

Electromagnetismo

1-1 Las fuerzas eléctricas	1-4 Las leyes del electromagnetismo
1-2 El campo eléctrico y el magnético	1-5 ¿Qué son los campos?
1-3 Las características de los campos vectoriales	1-6 El electromagnetismo en la ciencia y la tecnología

Referencias: Capítulo 12, vol. I, Características de la fuerza

1-1 Las fuerzas eléctricas

Consideremos una fuerza análoga a la de gravitación que varíe con la inversa del cuadrado de la distancia, pero que sea un *billón de billón de billones* de veces más intensa. Y con otra diferencia. Hay dos clases de "materia", que podríamos llamar positiva y negativa. Si son de la misma clase se repelen y si son de distinta clase se atraen, a diferencia de la gravitatoria que es sólo atractiva. ¿Qué sucedería?

Un conjunto de elementos positivos se repelerán con una fuerza enorme y se esparcirán en todas las direcciones. A un conjunto de elementos negativos le sucederá lo mismo. Pero una mezcla de elementos positivos y negativos deberá comportarse en una forma completamente diferente. Los elementos opuestos serán mantenidos juntos por una fuerza enorme de atracción. El resultado neto será que estas terribles fuerzas se equilibrarán perfectamente entre ellas y formarán una mezcla de elementos positivos y negativos íntimamente mezclados entre sí y de tal modo que dos porciones separadas de esa mezcla no sufran prácticamente ni atracción ni repulsión.

Una fuerza de este tipo existe: la fuerza eléctrica. Y toda la materia es una mezcla de protones positivos y de electrones negativos que se están atrayendo y repeliendo con una gran fuerza. Habrá un equilibrio perfecto cuando al estar cerca de este conjunto no se sienta ninguna fuerza resultante. Si se sintiese una ligera falta de balance lo podríamos saber. Si estuviesen ubicados a un brazo de distancia de alguien y en él hubiera un *uno por ciento* más de electrones que de protones, la fuerza de repulsión sería increíble. ¿De qué magnitud? ¿Suficiente para levantar el edificio Empire State? ¡No! ¿Para levantar el Monte Everest? ¡No! ¿La repulsión sería suficiente para levantar un "peso" igual al de la Tierra entera?

Con una fuerza tan enorme y perfectamente equilibrada en esta íntima mezcla no es difícil comprender que la materia, tratando de conservar estas cargas positivas y negativas en el mejor equilibrio, pueda tener una gran rigidez y una gran resistencia. El edificio Empire State, por ejemplo, se aparta sólo 2,50 metros de su posición de equilibrio

dado que las fuerzas eléctricas mantienen cada electrón y cada protón más o menos en su propio lugar. Por otra parte, si consideramos la materia en una escala mucho más pequeña de tal manera que tengamos sólo algunos átomos, cualquier porción de material de este tamaño no tendrá por lo común igual número de cargas positivas y negativas y, en consecuencia, existirán intensas fuerzas eléctricas residuales. Igualmente, cuando hay un número igual de cargas de signos opuestos en dos pequeños trozos de materia vecinos, puede haber entre ellos grandes fuerzas eléctricas resultantes, ya que las fuerzas entre cargas individuales varía con la inversa del cuadrado de la distancia. Se puede producir una fuerza resultante si una carga negativa de un trozo de material está más cerca de una carga positiva que de una negativa del otro trozo. La fuerza de atracción puede, entonces, ser mayor que la de repulsión de tal manera que puede existir una fuerza de atracción resultante entre los dos trozos de materia sin que haya un exceso neto de cargas. Las fuerzas que mantienen juntos los átomos y las fuerzas químicas que mantienen juntas las moléculas, son, en realidad, fuerzas eléctricas actuando en una región en la cual el equilibrio de cargas no es perfecto, o bien en una región donde las distancias son muy pequeñas.

