICOS LINEALES I I	79
RÉGIMEN PERMANENTE	
Circuito $R-L$ serie. Circuito $R-C$ serie. Circuito $R-L-C$ serie. Impedancia compleja. Asociación de impedancias. Potencia. Resonancia.	
4 ANÁLISIS DE REDES	109
Conceptos y definiciones. Métodos de análisis. Teoremas de redes.	
5 POLÍMETRO Y OSCILOSCOPIO	131
Polímetro como instrumento de medida. Osciloscopio como instrumento de medida. Métodos de medida.	
6 ANÁLISIS DE INSTRUMENTOS	149
Construcción de un amperímetro y un voltímetro. Resistencia interna. Método operativo para la construcción y calibrado de amperímetros y voltímetros.	
7 PRÁCTICAS CON CIRCUITOS $R-L$ y $R-C$	163
Objeto de la práctica. Material necesario. Medias con circuitos en régimen transitorio. Medidas con circuitos en régimen permanente.	
8 PRÁCTICAS CON CIRCUITOS $R-L-C$	173
Objeto de la práctica. Material necesario. Medidas con un circuito $R-L-C$ en régimen transitorio: Factores característicos. Medidas con un circuito $R-L-C$ en régimen permanente. Medida de la curva de resonancia.	
A TABLAS Y MATERIAL DE PRÁCTICAS	189
A.1 Código de colores y potencias de diez.	189
A.2 Constantes y unidades físicas.	190
A.3 Material de prácticas.	192
BIBLIOGRAFÍA.	194

Capítulo 1
CORRIENTE ELÉCTRICA

ESQUEMA - RESUMEN

Objetivos

Generales

Estudio de la corriente eléctrica y las leyes que gobiernan su comportamiento en conductores, generadores y circuitos.

Específicos

- Definición de corriente eléctrica: Tipos de corriente.
- Definición de intensidad y densidad de corriente.
- Ecuación de continuidad como expresión del principio de conservación de la carga.
- Corrientes estacionarias: Primera ley de Kirchhoff.
- Ley de Ohm: Resistencia eléctrica.
- Conductividad y movilidad eléctrica. Ley de Ohm en forma puntual.
- Ley de Joule: Potencia eléctrica disipada en una resistencia.
- Fuerza electromotriz.
- Segunda ley de Kirchhoff y la conservación de energía. Relaciones entre tensiones y corrientes en ramas y lazos o bucles.
- Asociación de resistencias en serie y paralelo. Resistencia del conjunto.
- Análisis de redes eléctricas.
- Conceptos y definiciones de los componentes de circuitos y redes eléctricas.
- Principio de superposición.

- Análisis de redes por el método de mallas. Cálculo de intensidades en las ramas de una red.
- Resistencia de entrada en una red.
- Teorema de Thévenin: Generador y resistencia equivalente.
- Teorema de la máxima transferencia de potencia: Condiciones que debe cumplir la resistencia de carga.

En éste capítulo nos proponemos estudiar los fenómenos más importantes que tienen lugar cuando las cargas se mueven de manera prácticamente uniforme, es decir, movimientos que en conjunto no sufren aceleraciones. Las condiciones cambian ahora ya que intervienen campos que no son conservativos (o irrotacionales) al mismo tiempo que campos conservativos. Además para que se produzca corriente dentro de un conductor debe existir un campo dentro de él, lo que modifica las condiciones de conductores con cargas estáticas donde $\mathbf{E} = 0$ en el interior, y este campo se transmite a lo largo de todo el conductor a la velocidad de propagación de toda perturbación electromagnética, velocidad de la luz. Por esta razón cuando un generador se aplica a una línea que transporta energía eléctrica, casi instantáneamente se ponen en movimiento tanto los electrones que están dentro de la línea en puntos próximos al generador como los que se encuentran a kilómetros de distancia. Esto contrasta con el propio movimiento de los electrones, que en este caso es muy lento.

Cuando dentro de un conductor hay movimiento de electrones y la corriente es constante, dicho conductor, desde el punto de vista electrostático, es neutro. Efectivamente, si consideramos un volumen cualquiera encontramos tantos electrones de la capa externa moviéndose como átomos ionizados forman la red del conductor. Esto determina que una corriente continua dentro de un conductor no crea un campo electrostático en el exterior pero sí un campo magnetostático.

