Programa de la asignatura:

Electricidad y magnetismo

U1 | Electricidad y magnetismo

Índice

Unidad 1. Electricidad y magnetismo

Presentación de la unidad

Electricidad. http://lamiscelanea.org.mx/

Electricidad es el nombre que se da a una amplia gama de fenómenos que, de una u otra forma, se producen casi en todo lo que nos rodea. Desde el relámpago en el cielo hasta el encendido de una bombilla eléctrica, y desde lo que mantiene unidos a los átomos de las moléculas hasta los impulsos que se propagan por el sistema nervioso, la electricidad está en todas partes. El control de la electricidad se hace evidente en muchos aparatos, desde los hornos de microondas hasta las computadoras. En esta era de la tecnología es importante entender las bases de la electricidad y cómo se pueden usar esas ideas básicas para mantener y aumentar nuestra comodidad, nuestra seguridad y nuestro progreso actuales [1]. (Hewitt, 2007).

Hoy en día, nuestra vida diaria depende extraordinariamente de la electricidad, mientras que hace un siglo sólo disponíamos de alguna lámpara eléctrica. Sin embargo, aunque el uso generalizado de la electricidad es muy reciente, su estudio tiene una larga historia que comienza mucho antes de que apareciese la primera lámpara eléctrica. Las primeras observaciones de la atracción eléctrica fueron realizadas por los antiguos griegos [2]. (Tipler, 2010). Evidencia encontrada en documentos de la antigua China sugiere que desde el año 2000 a.C., el magnetismo ya había sido observado. Los antiguos griegos observaron fenómenos eléctricos y magnéticos desde el año 700 a.C. Conocían las fuerzas magnéticas al observar la *magneita* (Fe_3O_4), piedra de origen natural, que es atraída por el hierro. (La palabra eléctrico viene de *elektron*, palabra griega para designar el "ámbar". La palabra *magnético* proviene de *Magnesia*, nombre de la provincia griega donde se encontró magnetita por primera vez). No fue sino hasta principios del siglo XIX que los científicos llegaron a la conclusión de que la electricidad y el magnetismo son fenómenos relacionados. En 1819, Hans Oersted descubrió que la aguja de la brújula se desvía si se coloca cerca de un circuito por el que se conduce una corriente eléctrica. En 1831, Michael Faraday y, en forma simultánea, Joseph Henry, demostraron que cuando se pone en movimiento un alambre cerca de un imán (o, de manera equivalente, cuando un imán se mueve cerca de un alambre), se establece una corriente eléctrica en dicho alambre. En 1873, James Clerk Maxwell aprovechó estas observaciones, junto con otros experimentos, para sustentar las leyes del electromagnetismo tal como se conocen hoy en día. (Electromagnetismo es el nombre que se le da al estudio conjunto de la electricidad y del magnetismo) [3]. (Aymond, 2015).

Ahora es momento de estudiar los componentes de la electricidad y magnetismo, desde sus principios y elementos que lo explican.

¡Adelante!

Propósitos

Al finalizar el estudio de la unidad:

1	**Explicarás** los conceptos de electricidad y magnetismo.
2	**Diferenciarás** entre potencial eléctrico y diferencia de potencial.
3	**Resolverás** problemas de aplicación de leyes.
4	**Medirás** las variables de corriente y voltaje, con base a un procedimiento.

Competencia específica

Unidad 1 | **Aplicar** las leyes de electricidad y magnetismo para determinar la variación de fuerza eléctrica y su paso en un conductor eléctrico, con base en sus mediciones.

1.1. Materia y carga eléctrica

Recuerda que todo lo que ocupa un lugar en el espacio es materia, por lo tanto, ocupa un volumen. Desde hace muchos años los científicos se han inquietado por predecir el comportamiento del conjunto de átomos, los cuales conforman la materia, y están conformados por estructuras subatómicas como electrones, protones y neutrones, Figura 1.1, siendo estos los ingredientes principales de la carga eléctrica, ya que de ellos se desprende la ley de las cargas eléctricas, donde indica que fuerzas opuestas se atraen Figura 1.3 y fuerzas iguales se repelen Figura 1.2, y está medida en Coulombs (C)

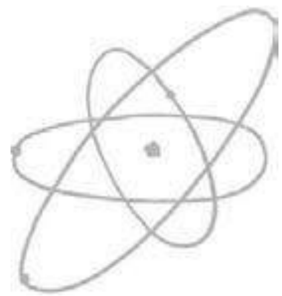

Figura 1.1 Modelo clásico del átomo [1]. Tomado de Hewitt, (2007).

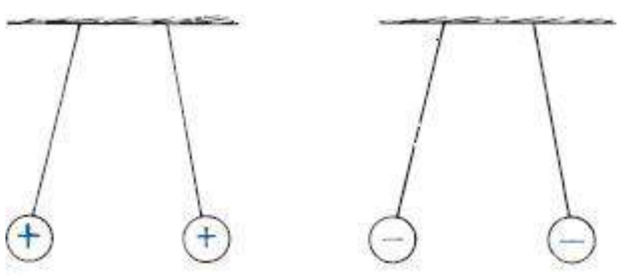

Figura 1.2 Cargas con signos iguales [1]. Tomado de Hewitt, (2007).

Figura 1.3 Cargas con signos diferentes [1]. Tomado de Hewitt, (2007).

Teniendo en cuenta que esta ley tiene dependencia de dos factores que son: la distancia entre cuerpos y la cantidad de carga de cada uno, por lo que la cantidad de carga es directamente proporcional a la fuerza de atracción de estos.

1.1.1. Aislantes, semiconductores y conductores

Una de las principales características que tienen los materiales es la capacidad que tienen los electrones de sus átomos para desplazarse libremente entre otros átomos del mismo material (conductividad). Por ejemplo, en los metales es fácil establecer una corriente eléctrica porque sus átomos son libres para desplazarse a través del material. A esos materiales se les llama **conductores**. (Hewitt, 2007).

En otros materiales, como caucho y vidrio, los electrones están fuertemente enlazados con determinados átomos, y pertenecen a ellos. No están libres para desplazarse entre otros átomos del material. En consecuencia, no es fácil hacer que fluyan. Esos materiales son malos conductores de la corriente eléctrica por la misma razón que en general son deficientes conductores del calor. A estos materiales se les llama **aislantes.** (Hewitt, 2007).

Todas las sustancias se pueden ordenar según su capacidad de conducir cargas eléctricas. Las que quedan arriba de la lista son los conductores, y al último quedan los aislantes. A pesar de que esos extremos en la lista están muy alejados, existen otras sustancian intermedias que se llaman **semiconductores**. Su clasificación depende de lo firmemente que sus átomos retengan a sus electrones, ya que puede hacerse que estos materiales se comporten a veces como aislantes, y a veces como conductores. (Hewitt, 2007).

Para tener una idea más clara, toma una pequeña barra de cobre y frótala con alguna piel o lana y de esta manera lograrás que se cargue, si sostienes la barra en la mano mientras la frotas e intentas atraer un trozo de papel, éste no será atraído, ya que la carga del cobre al tocar directamente tu piel (siendo tu mismos un conductor) se distribuirá y se irá hacia tierra desapareciendo, pero en cambio, si colocas entre la mano y el metal un material aislante entonces la carga permanecerá en el metal y atraerá el papel.