Ustedes saben, por supuesto, que los átomos están contruidos con protones positivos en el núcleo y con electrones en el exterior. Se podrían preguntar: "¿Si las fuerzas eléctricas son tan intensas, por qué los protones y los electrones no están unos junto a los otros? ¿Si pueden formar una mezcla íntima, por qué no lo hacen más íntimamente?". La respuesta tiene que ver con los efectos cuánticos. Si probásemos de ubicar nuestros electrones en una región muy próxima a los protones, de acuerdo con el principio de indeterminación deberían tener un momentum medio cuadrático que es mayor a medida que tratamos de acercarlos. Es este movimiento, requerido por las leyes de la mecánica cuántica, el que impide que la atracción eléctrica llegue a acercar más las cargas.

Aquí podemos hacer otra pregunta: "¿Qué es lo que mantiene unido al núcleo?". En un núcleo hay varios protones, y todos son positivos. ¿Por qué no se apartan unos de otros? Ello nos lleva a aceptar que en el núcleo, además de las fuerzas eléctricas, hay fuerzas de otro tipo, no eléctricas, llamadas fuerzas nucleares, que son mucho más intensas que las fuerzas eléctricas, y que pueden mantener los protones unidos aun cuando se repelen eléctricamente. Sin embargo, las fuerzas nucleares son de corto alcance —decrecen mucho más rápidamente que $1/r^2$. Y esto trae una consecuencia muy importante. Si un núcleo tiene muchos protones, se hace muy grande y no se mantiene unido. Un ejemplo es el uranio con 92 protones. Las fuerzas nucleares actúan principalmente entre cada protón (o neutrón) y sus vecinos inmediatos, mientras que las fuerzas eléctricas actúan aun a grandes distancias, ocasionando una repulsión entre cada protón y todos los restantes en el núcleo. Cuanto mayor cantidad de protones haya en un núcleo, mayor será la intensidad de la repulsión eléctrica y, por tanto, como en el caso del uranio, el equilibrio será demasiado frágil y el núcleo estará en mayores condiciones de explotar bajo la acción de las fuerzas eléctricas de repulsión. Si se "golpea" ligeramente un núcleo en tales condiciones (como podría suceder en el caso del bombardeo con neutrones lentos), se romperá en dos partes, cada una con una carga positiva, y estas partes se apartarán debido a su repulsión eléctrica. La energía que se libera es la energía de la bomba atómica. Esta energía se llama comúnmente "nuclear", pero es en realidad energía "eléctrica" liberada cuando las fuerzas eléctricas superan a las fuerzas de atracción nuclear.

Podríamos preguntar, finalmente, qué es lo que permite a los electrones cargados negativamente que se mantengan juntos (ya que ellos no sufren los efectos de las fuerzas nucleares). Si un electrón está constituido enteramente por una sola clase de sustancia, cada

parte deberá repeler a la otra. ¿Por qué, entonces, ellas no se apartan? ¿Pero, tiene "partes" el electrón? Quizás, podríamos decir que el electrón es puntual y que las fuerzas eléctricas actuarán entre *diferentes* cargas puntuales, de tal manera que el electrón no actúe sobre sí mismo. Quizás, todo lo que podemos decir sobre este problema acerca de qué es lo que permite mantener cohesionado al electrón es que ha provocado numerosas dificultades en la tentativa de elaborar una teoría completa del electromagnetismo. Este problema no ha sido todavía resuelto. Volveremos a discutir un poco más sobre este tema en los próximos capítulos.

Tabla de letras griegas minúsculas y mayúsculas comúnmente utilizadas

α	alfa	ν	nu
β	beta	ξ Ξ	xi (ksi)
γ Γ	gamma	$\omicron$	omicron
δ Δ	delta	π Π	pi
ϵ	epsilon	ρ	rho
ζ	dzeta	σ Σ	sigma
η	eta	τ	tau
θ Θ	theta	υ Υ	ypsilon
ι	iota	ϕ Φ	phi
κ	kappa	χ	ji (chi)
λ Λ	lambda	ψ Ψ	psi
μ	mu	ω Ω	omega

Como hemos visto, deberíamos esperar que una combinación de fuerzas eléctricas y efectos cuánticos debería determinar la estructura detallada de la materia y, por lo tanto, de sus propiedades. Algunos materiales son duros, otros son blandos. Algunos son "conductores" de la electricidad —porque sus electrones están libres para desplazarse—; otros son "aisladores" —porque sus electrones están ligados fuertemente a cada átomo—. Veremos un poco más adelante el origen de algunas de estas propiedades, pero como es un aspecto más complicado, comenzaremos a considerar las fuerzas eléctricas sólo en casos simples. Comenzaremos por tratar solamente las leyes de la electricidad —incluyendo el magnetismo que es en realidad una parte de este mismo tema.