En este capítulo comenzaremos introduciendo los conceptos de intensidad y densidad de corriente. Aplicaremos el principio de conservación de la carga para obtener la ecuación de continuidad. Estudiaremos la ley de Ohm que gobierna el comportamiento de la corriente de conducción en medios conductores lineales, e introduciremos los conceptos de conductividad, resistividad y resistencia eléctrica. Analizaremos el concepto de fuerza electromotriz en circuitos eléctricos. Estudiaremos los efectos térmicos de la corriente eléctrica en conductores y la ley de Joule que los caracteriza. Terminaremos introduciendo las leyes de Kirchhoff que permiten el análisis de las corrientes en los nudos y lazos de los circuitos; además introduciremos los teoremas de Thévenin y de máxima transferencia de potencia.

1.1 CORRIENTE ELÉCTRICA

Los medios que permiten el movimiento de partículas cargadas se llaman conductores. Los conductores más conocidos son los metales; en ellos, la mayoría de los electrones correspondientes a la última capa electrónica están débilmente ligados a los átomos y se mueven en una dirección bajo la influencia de un campo eléctrico. Otros medios conductores son: Los plasmas, donde existen electrones e iones que pueden moverse; los electrolitos, que son líquidos donde los iones de distinto signo pueden moverse; y, por último, podemos citar los semiconductores, caracterizados por que el transporte de carga se hace mediante electrones que pasan de la banda de valencia a la de conducción y por huecos (lugares libres que dejan los electrones en la banda de valencia) que se comportan como cargas positivas desplazándose en sentido contrario a los electrones. En ausencia de campo eléctrico las cargas, en los distintos tipos de

conductores, se mueven de forma aleatoria, de manera que no se produce un desplazamiento neto de carga. Sólo se produce arrastre de cargas en una dirección cuando se aplica un campo eléctrico, y además las cargas positivas se mueven en la dirección y sentido del campo mientras que las negativas lo hacen en sentido contrario.

Corriente eléctrica es el movimiento de partículas cargadas que produce un desplazamiento de cargas en una dirección.

Los tipos más comunes de corriente, según la forma de producirse son:

Corriente de conducción, caracterizada por el arrastre de cargas dentro de un medio eléctricamente neutro. Los ejemplos más conocidos son: El movimiento de los electrones en el seno de un metal, que desde este punto de vista puede representarse mediante una red de iones fijos (átomos que han perdido uno o más electrones de su capa externa) y una nube electrones libres que se desplazan cuando se aplica un campo eléctrico. El de los iones en un líquido formado por iones positivos y negativos, los positivos se mueven en una dirección y los negativos en la contraria, de manera que ambos producen una corriente en el mismo sentido. Los electrones y huecos en un semiconductor, que producen una corriente similar a la anterior en la que los huecos actúan como cargas positivas. En estos casos los medios conductores tienen el mismo número de cargas positivas que negativas y el movimiento se debe a que sobre las cargas actúa un campo eléctrico.

En este capítulo vamos a estudiar los fenómenos derivados de la corriente de conducción en conductores, es decir la corriente gobernada por la ley de Ohm.

Corriente de convección, se produce cuando hay un transporte de masa que arrastra en su movimiento partículas cargadas; ejemplos característicos son la corriente producida por el movimiento de un líquido que lleva en su interior iones o el haz de electrones en un tubo de rayos catódicos.

En el caso de campos variables temporalmente, que estudiaremos en capítulos posteriores, se introducen los siguiente tipos de corriente:

Corriente de polarización, debida a las variación temporal de \mathbf{P} en un medio polarizado ($\partial\mathbf{P}/\partial t$).

Corriente de desplazamiento, consecuencia de la variación temporal del vector \mathbf{D} en un campo electromagnético ($\partial\mathbf{D}/\partial t$). En este caso, si se considera únicamente el vacío, no hay movimiento ni oscilación de cargas eléctricas, sólo hay una variación de campo eléctrico con el tiempo que genera un campo magnético variable.