1.1.2. Aplicación de la ley de Coulomb

En 1785 Coulomb estableció la ley fundamental de fuerza eléctrica entre dos partículas cargadas estacionarias, misma que a partir de sus experimentos arrojaron las siguientes propiedades:

1) La fuerza es inversamente proporcional al inverso del cuadrado de la distancia de separación $\boldsymbol{r}$ entre las dos partículas, medida a lo largo de la línea recta que las une.
2) La fuerza es proporcional al producto de las cargas q_1 y q_2 de las dos partículas
3) La fuerza es repulsiva si las cargas son del mismo signo y atractivos si las cargas son de signos opuestos**.** (Serway, 2009)

La expresión matemática de la Ley de Coulomb es:

$$F_e = k_e \frac{|q_1||q_2|}{r^2} \tag{1}$$

Donde q_1 y q_2 representan las cargas puntuales tomadas con su signo negativo o positivo de acuerdo con el caso, $\boldsymbol{r}$ corresponde a la distancia entre las cargas y k_e es una constante conocida como **constante de Coulomb**, la cual se expresa de la siguiente manera

$$k_e = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \tag{2}$$

Donde la constante ε_0 (letra griega minúscula, épsilon) se conoce como la **permitividad del vacío**, cuyo valor es

$$\varepsilon_0 = 8.8542x10^{-12} \frac{C_2}{Nm^2}$$

El valor de la constante de Coulomb depende de la elección de las unidades. En el sistema SI la unidad de carga es el **coulomb** (C). Entonces, k_e tiene el siguiente valor

$$k_e = 8.9876x10^9 \frac{Nm^2}{C^2}$$

Teniendo en cuenta que la unidad de carga más pequeña conocida es la que tiene un protón (+*e*) o un electrón (-*e*) y ésta tiene una magnitud de

$$e = 1.60218 \text{ x } 10^{-19} \text{ C}$$

Ahora se podrá calcular el número de electrones o protones que componen un Coulomb de carga, aplicando el inverso a la magnitud de un electrón o protón (1/e), esto dará que 1 C es igual a la carga de 6.24×10^{18} electrones (o protones).

Tabla 1.1 Carga y masa de las partículas subatómicas.

Partícula	Carga (C)	Masa (Kg)
Electrón (e)	$-1.6021917 \times 10^{-19}$	9.1095×10^{-31}
Protón (p)	$+1.6021917 \times 10^{-19}$	1.67261×10^{-27}
Neutrón (n)	0	1.67492×10^{-27}

El hecho de que cada carga se represente con su signo explica si existe una fuerza de atracción o repulsión entre ellas, por lo tanto, la ecuación 1 se puede expresar de la siguiente manera

$$F_e = k_e \frac{q_1 q_2}{r^2} \tag{3}$$

Recordando que la fuerza es una cantidad vectorial que debe ser tratada como corresponde, la ley de Coulomb, expresada en forma vectorial para una fuerza ejercida por una carga q_1 sobre una segunda carga q_2, se puede reescribir de la siguiente manera

$$\vec{F}_e = k_e \frac{q_1 q_2}{r^2} \vec{u}_{12} \tag{4}$$

Donde $\vec{u}_{12}$ es un vector unitario dirigido de q_1 hacia q_2, como se puede observar en la Figura 1.4. Ya que la fuerza eléctrica obedece a la tercera ley de Newton, la fuerza eléctrica ejercida por q_2 sobre q_1 es igual en magnitud, pero en sentido opuesto a la fuerza ejercida por q_1 sobre q_2; es decir, $\vec{F}_{21} = -\vec{F}_{12}$. Por último, en la ecuación (4) es claro que, si q_1 y q_2 son del mismo signo, como se observa en la Figura 1.4 a), el producto q_1q_2 es positivo y la fuerza eléctrica sobre una partícula está dirigida lejos de otra. Si q_1 y q_2 son de signo opuestos como se muestra en la Figura 1.4 b), el producto q_1q_2 es negativo y la fuerza eléctrica de una partícula está dirigida hacia la otra.

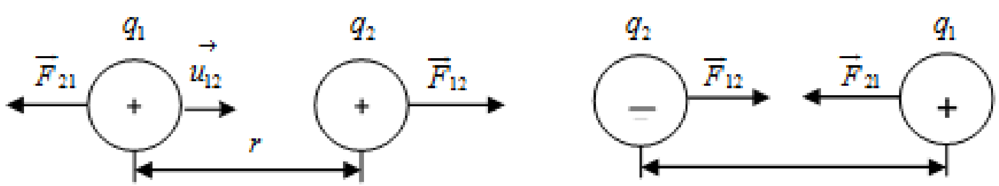

Figura 1.4 Cargas puntuales separadas por una distancia r.

La Figura 1.4 muestra que, cuando las cargas son del mismo signo la fuerza es de repulsión, mientras que cuando las cargas son de signo contrario la fuerza es de atracción.

Ahora bien, cuando se encuentran más de dos cargas involucradas se aplica la ecuación **(4)** para obtener la fuerza entre cualquier par de ellas, por lo tanto, la fuerza resultante sobre cualquiera de ellas será igual al vector suma de las fuerzas, debidas a las diversas cargas por separado (**principio de superposición).**

Por ejemplo, si se tienen 5 cargas, entonces la fuerza resultante sobre la partícula 1 debida a las demás partículas es de:

$$\vec{F}_1 = \vec{F}_{21} + \vec{F}_{31} + \vec{F}_{41} + \vec{F}_{51}$$

Ejemplo 1

Dos cargas puntuales de valores $q_1 = +3\ \mu C$ y $q_2 = -5\ \mu C$, se encuentran separadas por una distancia de 1 m. Encontrar la magnitud de la fuerza eléctrica resultante y discutir si se trata de una fuerza de atracción o repulsión.

Sustituyendo los valores en la ecuación (1) se tiene

$$F_e = k_e \frac{|q_1||q_2|}{r^2} = 8.9876 \text{ x } 10^9 \ \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2}\left[\frac{|+3 \text{ x } 10^{-6}\ \text{C}||-5 \text{ x } 10^{-6}\ \text{C}|}{(1\text{m})^2}\right] = 0.1348 \text{ N}$$

La fuerza actuante sobre las cargas tiene la misma magnitud y dirección, pero sentido diferente. Como el producto q_1q_2 es negativo, la fuerza entre q_1 y q_2 es de atracción.

Ejemplo 2

Se tienen tres fuerzas puntuales ubicadas como se ve en la Figura 1.5, donde $q_1 = q_3 = 6\ \mu C$, $q_2 = -2\ \mu C$. La distancia entre q_2 con las otras partículas es de 0.5 m. Encuentre la fuerza resultante que se ejerce sobre q_3.

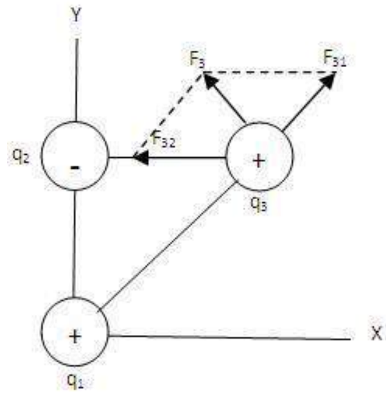

Figura 1.5 Distribución de tres cargas puntuales en el plano xy (ejemplo 2).

