

# CAPÍTULO I

## FUNDAMENTOS DE CORRIENTE ALTERNA

# CAPÍTULO I

## FUNDAMENTOS DE CORRIENTE ALTERNA

### 1.1 Electrostática

Aproximadamente en el año 600 a. C. antes de Cristo se sabe de las primeras observaciones del fenómeno de atracción entre pequeños objetos. Teofrasto (310 a. C.) realizó un estudio de los diferentes materiales que eran capaces de producir fenómenos eléctricos, escribiendo el primer tratado sobre la electricidad.

A comienzos y principios del siglo XVII comienzan los primeros estudios sobre la electricidad y el magnetismo orientados a mejorar la precisión de la navegación con brújulas magnéticas. El físico real británico William Gilbert utiliza por primera vez la palabra electricidad del griego elektron (ámbar). El jesuita italiano Niccolo Cabeo analizó sus experimentos y fue el primero en comentar que había fuerzas de atracción entre ciertos cuerpos y de repulsión entre otros.

Alrededor de 1672 el físico alemán Otto von Guericke construye la primera máquina electrostática capaz de producir y almacenar energía eléctrica estática por rozamiento. Esta máquina consistía en una bola de azufre atravesada por una varilla que servía para hacer girar la bola. Las manos aplicadas sobre la bola producían una carga mayor que la conseguida hasta entonces. Francis Hawkesbee perfeccionó la máquina de fricción usando una esfera de vidrio hacia 1707.

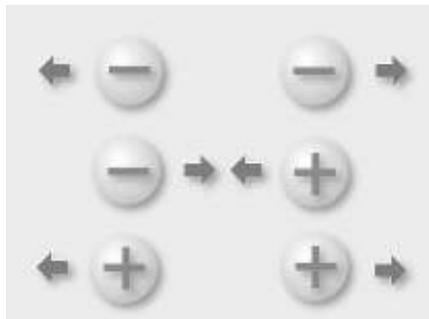
En 1733 el francés Francois de Cisternay du Fay propuso la existencia de dos tipos de carga eléctrica, positiva y negativa experimentando con vidrio y ámbar, constatando que:

- Los objetos frotados contra el ámbar se repelen
- También se repelen los objetos frotados contra una barra de vidrio
- Sin embargo, los objetos frotados con el ámbar atraen los objetos frotados con el vidrio.

## 1.2 Carga Eléctrica

En física, la carga eléctrica es una propiedad intrínseca de algunas partículas subatómicas (pérdida o ganancia de electrones) que se manifiesta mediante atracciones y repulsiones que determinan las interacciones electromagnéticas entre ellas. La materia cargada eléctricamente es influida por los campos electromagnéticos siendo, a su vez, generadora de ellos. La interacción entre carga y campo eléctrico origina una de las cuatro interacciones fundamentales: la interacción electromagnética.

Los trabajos de investigación realizados en la segunda mitad del siglo XIX por el premio Nobel de Física Joseph John Thomson lo llevaron en 1897 a descubrir el electrón, y de Robert Millikan a medir su carga, determinaron la naturaleza discreta de la carga eléctrica.



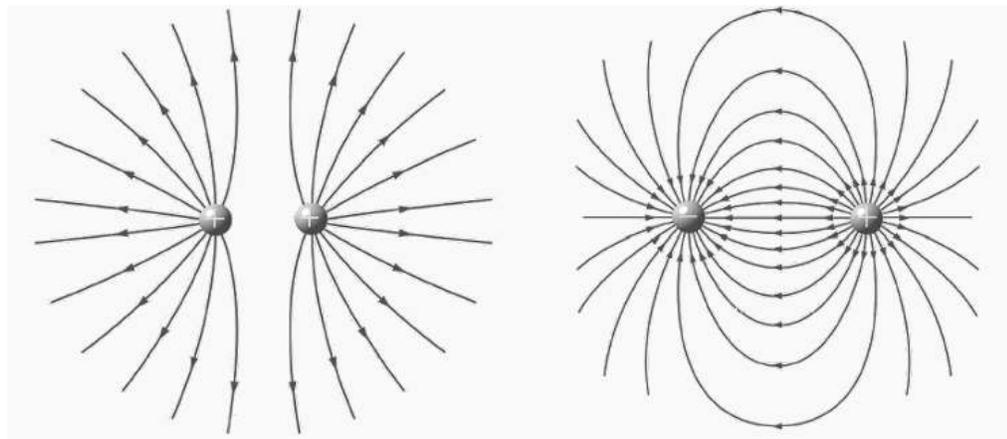
*Figura 1.1.* Interacciones entre cargas de igual y distinta naturaleza.

La carga eléctrica es de naturaleza discreta, fenómeno demostrado experimentalmente por Robert Millikan. Las dos partículas elementales cargadas que existen en la Tierra son el electrón y el protón. Por razones históricas, a los electrones se les asignó carga negativa:  $-1$ , también expresada  $-e$ . Los protones tienen carga positiva:  $+1$  o  $+e$ . Cuando un átomo gana o pierde un electrón, queda cargado eléctricamente. A estos átomos cargados se les denomina iones.

En 1785 el físico francés Charles Coulomb publicó un tratado en el que se describían por primera vez cuantitativamente las fuerzas eléctricas, formulando las leyes de atracción y repulsión de cargas eléctricas estáticas, usando la balanza de torsión para realizar sus medidas. En su honor estas leyes se conocen con el nombre de ley de Coulomb. Esta ley, junto con su elaboración matemática más sofisticada a través del teorema de Gauss y la

derivación de los conceptos de campo eléctrico y potencial eléctrico, describen la práctica totalidad de los fenómenos electrostáticos.

Durante todo el siglo posterior se sucedieron avances significativos en el estudio de la electricidad, y en los fenómenos eléctricos producidos por cargas en movimiento en el interior de un material conductor. Finalmente, en 1864 el físico escocés James Clerk Maxwell unificó las leyes de la electricidad y el magnetismo en un conjunto reducido de leyes matemáticas.



*Figura 1.2.* Representación de campo eléctrico producido por dos cargas.