Intensidad de corriente

Se define como la carga neta que atraviesa una superficie por unidad de tiempo, y su valor viene dado por la expresión,

$$I = \frac{dq}{dt} \quad (1.1)$$

La unidad en el sistema internacional (SI) es el **Amperio** (A), que es el *culombio partido por segundo* (C/s). También se utiliza con frecuencia el miliamperio (mA = 10^{-3} A) y el microamperio ($\mu\text{A} = 10^{-6}$ A).

Densidad de corriente

Suponemos un modelo clásico de movimiento de electrones en el seno de un conductor metálico. Dado un conjunto de N cargas en un conductor, cuando se aplica un campo eléctrico se mueven y sufren colisiones con los iones que constituyen la red del conductor. El resultado es que los distintos electrones tienen velocidades \mathbf{v}_i como muestra la figura 1.1a. Se define la velocidad media por la ecuación,

$$\langle \mathbf{v} \rangle = \frac{1}{N} \sum_1^N \mathbf{v}_i \quad (1.2)$$

Este valor medio implica que consideramos las componentes de \mathbf{v}_i y calculamos el valor medio de cada una, con lo cual las componentes de $\langle \mathbf{v} \rangle$ son los valores medios de las componentes de \mathbf{v}_i .

Considerando que el valor de cada carga es q y el número de cargas por unidad de volumen es n , el número de dichas cargas que atraviesan una superficie elemental $d\mathbf{s}$ en el tiempo dt es la intensidad de corriente elemental dI . Si nos fijamos en la figura 1.1b la corriente que atraviesa $d\mathbf{s}$ en el tiempo dt son las cargas que están dentro del paralelepípedo inclinado de base $d\mathbf{s}$, lado $|\langle \mathbf{v} \rangle| dt$ y altura $|\langle \mathbf{v} \rangle| dt \cos \theta$, es decir, la carga que atraviesa es,

$$dq = nq |\langle \mathbf{v} \rangle| \cos \theta d\mathbf{s} dt = nq \langle \mathbf{v} \rangle \cdot d\mathbf{s} dt$$

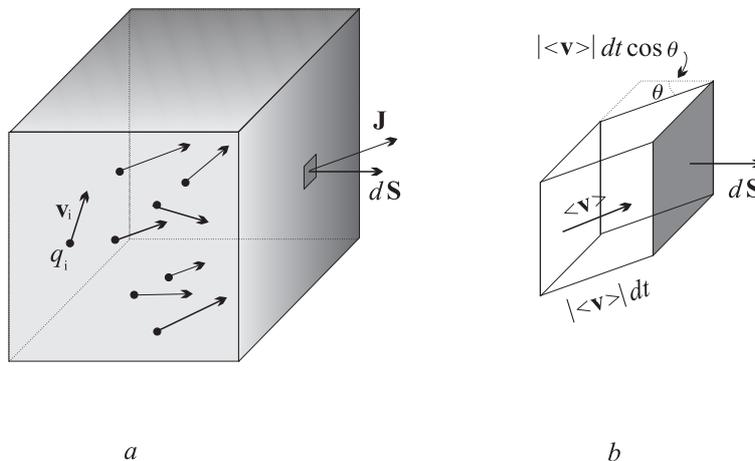


Figura 1.1

Suponemos que en este caso todas las partículas tienen la misma carga, $q_i = q$, y n es el número de partículas por unidad de volumen.

La corriente que atraviesa la superficie elemental será $dI = dq/dt$,

$$dI = nq \langle \mathbf{v} \rangle \cdot d\mathbf{s}$$

El producto escalar $\langle \mathbf{v} \rangle \cdot d\mathbf{s}$ pone de manifiesto que la componente de la velocidad en la dirección normal a la superficie es la que se considera al medir las cargas que atraviesan dicha superficie.

En la expresión anterior podemos tener en cuenta que la densidad de carga ρ está relacionada con las cargas por unidad de volumen mediante la siguiente ecuación:

$$\rho = nq$$

En consecuencia,

$$dI = \rho \langle \mathbf{v} \rangle \cdot d\mathbf{s}$$

Si el sistema de cargas consta de M grupos distintos de N_i cargas q_i , con densidades ρ_i y velocidades medias $\langle \mathbf{v}_i \rangle$ para cada grupo, la corriente anterior se expresará de la forma,

$$dI = \sum_1^M (\rho_i \langle \mathbf{v}_i \rangle) \cdot d\mathbf{s} \quad (1.3)$$

Las cargas que atraviesan $d\mathbf{s}$ por unidad de tiempo, dependen del número de cargas en el volumen próximo a la superficie $d\mathbf{s}$ y de la componente de su velocidad en la dirección normal a $d\mathbf{s}$. Se define la **densidad de corriente**, que se representa por \mathbf{J} , como la corriente por unidad de área que atraviesa la superficie cuya normal coincide con la dirección de \mathbf{J} .