Primero se determina la magnitud de la fuerza resultante sobre q_3 ejercida por q_2

$$F_{23} = k_e \frac{|q_2||q_3|}{r^2} = 8.9876 \text{ x } 10^9 \ \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2} \left[\frac{(2 \text{ x } 10^{-6} \text{ C})(6 \text{ x } 10^{-6} \text{ C})}{(0.5\text{m})^2} \right] = 0.4314 \text{ N}$$

Ahora calcula la magnitud de la fuerza resultante ejercida por q_1 sobre q_3, es decir, F_{13}

$$F_{23} = k_e \frac{|q_1||q_3|}{\left(\sqrt{2}r\right)^2} = 8.9876 \text{ x } 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2} \left[\frac{(6 \text{ x } 10^{-6} \text{ C})(6 \text{ x } 10^{-6} \text{ C})}{\left(\sqrt{2}(0.5)\text{m}\right)^2} \right] = 0.6471 \text{ N}$$

Como es una fuerza repulsiva y hace un ángulo de 45° con el eje X sus componentes en X y Y son iguales, y su magnitud está dada por

$$F_{13} \cos 45° = 0.4575 \text{ N}$$

Para obtener la fuerza resultante sobre q_3 en "*x*" y "*y*" se tienen las siguientes sumatorias

$F_x = F_{13x} + F_{23} = 0.4575 \text{ N - } 0.4314 \text{ N} = 0.026 \text{ N}$

$F_y = F_{13y} = 0.4575 \text{ N}$

Expresándolo en forma de vectores se obtiene

$F_3 = (0.4575i - 0.4314j) \text{ N}$

1.2. Campo eléctrico

Las fuerzas eléctricas, como las gravitacionales, actúan entre objetos que no se tocan entre sí. En la electricidad y en la gravitación existe un *campo de fuerzas* que influye sobre los cuerpos cargados y masivos, respectivamente. El campo desempeña un papel intermedio en la fuerza entre los cuerpos. Es común pensar que los cohetes lejanos, y cosas por el estilo, interactúan con los campos gravitacionales y no con las masas de la Tierra y demás cuerpos responsables de los campos. Así como el espacio que rodea a un planeta (y a todos los demás cuerpos masivos) está lleno con un campo gravitacional, el espacio que rodea a un cuerpo con carga eléctrica está lleno por un **campo eléctrico**, una especie de aura que se extiende por el espacio Figura 1.6. (Hewitt, 2007).

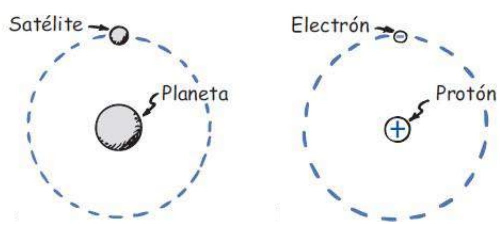

Figura 1.6 Fuerza gravitacional y eléctrica. (Hewitt, 2007).

Un campo eléctrico tiene tanto magnitud (intensidad) como dirección. Una forma útil para describir un campo eléctrico es con las líneas de fuerza eléctrica, que se muestran en la Figura 1.7. Las líneas de fuerza que se ven en la figura representan una pequeña cantidad entre la infinidad de líneas posibles que indican la dirección del campo. (Hewitt, 2007).

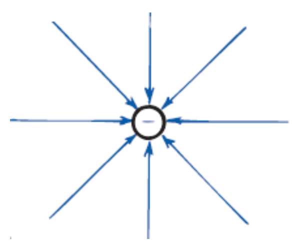

Figura 1.7 Representación del campo eléctrico en torno a una carga negativa. (Hewitt, 2007).

El Concepto de campo eléctrico nos ayuda no sólo a comprender las fuerzas entre los cuerpos estacionarios cargados y aislados, sino también lo que sucede cuando se mueven las cargas. Cuando esto sucede, su movimiento se comunica a los cuerpos cargados vecinos, en forma de una perturbación del campo. (Hewitt, 2007).

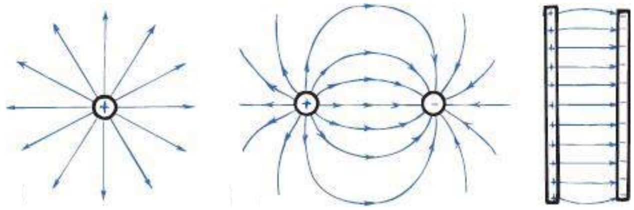

Figura 1.8 Algunas configuraciones de campos eléctricos. (Hewitt, 2007).

1.2.1. Campo eléctrico en un cuerpo con carga

La magnitud del campo en cualquiera de sus puntos es simplemente la fuerza por unidad de carga. Si un cuerpo con carga *q* experimenta una fuerza *F* en determinado punto del espacio, el vector del campo eléctrico $\vec{E}$ en ese punto es

(5)

El vector $\vec{E}$ está en unidades del SI, Newton por cada Coulomb (N/C). La dirección del campo, como se ve en la Figura 1.9, está en la dirección de la fuerza que experimenta una carga positiva de prueba cuando es colocada en el campo.

Figura 1.9 Carga de prueba que experimenta un campo eléctrico.

A partir de la ley de Coulomb y combinándola con la ecuación (5) se tiene

$$\vec{E} = k_e \frac{q}{r^2} \vec{u}_{12} \qquad (6)$$

Además, cabe mencionar que si se coloca una carga arbitraria q_0 en un campo eléctrico $\vec{E}$, éste experimenta una fuerza eléctrica dada por

$$\vec{F} = q\vec{E} \qquad (7)$$

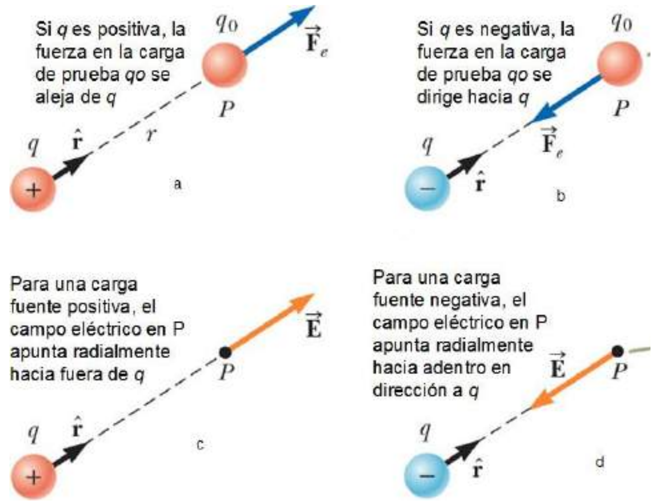

Figura 1.10 Fuerzas y Campos eléctricos experimentados por una carga de prueba.

1.2.2. Potencial eléctrico y diferencia de potencial

Del mismo modo en que las fuerzas electrostáticas tienen relación con la intensidad de campo eléctrico, es posible hacer lo mismo con referencia a la potencia eléctrica, esto es, si se desea comparar un punto de un campo eléctrico con otro en términos de potencial eléctrico, se deberá utilizar como elemento de comparación una misma carga. Para efectos más prácticos, se utilizará la carga más sencilla que es la carga unidad positiva y su energía potencial esto es llamado potencia eléctrica (V) en un punto p como la energía potencial eléctrico que tendría la unidad de carga positiva ubicada en dicho punto del campo.