Hemos dicho que la fuerza eléctrica, como en el caso de la fuerza de gravitación, decrece con la inversa del cuadrado de la distancia que separa las cargas. Esta relación se llama ley de Coulomb. Pero esto no es enteramente cierto cuando las cargas están en movimiento —las fuerzas eléctricas dependen del movimiento de las cargas en una forma complicada—. Una parte de la fuerza entre cargas en movimiento se llama fuerza *magnética*. Es en realidad sólo un aspecto de un efecto eléctrico. Esta es la razón por la cual llamamos "electromagnetismo" a este tema.

Existe un principio general importante que permite tratar las fuerzas electromagnéticas en una forma relativamente simple. Se encuentra experimentalmente que la fuerza que actúa sobre una partícula cargada —cualquiera sea el número de cargas existentes o la forma en que se desplazan— depende únicamente de la posición de esta

carga, de la velocidad de la carga y del valor de esta carga. Podemos escribir la fuerza $\mathbf{F}$ sobre una carga q que se mueve con una velocidad $\mathbf{v}$ en la forma

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}). \quad (1.1)$$

Llamaremos $\mathbf{E}$ al *campo eléctrico* y $\mathbf{B}$ al *campo magnético* en el punto donde se encuentra la carga. Algo muy importante es que las fuerzas eléctricas debidas a todas las otras cargas del universo pueden ser resumidas dando solamente estos dos vectores. Los valores dependen del lugar donde se encuentre la carga y pueden variar con el tiempo. Además, si reemplazamos esta carga por otra carga, la fuerza sobre la nueva carga será proporcional al valor de esta carga, en la medida en que las otras cargas del universo no hayan cambiado su posición ni su estado de movimiento; (en la realidad, por supuesto, cada carga produce fuerzas sobre todas las vecinas y puede causar un movimiento de las mismas, y así, en ciertos casos los campos pueden cambiar si cambiamos la carga dada por otra).

Sabemos por lo visto en el volumen I cómo encontrar el movimiento de una partícula conociendo la fuerza que actúa sobre ella. La ecuación (1.1) puede combinarse con la ecuación de movimiento para dar

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{m\mathbf{v}}{(1 - v^2/c^2)^{1/2}} \right] = \mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}). \quad (1.2)$$

Donde si $\mathbf{E}$ y $\mathbf{B}$ son conocidos, podremos encontrar el movimiento. Ahora necesitaríamos saber cómo se producen los campos $\mathbf{E}$ y $\mathbf{B}$.

Uno de los principios simplificadores más importantes con respecto a la forma de producir los campos es el siguiente: supongamos que un cierto número de cargas se desplazan de una cierta manera produciendo un campo $\mathbf{E}_1$, y que otro conjunto de cargas produzca otro campo $\mathbf{E}_2$. Si ambos sistemas de cargas son considerados en el mismo instante (conservando las mismas posiciones y movimientos que cuando los consideramos separados), el campo producido es la suma

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2. \quad (1.3)$$

Este hecho se llama *principio de superposición* de los campos. Este es también aplicable a los campos magnéticos.

Este principio implica que si conocemos la ley según la cual una carga *única* moviéndose de una manera arbitraria produce los campos eléctricos y magnéticos, conocemos completamente todas las leyes de la electrodinámica. Si queremos conocer la fuerza que se ejerce sobre una carga A , debemos solamente calcular los campos $\mathbf{E}$ y $\mathbf{B}$ producidos por cada una de las cargas B, C, D , etc. y después de sumar los campos $\mathbf{E}$ y $\mathbf{B}$ producidos por cada una de estas cargas, podremos encontrar los campos totales, y a partir de ellos las fuerzas actuantes sobre la carga A . Si ocurriese que el campo fuera producido por una sola carga, ésta sería la forma más sencilla de describir las leyes de la electrodinámica. Hemos dado una descripción de esta ley (cap. 28, vol. I) la cual es, desafortunadamente, muy complicada.

