Electrodinámica

W. O. Barreto A.
(Dated: Mérida, 1 de mayo del 2006)

El Hombre aprendió sobre la electricidad y el magnetismo a través de distintos fenómenos naturales. Todos hemos visto relámpagos y oido truenos (centellas o rayos). El magnetismo fue observado originalmente en los minerales que exhiben lo que ahora denominamos ferromagnetismo. El magnetismo fue utilizado antes que la electricidad en la manufactura de brújulas. Los fenómenos eléctricos y magnéticos, que parecen muy diferentes en naturaleza, fueron unificados mediante un lento proceso que culminó con la deducción por parte de Maxwell de sus hoy famosas ecuaciones. Podemos pensar en el logro de Maxwell como el primer paso en el camino hacia algo denominado gran unificación, que permitiría a través de una sola teoría unificar todas las fuerzas fundamentales. La teoría de Maxwell unificó dos fuerzas aparentemente distintas. Intentaremos demostrar la unidad de la electricidad y el magnetismo a través de un enfoque electrodinámico. Comenzaremos con la noción de carga eléctrica, interacción eléctrica, campo eléctrico, potencial eléctrico. Luego procederemos con la corriente eléctrica y su relación con el magnetismo y el campo magnético. Sólo adelantaremos esto. En 1820 Hans Christian Oersted encontró la conexión entre la electricidad y el magnetismo: descubrió que una corriente eléctrica podía desviar la aguja de una brújula. Este descubrimiento lo hizo mientras preparaba una clase demostrativa para sus estudiantes de física.

I. CARGA ELÉCTRICA

Para no esperar la caida de un rayo, o experimentar con ellos cuando caigan, podemos realizar un experimento "antigravedad" muy sencillo. Cortemos papel con una tijera hasta lograr papelillo. Acerquemos cualquier objeto de plástico, por ejemplo, un peine o una regla para dibujar o medir. ¿Qué ocurre? Absolutamente nada. Ahora frotemos el plástico con una tela, por ejemplo, con la tela de un pantalón. Acerquemos de nuevo el plástico al papelillo ¿Que ocurre? Voilá. Ocurre algo que no podemos explicar con la ley de gravitación universal de Newton, algo nuevo tenemos que aprender sobre cońo interactúa la materia y sobre otras propiedades intrínsecas, además de la masa.

Podemos pensar en términos termodinámicos porque observamos que por efecto de la fricción la temperatura aumenta tanto en el plástico como en la tela. Hemos transferido calor al interior de ambos cuerpos por conducción o contacto. Bien, ¿y ahora qué? La gravitación no explica el fenómeno observado, ni la termodinámica, porque evidentemente hay algo más que calor que se ha transferido de un material a otro. A este fenómeno lo denominaremos *eléctrico*; los Griegos ya lo habían observado cuando frotaban el ambar (la palabra electrón deriva de la palabra griega para ambar).

El fenómeno eléctrico se explica por la existencia de una propiedad intrínseca de la materia denominada *carga eléctrica*. Entonces, ¿Cuál es la naturaleza de la carga eléctrica?

$\prec$ *Cargas eléctricas del mismo signo se repelen y cargas de signo opuesto se atraen.* $\succ$

La carga eléctrica fundamental es

$$e = 1,6 \times 10^{-19}\, C,$$

donde C es la unidad internacional de carga eléctrica denominada Coulombio. Un electrón tiene una carga eléctrica negativa $e^- = -e$.

$\sim$*La carga eléctrica está cuantizada*$\sim$, es decir, cualquier cantidad de carga en la naturaleza se encuentra en múltiplos de e

$$q = ne, \;\; n = 0, \pm 1, \pm 2, ...$$

Existen unas partículas denominadas *quarks* que pueden tener cargas fraccionarias, pero ellas no se pueden encontrar aisladas. Por ejemplo, un protón tiene una carga $+e$ y está constituido por tres quarks $(+\frac{2}{3}e, +\frac{2}{3}e, -\frac{1}{3}e)$. Por cierto, el e^- no está constituido por quarks, es una partícula fundamental. Un neutrón está constituido por tres quarks $(-\frac{1}{3}e, -\frac{1}{3}, +\frac{2}{3}e)$.