Su expresión será entonces:

$$V = \frac{E_p}{q} \qquad (8)$$

Por ser una energía por unidad de carga, el potencial tendrá una magnitud escalar cuya unidad en SI medias, estará definida por la relación de J/C dicha relación recibe el nombre de Voltio (V).

En cuanto a la **diferencia de potencial** es la diferencia que se tiene entre dos puntos dados y está relacionada al movimiento de sus cargas positivas entre ellos, también se conoce como tensión eléctrica, estas cargas se desplazan espontáneamente de un punto a otro, por un campo eléctrico y es debido a que se desplazan y se adhieren a los de menor potencial, de la misma manera que cuerpos con masa caen de los puntos de mayor altura, los electrones (partículas negativas) lo hacen en sentido contrario

A partir de esta propiedad del movimiento de las cargas de un punto a otro puede se puede deducir su expresión matemática

$$V = V\left(final\right) - V\left(inicial\right) = \frac{E_p\left(final\right) - E_p\left(inicial\right)}{q} = \frac{W_e}{q} \qquad (9)$$

Este criterio considera el trabajo en forma positiva cuando conlleva una ganancia de energía potencial y negativo cuando se logra en base a una baja de energía potencial en la carga afectada, por ese motivo entonces W_e se expresa de la siguiente forma:

$$W_e = E_p\left(final\right) - E_p\left(inicial\right) = \Delta E_p \qquad (10)$$

Despejando W_e de la ecuación (9) se tiene

$$W_e = q\Delta V \qquad (11)$$

Donde q es la carga que se desplaza y ΔV la diferencia de potencial entre los dos puntos, si q es positiva habrá un aumento de potencial y por ende un ΔV positivo, efectuado por agentes exteriores involucrados en que la carga sea desplazada forzosamente. De lo contrario, si ΔV es negativo, el movimiento de la carga es debido al propio campo y se da de manera espontánea, lo anterior siempre y cuando q sea positiva, en caso contrario los criterios anteriores serán opuestos.

1.2.3. Corriente eléctrica

Así como una corriente de agua es el flujo de moléculas de H_2O, la **corriente eléctrica** es el flujo de carga eléctrica. La tasa del flujo de carga eléctrica se mide en amperes. Un ampere es una tasa de flujo igual a un coulomb de carga por segundo. (Hewitt, 2007).

De esta manera, la corriente se define como la tasa a la cual circula la carga a través de una superficie. Si ΔQ es la cantidad de carga que pasa a través de una superficie *A* en un intervalo de tiempo Δt, la **corriente promedio** i es igual a la carga que pasa a través de *A* por unidad de Tiempo.

$$i = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \qquad (12)$$

El flujo convencional de la corriente sigue la dirección opuesta al flujo de electrones, tal y como se muestra en la Figura 1.11.

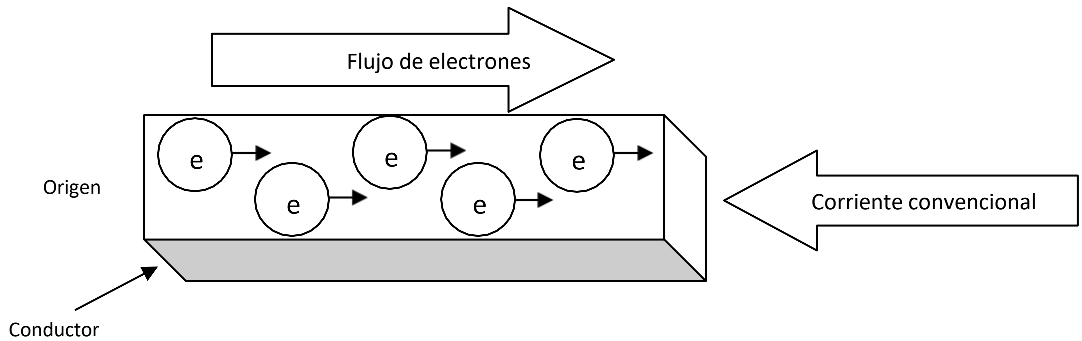

Figura 1.11 Flujo de electrones y corriente convencional en un conductor.

En caso de que la rapidez de intercambio varíe con el tiempo, ésta afectará directamente a la corriente, lo que se define como corriente instantánea, I. Al aplicar las diferenciales a la ecuación (12) se tiene lo siguiente

$$I = \frac{dQ}{dt} \tag{13}$$

Como se observa en la Figura 1.11, la corriente convencional viaja opuestamente al flujo de electrones, aunque no siempre es así, ya que en algunos metales esto es inverso debido a que los portadores de carga son los electrones, y no lo protones, como convencionalmente se considera. En otros casos la corriente es el flujo de ambas cargas, positiva y negativa.

Para comprender mejor lo anterior, considere la corriente en un conductor cilíndrico de área de sección transversal *A* (ver Figura 1.12).

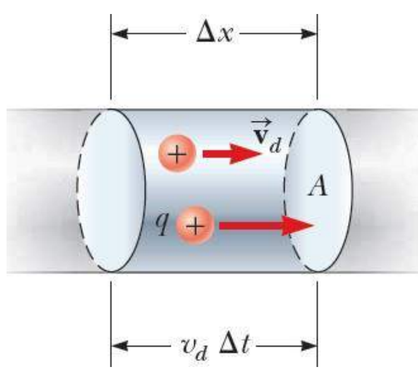

Figura 1.12 Segmento de un conductor uniforme de área transversal A.

El volumen del conductor de longitud Δx es A Δx. Si el número de portadores por unidad de volumen se representa por la letra n, entonces el número de portadores de carga en dicho elemento estará dado por $nA\ \Delta x$, por lo tanto, para obtener la carga (ΔQ) se utilizala siguiente expresión algebraica

$$\Delta Q = (\text{número de cargas})(\text{carga por partícula}) = (nA\Delta x)q \tag{14}$$

La carga de cada partícula en dicha ecuación está representada por q, ahora bien; se mencionó que lo portadores viajan a cierta velocidad, por lo que se representa como v_d, y la distancia que recorren la representan por Δx así entonces $\Delta x = v_d * \Delta t$, aplicando esto a la ecuación anterior queda de la siguiente manera

$$\Delta Q = (nAv_d \Delta t)q \tag{15}$$

Para obtener la corriente en el conductor se dividen ambos miembros de la ecuación entre Δt y se obtendrá

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta Q} = nqv_d A \tag{16}$$

A la velocidad de los portadores se les llama velocidad de deriva, para explicarla se toma como referencia un conductor, donde los portadores de carga sean los electrones, cuando este conductor está aislado los electrones se mueven en forma aleatoria, al aplicar una diferencia de potencial a dicho conductor entonces se forma un campo eléctrico, el cual por ende genera una fuerza eléctrica y finalmente, una corriente, es entonces cuando estos empiezan a moverse en zigzag chocando con los átomos del conductor, esto produce que haya una energía vibratoria y consecuentemente un aumento en la temperatura (por eso se calientan los cables de una extensión eléctrica al conectar varios aparatos, los cuales necesitan de mucha corriente para funcionar), sin embargo, los electrones siguen su movimiento lento dentro del conductor con la velocidad promedio llamada velocidad de deriva.

Ejemplo 3

Un alambre de cobre de área en la sección transversal de 8×10^{-6} lleva una corriente de 10 A. Encuentre la velocidad de deriva de los electrones en el alambre. La densidad del cobre es 8.95 g/cm^3.