Resulta que la forma bajo la cual las leyes de la electrodinámica son más sencillas no es la que se podría esperar. No es simple dar una fórmula para la fuerza que una carga produce sobre la otra. Es cierto que cuando las cargas están quietas la

ley de fuerza coulombiana es simple, pero cuando las cargas están en movimiento las relaciones son complicadas, entre otras cosas, por el retardo y por los efectos de la aceleración. Como consecuencia, no deseamos presentar la electrodinámica solamente a partir de las leyes de fuerza entre las cargas; nos parece que es más conveniente adoptar otro punto de vista —aquel en el que las leyes de la electrodinámica aparezcan más fáciles de manejar.

El campo eléctrico y el magnético

Primeramente deberemos ampliar el conocimiento que tenemos de los vectores eléctrico y magnético, $\mathbf{E}$ y $\mathbf{B}$. Los hemos definido en función de las fuerzas que experimenta una carga. Hablaremos ahora de los campos eléctricos y magnéticos *en un punto* cuando no hay cargas presentes en dicho punto. Lo que en realidad estamos diciendo es que, como hay fuerzas “actuando” sobre la carga, quedará “algo” en este lugar cuando se retira la carga. Si una carga ubicada en el punto (x, y, z) en el tiempo t sufre la acción de la fuerza $\mathbf{F}$ dada por la ecuación (1.1) asociaremos los vectores $\mathbf{E}$ y $\mathbf{B}$ con *este punto* del espacio (x, y, z) . Podremos considerar a $\mathbf{E}(x, y, z, t)$ y $\mathbf{B}(x, y, z, t)$ como responsables de la fuerza que sufriría a un tiempo t , una carga situada en el punto (x, y, z) , con la condición de que al ubicar la carga en este punto, la misma no perturbe la posición ni el estado de movimiento de todas las otras cargas responsables de los campos.

Siguiendo esta idea, asociaremos con *todo* punto (x, y, z) del espacio dos vectores $\mathbf{E}$ y $\mathbf{B}$, que pueden cambiar con el tiempo. Los campos eléctricos y magnéticos son ahora considerados como *funciones vectoriales* de x, y, z y t . Como un vector está caracterizado por sus componentes, cada uno de los campos $\mathbf{E}(x, y, z, t)$ y $\mathbf{B}(x, y, z, t)$ representa tres funciones matemáticas de x, y, z y t .

Esto es así precisamente porque se puede definir $\mathbf{E}$ (o $\mathbf{B}$) en todo punto del espacio y esto se llama “campo”. Un “campo” es toda cantidad física que toma un valor diferente en cada punto del espacio. La temperatura, por ejemplo, es un campo —en este caso un campo escalar— que designaremos con $T(x, y, z)$. La temperatura podría variar con el tiempo y en este caso diremos que el campo de temperaturas es función del tiempo, y lo escribimos $T(x, y, z, t)$. Otro ejemplo es el “campo de velocidades” de un líquido en movimiento. Seguiremos la notación $\mathbf{v}(x, y, z, t)$ para indicar la velocidad del líquido en cada punto del espacio y en el instante t . Este es un campo vectorial.

Volviendo a los campos electromagnéticos —aun cuando sean producidos por las cargas de acuerdo con fórmulas complicadas, tienen la importante característica siguiente: las relaciones entre los valores de los campos en *un punto* y los valores en *un punto vecino* son muy simples. Con solamente algunas de estas relaciones presentadas en forma de ecuaciones diferenciales podemos describir completamente el campo. Y es bajo la forma de tales ecuaciones que las leyes de la electrodinámica se presentan de la manera más simple.