También se ha observado que la carga eléctrica total se conserva

$\sim$ *Una disminución de la carga eléctrica en un volumen dado, corresponde a un flujo de carga eléctrica a través de la superficie que encierra al volumen.* $\sim$

Para no dejar cabos sueltos, regresemos al experimento con el papelillo. En términos de la carga eléctrica podemos explicar el fenómeno. Por fricción (para aumentar la temperatura y en consecuencia la movilidad de las cargas en la tela) y contacto hemos transferido cargas eléctricas negativas (electrones) al plástico y ellas quedan adosadas a éste. El papelillo con carga neta neutra se polariza (por inducción) ante la cercanía del plástico cargado. En el papelillo se forman dipolos eléctricos de tal forma que las cargas positivas se distribuyen quedando más cerca del plástico (por atracción) y las negativas se alejan de éste (por repulsión). Es posible también hacer experimentos con otros tipos de materiales de los que podemos extraer electrones (cargas móviles en los materiales), resultando cargados positivamente, por ejemplo un metal frotado con una tela plastificada. En términos eléctricos el plástico es un aislante y el metal es un conductor (permite una alta movilidad de electrones).

II. LEY DE COULOMB Y PRINCIPIO DE SUPERPOSICIÓN

La interacción eléctrica se puede cuantificar a través de la Ley de Coulomb. Sean dos cargas puntuales q_1 y q_2, posicionadas según $\vec{r}_1$ y $\vec{r}_2$, respectivamente. Si $\vec{r}_{21} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1$, entonces

$$\vec{F}_{21} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{q_1 q_2}{r_{21}^2}\hat{r}_{21}, \tag{1}$$

es la fuerza que ejerce la carga 1 sobre la carga 2. ϵ_0 es la permitividad en el vaciío y se puede determinar experimentalmente que

$$\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12}\frac{C^2}{Nm^2}$$

. La ecuación (1) se puede escribir alternativamente de la siguiente forma

$$\vec{F}_{21} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{q_1 q_2(\vec{r}_2 - \vec{r}_1)}{|\vec{r}_2 - \vec{r}_1|^3} = -\vec{F}_{12}. \tag{2}$$

Observe que la fuerza eléctrica que ejerce la carga 2 sobre la carga 1 es exactamente igual en magnitud y dirección, pero en sentido opuesto, a la que ejerce la carga 1 sobre la carga 2.

Para un sistema de N cargas puntuales, la fuerza sobre la carga i–ésima es

$$\vec{F}_i = \sum_{j=1; j\neq i}^{N} \vec{F}_{ij}, \tag{3}$$

porque la fuerza eléctrica satisface el principio de superposición.

III. CAMPO ELÉCTRICO

El campo eléctrico es el intermediario en la interacción entre cargas eléctricas. Cualquier definición del campo eléctrico tiene que permitir su cuantificación. Por ejemplo, en la interacción entre dos cargas, una de ellas establece un campo eléctrico y la otra interactú a con ese campo eléctrico. En consecuencia, tenemos dos problemas: 1) Determinar, mediante medición o cálculo, el campo eléctrico establecido por una carga en cualquier punto del espacio; 2) Calcular la fuerza que el campo ejerce sobre la otra carga ubicada en cualquier punto del espacio.

Operacionalmente, definimos el campo eléctrico asociado a una colección de cargas en términos de la fuerza ejercida sobre una carga de prueba positiva en un punto determinado. Es importante que la carga de prueba sea lo suficientemente pequeña para que no perturbe la distribución de cargas cuyo campo eléctrico setamos tratando de medir. Esto es,

$$\vec{E}(\vec{r}) = \lim_{q_0 \to 0}\frac{\vec{F}}{q_0} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{q(\vec{r} - \vec{r'})}{|\vec{r} - \vec{r'}|^3}, \tag{4}$$

donde $\vec{r}$ representa el vector posición del punto de observación y $\vec{r'}$ el vector posición de la carga que produce el campo. Si el campo eléctrico es producido por un conjunto de N cargas puntuales, el campo eléctrico total está dado por

$$\vec{E} = \sum_{i=1}^{N} \vec{E}_i. \tag{5}$$

Si el sistema de cargas es contínuo, el diferencial de campo eléctrico es

$$d\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{dq(\vec{r} - \vec{r'})}{|\vec{r} - \vec{r'}|^3} \tag{6}$$

y el campo eléctrico total en el punto de observación es

$$\vec{E}(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{dq(\vec{r} - \vec{r'})}{|\vec{r} - \vec{r'}|^3}, \tag{7}$$

donde $\vec{r'}$ ahora representa el vector posición del elemento diferencial de carga. Observe que la integración se realiza sobre la coordenada primada. Si la distribución es volumétrica el $dq = \rho dV'$, donde ρ es la densidad volumétrica de carga. De igual forma, si la distribución es superficial $dq = \sigma dS'$, o lineal $dq = \lambda dl'$, donde σ o λ representan la densidad superficial de carga o la densidad lineal de carga.

