Es importante señalar que el campo magnético creado por la corriente que fluye por el alambre, no puede ejercer una fuerza sobre el propio alambre, del mismo modo que el campo gravitatorio terrestre no puede ejercer una fuerza sobre la tierra misma sino solamente sobre otro cuerpo. En la figura señalada, no existe una fuerza magnética sobre el conductor porque no hay presente ningún campo magnético externo.

La magnitud del campo magnético B en un punto alejado del conductor a una distancia "r" varía directamente con la intensidad de la corriente I que fluye por el conductor e inversamente proporcional a la distancia "r". Esto se puede escribir como :

$$B = constante \times \left(\frac{I}{r}\right)$$

el valor de la constante de proporcionalidad, si el medio presente es el vacío y se utilizan unidades de S.I. se escribe generalmente como

$$\frac{\mu_o}{2\pi} = 2 \times 10^{-7}$$

donde $\mu_o = 4\pi \times 10^{-7} \frac{T.m}{A}$. se conoce como la permeabilidad del espacio vacío. Entonces la magnitud del campo magnético se escribe :

$$B = \left(\frac{\mu_o}{2\pi}\right)\left(\frac{I}{r}\right)$$

Poco tiempo después de que Oersted descubriera que un conductor portador de corriente, genera un campo magnético que desviaba la aguja de una brújula magnética, Ampére propuso que un segundo conductor con corriente colocado cerca del primero experimentaría una fuerza de origen magnético.

La magnitud y dirección de la fuerza que le produce a este segundo conductor el campo externo creado por la corriente circulando en el primer alambre puede ser calculado por la expresión antes estudiada $F_{21} = I_2 B_1 L \operatorname{sen}\theta$ y la RMD.Debido a la Tercera Ley de Newton, el alambre 1 debe entonces sentir una fuerza $F_{12} = -F_{21}$.

Este análisis lo podemos resumir en el siguiente enunciado acerca de conductores rectos y paralelos que conducen corriente :

"Dos conductores largos, rectos y paralelos que conducen corriente en la misma dirección, se atraen entre sí, y si conducen corrientes en dirección y sentido opuesta se repelen."

Ejemplo 1.
Un haz de electrones viaja a 3.0 x 10^6 m/s a través de un campo magnético uniforme. La inducción del campo magnético es de 4.0 x 10^{-2} T.
El haz se dirige perpendicularmente hacia el campo magnético. ¿Cuál es la magnitud de la fuerza sobre cada electrón en el haz.
Datos:

v = 3.0 x 10^6 m/s
B = 4.0 x 10^{-2} T
q = 1.6 x 10^{-19} C

F = Bqv
F = 4 x 10^{-2} T x 1.6 x 10^{-19} x 3 x 10^6 m/s

F = 1.9 x 10^{-14} N

Esta configuración entre alambres conductores largos y paralelos se utiliza para definir el Ampére.

Ampére : es la corriente en cada alambre que produciría una fuerza de 2x10^{-7} Newtons por metro de longitud cuando los alambres de sección transversal despreciable se encuentran separados en el vacío una distancia de un metro.

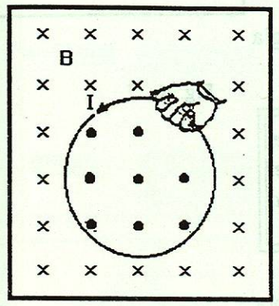


Fig. No. 6.

En el presente capítulo se han estudiado los efectos magnéticos, como una propiedad inseparable de la corriente eléctrica. Ampére, a principios del siglo XIX reconoció que una simple espira con corriente origina un campo magnético asociado con momentos dipolares magnéticos de partículas fundamentalmente subatómicas, como electrones, protones y protones y neutrones que se relacionan con sus momentos angulares de spin intrínsecos(visión microscópica de los efectos magnéticos).De manera análoga, Ampére razonó que los efectos magnéticos asociados a un imán permanente se origina por "anillos" de corriente muy pequeños dentro del imán.