Existen varias ideas creadas con la finalidad de ayudar a visualizar el comportamiento de los campos. La más correcta es tal vez la más abstracta: consideramos simplemente los campos como funciones matemáticas de la posición y del tiempo. Podremos así tratar de dar una imagen del campo asociando vectores a muchos puntos del espacio y en forma tal que cada uno de ellos dé la intensidad y la dirección en ese punto. Esta representación está mostrada en la figura 1-1. Podremos también trazar las líneas que en todo punto son tangentes a estos vectores —y que, por así decirlo, siguen las flechas y dan

la dirección del campo—. Haciendo esto perdemos los *módulos* de los vectores, pero podremos tener una idea de la intensidad del campo dibujando las líneas más separadas cuando el campo es débil y más juntas cuando es fuerte. Adoptaremos la convención de que el *número de líneas por unidad de área* perpendicular a las líneas es proporcional a la *intensidad del campo*. Esto es, por supuesto, sólo una aproximación, y requerirá, en general, que de tiempo en tiempo aparezcan nuevas líneas a fin de ajustar su número a la intensidad del campo. El campo de la figura 1-1 está representado por líneas de campo en la figura 1-2.



Fig. 1-1. Un campo vectorial se puede representar dibujando un sistema de flechas cuyo módulo y dirección indican los valores del campo vectorial en los puntos en los cuales las flechas han sido dibujadas.

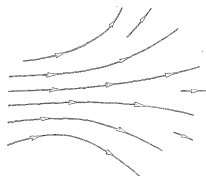


Fig. 1-2. Un campo vectorial se puede representar dibujando líneas tangentes a la dirección del vector de campo en cada punto, y dibujando la densidad de las líneas proporcional a la intensidad del campo vectorial.

1-3 Las características de los campos vectoriales

Existen dos propiedades matemáticas importantes de los campos vectoriales que podremos utilizar en nuestra descripción de las leyes de la electricidad utilizando el concepto de campo. Supongan que nos imaginamos una superficie cerrada cualquiera y nos preguntamos si estamos perdiendo "cualquier cosa" de su interior; es decir, si el campo tiene la propiedad de "fluir hacia afuera". Por ejemplo, para un campo de velocidades, podríamos preguntarnos si la velocidad está siempre dirigida hacia el exterior de la superficie, o más generalmente, si hay más fluido saliente (o por unidad de tiempo) que entrante. Llamamos "flujo de velocidad" saliente de la superficie, la cantidad total de fluido saliente de la superficie por unidad de tiempo. El flujo a través de un elemento de superficie es exactamente igual al producto de la componente de la velocidad normal

a la superficie, por el área de esta superficie. Para una superficie cerrada cualquiera, el *flujo neto saliente* -o *flujo*- es el producto del promedio de la componente de la velocidad según la dirección hacia afuera, por el área de la superficie:

$$\text{Flujo} = (\text{componente normal media}) \cdot (\text{área de la superficie}). \quad (1.4)$$

En el caso de un campo eléctrico, podremos definir matemáticamente algo análogo a un flujo saliente, que también llamaremos flujo, pero por supuesto no es el flujo de una sustancia, porque el campo eléctrico no es la velocidad de nada. Por otra parte, sin embargo, la componente normal media del campo es una cantidad matemática que tiene un sentido útil. Hablaremos, entonces, del *flujo eléctrico* -también definido por la ecuación (1.4)-. Finalmente, no sólo es útil hablar del flujo a través de una superficie completamente cerrada, sino a través de toda superficie de contorno. Aquí también, como en el caso anterior, el flujo a través de una superficie de contorno estará definido como el producto de la componente normal media del vector por el área de la superficie. Esta idea está ilustrada en la figura 1-3.

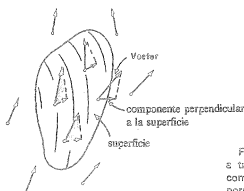
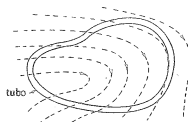


Fig. 1-3. El flujo de un campo vectorial a través de una superficie está definido como el valor medio de la componente normal del vector por el área de la superficie.