IV. LÍNEAS DE FUERZA

Las líneas de fuerza nos permiten describir el campo eléctrico:

- Salen de las cargas positivas y entran a las cargas negativas;
- El número de líneas es proporcional a la magnitud de la carga;
- La densidad de líneas es proporcional a la intensidad del campo eléctrico;
- Dos líneas de fuerza no se pueden cruzar.

V. DIPOLO ELÉCTRICO

Un dipolo eléctrico es un arreglo de dos cargas puntuales de signos opuestos y separadas una distancia muy pequeña $2a$. Se puede demostrar que el campo eléctrico producido por este arreglo en un punto de observación $\vec{r}$ está dado por

$$\vec{E}(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0 r^3} \left\{ \frac{3(\vec{p} \circ \vec{r})\vec{r}}{r^2} - \vec{p} \right\}, \tag{8}$$

donde $\vec{p} = q\vec{l}$ es el vector momento dipolar eléctrico ($\vec{l}$ tiene magnitud $2a$ y va desde la carga negativa a la carga positiva).

El torque que experimenta un dipolo colocado en un campo eléctrico externo es

$$\vec{\tau} = \vec{p} \times \vec{E} \tag{9}$$

y la energía potencial eléctrica

$$E_p = -\vec{p} \circ \vec{E}. \tag{10}$$

VI. FLUJO ELÉCTRICO

El flujo del campo eléctrico es el número de líneas que atraviesan un elemento de área perpendicular al campo eléctrico

$$\Phi_E = \int \vec{E} \circ d\vec{S}, \tag{11}$$

donde $d\vec{S} = dS\hat{n}$ define el elemento diferencial de superficie y $\hat{n}$ el vector unitario perpendicular al elemento de superficie.

VII. LEY DE GAUSS

El número de líneas del campo eléctrico que atraviesan un elemento de área perpendicular al campo eléctrico es proporcional a la carga neta encerrada por una superficie gaussiana:

$$\oint \vec{E} \circ d\vec{S} = \frac{q_N}{\epsilon_0}. \tag{12}$$

VIII. ENERGÍA POTENCIAL ELÉCTRICA

Ya en el estudio del dipolo eléctrico hicimos referencia a la energía potencial eléctrica, siguiendo nuestra noción de energiía potencial y su relación con el trabajo realizado para rotar el dipolo en contra del campo eléctrico externo. Aunque no lo comentamos anteriormente, si el trabajo realizado por una fuerza sobre una partícula que se desplaza de una posición inicial a otra final no depende de la trayectoria, entonces la fuerza es conservativa, como es el caso de la fuerza eléctrica y la fuerza gravitacional. Cuando las fuerzas son conservativas, éstas se pueden expresar a través de una función de energía potencial. Podemos asociar una energía potencial a un sistema de tal forma que si colocamos una partícula cargada, ésta experimenta una fuerza eléctrica. Así, la variación de energía potencial eléctrica cuando desplazamos a una carga q en presencia de un campo eléctrico externo $\vec{E}$ es

$$U_b - U_a = -q \int_a^b \vec{E} \circ d\vec{r}, \tag{13}$$

donde la integral es independiente de la trayectoria entre los puntos a y b porque la fuerza eléctrica es conservativa.

Ahora nos planteamos la siguiente pregunta: ¿Dónde reside la energía que un agente externo invierte cuando acerca (o aleja) dos cargas eléctricas? Observemos que:

1. *Cargas de signos opuestos*: Si dejamos una fija (q_1) y alejamos la otra (q_2), digamos hacia la derecha, se realiza un trabajo negativo, resultando un incremento en la energía potencial. Si liberamos la carga desde la separación mayor, debido a la atracción se acerca a la otra, disminuyendo la energía potencial y aumentando la energía cinética.

