ELECTROMAGNETISMO

DEDUCCION DE LAS FORMULAS MAS IMPORTANTES PARTIENDO DE LA LEY DE AMPERE RELATIVA A LA ACCION ENTRE CORRIENTES

Por LEON GARZON RUIPEREZ

(Doctor en Ciencias Químicas y Catedrático de Física y Química del Instituto de Ponferrada)

SON harto conocidas las dificultades que hasta hace poco tiempo presentaba el estudio del Magnetismo y Electromagnetismo, habiendo contribuído eficazmente a allanar la mayoría de aquéllas la gran difusión que ha alcanzado el sistema M.K.S.A. racionalizado.

Subsisten aún cuestiones sobre las cuales urge se adopte un criterio único. Entre éstas merece citarse la de los nombres que han de asignarse a los vectores $\vec{B}$ y $\vec{H}$.

Tampoco es unánime el criterio que los autores adoptan en el desarrollo de la Teoría. En general puede decirse que no hay dos tratados que se ajusten a una misma idea directriz.

En la bibliografía que nos ha sido dable consultar no hemos visto ningún trabajo en el que se desarrolle el Electromagnetismo partiendo de la segunda ley de Ampère relativa a la acción entre corrientes; y como la deducción de las fórmulas fundamentales partiendo de la citada ley resulta más sencilla y más lógica que por los procedimientos ordinarios, hemos creído que tal vez pudiera tener cierto interés dar a conocer los resultados de nuestro trabajo.

1. LEY FUNDAMENTAL. ACCION MUTUA ENTRE DOS CORRIENTES PARALELAS.—La experiencia ha puesto de manifiesto que, entre dos corrientes paralelas, se ejercen fuerzas. Estas son atractivas, si las corrientes tienen el mismo sentido; y repulsivas en caso contrario. Este hecho constituye para nosotros la ley fundamental en su aspecto cualitativo.

El estudio cuantitativo del fenómeno permite escribir la siguiente fórmula, para la fuerza:

$$F = K \frac{i' \, i \, l}{a}, \qquad [1]$$

en la cual i e i' son las intensidades, que supondremos tienen el mismo sentido; a, la distancia entre los dos conductores, y l la longitud del conductor 2.

Las medidas realizadas han permitido determinar el valor de K:

$$K = 2.10^{-7} \frac{N}{A^2}$$

Conocido este valor, la fórmula [1] puede utilizarse, y de hecho se hace así, para definir el amperio. He aquí la definición: «Es la intensidad que,

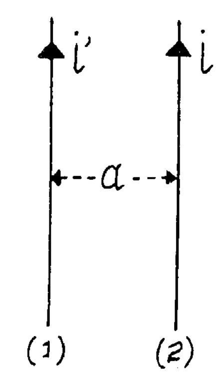

Fig. 1

circulando por dos conductores paralelos de longitud infinita y separados por una distancia de un metro en el vacío, ejerce sobre cada conductor una fuerza de 2.10^{-7} N por metro de longitud.» En lo que sigue escribiremos $K = \frac{\mu_0}{2\pi}$.

Supongamos fijo el conductor 1. En este caso el otro conductor será atraído hacia él con una fuerza calculable mediante la fórmula [1]. Del análisis de ésta se infiere que la fuerza depende, para un punto dado (a constante), de una magnitud característica de la corriente fija y de otra característica de la corriente móvil. Análogamente a como se hace en otras muchas cuestiones de la Física, podemos suponer que la corriente i crea a su alrededor un campo, que llamaremos de INDUCCION MAGNETICA, que se manifiesta por las interacciones que ejerce sobre corrientes situadas en él.

2. ACCION DE UNA INDUCCION SOBRE UNA CORRIENTE.—La fórmula [1] puede escribirse del modo siguiente:

$$F = \frac{\mu_0 i'}{2\pi a} \cdot il$$

El primer factor representa evidentemente la magnitud característica del conductor fijo. Representándola por B, podremos escribir:

$$B = \frac{\mu_0 i'}{2\pi a}$$

y por consiguiente:

$$F = i.l.B. \qquad [2]$$

Vamos a demostrar ahora que B es un vector. Recuérdese que el sentido del otro vector $\vec{l}$ coincide con el convencional asignado a la corriente. Si B no fuera un vector, la dirección y sentido de F deberían ser los mismos que los de $\vec{l}$, y hemos visto que no es así, pues F es perpendicular a l. Por consiguiente, hay que admitir que B es vector. El producto de l y B no puede ser escalar, por lo que habrá de ser vectorial.

La fórmula anterior deberá escribirse del modo siguiente:

$$\vec{F} = i\,\vec{l} \times \vec{B} \qquad [3]$$

El vector $\vec{B}$ es, por tanto, perpendicular al plano determinado por $\vec{l}$ y $\vec{F}$. Su sentido coincide con el de avance de un sacacorchos cuando al girar éste se pasa de $\vec{F}$ a $\vec{l}$.