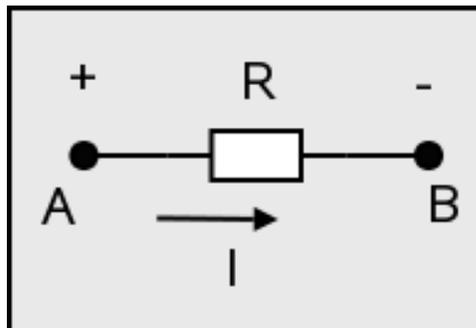
En el Sistema Internacional de Unidades la unidad de carga eléctrica se denomina culombio (símbolo C) y se define como la cantidad de carga que pasa por una sección en 1 segundo cuando la corriente eléctrica es de 1 amperio. Se corresponde con la carga de  $6,24 \times 10^{18}$  electrones aproximadamente. La carga más pequeña que se encuentra en la naturaleza es la carga del electrón (que es igual en magnitud a la del protón y de signo opuesto):  $e = 1,602 \times 10^{-19}$  C (1 eV en unidades naturales).

### **1.3 Tensión eléctrica**

La tensión, voltaje o diferencia de potencial es una magnitud física que impulsa a los electrones a lo largo de un conductor en un circuito eléctrico cerrado, provocando el flujo de una corriente eléctrica. La diferencia de potencial también se define como el trabajo por unidad de carga ejercido por el campo eléctrico, sobre una partícula cargada, para moverla de un lugar a otro.

La tensión entre dos puntos de un campo eléctrico es igual al trabajo que realiza dicha unidad de carga positiva para transportarla desde el punto A al punto B. En el Sistema Internacional de Unidades, la diferencia de potencial se mide en voltios (V), al igual que el potencial.

La tensión es independiente del camino recorrido por la carga, y depende exclusivamente del potencial eléctrico de los puntos A y B en el campo.



*Figura 1.3.* Polaridad de una diferencia de potencial.

Si dos puntos que tienen una diferencia de potencial se unen mediante un conductor, se producirá un flujo de electrones. Parte de la carga que crea el punto de mayor potencial se trasladará a través del conductor al punto de menor potencial y, en ausencia de una fuente externa (generador), esta corriente cesará cuando ambos puntos igualen su potencial eléctrico (Ley de Henry). Este traslado de cargas es lo que se conoce como corriente eléctrica.

Cuando se habla sobre una diferencia de potencial en un sólo punto, o potencial, se refiere a la diferencia de potencial entre este punto y algún otro donde el potencial sea cero.

Cuando por dos puntos de un circuito puede circular una corriente eléctrica, la polaridad de la caída de tensión viene determinada por la dirección convencional de la misma; esto es, del punto de mayor potencial al de menor. Por lo tanto, si por una resistencia  $R$  circula una corriente de intensidad  $I$ , desde el punto A hacia el B, se producirá una caída de tensión en la misma con la polaridad indicada, y se dice que el punto A es más positivo que el B.

Otra de las formas de expresar la tensión entre dos puntos es en función de la intensidad de corriente y la resistencia existentes entre ellos; así se obtiene uno de los enunciados de la ley de Ohm, que dice:

$$V=R*I$$

Es importante destacar que  $V$  no se refiere al potencial eléctrico sino a la diferencia de potencial  $\Delta V$  entre dos puntos.

#### 1.4 Conducción eléctrica

La conducción eléctrica es el movimiento de partículas eléctricamente cargadas a través de un medio de transmisión (conductor eléctrico). El movimiento de las cargas constituye una corriente eléctrica. El transporte de las cargas puede ser a consecuencia de la existencia de un campo eléctrico, o debido a un gradiente de concentración en la densidad de carga, o sea, por difusión. Los parámetros físicos que gobiernan este transporte dependen del material en el que se produzca.

La conducción en metales y resistencias está bien descrita por la Ley de Ohm, que establece que la corriente es proporcional al campo eléctrico aplicado. Se calcula la conductividad  $\sigma$  para caracterizar la facilidad con la que aparece en un material una corriente de densidad (corriente por unidad de área)  $j$ , definida como:

$$j = \sigma E$$

o por su recíproco la resistividad  $\rho$ :

$$j = E / \rho$$

La conducción en dispositivos semiconductores puede darse debido a una combinación de campo eléctrico (deriva) y de difusión. La densidad de corriente es entonces:

$$j = \sigma E + D \nabla qn$$

siendo  $q$  la carga eléctrica elemental y  $n$  la densidad de electrones. Los portadores se mueven en la dirección de decrecimiento de la concentración, de manera que para los

electrones una corriente positiva es resultado de una gradiente de densidad positivo. Si los portadores son "huecos", cámbiese la densidad de electrones  $n$  por el negativo de la densidad de huecos  $p$ .

## 1.5 Materiales conductores

Un material conductor es cualquier sustancia que posee gran cantidad de portadores de carga libres por unidad de volumen; al utilizar esta definición se entiende que es posible transportar carga fácilmente de un lugar a otro a través de estos materiales los cuales poseen aproximadamente  $10^{17}$  o más portadores libres por  $\text{cm}^3$  [1] caso contrario a los materiales dieléctricos o aislantes lo cuales poseen muy pocos portadores de cargas libres del orden de  $10^5$  o menos portadores por  $\text{cm}^3$  [1] e incluso puede presentarse el caso que no posean portadores libres.

Existe una tercer categoría de materiales que poseen portadores de carga libres la cual se encuentra entre los conductores y los dielectricos dichos materiales son conocidos como semiconductores y presentan una densidad aproximada de  $10^{11}$  o más portadores libres por  $\text{cm}^3$  [1] a temperatura ambiente de 300K.

## 1.6 Sólidos conductores y sólidos aislantes

En los sólidos cristalinos incluidos los sólidos aislantes, los átomos interaccionan con sus vecinos, y los niveles de energía de los átomos individuales forman bandas. El que un material conduzca o no, viene determinado por su estructura de bandas y por la ocupación de dichas bandas determinada por los niveles de Fermi. Los electrones, al ser fermiones, siguen el principio de exclusión de Pauli, por lo que dos electrones dentro de un mismo sistema de interacciones no pueden ocupar el mismo estado, lo cual significa que sus cuatro números cuánticos han de diferir. Así los electrones en un sólido rellenan bandas de energía hasta un cierto nivel, llamado la energía de Fermi.