Síntesis de la hipótesis de Ampére :

"Concibo a los fenómenos presentados por los imanes considerándolos como si fueran ensambles de corrientes eléctricas muy pequeños alrededor de sus partículas."

Ejemplo 3
Un alambre de 10 centímetros de largo se coloca perpendicularmente a un campo magnético uniforme. El acampo tiene una inducción de 0.060 teslas. La corriente en el alambre es de 4 amperes. Determina la magnitud de la fuerza.
Datos:
L = 1 x 10^{-1} m
B = 6 x 10^{-2} T
I = 4 A.

F = BIL

F = (6x10^{-2} T)(4A x 1x 10^{-1}m)

F = 2.4 x 10-2 N

La figura # 6 muestra una sencilla espira de alambre por la que fluye una corriente I, en el sentido opuesto al movimiento de las manecillas del reloj, tal y como se indica. Si se aplica la RMD-2 para determinar la dirección del campo magnético B en la parte superior de la espira, vemos que el campo B debido a ese segmento de la espira, señala hacia afuera del papel por debajo y hacia adentro del papel por encima de ese segmento del conductor. Si repetimos la aplicación de la RMD-2 en cualquier segmento de la espira concluiremos que la corriente que fluye en la espira en contra de las manecillas del reloj produce un campo magnético que sale hacia afuera de la página en la parte interior de la espira, y hacia adentro de la página en el área externa de la espira.

Este patrón de campo descrito, es muy similar al que produce un imán de barra corto, esto significa que desde el punto de vista de los efectos magnéticos producidos sobre el ambiente externo, no es posible distinguir entre una espira pequeña y un imán pequeño. De una manera análoga sus respuestas a un campo magnético externo son también idénticas.

En particular, sabemos que pequeñas agujas imantadas experimentan un torque dentro de un campo magnético uniforme que tiende a alinearlos con las líneas del campo(experimento de Gilbert). Del mismo modo podemos esperar entonces que que una espira con corriente experimente también un torque que tiende a alinearla con el campo magnético.

Resulta conveniente introducir una nueva magnitud vectorial para explicar este efecto magnético sobre la espira con corriente, el Momento Magnético "μ" cuya magnitud está dada por : $\mu = IA$

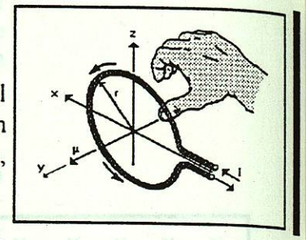


Fig. No. 7.

donde A es el área de la espira (sin importar su forma) y cuya dirección es la del campo magnético debido a la espira con corriente en su centro. La espira con corriente, al colocarse en la región ocupada por un campo magnético externo, experimentará un torque que tiende a alinear a "m" y a B (Efecto Motor).

La dirección del vector Momento Magnético se determina mediante la regla de la mano derecha # 3 (RMD-3)

RMD-3 : "Si la mano derecha circunda la espira o bobina de corriente, de modo que los dedos señalan en dirección de la corriente, entonces el pulgar apuntará en la dirección del vector momento magnético.(La misma dirección de B dentro de la espira)

La determinación de la magnitud del campo magnético debido a una sola espira con corriente en un punto arbitrario del espacio está fuera del alcance de la herramienta matemática de este curso, ya que requiere del uso del cálculo infinitesimal. Mediante consideraciones de simetría es posible determinar en el centro de la espira el campo mediante la siguiente expresión :

$$B = \frac{(\mu_o I)}{2r}$$

Un dispositivo eléctrico que consiste de un alambre largo devanado en una hélice fuertemente apretada y conductor de una corriente I , llamado Solenoide suele utilizarse para crear un campo magnético uniforme que a menudo acelera a un material magnético por ejemplo en los timbres caseros ,en los altavoces etc. El efecto de utilizar varias espiras como las analizadas anteriormente nos conduce a una nueva expresión para la magnitud del campo :

$$B = \mu_o I n$$

donde n = # de espiras por unidad de longitud.