La fórmula [3] es más general que la [2]. Desarrollando el producto se tiene:

$$F = i\,l\,B\,sen\,\varphi, \qquad [4]$$

siendo φ el ángulo formado por $\vec{l}$ y $\vec{B}$. Si $\vec{l}$ y $\vec{B}$ son perpendiculares, la fórmula anterior se reduce a la [2], como era de esperar. Si $\varphi = 0$, ó 180°, $F = 0$. No existe intersección alguna cuando la corriente se sitúa perpendicularmente cruzando a la que crea el campo.

La [2] permite definir la inducción B como fuerza por unidad de intensidad y unidad de longitud. Sus dimensiones son, por consiguiente, las siguientes:

$$\frac{N}{A.m}$$

3. ACCION DE UNA INDUCCION SOBRE UNA CARGA EN MOVIMIENTO.—Consistiendo una corriente eléctrica en un transporte de cargas,

cuyo sentido para las positivas coincide con el convencional a ella asignado, resulta plausible admitir que las acciones que experimenta la corriente i son el resultado de las ejercidas sobre las cargas circulantes. Vamos a ver cuál sería la fuerza de atracción que la inducción ejercería sobre una carga q aislada que se mueve según una dirección paralela a i' (y, por tanto, perpendicular a B) con la velocidad v.

Si en el tiempo t el espacio recorrido por q es l, se tiene:

$$i = \frac{q}{t} = \frac{q}{l/v} = \frac{q.v}{l}; \qquad i.l = q.v$$

Sustituyendo este valor en [2] resulta:

$$F = q.v.B \qquad [5]$$

Un razonamiento análogo al seguido anteriormente permite escribir la fórmula anterior así:

$$\vec{F} = q.\vec{v} \times \vec{B} \qquad [6]$$

o bien:

$$F = q.v.B.sen\,\varphi \qquad [7]$$

siendo φ el ángulo formado por $\vec{v}$ y $\vec{B}$. Para $\varphi = 90°$, el valor de F es máximo y vale $q.v.$B. Para $\varphi = 0$, ó 180°, F = 0. Por tanto, una carga que se mueve en la dirección de la inducción no se halla sometida a ninguna fuerza.

La [5] permite también definir B. Las unidades, en este caso, son:

$$\frac{New}{culomb \cdot \frac{m}{seg}} = \frac{New}{A.m}$$

INDUCCION CREADA POR UN ELEMENTO DE CORRIENTE. LEY DE BIOT Y SAVART.—Apliquemos la fórmula [4] a un conductor rectilíneo de longitud dl (elemento de corriente) por el que circula una corriente de intensidad i (fig. 2). En el centro de ese elemento de corriente actúa una inducción de valor B, debida a m unidades de masa magnética norte situadas en el punto A. El elemento dl es perpendicular al plano P que contiene el punto A.

El ángulo que forman $\vec{dl}$ y $\vec{B}$ es $180 - \varphi$. Se tiene, por tanto:

$$dF = i\,dl\,B\,sen\,\varphi$$

Recuérdese que $\vec{dF}$ es perpendicular a $\vec{dl}$ y $\vec{B}$. El sentido, dado por la regla del sacacorchos o la de los tres dedos de la mano izquierda, es hacia fuera del plano del dibujo.

El valor de B es, como se sabe por Magnetismo,

$$B = \frac{\mu_0 m}{4\pi r^2}$$

Por consiguiente, se tiene:

$$dF = \frac{\mu_0 m}{4\pi r^2} \, i \, dl . sen \, \varphi$$

Si la masa magnética m permanece fija, el elemento de corriente se mueve. Por el contrario, si éste es el que permanece fijo, el principio de acción

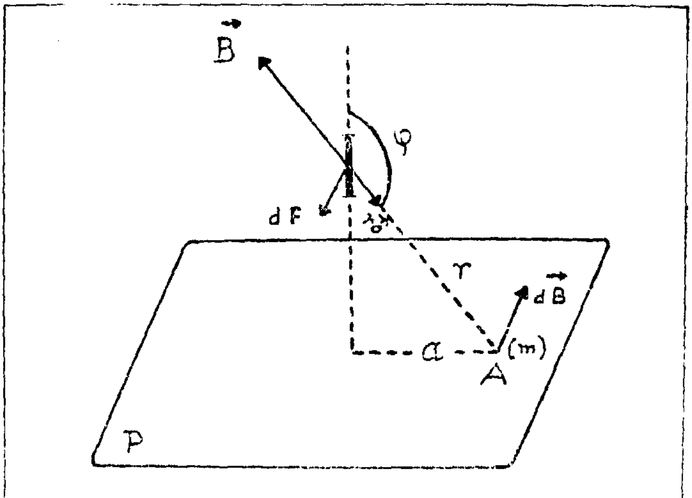

Fig. 2

y reacción nos dice que aquélla se moverá por la acción de una fuerza igual y contraria a dF, lo cual pone de manifiesto que en el punto A existe una inducción magnética dB, cuyo origen se debe al elemento de corriente y cuyo valor es:

$$dB = \frac{dF}{m} = \frac{\mu_0 \, i \, dl \, sen \, \varphi}{4\pi r^2} \qquad [8]$$

o bien, en forma vectorial:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 i}{4\pi r^2} \, \vec{dl} \times \vec{r_0} \qquad [9]$$

$\vec{r_0}$ es el vector unidad representado en la figura 2.