Para obtener la densidad de corriente en un punto se considera la corriente en un volumen muy pequeño alrededor del punto. Se define \mathbf{J} en el punto mediante un límite, es decir,

$$\mathbf{J} = \lim_{\Delta s \rightarrow 0} \frac{\Delta I}{\Delta s} \quad (1.4)$$

En la definición suponemos que \mathbf{J} es perpendicular a la superficie elemental Δs .

Dada esta definición el término entre paréntesis de la expresión 1.3 nos sirve para encontrar la forma matemática de la **densidad de corriente \mathbf{J}** en un punto,

$$\mathbf{J} = \sum_1^M \rho_i \langle \mathbf{v}_i \rangle \quad (1.5)$$

La densidad de corriente definida es un vector que en cada punto del conductor toma el valor indicado por la ecuación. (1.5), es decir, \mathbf{J} es un vector función del punto considerado.

En el SI de unidades la densidad de corriente J es el Amperio/m² (A/m²).

Las definiciones que hemos enunciado ponen de manifiesto que *la intensidad de corriente I describe el flujo de cargas a través de una superficie finita, y la densidad de corriente \mathbf{J} es un vector que caracteriza el flujo de cargas en un punto.*

Teniendo en cuenta esta definición, la relación entre intensidad y densidad de corriente para una superficie elemental será,

$$dI = \mathbf{J} \cdot d\mathbf{s} \quad (1.6)$$

La relación entre intensidad y densidad de corriente, cuando consideramos la cargas que atraviesan una superficie genérica S , se deduce de la ecuación. (1.6) mediante la integración de \mathbf{J} sobre dicha superficie S , es decir,

$$I = \int_S \mathbf{J} \cdot d\mathbf{s} \quad (1.7)$$

La corriente puede o no depender del tiempo, se dice que una **corriente es continua (constante)** cuando no depende del tiempo.

La corriente I es un escalar, pero en los conductores se toma como sentido positivo de la corriente el del vector \mathbf{J} . En dicho conductor coincide con el contrario al movimiento real de los electrones, ya que como veremos a continuación \mathbf{J} tiene la dirección y sentido del campo \mathbf{E} y los electrones sufren una fuerza $-e\mathbf{E}$.

Las líneas de corriente \mathbf{J} , por analogía con las líneas de campo, se definen como líneas tangentes en cada punto al vector \mathbf{J} . Se define un tubo de corriente como un conjunto de líneas que forman una superficie de contorno cerrado por cuyas secciones transversales, inicial y final, pasa la misma corriente I .

Se suele utilizar el símbolo I para corriente continua e i o $i(t)$ en el caso de corrientes variables con el tiempo.

1.2 ECUACIÓN DE CONTINUIDAD

En ninguno de los experimentos realizados hasta nuestros días se ha creado o aniquilado carga, por tanto el **principio de conservación de la carga establece que ésta no se crea ni destruye**. Como consecuencia de este principio podemos obtener una relación entre el flujo de carga a través de una superficie cerrada S que limita un volumen V y la variación de la carga en su interior. Dicho volumen puede considerarse dentro de un conductor o que incluya la unión de conductores como en el caso de un nudo donde confluyen varios conductores. *Aplicando dicho principio de conservación se deduce que el flujo de corriente será igual a la disminución de carga Q en el interior*, en forma matemática dicho principio se expresa de la forma siguiente,

$$\oint_S \mathbf{J} \cdot d\mathbf{s} = -\frac{dQ}{dt} \quad (1.8)$$

Donde el primer miembro representa el flujo de corriente a través de la superficie S (integral sobre una superficie cerrada) que limita el volumen V considerado y

el segundo la variación de carga en su interior. El signo negativo indica que la carga decrece cuando el flujo es hacia el exterior, es decir, a flujo positivo corresponde disminución de carga.