Un Toroide se puede considerar como un Solenoide doblado en forma de rosca, la expresión para la magnitud del campo de este dispositivo nos queda :

$$B = \frac{\mu_o I N}{2 \pi r} \qquad \textit{donde } N = \# \textit{ total de espiras.}$$

Ejemplo 3.
Una corriente de 5 A fluye por un alambre de 1 metro de largo. El alambre está colocado perpendicularmente a un campo magnético uniforme. La fuerza sobre el alambre es de 0.2 newtons. ¿Cuál es la magnitud de la intensidad del campo magnético.
Datos:
F = 0.2 N
I = 5 A
L = 1 m

$$B = \frac{F}{IL}$$

$$B = \frac{0.2\ N}{(5\ A)(1\ m)}$$

$$B = 0.04\ \frac{N}{A\text{-}m}$$

$$B = 0.04\ T$$

D.- INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA

La Revolución industrial que transformó al mundo hace más de un siglo se basó en tres adelantos científicos principales : la invención de la máquina de vapor y el desarrollo de las máquinas térmicas gracias a la Termodinámica, el descubrimiento de que las fuerzas para girar los motores podían producirse por la interacción de corrientes eléctricas con campos magnéticos y el descubrimiento de que las corrientes pueden producirse cambiando campos magnéticos. Ya se han analizado los dos primeros adelantos ; ahora investigaremos el tercero.

D.1. FEM INDUCIDA

El descubrimiento de que las corrientes eléctricas generan campos magnéticos fue hecho por el físico danés Hans Christian Oersted en 1820. Este nuevo conocimiento de la naturaleza dio lugar a intensas investigaciones de los fenómenos relacionados. Uno de los caminos de experimentación fue el que siguieron aquellos que querían encontrar la respuesta a la pregunta :"*Si las corrientes producen campos magnéticos, ¿no es posible que los campos magnéticos produzcan corrientes ?*" Unos diez años más tarde, Michael Faraday (1791-1867) demostró en Inglaterra que la respuesta a esta pregunta era afirmativa ; éste hallazgo también lo realizó en forma independiente Joseph Henry (1797-1878) en Albany, Nueva York, debido a que sólo se publicó en Estados Unidos y pocas personas supieron de él, sus experimentos tuvieron poca influencia en los avances científicos de la época.

Veamos un experimento sencillo, similar a como lo hizo Faraday para demostrar que los campos magnéticos podían producir corriente.

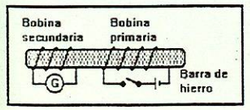
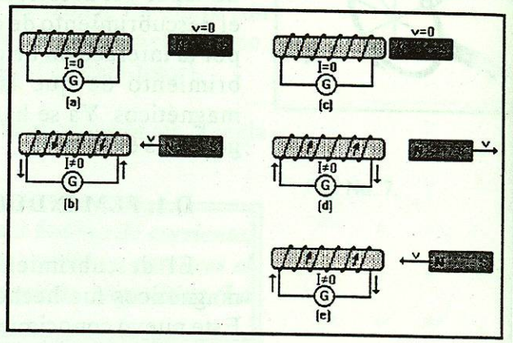


Fig. No. D-1. Sólo existe una corriente inducida en la bobina secundaria cuando cambia la corriente en la bobina primaria.

En este experimento se usa el sencillo equipo de la figura D.1. Se observa que se trata de dos circuitos simples en serie. Uno consiste en una batería y un interruptor conectados en serie por medio de un largo alambre enrollado alrededor de una varilla de hierro dulce ; a este arreglo se le llama ***bobina primaria*** porque está conectado a la batería. Un segundo alambre independiente del primero, también está enrollado alrededor de la varilla. Esta bobina que está en serie con un galvanómetro, pero, que no contiene una batería en su circuito, se conoce como *bobina secundaria*. Como no hay batería en el circuito de la bobina secundaria, podría imaginarse que la corriente a través de él siempre es cero. Sin embargo, sucede algo sorprendente al abrir o cerrar el interruptor del circuito primario. En ese instante, la aguja del galvanómetro se mueve y regresa acero. En otras palabras, durante un instante se induce una corriente en el circuito de la bobina secundaria. Es como si el circuito secundario tuviera una batería(una fuente de fem) durante el breve periodo en que tarda el interruptor en abrirse o cerrarse. Decimos que durante ese instante existe una *fem inducida* en la bobina secundaria. Otra