La [8] constituye la expresión de la llamada Ley elemental de Biot y Savart.

INDUCCION CREADA POR UNA CORRIENTE RECTILINEA INDEFINIDA.—Para obtener en un punto A la inducción producida por una corriente rectilínea indefinida, bastará sumar las contribuciones debidas a todos los elementos de corriente. Esta suma es la integral de la expresión [8], que nosotros no vamos a calcular, ya que este valor es, según indicamos oportunamente, el factor dependiente del conductor que crea la inducción que, en el caso actual, es una corriente de intensidad i. Por consiguiente:

$$B = \frac{\mu_0 i}{2\pi a} \qquad [10]$$

INDUCCION EN EL CENTRO DE UNA ESPIRA CIRCULAR.—La integración de la ecuación [8] reviste gran sencillez en este caso, pues la única variable es dl. Tanto φ como r son constantes; φ vale 90° y r es el radio de la espira.

Por consiguiente, se tiene:

$$B = \frac{\mu_0 i}{4\pi r^2}\int dl$$

La integral $\int dl$ es, evidentemente, igual a la longitud de la espira, o sea $2\pi r$. Para B resulta el siguiente valor:

$$B = \frac{\mu_0 i}{2r} \qquad [11]$$

INDUCCION CREADA POR UNA CARGA EN MOVIMIENTO.—Sea una carga dq que en el tiempo dt recorre un elemento de longitud dl.

La intensidad equivalente a este desplazamiento de la carga es:

$$i = \frac{dq}{dt} = \frac{dq}{dl/v} = \frac{v.dq}{dl}$$

de donde:

$$i\,dl = v.dq$$

Sustituyendo este valor en la [8], se tiene:

$$dB = \frac{\mu_0\, dq\, v.sen\,\varphi}{4\pi r^2}$$

Para una carga q, sería:

$$B = \frac{\mu_0 q \; v . sen \varphi}{4\pi r^2}$$

y en forma vectorial,

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 q}{4\pi r^2} \vec{v} \times \vec{r_0} \qquad [12]$$

$\vec{B}$ es perpendicular al plano de $\vec{v}$ y $\vec{r_0}$, como se infiere de lo expuesto anteriormente (fig. 3).

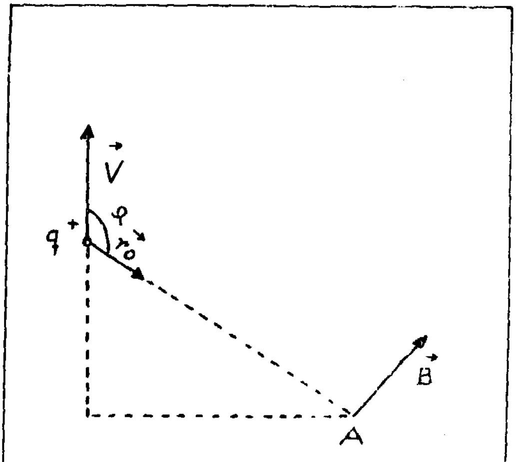

Fig. 3

Tiene mucho interés para la deducción de varias fórmulas del Electromagnetismo, la magnitud $\oint \vec{B}\, \vec{dl}$, que se denomina circulación del vector $\vec{B}$ a lo largo de una línea cerrada, cuyo elemento de longitud es $\vec{dl}$.

Para el caso de una corriente rectilínea indefinida, la magnitud considerada es fácil de calcular, cuando el camino de integración es una línea de inducción. A lo largo de esta línea el vector B se mantiene constante. Por consiguiente, la integral anterior se reduce a:

$$B \oint dl = \frac{\mu_0 i}{2\pi a} \cdot 2\pi a = \mu_0 i.$$

Este resultado es completamente general y se conoce con el nombre de Teorema de Ampère: el trabajo realizado por el vector $\vec{B}$ en rodear una corriente de intensidad i es igual a $\mu_0 i$, independientemente de la forma de la línea descrita. Como es sabido, este teorema permite obtener de manera sencilla el valor de la inducción en el interior de un solenoide.

CONCLUSIONES.—De todo lo que hemos expuesto se infiere que la inducción es debida al desplazamiento de cargas eléctricas. Esta inducción, por otra parte, se pone de manifiesto sobre cargas en movimiento.