2. *Cargas de signos iguales*: Si desplazamos ahora la carga hacia la izquierda se produce un aumento de la energía potencial. Al liberarla, la separación aumenta, decreciendo de nuevo la anergía potencial y aumentando la energía cinética.

Independientemente del signo de las cargas

$$U_b - U_a = -q_2 \int_a^b E_1 dr = -\frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0} \int_a^b \frac{dr}{r^2} = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{r_b} - \frac{1}{r_a} \right), \tag{14}$$

Si $U_b = 0$ cuando $r_b \to \infty$

$$U(r) = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{r}. \tag{15}$$

Esta es la energía potencial eléctrica para un sistema conformado por dos cargas puntuales.

Para profundizar el concepto, supongamos que tres cargas puntuales se encuentran en el infinito:

- Traemos la carga q_1, ¿cuál es la energía potencial? Respuesta:

  $$U = 0$$

  .

- Traemos la carga q_2 y hacemos la misma pregunta, respuesta:

  $$U = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r_{12}}$$

- Traemos la carga q_3, respuesta:

$$U = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\left(\frac{q_1q_2}{r_{12}} + \frac{q_1q_3}{r_{13}} + \frac{q_2q_3}{r_{23}}\right)$$

.

¿Nos estamos entendiendo? Este resultado es independiente del orden en que reunimos las cargas. La energía que invierte un agente externo para reunir las tres cargas se almacena en el campo eléctrico. Uhmmm, ¿Y por qué...?

Para un sistema de N cargas puntuales tenemos

$$U = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\left(\frac{q_1q_2}{r_{12}} + \frac{q_1q_3}{r_{13}} + ... + \frac{q_1q_N}{r_{1N}} + ... + \frac{q_2q_3}{r_{23}} + ... + \frac{q_{N-1}q_N}{r_{N-1\,N}}\right). \tag{16}$$

Esto es una suma algebraica de escalares. Observe que U es una propiedad del sistema y no de cargas individuales.

La energía potencial de un sistema de cargas fijas es igual al trabajo que debe realizar un agente externo para reunir el sistema, desplazando cada carga una distancia infinita.

IX. POTENCIAL ELÉCTRICO

Definimos el potencial eléctrico como la energía potencial eléctrica por unidad de carga, así

$$\phi(r) = \lim_{q_0\to 0}\frac{U(r)}{q_0}. \tag{17}$$

El potencial puede ser negativo o positivo dependiendo del signo de la carga. La unidad internacional para el potencial eléctrico es el voltio: $[\phi] = V$.

Para una carga puntual el potencial es

$$\phi(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{q}{|\vec{r} - \vec{r'}|} \tag{18}$$

y para una distribución continua de carga

$$\phi(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\int\frac{dq}{|\vec{r} - \vec{r'}|}. \tag{19}$$

Es posible determinar el campo elétrico si el potencial eléctrico es conocido. Veamos.

$$dU = qd\phi = -dW = -qEdr\cos\theta, \tag{20}$$

esto es,

$$d\phi = -E_\ell dr, \tag{21}$$

donde E_ℓ es la componente del campo eléctrico paralela al desplazamiendo. Así,

$$E_\ell = -\frac{d\phi}{dr}. \tag{22}$$

Esto quiere decir que el campo eléctrico apunta en la dirección que disminuye el potencial. Si el potencial depende en general de las coordenadas rectangulares (x, y, z), entonces $\vec{r} =< x, y, z >= x\hat{\imath} + y\hat{\jmath} + z\hat{k}$ y podemos calcular las componentes rectangulares del campo eléctrico a través de

$$\vec{E} = -\left\langle\frac{\partial\phi}{\partial x}, \frac{\partial\phi}{\partial y}, \frac{\partial\phi}{\partial z}\right\rangle = -\vec{\nabla}\phi. \tag{23}$$

X. SUPERFICIES EQUIPOTENCIALES

Una vez determinado el potencial eléctrico, las superficies definidas por $\phi =$constante se denominan equipotenciales. Es claro entonces que el campo eléctrico es perpendicular a estas superficies en cualquier punto sobre ellas. Por ejemplo, un campo eléctrico constante, digamos en la dirección del semieje positivo x corresponde a una familia de superficies definidas por $\phi = -\phi_0 x/a$, donde ϕ_0 es la superficie equipotencial en $x = a$. Otro ejemplo, el potencial eléctrico para una carga puntual es $\phi = (4\pi\epsilon_0)^{-1} q/r$, cada esfera de radio $r =$constante define una superficie equipotencial. Es claro que en este caso el campo eléctrico es perpendicular a estas superficies en cada punto sobre ellas. En general, las superficies equipotenciales forman un ángulo recto con las líneas de fuerza; de otra forma el campo eléctrico tendría componentes sobre la superficie equipotencial y por ende realizaría trabajo sobre una partícula de prueba. Es obvio que esto no es posible por definición. Entonces, sobre un superficie esuipotencial el trabajo realizado es nulo.