característica que se puede observar, de la corriente y la fem inducidas es que : la corriente de corta duración va en una dirección cuando se cierra el interruptor y en dirección contraria cuando se abre. Esto nos dice que la dirección de la fem inducida depende de si la corriente de la bobina primaria aumenta o disminuye.

En la figura D.2 se presenta un experimento similar, que comprende un imán de barra y una bobina en serie con un galvanómetro. Cuando el imán está estacionario junto a la bobina, como en *a* y *c*, no hay corriente en la bobina. Sin embargo, al mover el imán con respecto a la bobina aparece una corriente en la bobina, como se ilustra en *b*, *d* y *e*. Vemos entonces que existe una fem inducida en la bobina sólo cuando el imán y la bobina están en movimiento relativo. *No hay fem inducida cuando las condiciones no cambian.*



FigD2.- La corriente se induce en la bobina sólo cuando el imán se mueve con respecto a la bobina. La dirección de la corriente depende de la dirección del movimiento del imán y de la dirección del campo del imán.

Hay dos formas de analizar este efecto. En una se usa el hecho de que una carga que se mueve por un campo magnético experimenta una fuerza. Aunque en la figura D.2 se muestra el imán en movimiento, ocurren exactamente los mismos efectos si el imán se mantiene fijo y se mueve la bobina. Las cargas libres del alambre experimentan una fuerza , etc.( ), porque se mueven en el campo magnético del imán. Fluyen por la acción de esta fuerza y por lo tanto originan la corriente inducida.

Este enfoque explica la relación entre la fem inducida y los fenómenos que hemos estudiado. Sin embargo, hay otro método que es más útil para la mayoría de las situaciones prácticas. Este método comprende el concepto de flujo magnético.

D.2.- FLUJO MAGNÉTICO

Faraday explicó la fem inducida en una bobina en términos de una cantidad llamada *flujo magnético*. Para hacerlo, desarrolló una regla para elaborar una representación gráfica de las líneas de campo magnético. Si el campo magnético en una región del espacio tiene magnitud *B*, esta magnitud se representa gráficamente con el convenio de dibujar las líneas de campo con cierta separación según su magnitud. De esta manera, los campos más fuertes se representan con líneas más próximas y los campos más débiles se representan con líneas más separadas. Otra forma de decirlo es que la *densidad* de las líneas de campo en el dibujo es proporcional al valor de *B*.

La forma de medir esta densidad de líneas es construyendo una superficie imaginaria perpendicular a las líneas y luego contando el número de líneas por unidad de área que pasan por la superficie, como en la figura D.3. Podemos ver que pasan 20 líneas por el área de 1 m2. Podemos definir que esta densidad de líneas represente la magnitud de campo que deseamos, por ejemplo, 1 T. Entonces, si en el mismo dibujo hay una región de 10 líneas por metro cuadrado, representaría un campo con la mitad de la magnitud (0.5 T), mientras que una región con 40 líneas por metro cuadrado representaría un campo de 2 T, etcétera. De esta manera, la interpretación gráfica de *B* es que *B* es proporcional a la densidad de las líneas de campo, que es el número de líneas de campo que pasan por una región dividido entre el área.

De esta interpretación se tiene que el número de líneas por el área *A* representa a B A (*B* perpendicular a *A*). Esta cantidad se denomina *flujo magnético* por *A* y se designa con el símbolo Φ :

flujo magnético a través de $A = \Phi = B\,A$ (ec. D.1)

Es evidente que las unidades del flujo magnético en el Sistema Internacional son . Esta combinación de unidades recibe un nombre especial : el *weber (Wb)*. Así,

o, a la inversa,

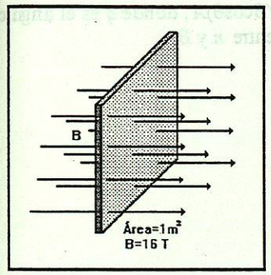


Fig D.3.- Empleando el convenio de dibujar un número de líneas magnéticas proporcional a *B* por unidad de área perpendicular a las líneas de campo.