Con base en la tabla periódica de los elementos se encuentra que el peso atómico del cobre es 63.5 g/mol. Nota. Cualquier sustancia contiene 6.02×10^{23} átomos, que es el número de Avogadro de átomos.

Conociendo la densidad del cobre se puede calcular el volumen que se ocupa en 63.5 g de cobre

$$V=\frac{m}{p}=\frac{63.5\ \text{g}}{8.95\ \text{g}/\text{cm}^3}=7.09\ \text{cm}^3$$

Suponiendo que cada átomo de cobre aporta un electrón libre al material, se tendrá

$$n=\frac{6.02\ \text{x}\ 10^{23}\ \text{electrones}}{7.09\ \text{cm}^3}=8.48\ \text{x}\ 10^{22}\ \frac{\text{electrones}}{\text{cm}^3}\left(10^{6}\ \frac{\text{cm}^3}{\text{m}^3}\right)=8.48\ \text{x}\ 10^{28}\ \frac{\text{electrones}}{\text{m}^3}$$

Con la ecuación (16) se obtiene finalmente la velocidad de deriva:

$$v_d=\frac{I}{nqA}$$

Sustituyendo valores

$$v_d=\frac{10\ \frac{\text{C}}{\text{s}}}{\left(8.48\ \text{x}\ 10^{28}\ \frac{\text{electrones}}{\text{m}^3}\right)\left(1.6\ \text{x}\ 10^{-19}\ \text{C}\right)\left(8\ \text{x}\ 10^{-6}\ \text{m}^2\right)}=9.21\ \text{x}\ 10^{-5}\ \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

1.3. Campo magnético y electromagnetismo

A manera de hacer una pequeña reseña de la historia del magnetismo, se hace referencia cuando los griegos observaron que el hierro atraía algunos tipos de materiales, tal como es el caso de la magnetita, la cual se constituye naturalmente como un imán y ésta tiene la propiedad de atraer ciertos metales hacia ella, además al ser suspendida en un hilo ésta se alinea “automáticamente” en la dirección norte-sur de la tierra por el mismo campo magnético que la envuelve, dicha fuerza es generada a partir del movimiento de partículas cargadas. Dado lo anterior, entonces se podrá observar una relación directa entre el magnetismo y la electricidad, puesto que una depende de la otra, y viceversa. A pesar de esto cada fuerza es diferente, una es perpendicular a la otra, como se muestra en la Figura 1.13.

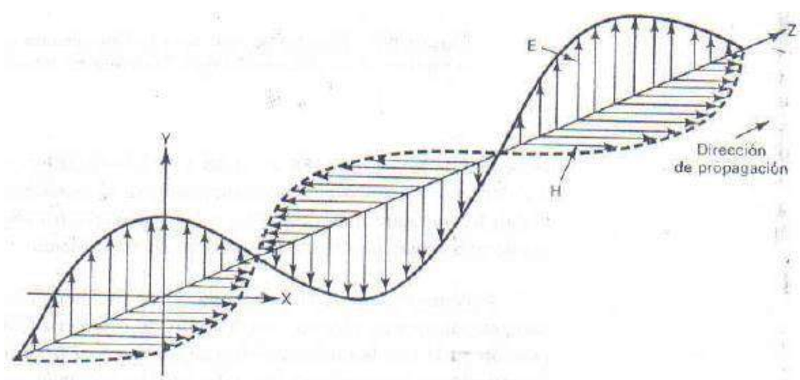

Figura 1.13 Propagación de los campos eléctrico (E) y magnético (H).

Los materiales que por naturaleza son “imanes” son el Hierro, Níquel y Cobalto, pues bien no todos los materiales pueden tener esta propiedad, ya que exceptuando los mencionados, los demás tienden por naturaleza a formar pares en sus átomos con electrones de spin opuesto, lo que provoca que se anulen entre sí, a diferencia de los ferromagnéticos (los 3 anteriormente mencionados) que estos tienen sus electrones dispersos, y cuando estos se alinean, suman sus fuerzas y producen un campo magnético, por lo que se dice que el material es un imán. No importa cuántas veces se fragmente un imán, éste conservará sus dos polaridades, también conocidos como norte y sur.

Todos los materiales son diamagnéticos, puesto que es una propiedad natural de la materia, y se debe a que la rotación de sus electrones al ser expuestos a un campo magnético incrementa su velocidad, lo que genera una oposición al campo magnético aplicado, haciendo que se decremente su magnetización, y, por ende, son repelidas débilmente. Por lo regular es negativo y sumamente pequeño, del orden de -10^{-8} a -10^{-5}, se debe de tener en cuenta que esto no depende de la temperatura sino de la densidad del material, algunos de los materiales utilizados en la industria son sólo diamagnéticos por instantes, tal es el caso de cobre, zinc, oro, plata, cadmio, mercurio. Por ejemplo, la permeabilidad relativa del cobre es 0.999991.

Así mismo, existen materiales a los cuales se les llama paramagnéticos, estos se alinean inversamente, es decir, su magnetización es positiva y son atraídas débilmente hacia un imán. Por su propia naturaleza es difícil su imantación, tal es el caso como el aluminio, manganeso, magnesio, cromo y platino, utilizados en algunas industrias.

1.3.1. Campo y fuerza magnética

Un elemento con capacidades de imán puede influir en otros materiales sin tocarlos, ya que estos generan un campo magnético que puede ser representado por medio de líneas de fuerza (observa las imágenes), las cuales se extienden iniciando del norte del imán y van al sur del mismo, estas líneas nunca se cruzan, al alejarse del imán éstas se van separando, cuantas más líneas de fuerza existan y éstas se acerquen más, la intensidad del campo magnético será mayor, además de que serán perpendiculares al campo eléctrico. Esto es, formará ángulos rectos con la velocidad de la partícula y la dirección del campo.

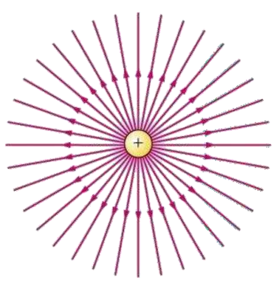

Figura 1.14 líneas de fuerza en carga puntual

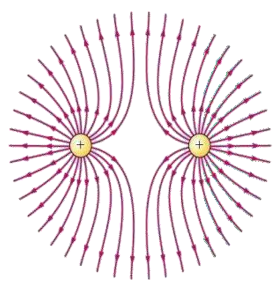

Figura 1.15 Líneas de fuerza en cargas iguales

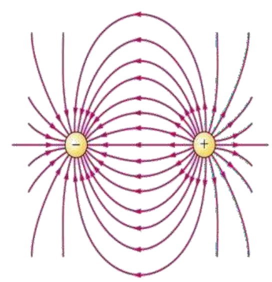

Figura 1.16 Líneas de fuerza en cargas opuestas

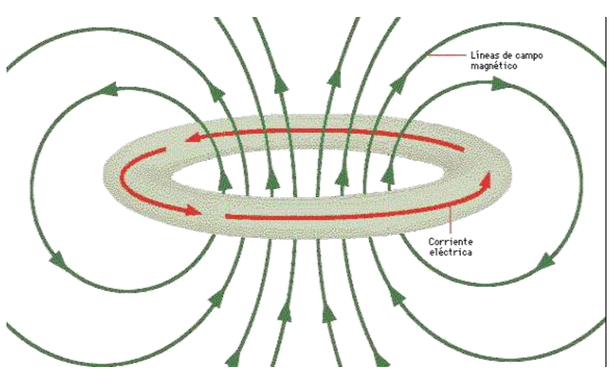

Figura 1.17 Perpendicularidad de las líneas de fuerza de un campo eléctrico respecto al magnético.