XI. CORRIENTE ELÉCTRICA

Las cargas eléctricas en movimiento están presentes en casi todas partes. En la actividad muscular, en los rayos, para sólo referirnos a procesos naturales. La carga eléctrica circula en las instalaciones eléctricas domésticas, en cables, bombillos, semiconductores, líquidos (en baterías de autos), gases (en lámparas fluorescentes), aun en el vacío (en tubos de TV). Entonces ¿Cómo es que sabemos tan poco sobre la corriente eléctrica? Las cargas se mueven (oscilando) en el campo magnético terrestre, en el Sol, en las galaxias, en el universo...
Una definición precisa de la corriente eléctrica:
Es la cantidad de carga neta dq que atraviesa cualquier superficie en un intervalo de tiempo dt.

$$i = \frac{dq}{dt}. \tag{24}$$

Por convención, e l sentido de la corriente es el de las cargas positivas y la unidad internacional de la corriente eléctrica es el Amperio ($[i] = A = C/s$). La corriente eléctrica no es un vector (no cumple con la ley aditiva de vectores). Siendo i un flujo de cargas a través de una superficie cualquiera, entonces podemos asociar a i un vector densidad de corriente $i\vec{j}$ a través de

$$i = \int \vec{j} \circ d\vec{S}. \tag{25}$$

La corriente eléctrica i es una medida macroscópica del movimiento de las cargas eléctricas, mientras que $\vec{j}$ es una medida microscópica. Se puede demostrar que

$$\vec{j} = \rho \vec{v}, \tag{26}$$

donde ρ es la densidad de carga y $\vec{v}$ la velocidad de un elemento diferencial de carga dq en el volumen dV.

XII. INTERACCIÓN ENTRE UNA CORRIENTE ELÉCTRICA CONTINUA Y UNA BRÚJULA

Un hecho relevante (muy fácil de verificar con escasos recursos) es la interacción entre una corriente eléctrica continua i y una brújula. Si acercamos una brújula a un alambre conductor de una corriente, veremos cómo la brújula se reorienta. Si mantenemos la brújula en la cercaní a del alambre y desconectamos la batería que genera la corriente, observaremos que la brújula retorna a su orientación natural, esto es, apuntará hacia el norte geográfico de la Tierra.

XIII. ¿EXISTEN LAS CARGAS MAGNÉTICAS?

Si existen, no se han observado en la naturaleza. Digamos que no se han detectado y nuestro conocimiento del magnetismo es bastante amplio prescindiendo de ellas (de las cargas magnéticas). Si al menos se detectara un monopolo, entonces su existencia explicaría la cuantización de la carga.
Entonces ¿ Podemos usar el concepto de Campo Magnético? En principio sí, pero de manera diferente.

XIV. CAMPO MAGNÉTICO

La noción de región del espacio donde se experimentan fuerzas magnéticas la podemos mantener por analogía. Dos imanes interactúan, atrayéndose o repeliéndose, dependiendo de la orientación de ellos. Digamos que polos opuestos se atraen y polos iguales se repelen. Hasta aquí todo se mantiene análogo, pero si dividimos uno de los imanes en dos partes, observaremos que obtendremos dos imanes con polos opuestos cada uno. Podemos hacer esto, dividirlos, hasta escala atómica y observaremos finalmente que el efecto de polos opuestos magnéticos lo producen las cargas eléctricas en movimiento. Si lográramos detener el movimiento de las cargas entonces el fenómeno magnético desaparecería. Otra forma de explicar esto sería usar un sistema de referencia respecto al cual las cargas eléctricas se encuentren en reposo. El efecto resultaría el mismo: No observaremos campo magnético alguno.

Ya que el campo magnético es una manifestación de la electrodinámica ¿Cómo lo podemos definir?