Debido a la segunda expresión, el campo magnético B también se conoce como *densidad de flujo magnético*.

Es muy importante recordar que hemos considerado que *B* es perpendicular al plano del área *A*, como se muestra en la figura D.4a. Si rotamos *A* en la forma ilustrada en la figura D.4b, no pasan líneas de campo por el área y Φ = 0. El flujo también puede ser negativo, como se muestra en la figura D.4c, donde n y B tienen sentidos opuestos.

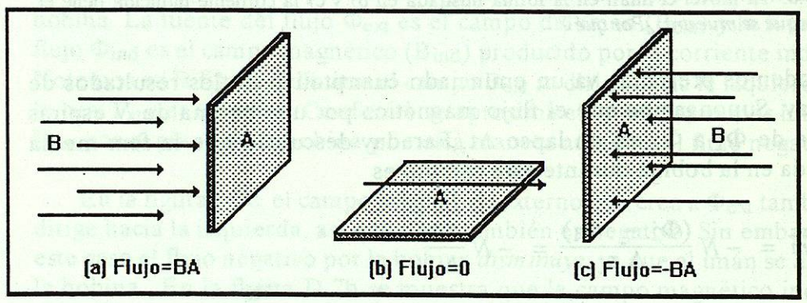


Fig D.4.- El flujo magnético por un área depende de la orientación relativa del área y las líneas de campo.

Una forma sencilla de escribir la manera en que F depende de la orientación es describiendo la dirección de la *normal,* n, del área *A*. En la figura D.5 se muestra que la componente de *B* sobre la normal es . Por consiguiente, la expresión general del flujo magnético es

$$\Phi = (B\cos\theta)\,A = BA\cos\theta \qquad \textbf{(ec. D.2)}$$

donde θ es el ángulo entre B y n.

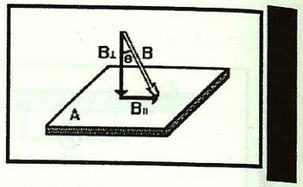


Fig D.5.- El flujo magnético Φ *por un área A* es el producto de *A* por la componente del *campo magnético B* sobre la *normal al área, n, Así,* Φ= (*B*cosθ)*A*, donde *q* es el ángulo entre *n* y *B*.

D.3.- LEY DE FARADAY Y LEY DE LENZ

El experimento que se muestra en la figura D.6 también confirma la conclusión de Faraday. Observemos que, como las líneas de campo son más densas cerca del imán, el flujo por la bobina aumenta al acercar el imán. Se observa una corriente en la bobina mientras el imán se va acercando. No hay cambio en el flujo cuando el imán está inmóvil, de manera que no se induce corriente en la bobina. Al quitar el imán, como en la figura D.6c, el flujo *disminuye* y el galvanómetro muestra una corriente en sentido opuesto. Los sentidos de las dos corrientes indican que la polaridad de la fem inducida por el acercamiento del imán es opuesta a la que induce el imán que se aleja ; esta situación se presenta en las figuras D.6b y D.6c.

