TEMA 7

EL CAMPO MAGNÉTICO

7.1. MAGNETISMO

Los trabajos de Oersted [1] en 1819, demostraron que una aguja imantada susceptible de girar libremente alrededor de su eje, y situada cerca de un hilo por el cual circula una corriente eléctrica, tiende a colocarse con su eje longitudinal perpendicular al conductor.

Doce años después, Faraday observó que se producía corriente eléctrica en un circuito, cuando en otro próximo se establecía o se interrumpía una corriente. Poco tiempo después, descubrió que el movimiento de un imán acercándose o alejándose de un circuito producía el mismo efecto que el del caso anterior. De forma simultanea, Joseph Henry[2] descubrió que podía obtenerse corriente en un circuito eléctrico por el movimiento de un imán en sus proximidades.

Experiencias posteriores realizadas por Biot[3], Savart[4] y Ampère[5], permitieron establecer

[1] Hans Chistian Oersted (1777-1851). Físico danés que en 1819 descubrió el efecto que lleva su nombre, y que representó el comienzo del electromagnetismo.

[2] Joseph Henry (1797-1878). Físico norteamericano. Es autor de importantes trabajos de electromagnetismo. Perfeccionó el electroimán (1826) y estableció una línea telegráfica de una milla de longitud (1831), pero sobre todo es conocido por sus descubrimientos en 1832 de la autoinducción y de las extracorrientes. Se anticipó casi un año al descubrimiento de Farady, pero como Faraday fue el primero que publicó sus descubrimientos, se le atribuyen en exclusiva los méritos del mismo.

[3] Jean-Baptiste Biot (1774-1862). Físico francés. En 1820 determinó con Savart el valor del campo magnético engendrado por un conductor rectilíneo recorrido por una corriente eléctrica.

[4] Félix Savart (1791-1841). Físico francés. Es el autor, conjuntamente con Biot, de experiencias de medidas de los campos magnéticos creados por corrientes eléctricas.

[5] André Marie Ampère (1775-1836). Matemático, físico y filósofo francés. Tras asistir en 1820 a la repetición de la experiencia de Oersted (desviación de una aguja imantada por una corriente eléctrica) edificó la teoría del origen electrodinámico de las acciones magnéticas. Estudió la relación entre las corrientes eléctricas y el magnetismo. Puede considerarse como precursor de la teoría electrónica de la materia. Todos los descubrimientos

la expresión que permite calcular la inducción magnética en cualquier punto del espacio que rodea a un conductor por el que circula una corriente.

7.2. CAMPO MAGNÉTICO. INDUCCIÓN

Una carga eléctrica móvil crea un campo magnético en el espacio que la rodea, y es éste campo el que ejerce una fuerza de carácter magnético sobre cualquier carga que se desplace en él.

Se dice que existe un campo magnético en un punto, si además de la fuerza electrostática, se ejerce una fuerza sobre una carga en movimiento que pase por dicho punto.

El campo magnético es una magnitud vectorial y se representa por líneas de inducción. La dirección de la línea de inducción es tal, que en cada punto coincide con la del vector inducción magnética.

En el Sistema Internacional, una línea de inducción se denomina *Weber*, símbolo **Wb**, que es la unidad de flujo magnético. La inducción magnética tiene como unidad el *Tesla*[6], símbolo **T**.

$$Tesla = Weber.m^{-2} \quad (T = Wb.m^{-2})$$

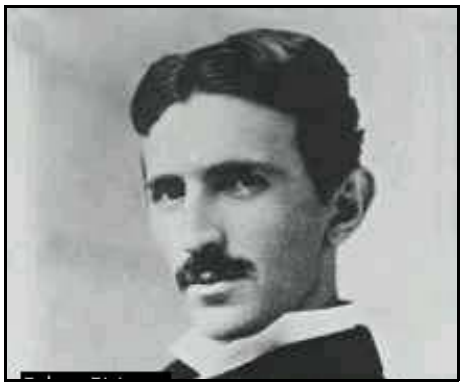
El flujo magnético a través de una superficie, es igual al número total de líneas de inducción que atraviesa dicha superficie.

$$\Phi = \int \vec{B}.d\vec{A} \qquad (7.1)$$

los expuso en 1826 en su memoria *Sobre la teoría matemática de los fenómenos electrodinámicos deducidos únicamente de la experiencia*. Creó un vocabulario de electricidad introduciendo las palabras *corriente* y *tensión*.