Las bandas que están completamente llenas de electrones no pueden conducir la electricidad, porque no hay estados cercanos de energía a los que los electrones puedan saltar. Los materiales con todas las bandas llenas (la energía de Fermi es entre dos bandas) son aislantes. Sin embargo, en algunos casos, la teoría de bandas falla y materiales que se

predecían como conductores por la teoría de bandas se vuelven aislantes. Los aislantes de Mott y los aislantes de transferencia de carga son dos clases de ejemplos.

## 1.7 Metales

Los metales son buenos conductores de la electricidad y del calor porque tienen espacios sin rellenar en la banda de energía de valencia. (El nivel de Fermi marca una ocupación sólo parcial de la banda). En ausencia de campos eléctricos, la conducción eléctrica se produce en todas direcciones a velocidades muy elevadas. Incluso a la temperatura más fría posible - en el cero absoluto - la conducción eléctrica puede aún darse a la velocidad de Fermi (la velocidad de los electrones con energía de Fermi). Cuando se aplica un campo eléctrico, un ligero desequilibrio desarrolla un flujo de los electrones móviles. Los electrones de esta banda pueden verse acelerados por el campo porque hay multitud de estados cercanos sin rellenar en la banda.

La resistencia en los metales se da por la dispersión de electrones desde defectos en el entramado o por fonones. El modelo de Drude representa una teoría clásica para metales sencillos, en el que la dispersión es caracterizada por un tiempo de relajación  $\tau$ . La conductividad viene entonces dada por la fórmula:

$$\sigma = \frac{ne^2\tau}{m}$$

donde  $n$  es la densidad de conducción eléctrica,  $e$  es la carga del electrón, y  $m$  es la masa del electrón. Un modelo mejor es el de la llamada teoría semiclásica, en la cual el efecto del potencial de periodicidad del entramado sobre los electrones los dota de una masa efectiva (Teoría de bandas).

## 1.8 Semiconductores

El nivel de Fermi en un semiconductor está situado de manera que está o lleno o vacío. Un sólido que no tiene bandas parcialmente rellenas es un aislante, pero a temperaturas finitas, los electrones pueden ser excitados térmicamente desde la banda de valencia hasta la siguiente más elevada, la banda de conducción que está vacía. De esta manera la fracción de electrones excitada depende de la temperatura y del salto entre bandas, que es la

diferencia de energía entre las dos bandas. Al excitar estos electrones en la banda de conducción se dejan atrás huecos cargados positivamente en la banda de valencia, que también pueden conducir la electricidad.

En los semiconductores, las impurezas afectan ampliamente a la concentración y al tipo de los portadores de cargas. Las impurezas donantes (de tipo *n*) tienen electrones de valencia extra con energías muy cercanas a las de la banda de conducción que pueden ser fácilmente excitados térmicamente hacia la banda de conducción. Las impurezas receptoras (de tipo *p*) capturan electrones desde la banda de valencia, facilitando la formación de huecos. Si un aislante es dopado con suficientes impurezas, puede darse una transición de Mott y que el aislante pase a ser conductor.

## **1.9 Superconductores**

Los superconductores son conductores perfectos bajo una cierta temperatura crítica específica para cada material y bajo un campo magnético. En los metales y en algunos otros materiales, se da una transición a la superconductividad cuando se alcanzan bajas temperaturas (sub-criogénicas). Mediante una interacción en la que participan algunas otras partes del sistema (en los metales, los fonones), los electrones se emparejan en pares de Cooper. Los pares de Cooper bosónicos forman un superfluido que tiene resistencia cero (teoría BCS).

## **1.10 Electrolitos**

Las corrientes eléctricas en los electrolitos son flujos de iones eléctricamente cargados. Por ejemplo, si se somete una disolución de Na<sup>+</sup> y Cl<sup>-</sup> a un campo eléctrico, los iones de sodio se moverán de forma constante hacia el electrodo negativo (Cátodo), mientras que los iones de cloro se moverán hacia el electrodo positivo (Ánodo). Si las condiciones son las correctas, se producirán reacciones redox en la superficie de los electrodos, liberando electrones el cloro y posibilitando que se absorban electrones en el sodio.

El hielo de agua y ciertos electrolitos sólidos llamados conductores de protones contienen iones positivos de hidrógeno que son de movimiento libre. En estos materiales, las corrientes eléctricas están compuestas por protones en movimiento (contrariamente a los electrones móviles que encontramos en los metales).

En ciertas mezclas electrolíticas, poblaciones de iones brillantemente coloreados forman las cargas eléctricas en movimiento. La lenta migración de esos iones a lo largo de una corriente eléctrica es un ejemplo de situación donde una corriente es directamente visible a los ojos humanos.

### **1.11 Gases y plasmas**

En el aire y en otros gases corrientes por debajo del dominio de rotura, la fuente dominante de conducción eléctrica es a través de un relativamente reducido número de iones móviles producidos por gases radioactivos, luz ultravioleta, o rayos cósmicos. Dado que la conductividad eléctrica es extremadamente baja, los gases son dieléctricos o aislantes. Sin embargo, cuando el campo eléctrico aplicado se aproxima al valor de rotura, los electrones libres alcanzan una aceleración suficiente por parte del campo eléctrico como para crear electrones libres adicionales mediante la colisión, y la ionización de los átomos o las moléculas neutras del gas en un proceso llamado rotura en avalancha.

El proceso de rotura forma un plasma que contiene un número significativo de electrones móviles y de iones positivos, por lo que se comporta como un conductor eléctrico. En el proceso, se forma una senda conductiva que emite luz, como una chispa, un arco o un rayo.

Un plasma es un estado de la materia donde algunos de los electrones de un gas han sido separados o "ionizados" de sus moléculas o átomos. Un plasma puede formarse por altas temperaturas, o por la aplicación de un campo eléctrico o magnético intenso. Debido a sus masas inferiores, los electrones en un plasma aceleran más la respuesta aun campo eléctrico que los iones positivos de mayor peso, por lo que cargan con el grueso de la corriente.