Hay una segunda propiedad de un campo vectorial que se relaciona no ya con una superficie sino con una línea. Supongan que consideramos ahora un campo de velocidades que describe el flujo de un líquido. Podríamos hacernos la siguiente pregunta de mucho interés: ¿Está circulando el líquido? Con esto queremos significar: ¿hay un movimiento rotacional resultante a lo largo de algún lazo? Supongamos que en un instante dado se congele el líquido, excepto dentro de un tubo de diámetro uniforme que forma un lazo cerrado como está indicado en la figura 1-4. Fuera del tubo el líquido se detendrá, pero dentro del mismo continuará en movimiento debido a su momentum -es decir, el momentum es mayor en un sentido que en el otro en el interior del tubo-. Definiremos una cantidad llamada *circulación*, como el producto de la velocidad resultante del líquido en el tubo por su circunferencia. Podemos nuevamente extender nuestra definición y definir la "circulación" para todo campo vectorial (aunque no haya nada que se mueva). Para todo campo vectorial la *circulación a través de una curva cerrada imaginaria cualquiera* está definida como la componente



(b)



(c)

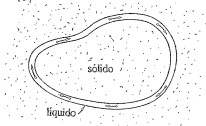


Fig. 1-4. (a) El campo de velocidades en un líquido. Imaginen un tubo de sección uniforme que siga una trayectoria cerrada como en (b). Si el líquido fuera congelado instantáneamente excepto dentro del tubo, el líquido dentro del tubo circularía como se muestra en (c).

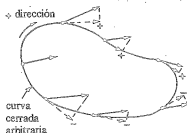


Fig. 1-5. La circulación de un campo vectorial es el producto de la componente tangencial media del vector (con una orientación sistemática de las tangentes) por la circunferencia del lazo.

tangencial media del vector multiplicada por la circunferencia del lazo (fig. 1-5); (las tangentes en los diferentes puntos de la curva están orientados en forma coherente).

$$\text{Circulación} = (\text{componente tangencial media}) \cdot (\text{longitud del lazo}) \quad (1.5)$$

Podrán ver que esta definición da realmente un número que es proporcional a la velocidad de circulación en el tubo solidificado en un instante dado tal como se indicó anteriormente.

Solamente con estas dos nociones —flujo y circulación— podremos describir de una vez las leyes de la electricidad y el magnetismo. Ustedes no comprenderán inmediatamente el sentido de dichas leyes, pero ellas podrán darnos una idea de cómo se describe la física del electromagnetismo en última instancia.

1-4 Las leyes del electromagnetismo

La primera ley del electromagnetismo describe el flujo del campo eléctrico:

$$\text{El flujo de } \mathbf{E} \text{ a través de una superficie cerrada} = \frac{\text{carga neta en el interior}}{\epsilon_0} \quad (1.6)$$

donde ϵ_0 es una constante conveniente; (la constante ϵ_0 se lee comúnmente "épsilon cero"). Si no hay cargas en el interior de la superficie, e igualmente si hay cargas vecinas pero externas a la superficie, la componente normal media del campo E es cero y, por lo tanto, no hay flujo neto a través de la superficie. Para mostrar el poder de este tipo de enunciado podríamos demostrar que la ecuación (1.6) es equivalente a la ley de Coulomb, sólo con la condición de que el campo de una carga única tenga simetría esférica. Para una carga puntual trazaremos una esfera centrada en la carga. Entonces la componente normal media es exactamente la intensidad del campo E en todo punto, ya que el campo debe ser radial y tener la misma intensidad en todo punto de la esfera. Nuestra regla nos dice ahora que el producto del campo sobre la superficie de la esfera, por el área de la esfera —es decir el flujo saliente— es proporcional a la carga interior. Si aumentamos el radio de la esfera, el área aumentará con el cuadrado del radio. El producto de la componente normal media por el área de la esfera debe ser siempre igual a la misma carga interior y, por lo tanto, el campo debe decrecer con el cuadrado de la distancia —tenemos entonces un campo que sigue una ley "inversa del cuadrado".