[6]Nikola Tesla (Smiljan, Croacia 1856-Nueva York, 1943) Físico e ingeniero de origen Croata. En 1881 descubrió el principio del campo eléctrico rotatorio. En 1893 se adoptó, por la central hidroeléctrica de las cataratas del Niágara, el sistema de corriente alterna polifásico de Tesla. En 1891 inventó la *bobina de Tesla*, un transformador-oscilador de alta frecuencia y alto voltaje que se sigue utilizando en los equipos electrónicos de radio y televisión. En 1956 se adoptó el nombre de *tesla* para la unidad de densidad de flujo magnético en el Sistema Internacional. Un tesla equivale a 10.000 gauss.

Nikola Tesla fue el inventor del primer motor eléctrico práctico de corriente alterna, vendió su patente a George Westinghouse, quien le dio un uso comercial en empresas como el proyecto energético de las cataratas del Niágara. Tesla es famoso también por otros inventos, como los generadores de alta frecuencia o la bobina de Tesla,un transformador empleado en radiocomunicación.



Nikola Tesla

Donde:

$\vec{B}$: Es el vector inducción en el centro de la superficie.

$d\vec{A}$: Es el vector que representa la superficie cortada por el flujo magnético.

7.3. FUERZA SOBRE UNA CARGA MÓVIL

Una carga móvil positiva +**q,** queda sometida a una fuerza de origen electromagnética, cuando se desplaza en el seno de un campo magnético de inducción **B**.

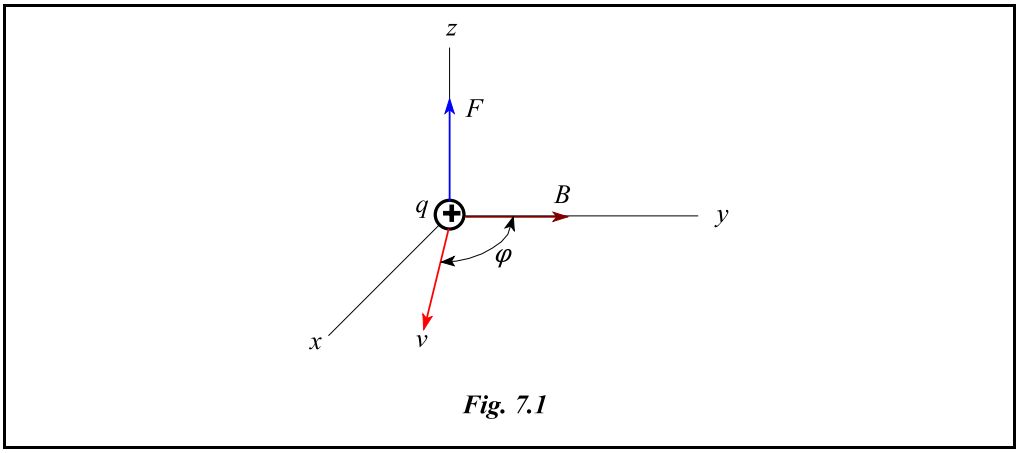


Fig. 7.1

La fuerza **F** viene dada por la expresión:

$$\vec{F} = q\vec{v} \wedge \vec{B} \qquad (7.2)$$

La dirección y sentido de **F** nos la da la regla de la mano izquierda (Fig. 7.2).

El módulo de **B,** de acuerdo con (7.2), es:

$$B = \frac{F}{q.v.sen\varphi}$$

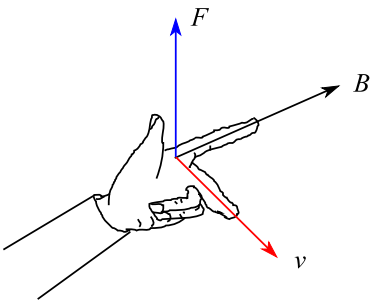


Fig. 7.2

A partir de esta expresión se puede definir la inducción magnética: *El valor de la inducción magnética en un punto, es el cociente obtenido al dividir la fuerza que se ejerce sobre una carga móvil que pasa por el punto, por el producto de la carga y de la componente de su velocidad perpendicular a la inducción.*

7.4. FUERZA SOBRE UN CONDUCTOR QUE TRANSPORTA UNA CORRIENTE.

Sobre los electrones en movimiento presentes en un conductor que transporta una corriente, y que se encuentra en el seno de un campo magnético, se ejercen fuerzas de origen electromagnéticas. Estas fuerzas unitarias se transmiten a la masa del conductor, y por tanto, el conductor en conjunto experimenta una fuerza, o un momento, o ambos a la vez.

Sea un conductor de longitud ***l*** y sección **A** que transporta una corriente de intensidad **i**, en el seno de un campo magnético uniforme de inducción **B** (Fig.7.3).