Por lo que se puede expresar matemáticamente:

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B} \tag{17}$$

Donde F es la fuerza magnética, *q* es la carga y *B* es el vector del campo magnético.

Obteniéndose que:

1) La fuerza magnética es proporcional a la carga y la velocidad a la que viaja la partícula.
2) La magnitud y la dirección de la fuerza magnética depende de la velocidad de la partícula, de la magnitud y dirección del campo magnético.
3) Cuando la partícula se mueve en la dirección paralela al vector campo magnético, la fuerza magnética sobre la carga es cero.
4) Cuando la velocidad hace un ángulo θ con el campo magnético, la fuerza magnética es perpendicular al plano formado por la velocidad y el vector del campo magnético.
5) La fuerza magnética sobre una carga positiva tiene sentido opuesto a la fuerza que actúa sobre una carga negativa que se mueve en la misma dirección.
6) Si el vector velocidad hace un ángulo θ con el campo magnético, la magnitud de la fuerza magnética es proporcional al senθ. [3].

A partir de lo anterior se desprende la ley de la mano derecha (ver Figura 1.18), que muestra que para obtener la dirección del producto vectorial *v* X *B*, se deberá girar el vector *v* hacia *B* haciendo uso de los cuatro dedos de la mano derecha, apuntando la palma hacia el vector *B*, por lo que el pulgar apuntará en dirección del producto vectorial de *v* X *B.* esto cuando la carga es positiva. Si *q* es negativa el pulgar apuntará en sentido opuesto. Por lo tanto, *F* tendrá una magnitud determinada por:

$$F = qvB\ sen(\theta) \tag{18}$$

Afirmando con esto que el ángulo θ entre v y B es cero cuando v es paralelo a B, sin embargo, θ = 90° cuando v es perpendicular a B.

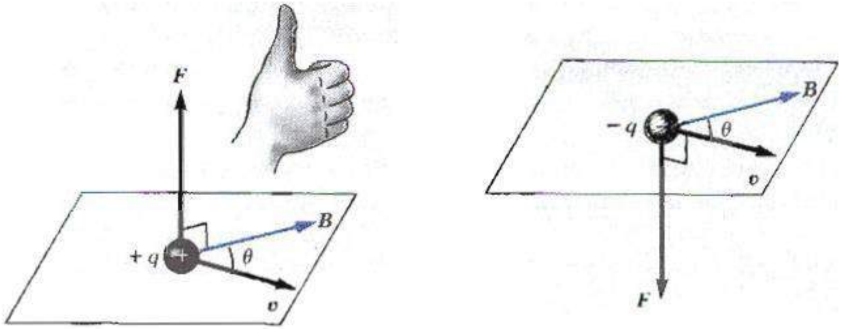

Figura 1.18 Ley de la mano derecha para determinar la dirección de una fuerza magnética

La Figura 1.18 muestra que, si la carga es positiva el pulgar queda hacia arriba. Por otro lado, si la carga es negativa el pulgar apuntará hacia abajo.

Lo que conlleva a resaltar las diferencias entonces de un campo eléctrico y uno magnético, donde la fuerza eléctrica siempre está en la misma dirección de su campo, mientras que el campo magnético es perpendicular a su fuerza, también la fuerza magnética actúa sobre las partículas que están cargadas y en movimiento mientras que la fuerza eléctrica actúa sobre la partícula cargada sin importar su velocidad. Y por último, para mover una partícula cargada la fuerza eléctrica debe aplicar un trabajo sobre ella mientras que el campo magnético no realiza trabajo alguno cuando una partícula se desplace.

$$F = ds = \left(F \cdot v\right)dt = 0 \tag{19}$$

La anterior ecuación se desprende de que la fuerza magnética es siempre perpendicular al desplazamiento de una carga que se mueve en un campo magnético estacionario, ya que esta fuerza es un vector perpendicular a *v*, a partir de esto y del teorema de trabajo y energía, se concluye que una carga no puede ser alterada sólo por el campo magnético. Podrá cambiar su dirección en cuanto al vector velocidad, pero nunca la rapidez de la partícula.

Basado en el SI la unidad del campo magnético (B) es medida en weber por metro cuadrado (Wb/m^2) conocido también como Tesla (T), relacionando esta medida con la ecuación (18), se obtiene la siguiente igualdad:

$$[B] = T = \frac{\mathrm{Wb}}{\mathrm{m}^2} = \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}} = \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{Am}}$$

Si se trabaja bajo el sistema CGS su unidad será llamada gauss (G) y relacionada con T (tesla) su conversión es 1 T = 10^4 G.

Ejemplo 4

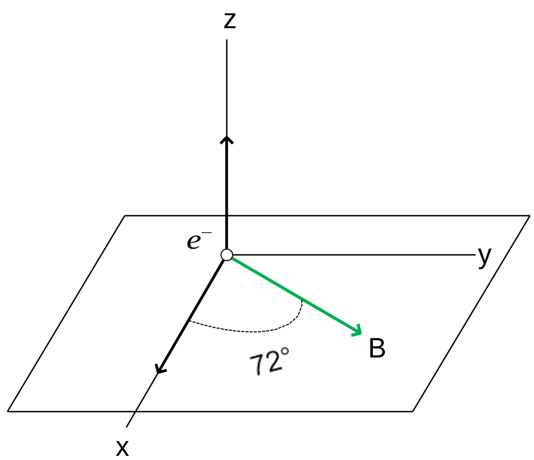

Figura 1.19 Movimiento de un electrón (ejemplo 4).

Si un protón se mueve con una rapidez de 5 x 10^6 m/s a lo largo del eje x y entra en una región donde la magnitud del campo magnético es de 3.8 T, el cual hace un ángulo de 72° con el eje de las x y está en el plano xy. Calcular

a) La Fuerza magnética
b) Su aceleración inicial
(Recuerda que la carga de un protón es de q = 1.6 x 10^{-19} C):

Sustituyendo valores en la ecuación (18) se tiene

$$F=\left(1.6\text{ x }10^{-19}\text{ C}\right)\left(5\text{ x }10^{6}\ \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)\left(3.8\text{ T}\right)\left(sen\left(72°\right)\right)=2.89\text{ x }10^{-12}\text{ N}$$

Dado que el producto del vector *v* X *B* está en la dirección positiva en z y la carga es positiva, la fuerza F estará en la misma dirección.

Sabiendo que la masa de un protón anteriormente vista es de 1.67 x 10^{-27} kg y sabiendo que la fórmula de la aceleración es $a=\frac{F}{m}$, el inciso b) dará como resultado

$$a=\frac{2.89\text{ x }10^{-12}\text{ N}}{1.67\text{ x }10^{-27}\text{ kg}}=1.73\text{ x }10^{15}\ \frac{\text{m}}{\text{s}^{2}}$$

1.3.2. Inducción electromagnética

El fenómeno de inducción electromagnética fue iniciado por Joseph Henry, físico americano que construyó los primeros motores electromagnéticos. Fue en 1830 cuando al cubrir con un alambre delgado aplicando muchas vueltas en un núcleo de acero descubre un fenómeno llamado autoinducción, mismo que convierte este experimento en un electroimán, pero fue por sus experimentos que se le acreditó a Michael Faraday, aunque más tarde se le reconoció a Henry su contribución. La unidad de la inductancia fue llamada el Henry en honor a Joseph Henry.