Si consideramos una curva cualquiera del espacio y medimos la circulación del campo eléctrico a lo largo de esta curva, encontraremos que en general no es igual a cero (aunque lo sea para el caso de un campo coulombiano). Por el contrario, para el campo eléctrico, hay una segunda ley que dice: para toda superficie S (no cerrada) y que se apoye sobre una curva C ,

Como

$$\text{Circulación de } E \text{ a lo largo de } C = \frac{d}{dt} (\text{flujo de } B \text{ a través de } S). \quad (1.7)$$

Podemos completar las leyes del campo electromagnético, escribiendo dos ecuaciones correspondientes para el campo magnético B .

$$\text{Flujo de } B \text{ a través de cualquier superficie cerrada} = 0. \quad (1.8)$$

Para una superficie S que se apoye sobre una curva C ,

$$c^2 (\text{circulación de } B \text{ a lo largo de } C) = \frac{d}{dt} (\text{flujo de } E \text{ a través de } S) + \frac{\text{flujo del vector densidad de corriente a través de } S}{\epsilon_0}. \quad (1.9)$$

La constante c^2 que aparece en la ecuación (1.9) es el cuadrado de la velocidad de la luz. Aparece porque el magnetismo es en realidad un efecto relativista de la electricidad. La constante ϵ_0 ha sido introducida con la finalidad de poder tomar un sistema de unidades conveniente para la corriente eléctrica.

Las ecuaciones (1.6) y (1.9) junto con la ecuación (1.1) son todas las leyes de la electrodinámica*. Como recordarán, las leyes de Newton son muy simples de escribir, pero presentan algunas consecuencias complicadas y nos tomó mucho tiempo estudiarlas completamente. Estas leyes no son tan sencillas de escribir, lo que significa que las consecuencias van a ser más elaboradas y nos tomará mucho tiempo estudiarlas todas.

* Necesitamos solamente agregar algunas aclaraciones sobre ciertas convenciones respecto al signo de la circulación.

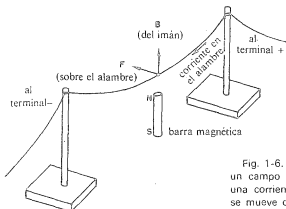


Fig. 1-6. Una barra magnética produce un campo $\mathbf{B}$ en el alambre. Cuando hay una corriente a través del alambre, éste se mueve debido a la fuerza $\mathbf{F} = q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$.

Podemos ilustrar algunas de las leyes de la electrodinámica con un conjunto de pequeños experimentos que muestran cualitativamente la interrelación entre los campos eléctrico y magnético. Ya han tenido experiencia con el primer término de la ecuación (1.1) por lo que no insistiremos en él. El segundo término de la ecuación (1.1) se puede poner en evidencia haciendo pasar una corriente a través del alambre que pasa por encima de una barra magnética como se muestra en la figura 1-6. El alambre se desplaza cuando se establece la corriente debido a la fuerza $\mathbf{F} = q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$. Cuando existe una corriente, las cargas dentro del alambre se están moviendo con una velocidad $\mathbf{v}$, y el campo magnético debido al imán ejerce una fuerza sobre ellas que tiene como resultado que el alambre se aparte hacia un costado.

Cuando el alambre se desplaza hacia la izquierda, esperaremos que el imán sea empujado hacia la derecha; (¡de lo contrario podríamos poner todo el sistema dentro de un vagón y tener un sistema de propulsión en el cual no se conserva el momento!). Aunque la fuerza sea muy pequeña como para producir un movimiento visible en la barra magnética, un sistema magnético más sensible, como la aguja de una brújula, podría mostrar este movimiento.

¿Cómo empuja el cable al imán? La corriente en el alambre produce un campo magnético y éste ejerce una fuerza sobre el imán. De acuerdo con el último término de la ecuación (1.9), una corriente debe tener una *circulación* de $\mathbf{B}$ —en este caso, las líneas de $\mathbf{B}$ son lazos alrededor del alambre, como se muestra en la figura 1-7—. Este campo $\mathbf{B}$ es el responsable de la fuerza sobre el imán.

La ecuación (1.9) nos dice que para una corriente dada en el alambre, la circulación de $\mathbf{B}$ es la misma para *toda* curva que circunde el alambre. Para las curvas —círculos digamos— que se encuentran más lejos del alambre, las circunferencias son mayores y, por lo tanto, la componente tangencial de $\mathbf{B}$ deberá disminuir. Podrán observar, de hecho, que debemos esperar un decrecimiento lineal de $\mathbf{B}$ con la distancia en el caso de un largo alambre rectilíneo.