### **1.12 El Vacío.**

Dado que un vacío perfecto no contiene partículas cargadas, los vacíos normalmente se comportan como aislantes perfectos (serían los mayores aislantes conocidos). Pese a ello, las superficies de los electrodos de metal pueden causar que una región de vacío se convierta en conductora por la inyección de electrones libres o de iones a través tanto de emisiones de campo como de emisiones termiónicas.

Las emisiones termiónicas ocurren cuando la energía termal excede a la función trabajo, mientras que las emisiones tienen lugar cuando el campo eléctrico en la superficie del metal es lo suficientemente elevado como para causar un efecto túnel, el cual desemboca en el lanzamiento de electrones libres desde el metal al vacío. Se suelen emplear electrodos calentados externamente para generar una nube de electrones como en el filamento o en el cátodo calentado indirectamente de las válvulas termoiónicas.

Los electrodos fríos pueden también producir nubes de electrones espontáneamente a base de emisiones termoiónicas cuando se forman pequeñas regiones incandescentes (llamadas puntos catódicos o puntos anódicos). Estas son regiones incandescentes de la superficie del electrodo que son creadas por flujos de corriente localizadamente elevados. Pueden haberse iniciado por emisiones de campo, pero entonces son mantenidas por emisiones termiónicas localizadas una vez que se ha formado el arco de vacío. Estas zonas de emisión de electrones se pueden formar muy rápidamente, incluso de forma explosiva, en superficies de metal sujetas a campos eléctricos elevados. Las válvulas termoiónicas y los sphytrones <sup>[2]</sup> son algunos de los interruptores electrónicos y de los dispositivos de amplificación basados en la conductividad en el vacío.

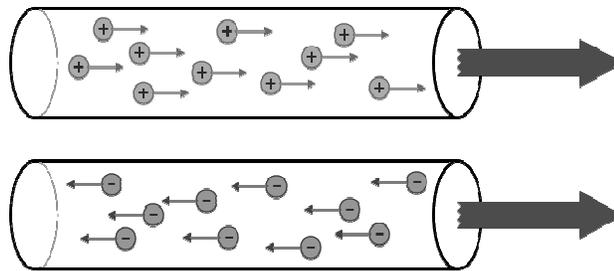
### **1.13 Corriente eléctrica**

La corriente eléctrica se definió como un flujo de cargas positivas y se fijó el sentido convencional de circulación de la corriente como un flujo de cargas desde el polo positivo al negativo y sin embargo posteriormente se observó, gracias al efecto Hall, que en los metales los portadores de carga son negativos, estos son los electrones, los cuales fluyen en sentido contrario al convencional. En general, el sentido convencional y el real son ciertos en el sentido que los electrones fluyen desde el polo positivo hasta llegar al negativo (sentido real), cosa que no contradice que dicho movimiento se inicia al lado del polo positivo donde el primer electrón se ve atraído por dicho polo creando un hueco para ser cubierto por otro electrón del siguiente átomo y así sucesivamente hasta llegar al polo negativo (sentido convencional) es decir la corriente eléctrica es el paso de electrones desde el polo negativo al positivo comenzando dicha progresión en el polo positivo.

En el siglo XVIII cuando se hicieron los primeros experimentos con electricidad, sólo se disponía de carga eléctrica generada por frotamiento o por inducción. Se logró (por

primera vez, en 1800) tener un movimiento constante de carga cuando el físico italiano Alessandro Volta inventó la primera pila eléctrica.

De manera más formal la corriente o intensidad eléctrica es el flujo de carga por unidad de tiempo que recorre un material. Se debe a un movimiento de los electrones en el interior del material. En el Sistema Internacional de Unidades se expresa en [C/s] (culombios sobre segundo), unidad que se denomina amperio. Una corriente eléctrica, puesto que se trata de un movimiento de cargas, produce un campo magnético, lo que se aprovecha en el electroimán.



*Figura 1.4.* La corriente eléctrica está definida por convenio en el sentido contrario al desplazamiento de los electrones.

Haciendo una analogía con un sistema hidráulico la corriente sería el equivalente al flujo de agua en una tubería la cual tiene que recorrer cierta distancia para poder ser utilizada. La corriente sigue el mismo principio, es necesario transportarla de forma segura y eficiente en grandes distancias con las menores pérdidas posibles utilizando la menor cantidad de recursos económicos. La corriente al igual que el agua es la materia prima que hace funcionar muchos sistemas, el agua es fundamental para actividades de hidratación de organismos vivos, como sustancia universal para diluir otros líquidos, en actividades de limpieza, etc. de la misma forma la corriente eléctrica es la que hace funcionar todos los equipos electrónicos, equipos y sistemas eléctricos, iluminación en viviendas y en la industria, procesos industriales en fábricas.

El instrumento usado para medir la intensidad de la corriente eléctrica es el galvanómetro que, calibrado en amperios, se llama amperímetro, colocado en serie con el conductor cuya intensidad se desea medir.

## 1.14 Electromagnetismo

Desde la antigua Grecia se conocían los fenómenos magnéticos y eléctricos pero no es hasta inicios del siglo XVII donde se comienza a realizar experimentos y a llegar a conclusiones científicas de estos fenómenos. Durante estos dos siglos, XVII y XVIII, grandes hombres de ciencia como William Gilbert, Otto von Guericke, Stephen Gray, Benjamin Franklin, Alessandro Volta entre otros estuvieron investigando estos dos fenómenos de manera separada y llegando a conclusiones coherentes con sus experimentos.

A principios del siglo XIX Hans Christian Ørsted encontró evidencia empírica de que los fenómenos magnéticos y eléctricos estaban relacionados. De ahí es que los trabajos de físicos como André-Marie Ampère, William Sturgeon, Joseph Henry, Georg Simon Ohm, Michael Faraday en ese siglo, son unificados por James Clerk Maxwell en 1861 con un conjunto de ecuaciones que describían ambos fenómenos como uno solo, como un fenómeno electromagnético.