Si en el interior del volumen la densidad de carga es ρ ,

$$Q = \int_V \rho dv$$

Por tanto se deduce que,

$$\oint_S \mathbf{J} \cdot d\mathbf{s} = -\frac{d}{dt} \int_V \rho dv \quad (1.9)$$

La ecuación anterior se conoce como **ecuación de continuidad** en forma integral. Esta ecuación es la expresión matemática del principio de conservación de la carga. *En forma verbal podemos decir que el flujo de corriente que sale a través de la superficie cerrada S es igual a la disminución de la carga en su interior, es decir, a menos la variación de carga en el interior.* La ecuación (1.9) se refiere a corrientes variables o corrientes que dependen del tiempo.

Para **corriente continua**, *corriente constante en cada punto*, en el interior del volumen considerado no hay variación de carga, $dQ/dt = 0$. La ecuación de continuidad se reduce a la siguiente,

$$\oint_S \mathbf{J} \cdot d\mathbf{s} = 0 \quad (1.10)$$

Esta ecuación significa que el flujo neto de corriente a través de una superficie cerrada es nulo, o de otra forma, la corriente que entra en el volumen limitado por S es igual a la que sale.

1.2.1 Primera ley de Kirchhoff

Si aplicamos la ecuación(1.10) a un nudo en el que convergen varios conductores por los que entra o sale corriente y donde no hay manantiales ni sumideros de carga, se anula la integral de \mathbf{J} sobre una superficie que rodea al nudo. Ésta propiedad se conoce como **primera ley de Kirchhoff** cuyo enunciado el siguiente:

En un nudo la suma algebraica de las corrientes que entran y salen es nula. En forma matemática dicha ley es,

$$\sum_1^N I_i = 0 \quad (1.11)$$

La **primera ley de Kirchhoff** es una forma de expresar el principio de conservación de la carga. Se consideran positivas las corrientes que salen y negativas las que llegan.

1.3 LEY DE OHM

G.S. Ohm en 1826 *determinaba experimentalmente la proporcionalidad entre el voltaje aplicado a un conductor cilíndrico y la corriente que circulaba por él, a la constante de proporcionalidad le llamó **resistencia eléctrica** R . La ecuación que expresa dicha ley es:*

$$V = R I \quad (1.12)$$

En su honor, la unidad de resistencia en el SI se llama *Ohmio* (Ω). Un *Ohmio* (Ω) = *Voltio/Amperio* (V/A).

La ley establecida por Ohm caracteriza a los conductores cuya resistencia no depende del voltaje aplicado, es decir, es válida para conductores lineales.

1.3.1 Forma puntual de la ley de Ohm

La conducción en un metal, en presencia de un campo eléctrico, se produce cuando los electrones libres se mueven bajo la influencia de dicho campo. El proceso, de forma cualitativa, consiste en que sobre cada electrón el campo ejerce una fuerza que lo acelera en el intervalo entre los choques del electrón con los átomos que forman la red metálica. Cuando choca cambia su velocidad y transmite energía a la red, que se manifiesta en forma de vibración detectada por el aumento de temperatura del metal. Los electrones se mueven en distintas direcciones pero mantienen una componente en la dirección del campo que da lugar a un arrastre de los electrones en dicha dirección, y por tanto se produce una corriente.

Si en la ecuación (1.5) suponemos que todas las partículas cargadas son iguales, podemos expresar dicha ecuación de la forma,

$$\mathbf{J} = \rho \langle \mathbf{v} \rangle = n q \langle \mathbf{v} \rangle \quad (1.13)$$

En este modelo, cuando se estudia la conducción desde un punto de vista microscópico, la velocidad media $\langle \mathbf{v} \rangle$ es proporcional al campo \mathbf{E} que actúa sobre las partículas cargadas, es decir,

$$\langle \mathbf{v} \rangle = \mu \mathbf{E} \quad (1.14)$$

El factor μ se conoce como **movilidad** de la partícula considerada. Si se trata de electrones se llama movilidad electrónica y se suele representar por μ_e .