La forma de cuantificar la interacción magnética y definir el campo magnético es a través de la siguiente ecuación de fuerza sobre una carga q en movimiento con velocidad $\vec{v}$

$$\vec{F}_m = q\vec{v} \times \vec{B}, \tag{27}$$

donde $\vec{B}$ es un campo magnético externo (nada que ver con q). Observe que si la carga q no se mueve, ésta no experiementa fuerza magnética. Además, la fuerza magnética es perpendicular tanto a la velocidad de la carga como al campo magnético externo. Se desprende de esta ecuación de fuerza, denominada de Lorentz, que la unidad internacional para el campo magnético es el Tesla: $[B] = Nm/A = T$.

Una forma equivalente de escribir la ecuación de fuerza de Lorentz es

$$\vec{F}_m = i\vec{l} \times \vec{B}, \tag{28}$$

donde $\vec{l}$ es el vector que define un segmento de longitud l por donde pasa la corriente i.

Un segmento (de extremos fijos) por donde pasa una corriente i en un campo magnético extreno experimentará una deflexión según el producto vectorial (regla de la mano derecha).

El campo electromagnético es el mediador en la interacción entre cargas eléctricas.

Con mayor precisión, aunque fuera del alcance de estas notas, podemos afirmar:

Los fotones son los mediadores en la interacción electromagnética.

XV. LEY DE BIOT–SAVART

Si el origen del campo magnético son las cargas en movimiento o corrientes eléctricas, entonces podemos considerar las fuerzas magnéticas que se ejercen elementos de corriente $id\vec{l}$ entre si. Sean los lazos de corriente 1 y 2. La fuerza diferencial que ejerce el lazo 2 sobre un elemento diferencial de corriente del lazo 1 es

$$d\vec{F}_{12} = i_1 d\vec{l}_1 \times \vec{B}_2, \tag{29}$$

donde $\vec{B}_2$ viene dado por la Ley de Biot–Savart

$$d\vec{B}_2 = \frac{\mu_0}{4\pi} i_2 d\vec{l}_2 \times \frac{(\vec{r}_1 - \vec{r}_2)}{|\vec{r}_1 - \vec{r}_2|^3}, \tag{30}$$

donde $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}\,Tm/A$ es la Permeabilidad del vacío y se determina experimentalmente. En general, una corriente i produce un campo magnético

$$\vec{B}(\vec{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int i d\vec{l} \times \frac{(\vec{r} - \vec{r'})}{|\vec{r} - \vec{r'}|^3}, \tag{31}$$

donde $\vec{r'}$ es el vector posición del elemento diferencial de corriente $id\vec{l}$.

XVI. FLUJO MAGNÉTICO

¿Podemos plantear una Ley equivalente a la de Gauss para el caso magnético?
El flujo magnético a través de una superficie cerrada es nulo

$$\oint \vec{B} \circ d\vec{S} = 0. \tag{32}$$

Esto es equivalente a decir que no se han observado monopolos magnéticos. El flujo magnético a través de una superficie abierta no es nulo en general.

¿Cuál es la Ley que da cuenta de las corrientes como fuentes del campo magnético?

XVII. LEY DE AMPÈRE

Intuitivamente podemos considerar la circulación del campo magnético, que será proporcional a la corriente neta a través de la superficie abierta encerrada por un lazo Ampèriano. Se comprueba experimentalmente que

$$\oint \vec{B} \circ d\vec{l} = \mu_0 i_N, \tag{33}$$

siempre y cuando las corrientes sean estacionarias.

XVIII. LEY DE FARADAY

Experimentos nada sofisticados nos permiten expresar la Ley de inducción de Faraday a través de

$$\oint \vec{E} \circ d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \int \vec{B} \circ d\vec{S}. \tag{34}$$

Una variación de flujo magnético induce una fuerza electromotriz en una trayectoria cerrada. El signo menos toma en cuenta la Ley de Lenz, esto es, la corriente inducida se establece de tal forma que se opone a la causa que la produce y es consistente con el principio de conservación de la energía.

Referencias

1. D. Halliday, R. Resnick y K. Krane, Física, Volúmenes I y II, Cuarta Edición, John Wiley & Sons, Inc. (1992).
2. P. Tipler, Física, Volúmenes I y II, Tercera Edición, Reverté (1993).
3. R. P. Feynman, R. B. Leighton, y M. L. Sands, The Feynman lectures on physics, Addison-Wesley Pub. Co. (1963).