Las ahora llamadas ecuaciones de Maxwell demostraban que los campos eléctricos y los campos magnéticos eran manifestaciones de un solo campo electromagnético. Además describía la naturaleza ondulatoria de la luz, mostrándola como una onda electromagnética. Con una sola teoría consistente que describía estos dos fenómenos antes separados, los físicos pudieron realizar varios experimentos prodigiosos e inventos muy útiles como la bombilla eléctrica por Thomas Alva Edison o el generador de corriente alterna por Nikola Tesla<sup>[3]</sup>. El éxito predictivo de la teoría de Maxwell y la búsqueda de una interpretación coherente de sus implicaciones, fue lo que llevó a Albert Einstein a formular su teoría de la relatividad que se apoyaba en algunos resultados previos de Hendrik Antoon Lorentz y Henri Poincaré.

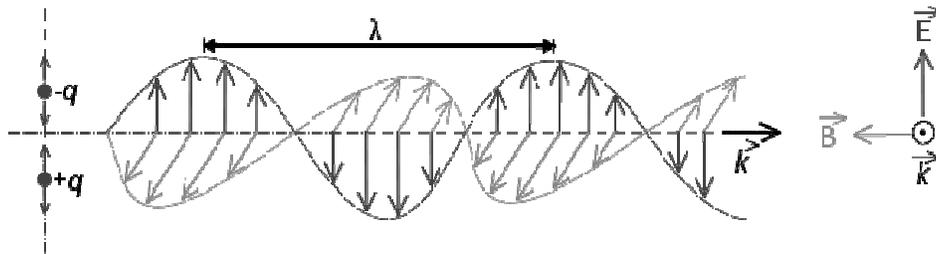


Figura 1.5. Esquema de una onda electromagnética.

Los estudios científicos de la Electrostática llevaróna a el matemático y físico, Carl Friedrich Gauss, a demostrar que la cantidad de flujo eléctrico en un campo es igual al cociente de la carga encerrada por la superficie en la que se calcula el flujo,  $q_{enc}$ , y la permitividad eléctrica,  $\epsilon_0$ . Esta relación se conoce como ley de Gauss:

$$\Phi = \oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{q_{enc}}{\epsilon_0} \quad (1)$$

En el año de 1820 Hans Christian Ørsted descubrió que el fenómeno magnético estaba ligado al eléctrico y entonces se formulo una teoría científica para el magnetismo<sup>[4]</sup>. La presencia de una corriente eléctrica, o sea, de un flujo de carga debido a una diferencia de potencial, genera una fuerza magnética que no varía en el tiempo. Si tenemos una carga a una velocidad  $\vec{v}$ , ésta generará un campo magnético  $\vec{B}$  que es perpendicular a la fuerza magnética inducida por el movimiento en ésta corriente, así:

$$\vec{F} = q \vec{v} \times \vec{B}$$

Para determinar el valor de ese campo magnético, Jean Baptiste Biot en 1820, dedujo una relación para corrientes estacionarias, ahora conocida como ley de Biot-Savart la cual esta descrita por la siguiente ecuación:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \oint_C \frac{d\vec{l} \times \vec{r}}{r^3}$$

Donde  $\mu_0$  es un coeficiente de proporcionalidad conocido como permeabilidad magnética,  $I$  es la intensidad de corriente, el  $d\vec{l}$  es el diferencial de longitud de la corriente y  $\vec{r}$  es la dirección de la corriente. De manera más estricta,  $\vec{B}$  es la inducción magnética, en otras palabras, es el flujo magnético por unidad de área. Experimentalmente se llegó a la conclusión que las líneas de fuerza de campos magnéticos eran cerradas, eliminando la posibilidad de un monopolo magnético. La relación matemática se la conoce como ley de Gauss para el campo magnético:

$$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0 \quad (2)$$

Esta ecuación es una generalización de la ley de Biot-Savart. Además que las fórmulas expresadas aquí son para cargas en el vacío

En esa época solo se habían estudiado los campos eléctricos y magnéticos que no varían con el tiempo pero los físicos a finales del siglo XIX descubrieron que ambos campos estaban ligados entonces se dedujo que un campo eléctrico en movimiento y una corriente eléctrica que varíe, generan un campo magnético y un campo magnético, dicho campo magnético ya implica de forma intrínseca la presencia de un campo eléctrico. Entonces se definió la fuerza que tendría una partícula cargada que se mueve en un campo magnético y así se llegó a la unión de las dos fuerzas anteriores, lo que hoy se conoce como la fuerza de Lorentz.

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (3)$$

Por otro lado, para generar una corriente eléctrica en un circuito cerrado debe existir una diferencia de potencial entre dos puntos del circuito, a ésta diferencia de potencial se la conoce como fuerza electromotriz o FEM. Ésta fuerza electromotriz es proporcional a la rapidez con que el flujo magnético varía en el tiempo, esta ley fue encontrada por Michael Faraday y es la interpretación de la inducción electromagnética, entonces un campo magnético que varía en el tiempo induce un campo eléctrico, con respecto a una fuerza electromotriz. Matemáticamente se representada como:

$$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad (4)$$

En un trabajo del físico James Clerk Maxwell de 1861 reunió las tres ecuaciones anteriormente citadas (1), (2) y (4) e introdujo el concepto de una corriente de desplazamiento como una densidad de corriente efectiva y llegó a la última de las ecuaciones, la ley de Ampère generalizada (5), ahora conocidas como ecuaciones de Maxwell:

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \int_S \vec{j} \cdot d\vec{S} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d}{dt} \int_S \vec{E} \cdot d\vec{S} \quad (5)$$

Las cuatro ecuaciones, tanto en su forma diferencial como en la integral aquí descritas, fueron las revisiones hechas por Oliver Heaviside. Pero el verdadero poder de éstas ecuaciones, más la fuerza de Lorentz (3), se centra en que juntas son capaces de describir cualquier fenómeno electromagnético, además de las consecuencias físicas que conlleva [5].