Sustituyendo (1.14) en (1.13) obtenemos,

$$\mathbf{J} = n q \mu \mathbf{E} = \rho \mu \mathbf{E}$$

La constante de proporcionalidad entre \mathbf{J} y \mathbf{E} es un parámetro característico del medio. Dicho parámetro se conoce como **conductividad** γ del medio y le caracteriza desde un punto de vista macroscópico.

$$\gamma = \rho \mu \quad (1.15)$$

Teniendo en cuenta lo anterior, la ecuación constitutiva que relaciona \mathbf{J} con \mathbf{E} es,

$$\mathbf{J} = \gamma \mathbf{E} \quad (1.16)$$

Ésta ecuación se conoce como **forma puntual de la ley de Ohm**, ya que expresa en cada punto la relación entre campo eléctrico y densidad de corriente a través de la conductividad. Es una ecuación constitutiva por que relaciona los vectores de campo \mathbf{J} y \mathbf{E} mediante un parámetro característico del medio material denominado conductividad.

Si la conductividad no depende del campo aplicado, el medio se considera lineal, en caso contrario sería no lineal. Cuando la conductividad no depende de la dirección de \mathbf{E} se dice que el medio es isótropo, en caso contrario es anisótropo. Cuando γ no depende del punto elegido el conductor es homogéneo, en caso contrario se trata de conductor no homogéneo.

Mientras no se indiquen de forma expresa las características del conductor, consideramos que son lineales homogéneos e isótropos.

La unidad de conductividad en el SI es el $(\Omega \cdot \text{m})^{-1}$, (Mho·m⁻¹) o Siemen/m (S/m).

La **resistividad** ρ_c es la inversa de la conductividad y se expresa en $\Omega \cdot \text{m}$.

En la tabla de resistividades que figura en el apéndice III se muestran las correspondientes a distintos materiales. Dicha tabla pone de manifiesto que la resistividad es uno de los parámetros con variación más amplia que caracterizan los materiales, ya que varía desde los $2,44 \cdot 10^{-8}$ ($\Omega \cdot \text{m}$) del oro hasta $7,5 \cdot 10^{17}$ ($\Omega \cdot \text{m}$) del cuarzo fundido.

1.3.2 Resistencia de un conductor

Cilindro conductor

En un cilindro conductor, de sección S y longitud l , podemos calcular la resistencia en función de la conductividad o resistividad. Para ello aplicaremos la ley de Ohm. Obtenemos en primer lugar la diferencia de potencial entre los extremos suponiendo que el campo eléctrico dentro del cilindro tiene la dirección de su eje. La relación entre campo y diferencia de potencial es de la forma siguiente:

$$V = \int_0^l \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = E \cdot l$$

Después calculamos la corriente mediante la ecuación (1.7) y aplicando la relación entre campo y corriente dada por la ecuación (1.16),

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

Utilizando la ley de Ohm ($V = RI$) obtenemos la resistencia del tubo de longitud l y sección uniforme S ,

$$R = \frac{V}{I} = \frac{1}{\gamma} \frac{l}{S} = \rho_c \frac{l}{S} \quad (1.17)$$

Esta expresión nos permite calcular la resistencia del cilindro, que es proporcional a la resistividad y longitud, e inversamente proporcional a su sección transversal.

1.4 LEY DE JOULE

Las cargas al moverse por un conductor sufren colisiones con otras cargas y con los átomos del material. En los choques transmiten energía al material, que se convierte en vibraciones, es decir, aumenta su temperatura; en otras palabras, el paso de corriente convierte energía eléctrica en térmica.

En un elemento de circuito entre cuyos extremos existe una diferencia de potencial (d.d.p.) V , el trabajo realizado para trasladar una carga dq desde un extremo a otro es,

$$dW = V dq$$

El trabajo realizado en el tiempo dt es la potencia,

$$P = \frac{dW}{dt} = V \frac{dq}{dt} = V I \quad (\text{vatios}) \text{ (W)} \quad (1.18)$$

Si el circuito elemental tiene una resistencia R , $V = RI$, la potencia P necesaria para transportar esa corriente entre los dos extremos del circuito es,

$$P = R I^2 \quad (1.19)$$

*La ecuación anterior se conoce como **ley de Joule** y expresa que la potencia eléctrica que se transforma en térmica es igual a la resistencia por el cuadrado de la intensidad de corriente que la atraviesa.*

Esta ley muestra que para mantener la corriente en un conductor debe existir un manantial de energía que mantenga el campo dentro del conductor. Esta fuente de energía, como veremos en el apartado de fuerza electromotriz, genera un campo no conservativo en el circuito.