La inductancia indica que una corriente puede ser generada a partir de en un campo magnético en continuo cambio, no por uno estable, a este resultado se le conoce como fem (fuerza electromotriz), por lo que una fem inducida en un circuito es directamente proporcional a la rapidez del cambio del flujo magnético a través del circuito, matemáticamente se expresa así

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt} \tag{20}$$

Conocida como Ley de Faraday donde φ es el flujo magnético, el cual se encuentra en el circuito y se expresa en la siguiente ecuación

$$\Phi = \int \vec{B} \cdot d\vec{A} \tag{21}$$

Si una bobina consiste de *N* espiras, con la misma área, y Φ es el flujo magnético a través de una espira, se induce una fem en todas las espiras. Las espiras están en serie, por lo que sus fem se suman; debido a eso, la fem total inducida en la bobina está dada por la expresión

$$\varepsilon = -N\frac{d\Phi}{dt} \tag{22}$$

Si el flujo inducido en un circuito con un área determinada es uniforme en toda ella, entonces su flujo es igual al producto de *BA cos θ*, donde *B* es el campo magnético uniforme y *A* el área del circuito y su fem entonces será calculada a partir de

$$\varepsilon = -\frac{d}{dt} BA\cos\theta \tag{23}$$

Con lo anterior se concluye que la fem puede ser inducida de varias maneras, ya sea porque varía la magnitud de *B* con respecto al tiempo, porque varía el área del circuito también con respecto al tiempo, cambiando el ángulo θ entre B y la normal al plano con respecto al tiempo, o combinándolas.

1.3.3. Aplicación de la ley de Ampere

Para encontrar los campos magnéticos generado por distribuciones de corriente simétricas, se utiliza la Ley de Ampere, que indica que la circulación de la intensidad del campo magnético en un contorno cerrado es igual a la corriente que lo recorre en ese contorno, teniendo en cuenta que el campo magnético es un campo vectorial con forma circular, cuyas líneas encierran la corriente. La dirección del campo en un punto es tangencial al círculo que la encierra.

A diferencia de la Ley de Gauss, la ley de Ampere no está basada en campos magnéticos, sino más bien en la integral de línea en el perímetro de un área cerrada, expresión que se puede ver a continuación, además teniendo en cuenta la ecuación para el cálculo del campo magnético total B en un alambre:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \tag{24}$$

Donde μ_0 es la permeabilidad del espacio libre, y $2\pi r$, que se refiere a la circunferencia del círculo, ya que B es constante en magnitud sobre este círculo expresado en la ecuación anterior, por lo tanto, la suma de los productos B sobre la trayectoria cerrada, la cual es equivalente, se representaría matemáticamente como sigue:

$$\oint \vec{B} \cdot \vec{ds} = \vec{B} \oint \vec{ds} = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}(2\pi r) = \mu_0 I \tag{25}$$

El campo magnético disminuye inversamente con la distancia al conductor. Por lo que se establece que la Ley de Ampere es la integral de línea de producto de los vectores B y ds alrededor de cualquier trayectoria cerrada siendo igual a la permeabilidad del espacio libre multiplicado por la corriente (I) que pasa a través de la superficie limitada por la trayectoria cerrada y esta representa la corriente estable total, por lo tanto, sólo es válida en corrientes con esta característica y es utilizada sólo para obtener el cálculo de campos magnéticos altamente simétricos.

Ejemplo 5

Un conductor cilíndrico de radio R transporta una corriente uniforme, determina

a) El campo magnético que apunta hacia el exterior del conductor (r > R)

b) El campo magnético que apunta hacia el interior del conductor (r < R)
c) ¿Cuál es el valor de B en r= 1.0 mm, 2.0 mm y 3.0 mm?

Si se tiene que R = 2.0 mm e I = 60 A

Ya que el alambre es recto, largo y cilíndrico, por su simetría el campo magnético deberá ser igual en cualquier parte, por consecuencia B tiene el mismo valor en cualquier punto con distancia igual del centro al mismo, se espera que B sea tangente en todos los círculos que rodean al alambre. Para el primer inciso se utilizará la ecuación (25)

Entonces se tiene

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \text{ para } [r \succ R]$$

Nuevamente elegimos una trayectoria circular concéntrica con el cilindro, donde B sea tangencial a esta trayectoria, por la misma simetría el campo tiene la misma magnitud en todos los puntos del círculo. Por lo que la corriente que encierra es inferior a I por el factor de relación entre las áreas

$$I_{neta} = I\,\frac{\pi r^2}{\pi r R^2}$$

Por ley de Ampere se obtendrá:

$$\oint \vec{B}\cdot d\vec{s} = B(2\pi r) = \mu_0 I_{neta} = \mu_0 \left(I \frac{r}{R^2} \right)$$

Por lo tanto

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi R^2} \text{r para } [r \prec R]$$

Por lo que, se observa que el campo es cero y va aumentando en forma lineal con r hasta que llega a ser igual a R y B se distribuye conforme al inverso del radio (1/r).

Por último, para el inciso c) se tiene lo siguiente

$$B_{r=1mm} = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} = \frac{\left(4\pi \text{ x } 10^{-7} \text{ T-}\frac{\text{m}}{\text{A}}\right)(60 \text{ A})}{(2\pi)\left(2.0 \text{ x } 10^{-3}\text{m}\right)^2}\left(1.0 \text{ x } 10^{-3}\text{m}\right) = 3.0 \text{ x } 10^{-3} \text{ T}$$

$$B_{r=2mm} = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} = \frac{\left(4\pi \text{ x } 10^{-7} \text{ T-}\frac{\text{m}}{\text{A}}\right)(60 \text{ A})}{(2\pi)\left(2.0 \text{ x } 10^{-3}\text{m}\right)} = 6.0 \text{ x } 10^{-3} \text{ T}$$

$$B_{r=3mm} = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} = \frac{\left(4\pi \text{ x } 10^{-7} \text{ T-}\frac{\text{m}}{\text{A}}\right)(60 \text{ A})}{(2\pi)\left(3.0 \text{ x } 10^{-3}\text{m}\right)} = 4.0 \text{ x } 10^{-3} \text{ T}$$

Como se ha observado que B es lineal en r, se tiene que cuando r = 1.0 mm, B tendrá la mitad del valor que cuando r = 2.0 mm. Fuera del alambre, B disminuye conforme 1/r, por lo que entonces B será 2/3 más grande que cuando r = 2.0 mm.

1.3.4. Aplicación de la ley de Faraday

Tal como se vio en el subtema *1.3.1. Inducción electromagnética*, se puede observar que la fem puede ser inducida de varias maneras, por lo cual el siguiente ejemplo muestra una aplicación de la ley de Faraday de inducción de una fem por cambio de flujo.

Ejemplo 6

Una Bobina de 50 vueltas se mueve en 0.020 s entre los polos de un imán desde un punto donde su área intercepta un flujo de 3.1 x 10^{-4} Wb hasta otro punto en el cual su área atrapa un flujo de 0.10 x 10^{-4} Wb. Determinar la fem promedio inducida en la bobina.