Como consecuencia de la circulación de la corriente eléctrica en el conductor, se verifica:

$$i = n.q.v.A$$

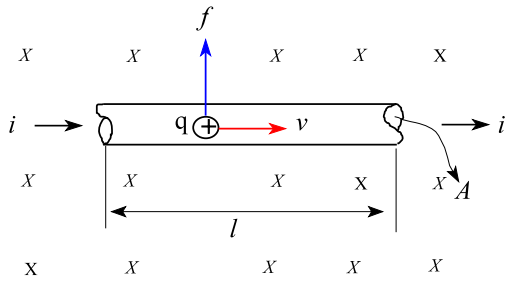


Fig. 7.3

La fuerza elemental sobre una carga **q,** que se mueve con velocidad **v**, es:

$$\vec{f} = q.\vec{v} \wedge \vec{B} \tag{7.3}$$

El número de cargas libres, susceptibles de desplazarse, en el conductor de la Fig. 7.3, es:

$$N = n.l.A$$

Siendo:

n : Número de cargas libres por unidad de volumen.
A : Sección del conductor.
l : Longitud del conductor.

Por tanto la fuerza resultante sobre el conductor es:

$$\vec{F} = N.\vec{f} = n.l.A.q.\vec{v} \wedge \vec{B} \tag{7.4}$$

Pero en (7.4) se verifica:

$$l.\vec{v} = v.\vec{l} \tag{7.5}$$

Sustituyendo (7.5) en (7.4) se obtiene:

$$\vec{F} = n.A.q.v.(\vec{l} \wedge \vec{B}) \tag{7.6}$$

Sabemos que la intensidad viene definida por:

$$n.A.q.v = i \tag{7.7}$$

Por tanto, sustituyendo (7.7) en (7.6), resulta:

$$\vec{F} = i.(\vec{l} \wedge \vec{B}) \tag{7.8}$$

La expresión (7.8) permite calcular la fuerza electromagnética que se produce sobre un conductor rectilíneo de longitud ***l*** recorrido por una corriente eléctrica de intensidad **i,** cuando se encuentra sometido a un campo magnético de inducción **B**.

Si el conductor no es rectilíneo; el campo no es uniforme; o ambas cosas suceden a la vez, en cualquier elemento diferencial del conductor se verifica:

$$d\vec{F} = i.d\vec{l} \wedge \vec{B} \tag{7.9}$$

7.5. FUERZA Y MOMENTO SOBRE UN CIRCUITO COMPLETO.

La fuerza y el momento resultante sobre un circuito completo que se encuentre situado en el seno de un campo magnético, se puede calcular a partir de la ecuación (7.9) integrándola a lo largo del circuito.

Como casos concretos se van a estudiar los tres siguientes:

Caso 1. Cuadro rectangular.

La Fig. 7.4 representa un cuadro rectangular formado por un hilo conductor recorrido por una corriente eléctrica de valor **i**. En un momento determinado, la normal al plano del cuadro y el campo magnético, que se supone uniforme, está formando un ángulo **α**. El cuadro es susceptible de girar libremente alrededor de su eje **X'-X**.

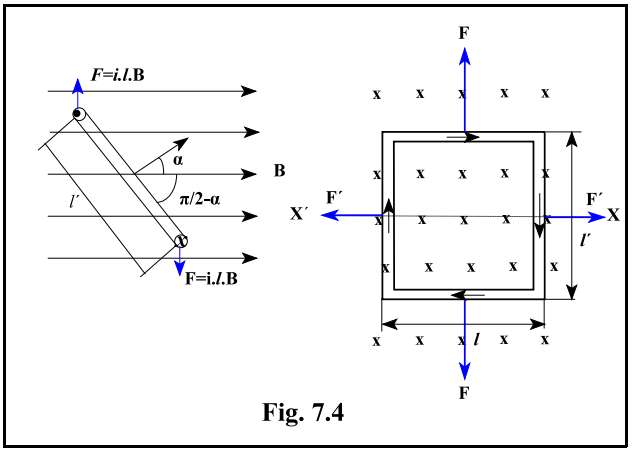


Fig. 7.4

Los lados ***l*** del cuadro son perpendiculares al campo magnético uniforme, por tanto (7.9) resulta:

$$d\vec{F} = i.d\vec{l} \wedge \vec{B} \quad ; \quad dF = i.dl.B$$

$$F = \int_0^l i.B.dl = i.B \int_0^l dl = i.B.l \qquad (7.10)$$

Los lados ***l´*** forman un ángulo **π/2- α** con el campo magnético **B**, luego el valor de las fuerzas **F´** son:

$$d\vec{F}' = i.d\vec{l} \wedge \vec{B} \quad ; \quad dF' = i.dl.B.sen(\pi/2-\alpha)$$

$$F' = \int_0^{l'} i.B.\cos\alpha.dl = i.B.\cos\alpha \int_0^{l'} dl = i.B.l'.\cos\alpha \qquad (7.11)$$