1.5 FUERZA ELECTROMOTRIZ

En apartados anteriores hemos visto que la circulación de una corriente por un material conductor lleva asociado un choque de los electrones o iones con los átomos de la red, y de estos choque se deduce que hay una transferencia de energía al material

que se manifiesta en forma térmica. La relación entre la corriente y la potencia disipada en el medio viene dada por la ley de Joule. Esto pone de manifiesto que para mantener una corriente es necesaria una fuente de energía que suministre la que se disipa en calor además de otros tipos de transformaciones energéticas que puedan tener lugar en determinados dispositivos, como, por ejemplo, la transformación de energía eléctrica en mecánica en un motor eléctrico.

Por otra parte, como se muestra en electrostática, si en un medio solo existe un campo electrostático,

$$\oint_C \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = 0$$

y teniendo en cuenta la ecuación constitutiva $\mathbf{J} = \gamma \mathbf{E}$, podemos expresar la ecuación anterior de la siguiente forma,

$$\oint_C \frac{1}{\gamma} \mathbf{J} \cdot d\mathbf{l} = 0$$

La última ecuación muestra que la suma de los productos escalares $\mathbf{J} \cdot d\mathbf{l}$ a lo largo del circuito cerrado es nula, y como $d\mathbf{l} \neq 0$ se deduce que $\mathbf{J} = 0$ en todos los puntos del circuito; es decir, mediante un campo electrostático no se puede mantener una corriente continua en un circuito cerrado.

Las dos situaciones que hemos enunciado en los párrafos anteriores determinan que para mantener una corriente en un circuito cerrado es necesario que exista un campo no conservativo, generado en una parte o en todo el circuito, que suministre la energía necesaria para mantener la corriente. Si suponemos que el campo no conservativo es \mathbf{E}' la integral de línea a lo largo del circuito es distinta de cero ($\oint \mathbf{E}' \cdot d\mathbf{l} \neq 0$). Este tipo de campo realiza un trabajo distinto de cero sobre una carga a lo largo de un camino cerrado, y por tanto le trasmite una energía, dicha energía se disipa en calor y en muchos casos parte se transmite a otros dispositivos.

Para mantener una corriente durante un tiempo indefinido es necesario que otro campo no conservativo esté presente de forma que suministre continuamente energía y mantenga una fuerza sobre las cargas libres del conductor.

Los dispositivos que suministran ese tipo de campos no conservativos se conocen como generadores de fuerza electromotriz (f.e.m.). Los más habituales son las pilas y baterías que generan el campo no conservativo mediante un proceso electroquímico. Otro generador frecuente en nuestros días son las baterías solares en las que el campo no conservativo tiene su origen en el efecto fotovoltaico. En estos generadores el campo no conservativo se localiza en una zona limitada del circuito (por ejemplo, dentro de la pila o batería).

De forma esquemática el funcionamiento de una pila como las que se utilizan en las baterías de los coches es el siguiente: La pila, véase la figura 1.2, se compone de dos electrodos y un electrolito. El electrodo positivo está formado por dióxido de plomo (PbO_2) en forma de polvo poroso, y el negativo lo constituye plomo (Pb) esponjoso. El electrolito está formado por ácido sulfúrico (SO_4H_2) y agua (H_2O).

La textura de los electrodos tiene por objeto que la superficie de contacto con el electrolito sea mayor para facilitar las reacciones químicas que se producen en cada electrodo.

Cuando se conecta un circuito externo a los electrodos se producen reacciones químicas en cada electrodo: En el negativo se produce la siguiente,

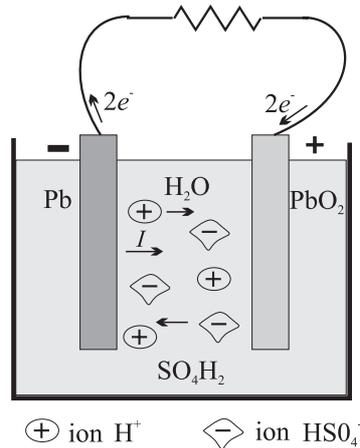
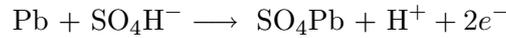
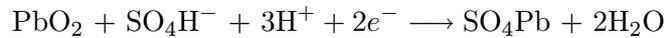


Figura 1.2

Es decir, se liberan dos electrones que pasan al circuito.