Aplicando la ecuación (22), se resuelve de la siguiente manera:

$$\varepsilon = -N\frac{d\Phi}{dt} = -50\frac{(3.1-0.10) \text{ x } 10^{-4} \text{ Wb}}{0.20 \text{ s}} = 0.75 \text{ V}$$

Ejemplo 7

Una bobina cuadrada (ver Figura 1.20) que mide 5.00 cm de lado tiene 1000 vueltas y se coloca perpendicularmente a un campo magnético uniforme de 0.600 T. La bobina se mueve en forma perpendicular a B de una forma rápida y uniforme, hacia una región donde el campo magnético es igual a cero, teniendo en cuenta que en t = 0 el borde de la bobina está en la esquina del campo, se necesitará 0.100 s para que la bobina esté completamente en el campo libre. Calcular la magnitud de la corriente inducida.

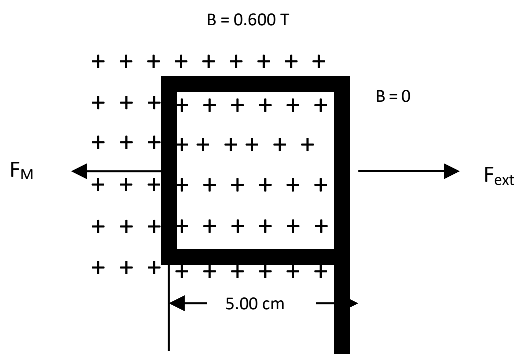

Figura 1.20 Representación esquemática de una bobina cuadrada (ejemplo 7)

Primero se debe calcular el flujo magnético durante el intervalo de tiempo Δt = 0.100 s. El área de la bobina está determinada por A = (5.00 x 10^{-2})^2 = 2.50 x 10^{-3} m^2. El flujo al principio es φ_B = BA = (0.600 T)(2.50 x 10^{-3} m^2) = 1.50 x 10^{-3} Wb. Al transcurrir 0.100 s, el flujo es cero.

La rapidez de cambio de flujo es constante igual a

$$\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{0 - 1.5 \text{ x } 10^{-3} \text{ Wb}}{0.100 \text{ s}} = -1.5 \text{ x } 10^{-2} \frac{\text{Wb}}{\text{s}}$$

A partir de la ecuación (22) se tiene que la fem inducida es

$$\varepsilon = -100\left(-1.50 \text{ x } 10^{-2} \frac{\text{Wb}}{\text{s}}\right) = 1.5 \text{ V}$$

La corriente se obtendrá a partir de

$$\text{I} = \frac{\varepsilon}{R} = \frac{1.50 \text{ V}}{100\ \Omega} = 15.0 \text{ mA}$$

Otra de las formas de inducir una fem en un conductor que se mueve en un campo magnético es conocida como fem en movimiento, y de acuerdo con la ley de Faraday su ecuación es

$$|\varepsilon| = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \qquad (26)$$

Para este caso la fem sólo se considera en su magnitud promedio, su dirección se tomará en cuenta más adelante.

Cuando la fem es inducida en un conductor recto de longitud L moviéndose a una velocidad $\vec{v}$ perpendicular al campo $\vec{B}$ está dada por la siguiente ecuación

$$|\varepsilon| = BLv \tag{27}$$

Donde B, L y el alambre son perpendiculares, para este caso y con relación a la ley de Lenz indica que habrá una oposición involucrando la fuerza del campo magnético sobre la corriente inducida en el conductor, la fuerza de la corriente es tal que se opone al movimiento del conductor, sabiendo la dirección de la corriente se conoce la dirección del campo.

Ejemplo 8

Un avión viaja a 1000 km/h en una región donde el campo magnético de la tierra es de 5.0 x 10^{-5} T y está casi vertical.

¿Cuál es la diferencia de potencial que se induce entre las puntas de las alas que están separadas por una distancia de 70 m?

Solución: Dado que v = 1000 km/h = 280 m/s, y v es perpendicular a B, se aplica la ecuación (27)

$$|\varepsilon| = BLv = \left(5.0 \text{ x } 10^{-5}\ \text{T}\right)\left(70\ \text{m}\right)\left(280\ \frac{\text{m}}{\cancel{\text{s}}}\right) = 1.0\ \text{V}$$

Ejemplo 9

Una barra de cobre de 30 cm de longitud está colocada perpendicularmente a un campo con una densidad de flujo de 0.80 Wb/m^2 y se mueve en ángulo recto respecto al campo con una rapidez de 0.50 m/s.

Determina la fem inducida en la barra

$$|\varepsilon| = BLv = \left(0.80\ \frac{\text{Wb}}{\cancel{\text{m}^2}}\right)\left(0.30\ \text{m}\right)\left(0.50\ \frac{\text{m}}{\cancel{\text{s}}}\right) = 0.12\ \text{V}$$

1.3.5. Aplicación de la ley de Lenz

Dicha ley es una deducción de la Ley de Faraday que también no muestra la forma de hallar la dirección de una corriente o fem inducida.

La ley de Lenz indica que al inducir una fem se producirá una corriente cuyo campo magnético se opondrá al cambio original en el flujo, dicho de otra manera la fem siempre tiene una dirección que se opondrá al cambio original en el flujo que la produjo, por ejemplo si el flujo a través de la bobina se incrementa, la corriente producida por la fem inducida generará un flujo que tratará de cancelar su aumento, o de otra manera, si este flujo se disminuye (el que pasa a través de la bobina) la corriente tratará de restituir la disminución del flujo. Por lo que se dice que dicha ley es consecuencia de la conservación de la energía.

Es conveniente indicar que esta ley indica sólo el sentido de una corriente inducida; la magnitud depende de la resistencia del circuito. A mayor resistencia menor es la corriente inducida que se opone al cambio de flujo, por lo que es más fácil que se lleve al cabo dicho cambio de flujo y esta propiedad trabaja también en forma opuesta, a menor resistencia mayor corriente opuesta al cambio de flujo.

Es importante que entregues sólo un archivo por unidad, para poder obtener e 10% de tu evaluación final.

Cierre de la unidad

Después de este breve recorrido por los tópicos primordiales de la electricidad y el magnetismo, y refrescando los temas, ejercicios y actividades que revisaste en la Unidad 3 de la asignatura de *Física*, puedes desempolvar los conceptos guardados para ponerlos en práctica, ya que a lo largo de tu formación probablemente requieras construir un sistema de generación eléctrica, ahora ya sabes cómo hacerlo.

Por lo pronto, continua con el estudio de la Unidad 2, para seguir ampliando los conocimientos adquiridos.

¡Adelante!

Fuentes de consulta

- Hewitt, Paul G. (2007). *Física Conceptual*. México: Pearson.
- P., A. Tipler y G. Mosca. (2010) *Física para la ciencia y la tecnología Vol.2.* México: Reverté.
- Aymond, A. Serway y John, W Jewett, Jr. (2015). *Física para ciencias e ingeniería Vol. 2*. México: Cengage Learning.
- Sears, Z. y Young, F. (2013). *Física universitaria*. México: Pearson.
- R., Resnik, D., Halliday y K, S. Krane. (2002). *Física Vol. 2.* México: Patria.
- Paul, A. Tipler. (1994). *Física Vol. 2.* México: Reverté.
- Wayne, T. (s.f.). *Sistemas de comunicaciones electrónicas*. México: Prentice-Hall.