Las dos fuerza **F´** tienen la misma dirección, pero sentidos opuestos, y están aplicadas sobre el eje de giro del cuadro. Su resultante es nula, así como su momento. Sin embargo, las

fuerzas **F** tienen resultante nula pero su momento no lo es, ya que constituye un par capaz de hacer girar al cuadro. El momento resultante es:

$$\tau = 2.F.\frac{l'}{2}.sen\alpha \qquad (7.12)$$

Sustituyendo (7.10) en (7.12) resulta:

$$\begin{aligned} \tau &= .i.B.l.l'.sen\alpha \\ l.l' &= A \\ \vec{\tau} &= i.\vec{A}\wedge\vec{B} \end{aligned} \qquad (7.13)$$

El par (7.13) varía entre **0** (para **α = 0**) y el valor máximo (para **α=π/2**). El valor máximo se corresponde con la posición en la que el plano del cuadro es paralelo al campo magnético.

Si en vez de una espira, fuesen **N** lo suficientemente próximas, el par (7.13) valdría:

$$\begin{aligned} \tau &= N.i.B.l.l'.sen\alpha \\ \vec{\tau} &= N.i.\vec{A}\wedge\vec{B} \end{aligned} \qquad (7.14)$$

Caso 2. Espira circular.

Se trata de una espira que forma una circunferencia de radio **a** que está recorrida por una corriente **i**. Fig. 7.5.

El plano de la espira se supone que coincide con el **X-Z** , y las líneas de inducción se supone que son paralelas al eje **X´-X.**

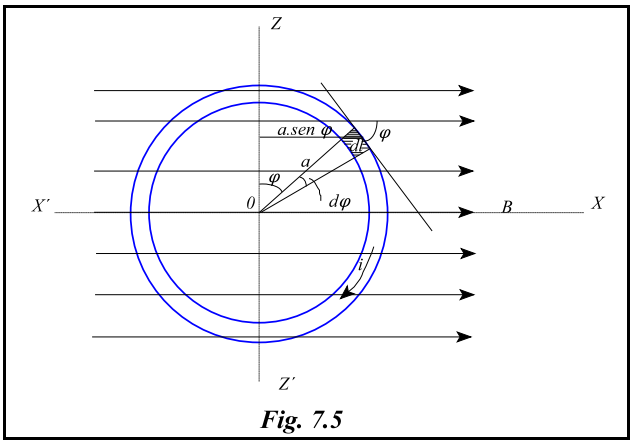


Fig. 7.5

Si tomamos un elemento **dl** en la espira, se obtiene:

$$dl = a.d\varphi \qquad (7.15)$$

Siendo φ el ángulo formado por el elemento **dl** y el vector campo.

La fuerza que se ejerce sobre el elemento de corriente $i.\vec{dl}$, está definida por el vector:

$$d\vec{F} = i.\vec{dl} \wedge \vec{B} \quad ; \quad dF = i.B.dl.sen\varphi \tag{7.16}$$

Sustituyendo (7.15) en (7.16) resulta:

$$dF = i.B.a.sen\varphi.d\varphi \tag{7.17}$$

La fuerza **dF** ejercerá un par que hará girar la espira alrededor de su eje **Z-Z´** y cuyo valor es:

$$d\tau = dF.a.sen\varphi \tag{7.18}$$

Sustituyendo (7.17) en (7.18) resulta:

$$d\tau = i.B.a^2.sen^2\varphi.d\varphi \tag{7.19}$$

Integrando (7.19) obtendremos el valor del par total sobre la espira:

$$\tau = \int \tau = i.B.a^2 \int_0^{2\pi} sen^2\varphi.d\varphi = i.B.a^2.\pi \tag{7.20}$$

Ahora bien $\pi.a^2 = A$, área del circulo que define la espira de radio **a**, por tanto (7.20) se puede expresar como:

$$\tau = i.A.B \tag{7.21}$$

Si el plano de la espira forma un ángulo **α** con el vector campo, el par valdrá:

$$\tau = i.A.B.sen\alpha \quad o\ bien \quad \vec{\tau} = i.\vec{A} \wedge \vec{B} \tag{7.22}$$

Caso 3. Solenoide.

Si devanamos un conjunto de espiras circulares de igual radio, cuyos planos sean paralelos, y muy próximas entre sí, obtenemos un solenoide (devanado helicoidal de hilo conductor).

Si se supone el solenoide situado en el seno de un campo magnético uniforme, de forma que su eje forme un ángulo **α** con el campo, el momento sobre el solenoide se puede considerar como **N** veces el valor de (7.22), es decir:

$$\vec{\tau} = N.i.\vec{A} \wedge \vec{B} \tag{7.23}$$