En el positivo la reacción es,



En este electrodo se toman dos electrones procedentes del circuito para completar la reacción. El proceso continua liberando electrones en el electrodo negativo y capturándolos en el positivo hasta que se convierten los electrodo en sulfato de plomo (SO₄Pb) (se suele decir que se sulfata la batería) y se agota el ácido sulfúrico en el electrolito.

El proceso indicado anteriormente es reversible. Para ello se aplica un generador externo a la batería, uniendo los polos del mismo signo y de manera que la tensión entre los bornes del generador externo sea ligeramente superior a la de la batería. Entonces las reacciones se invierten, entran electrones por el polo negativo y salen por el positivo, regenerándose los electrodos.

La f.e.m. de esta pila es de 2,1 voltios aproximadamente y su valor depende de los potenciales químicos de electrodo y electrolito, es decir, de la composición de dichos elementos.

Cuando no circula corriente, es decir, no hay conectado ningún circuito externo, las reacciones se inician pero se alcanza rápidamente el equilibrio y la reacción se para.

Las baterías utilizadas en los automóviles se forman asociando en serie seis unidades como la descrita y cerrando todo el conjunto en una caja de plástico u otro material aislante. Exteriormente sólo vemos la caja con dos bornes o terminales.

Los generadores electromagnéticos utilizan la inducción electromagnética para crear el campo no conservativo. Este fenómeno lo estudiaremos posteriormente, por lo que ahora sólo indicamos que existen tales generadores, y que además son los utilizados para transformar la energía mecánica en eléctrica acoplando la turbina a un alternador en las centrales eléctricas, así como los alternadores y dinamos, que utilizando la energía del motor de explosión generan la corriente que carga las baterías etc.

1.5.1 *Definición de fuerza electromotriz*

Para estudiar lo que ocurre en un circuito y definir la fuerza electromotriz vamos a considerar un circuito en el que intervienen campos debidos a cargas estáticas, campos conservativos, y otros campos no conservativos derivados de efectos electroquímicos, inducción electromagnética u otros tipos de generadores.

El funcionamiento del sistema formado por un conductor conectado a un generador de f.e.m. lo podemos describir de la manera siguiente: El generador crea dentro de él un campo no conservativo que traslada las cargas desde un polo a otro, de manera que la acumulación de cargas en los terminales crean un campo conservativo dentro del conductor que ejerce una fuerza sobre las cargas y las impulsa desde el polo positivo al negativo (del negativo al positivo si son electrones). Estas cargas en movimiento constituyen una corriente continua cuya densidad es la misma a lo largo del conductor. En el interior del generador intervienen tanto el campo no conservativo \mathbf{E}' como \mathbf{E} , de forma que la fuerza sobre las cargas dentro del generador se debe a los dos campos. En circuito abierto $\mathbf{E} = -\mathbf{E}'$, por tanto no se ejerce fuerza sobre las cargas y no hay corriente.

La fuerza del campo \mathbf{E} sobre las cargas en el conductor se produce inmediatamente después de aplicar el generador al conductor. La perturbación eléctrica se transmite a la velocidad de la luz, por tanto cuando se conecta el generador de una central eléctrica a la red de distribución, casi instantáneamente se observa el campo eléctrico y se mueven los electrones en puntos muy alejados del generador. La velocidad de arrastre de los electrones es muchísimo menor, del orden 2 cm/s. El símil acústico que podemos utilizar es el de un instrumento de viento, por ejemplo el clarinete; las vibraciones que produce el músico en la boquilla se transmiten a lo largo del tubo a la velocidad del sonido, 340 m/s aproximadamente, saliendo la perturbación acústica por el otro extremo casi inmediatamente después de producida la vibración en la boquilla, siendo el aire contenido en el tubo el medio a través del que se transmite la vibración.

Dado que tanto dentro como fuera del generador se producen movimientos de cargas en presencia de otros elementos con los que chocan e intercambian energía, en las dos zonas se transfiere energía cuyo origen procede únicamente del fenómeno físico o fisicoquímico que interviene en la generación del campo no conservativo.