La genialidad del trabajo de Maxwell es que sus ecuaciones describen un campo eléctrico que va ligado inequívocamente a un campo magnético perpendicular a éste y a la dirección de su propagación, éste campo es ahora llamado campo electromagnético [4]. Además la solución de éstas ecuaciones permitía la existencia de una onda que se propagaba a la velocidad de la luz, con lo que además de unificar los fenómenos eléctricos y magnéticos la teoría formulada por Maxwell predecía con absoluta certeza los fenómenos ópticos.

Así la teoría predecía a una onda que, contraria a las ideas de la época, no necesitaba un medio de propagación; la onda electromagnética se podía propagar en el vacío debido a la generación mutua de los campos magnéticos y eléctricos. Esta onda a pesar de tener una velocidad constante, la velocidad de la luz  $C$ , puede tener diferente longitud de onda y consecuentemente dicha onda transporta energía. La radiación electromagnética recibe diferentes nombres al variar su longitud de onda, como rayos gamma, rayos X, espectro visible, etc.; pero en su conjunto recibe el nombre de espectro electromagnético.

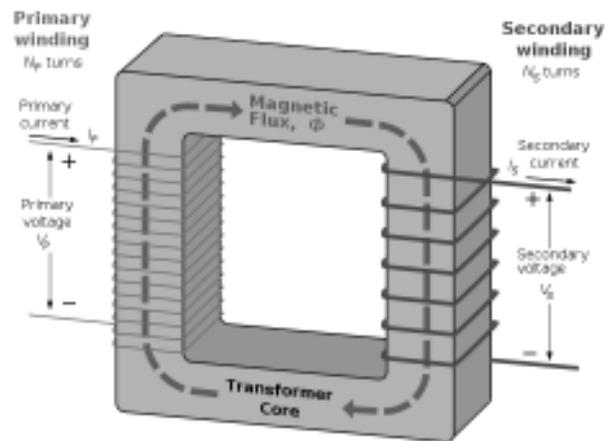


Figura 1.6. Transformador monofásico

Gracias a estos principios es como se ha desarrollado hoy en día interruptores electromagnéticos, transformadores de corriente (TC's), transformadores de potencial

(TP's), transformadores de acoplamiento, interruptores en vacío, arrancadores termomagnéticos, relevadores de protección, etc. dispositivos muy utilizados en la industria eléctrica.

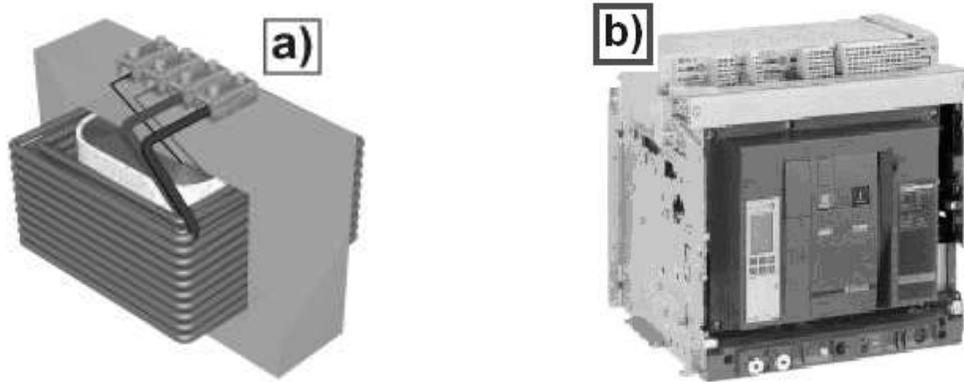


Figura 1.7. Dispositivos que utilizan principios electromagnéticos a) Transformador b) Interruptor de potencia

## 1.15 Pérdida de energía por limitantes físicas.

**1.15.1 Resistencia.** Se denomina resistencia eléctrica, simbolizada habitualmente como  $R$ , a la dificultad u oposición que presenta un cuerpo al paso de una corriente eléctrica para circular a través de él. En el Sistema Internacional de Unidades, su valor se expresa en ohmios, que se designa con la letra griega omega mayúscula,  $\Omega$ . Para su medida existen diversos métodos, entre los que se encuentra el uso de un ohmmetro.

Esta definición es válida para la corriente continua y para la corriente alterna cuando se trate de elementos resistivos puros, esto es, sin componente inductiva ni capacitiva. De existir estos componentes reactivos, la oposición presentada a la circulación de corriente recibe el nombre de impedancia.

Según sea la magnitud de esta oposición, las sustancias se clasifican en conductoras, aislantes y semiconductoras. Existen además ciertos materiales en los que, en determinadas condiciones de temperatura, aparece un fenómeno denominado superconductividad, en el que el valor de la resistencia es prácticamente nulo.

Una resistencia ideal es un elemento pasivo que disipa energía en forma de calor según la ley de Joule. También establece una relación de proporcionalidad entre la intensidad de corriente que la atraviesa y la tensión medible entre sus extremos, relación conocida como ley de Ohm:

$$v(t) = R \cdot i(t)$$

donde  $i(t)$  es la corriente eléctrica que atraviesa la resistencia de valor  $R$  y  $u(t)$  es la diferencia de potencial que se origina. En general, una resistencia real podrá tener diferente comportamiento en función del tipo de corriente que circule por ella.

Una resistencia real en corriente continua (CC) se comporta prácticamente de la misma forma que si fuera ideal, esto es, transformando la energía eléctrica en calor por efecto Joule. La ley de Ohm para corriente continua establece que:

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

donde  $R$  es la resistencia en ohmios,  $V$  es la diferencia de potencial en voltios e  $I$  es la intensidad de corriente en amperios.

Una resistencia real muestra un comportamiento diferente del que se observaría en una resistencia ideal si la intensidad que la atraviesa no es continua, es decir hablamos del comportamiento en corriente alterna (CA). En el caso de que la señal aplicada sea senoidal, a bajas frecuencias se observa que una resistencia real se comportará de forma muy similar a como lo haría en CC, siendo despreciables las diferencias. En altas frecuencias el comportamiento es diferente, aumentando en la medida en la que aumenta la frecuencia aplicada, lo que se explica fundamentalmente por los efectos inductivos que producen los materiales que conforman la resistencia real. Por ejemplo, en una resistencia de carbón los efectos inductivos solo provienen de los propios terminales de conexión del dispositivo mientras que en una resistencia de tipo bobinado estos efectos se incrementan por el devanado de hilo resistivo alrededor del soporte cerámico, además de aparecer una cierta componente capacitiva si la frecuencia es especialmente elevada.