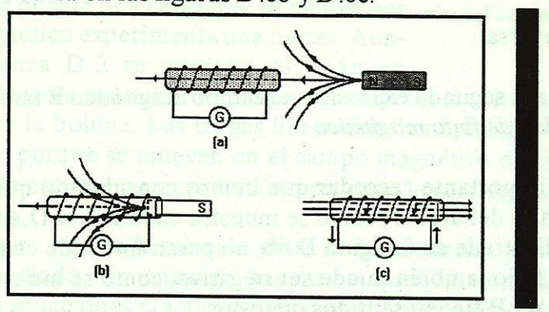


Fig D.6.- Al mover el imán en la forma ilustrada en b) y c) la corriente inducida tiene el *sentido que se muestra. ¿Por qué ?*

Podemos presentar ya un enunciado cuantitativo de los resultados de Faraday. Supongamos que el flujo magnético por una bobina de *N* espiras cambia de Φ_1 a Φ_2 en un lapso Δt. Faraday descubrió que la fem media inducida en la bobina durante este cambio es

$$\overline{fem} = -N\frac{(\Phi_2 - \Phi_1)}{\Delta\tau} = -N\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

Esto se conoce como *ley de la inducción magnética de Faraday.* Más adelante se explicará el significado del signo menos en al ecuación. Es uno de

los principios más importantes de la electricidad y el magnetismo y es la base de los generadores, los motores eléctricos y otros dispositivos importantes.

Como sucede con cualquier otra corriente, esta corriente inducida produce un campo magnético propio. En la figura D.7 se muestran las direcciones del campo inducido(B_{ind}) por los dos movimientos del imán que aparece en las figuras D.6b y c. Verifica que las direcciones indicadas para B_{ind} en la figura D.7 concuerdan con la regla de la mano derecha.

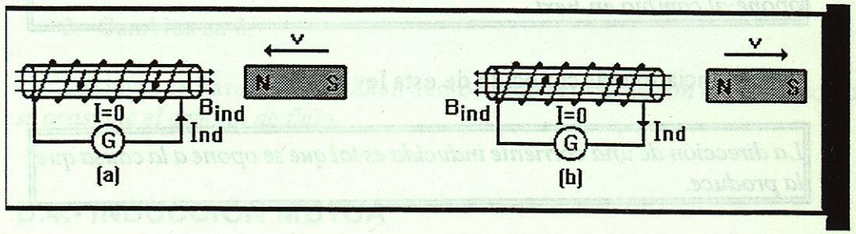


Fig D.7.- La corriente inducida crea un flujo magnético en la bobina, que tiende a oponerse al flujo producido por un campo externo cambiante(que no aparece en la figura). a) El polo norte del imán se aproxima a la bobina. b) El polo norte del imán se aleja.

Es importante tener presente que el flujo magnético Φ puede ser positivo o negativo, dependiendo de si el ángulo θ entre B y n está entre 0° y 90° entre 90° y 180°. En otras palabras, si invierte la dirección del campo magnético por un área, el signo de Φ también se invierte. En los análisis subsecuentes diremos que la normal al plano de la bobina y el imán externo están sobre el eje x. De esta manera podemos decir que el flujo es positivo cuando el campo magnético tiene una componente en la dirección + x y negativo cuando tiene una componente en la dirección -x.

En las situaciones presentadas en las figuras D.6 y D.7, hay *dos* fuentes de campo magnético y por lo tanto dos fuentes de flujo magnético en la bobina. La fuente del flujo Φ_{ext} es el campo del imán (B_{ext}) y la fuente del flujo Φ_{ind} es el campo magnético (B_{ind}) producido por la corriente inducida. Notemos en la figura D.6b que el campo B_{ext} se dirige hacia la izquierda, por lo cual F_{ind} es negativo. Conforme se aproxima el imán, pasan más líneas de B_{ext} por el plano de la bobina y de esta manera aumenta el flujo negativo.

En la figura D7c, el campo magnético externo que crea a Φ_{ext} también se dirige hacia la izquierda, así que Φext también es negativo. Sin embargo, en este caso el flujo negativo por la bobina *disminuye*, ya que el imán se aleja de la bobina. En la figura D.7b se muestra que le campo magnético inducido B_{ind} que produce la corriente inducida se dirige ahora hacia la *izquierda*. Por consiguiente, el flujo Φ_{ind} que crea es negativo. Este flujo Φ_{ind} negativo reemplaza a parte del flujo Fext que disminuye por el alejamiento del imán. Una vez más, *el flujo inducido se opone al cambio en el flujo externo.*