En estos casos, para analizar los circuitos, la resistencia real se sustituye por una asociación serie formada por una resistencia ideal y por una bobina también ideal, aunque a

veces también se les puede añadir un pequeño condensador ideal en paralelo con dicha asociación serie. En los conductores, además, aparecen otros efectos entre los que cabe destacar el "Efecto Piel".

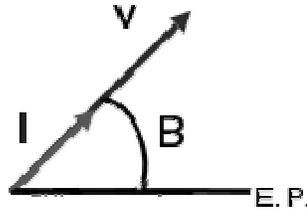
Consideremos una resistencia  $R$ , como la de la figura 2, a la que se aplica una tensión alterna de valor:

$$u(t) = V_0 \cdot \sin(\omega t + \beta)$$

De acuerdo con la ley de Ohm circulará una corriente alterna de valor:

$$i(t) = \frac{u(t)}{R} = I_0 \cdot \sin(\omega t + \beta) \quad \text{donde} \quad I_0 = \frac{V_0}{R}$$

Se obtiene así, para la corriente, una función senoidal que está en fase con la tensión aplicada (*Figura 1.8*).



*Figura 1.8.* Diagrama fasorial de una resistencia en CA.

Al utilizar un sistema polar y realizar operaciones matemáticas se deduce que en los circuitos de CA la resistencia puede considerarse como una magnitud compleja con parte real y sin parte imaginaria o, lo que es lo mismo con argumento nulo, cuya representación binómica y polar serán:

$$\vec{R} = R + 0j = R \angle 0^\circ$$

## 1.16 Resistividad

La resistencia de cualquier material con un área transversal uniforme se determina mediante los siguientes cuatro factores:

- Material
- Longitud
- Área transversal
- Temperatura

El material escogido, con su estructura molecular única, reaccionara diferencialmente a presiones para establecer una corriente a través de su núcleo. Los conductores que permiten un flujo de carga abundante con poca presión externa tendrán bajos niveles de resistencia, mientras que los aislantes tendrán altas características de resistencia.

Como podría esperarse, entre mayor es la trayectoria que las carga debe recorrer, mayor es el nivel de resistencia, mientras que a mayor área (y por tanto, espacio disponible), menor será la resistencia. La resistencia es entonces directamente proporcional a la longitud e inversamente proporcional al área.

Conforme la temperatura de la mayoría de los conductores aumenta, el movimiento incrementado de la partículas dentro de la estructura molecular vuelve más difícil que los portadores “libres” circulen, incrementándose así el nivel de la resistencia.

A una temperatura fija de 20°C (temperatura ambiente), la resistencia esta relacionada con los otros tres factores por:

$$R = \rho \frac{l}{A} \text{ en } \Omega \quad (\text{a})$$

Donde  $\rho$  es una característica del material llamada **resistividad**,  $l$  es la longitud de la muestra, y  $A$  es el área transversal de la muestra.

Las unidades de medición utilizadas en la ecuación anterior están relacionadas con la aplicación. Para alambre circulares, las unidades de medición generalmente son los *CM* del inglés *circular mil*, para la mayoría de las otras aplicaciones las unidades son  $\Omega \cdot \text{m}$  o  $\Omega \cdot \text{cm}$ .

La constante  $\rho$  es diferente para cada material. Su valor es la resistencia de un alambre de 1 [ft] por un mil de diámetro, medida a 20°C, esto para conductores circulares. En la industria en general se utilizan unidades métricas para las cantidades de la ecuación (a). En unidades del Sistema Internacional (SI), la resistividad mediría en  $\Omega \cdot m$ , el área en  $m^2$  y la longitud en metros. Sin embargo, el metro es generalmente es una unidad de medición muy grande para la mayor parte de aplicaciones, por lo que usualmente se emplea el centímetro. Las dimensiones resultantes para la ecuación (a) son:

$$\begin{aligned}\rho &= \Omega \cdot \text{cm} \\ l &= \text{cm} \\ A &= \text{cm}^2\end{aligned}$$

La resistividad de un material es realmente la resistencia de una muestra como la que aparece en la siguiente figura:

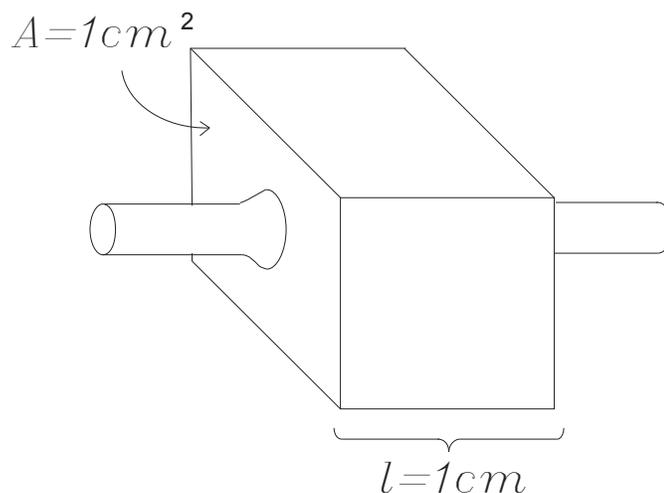


Figura 1.9. Resistividad en un volumen de  $1 \text{ cm}^3$ .

A continuación se muestra una tabla de la resistividad de diversos materiales utilizando la definición de la figura anterior. La resistividad  $\rho$  se mide también en  $\Omega \cdot \text{mil-ft}$  o en  $\Omega \cdot \text{m}$  en el *Sistema Internacional* de unidades.

Tabla 1.1. Resistividad  $\rho$  de algunos materiales.

Material <sup>[8]</sup>	$\rho \times 10^{-6} [\Omega \cdot \text{cm}] @ 20^\circ\text{C}$
Plata	1.645
Cobre	1.723
Oro	2.443
Aluminio	2.825
Tungsteno	5.485
Níquel	7.811
Hierro	12.299
Tantalio	15.54
Cromo-Níquel	99.72
Óxido de estaño	250
Carbono	3500

### 1.17 Efectos de la temperatura

La temperatura tiene un efecto considerable sobre la resistencia de conductores, semiconductores y aislantes. Los conductores tienen un número abundante de electrones libres, y cualquier introducción de energía térmica tendrá poco impacto en el número total de portadores libres. De hecho, la energía térmica solo aumentará la intensidad del movimiento aleatorio de las partículas dentro del material y hará más difícil que se establezca un flujo general de electrones en cualquier dirección, dicho de otra forma: para buenos conductores, un aumento en la temperatura resultará en un aumento en el nivel de resistencia. En consecuencia, los conductores tienen un coeficiente térmico de resistencia positivo.

En los semiconductores, un aumento de temperatura impartirá cierta energía térmica al sistema que resultará en un aumento en el número de portadores libres para conducción en el material, dicho de otra forma un aumento de temperatura resultará en una disminución del nivel de resistencia por lo cual hablamos de un coeficiente térmico de resistencia negativo. Al igual que en los semiconductores, un aumento de temperatura tendrá como consecuencia una disminución en la resistencia de un aislante, entonces podemos afirmar que tienen un coeficiente térmico de resistencia negativo. En la siguiente grafica se comparan las pendientes de los coeficientes térmicos de materiales conductores y semiconductores y aislantes.

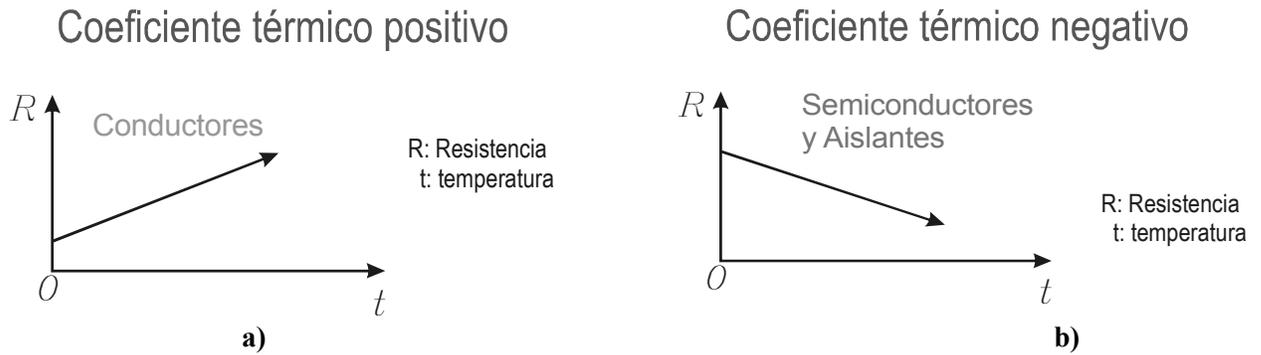


Figura 1.10. Coeficiente térmico de un material, a) Coeficiente positivo para materiales conductores, b) Coeficiente negativo para materiales conductores.

### 1.18 Coeficiente térmico de resistencia

Existe una segunda ecuación para calcular la resistencia de un conductor a diferentes temperaturas. Si define como <sup>[8]</sup>:

$$\alpha_{20} = \frac{1}{|T_1| + 20^\circ\text{C}} \left[ \frac{1}{^\circ\text{C}} \right]$$

Donde;

$\alpha_{20}$ : Coeficiente térmico de resistencia

$T_1$ : Temperatura

Con un coeficiente térmico de resistencia a temperatura de 20°C como referencia, una resistencia  $R_1$  de interés a una temperatura  $T_1$  se define de la siguiente forma:

$$R_1 = R_{20}[1 + \alpha_{20}(T_1 - 20^\circ\text{C})] \quad (\text{d})$$

Donde;

$\alpha_{20}$ : Coeficiente térmico de resistencia

$R_{20}$ : Resistencia de la muestra a una temperatura de 20°C

$R_1$ : Resistencia de interés.

$T_1$ : Temperatura de interés

Existen en la literatura tablas del coeficiente térmico de resistencia para diferentes materiales a continuación se presentan algunos de ellos.

Tabla 1.2. *Coeficiente térmico de resistencia para algunos metales.*

Material <sup>[8]</sup>	$\alpha_{20}$ [1/°C] @ 20°C
Plata	0.0038
Cobre	0.0039
Oro	0.0034
Aluminio	0.003
Tungsteno	0.005
Níquel	0.006
Hierro	0.0055
Constantán	0.000008
Cromo-Níquel	0.00044

La ecuación (d) puede escribirse en la siguiente forma:

$$\alpha_{20} = \frac{R_1 + R_{20}}{R_{20}} \frac{\Delta R}{\Delta T} \left[ \frac{1}{^\circ C} \right]$$

De la cual se definen las unidades  $\left[ \frac{1}{^\circ C} \right]$  para  $\alpha_{20}$ . Como  $\Delta R/\Delta T$  es la pendiente de la curva de la *Figura 1 a)* de lo cual podemos concluir que entre mayor es el coeficiente térmico de resistencia de un material, más sensible es el nivel de resistencia a cambios de temperatura. De la tabla anterior podemos observar que el cobre es el más sensible a variaciones de temperatura que la plata, el oro o el aluminio, aunque las diferencias son bastante pequeñas. La pendiente definida  $\alpha_{20}$  para el Constantán es tan pequeña que la curva es casi horizontal.

Como la  $R_{20}$  de la ecuación (d) es la resistencia del conductor a 20°C y  $T_1 - 20^\circ C$  es el cambio de la temperatura desde 20°C, la ecuación (d) puede escribirse de la siguiente forma:

$$R = \rho \frac{1}{A} [1 + \alpha_{20} \Delta T]$$

Que es una ecuación para la resistencia en términos de todos los parámetros de control.

A lo largo de este capítulo se revisaron los diversos fundamentos de la corriente alterna, los cual nos servirán en los capítulos siguientes para la comprensión de la teoría de dieléctricos y el estudio de la extinción del arco eléctrico.