Ahora bien, hemos dicho que una corriente por el alambre produce un campo magnético y que cuando hay un campo magnético presente, hay una fuerza sobre el alambre donde circula la corriente. Entonces debemos esperar que si producimos un campo magnético con una corriente en un alambre, éste deberá ejercer una fuerza sobre otro alambre que conduzca corriente.

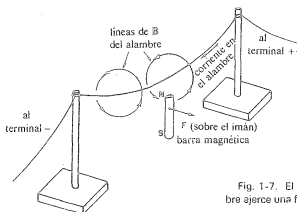


Fig. 1-7. El campo magnético del alambre ejerce una fuerza sobre el imán.

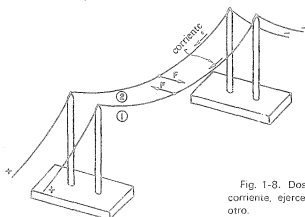


Fig. 1-8. Dos alambres que conducen corriente, ejercen fuerzas el uno sobre el otro.

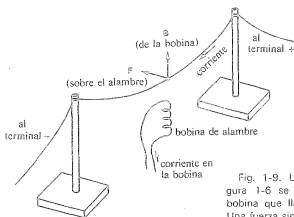


Fig. 1-9. La barra magnética de la figura 1-6 se puede reemplazar por una bobina que lleve una corriente eléctrica. Una fuerza similar actúa sobre el alambre.

Esto se puede mostrar por medio de dos alambres tendidos como se muestra en la figura 1-8. Cuando las corrientes son en el mismo sentido, los dos alambres se atraen, pero cuando las corrientes son opuestas, se repelen.

Brevemente, las corrientes eléctricas, tanto como los imanes, producen campos magnéticos. Pero un momento, ¿qué es un imán? Si los campos magnéticos son producidos por cargas en movimiento, ¿no es posible que el campo magnético de un trozo de hierro sea realmente el resultado de corrientes? Parece ser así. Podemos reemplazar la barra magnética de nuestro experimento por una bobina de alambre, como se muestra en la figura 1-9. Cuando una corriente circula por la bobina—asi como en el alambre extendido encima de ella— observamos un movimiento del alambre exactamente como antes, cuando teníamos un imán en vez de una bobina. En otras palabras, la corriente de la bobina imita un imán. Pero tenemos entonces que cuando un trozo de hierro actúa de esta manera, contiene una corriente circulando perpetuamente. Podemos, en efecto, comprender los imanes en términos de corrientes permanentes en los átomos de hierro. La fuerza sobre el imán de la figura 1-7 se debe al segundo término de la ecuación (1.1).

¿De dónde provienen las corrientes? Una posibilidad puede ser del movimiento de los electrones en las órbitas de los átomos. En realidad, este no es el caso del hierro, pero es correcto para ciertas sustancias. Además del movimiento orbital en el átomo, un electrón gira también sobre su propio eje—como sucede con la rotación de la Tierra sobre sí misma— y es la corriente debida a esta rotación la que produce el campo magnético en el caso del hierro; (decimos “como sucede con la rotación de la Tierra sobre sí misma” pero el problema es mucho más profundo en la mecánica cuántica, ya que un modelo clásico no nos describe lo que realmente sucede). En la mayor parte de las sustancias, algunos electrones giran en un sentido y otros en el otro, de tal modo que el magnetismo se anula, pero en el hierro, —por una razón misteriosa que discutiremos más adelante— la mayor parte de sus electrones giran con sus ejes paralelos, y a esto se debe su magnetismo.

Como los campos de los imanes provienen de corrientes, debemos agregar algunos términos adicionales en las ecuaciones (1.8) o (1.9) para tener en cuenta los imanes. Tomaremos simplemente *todas* las corrientes, incluyendo las corrientes de circulación de los electrones que giran, y así la ley es exacta. Observaremos aquí que la ecuación (1.8) expresa el hecho de que no hay “cargas” magnéticas análogas a las cargas eléctricas que aparecen en el segundo miembro de la ecuación (1.6). Jamás se han encontrado.

El primer término del segundo miembro de la ecuación (1.9) fue descubierto teóricamente por Maxwell y es de una gran importancia. Dice que los campos eléctricos variables producen efectos magnéticos. En verdad, sin este término, la ecuación no tendría ningún sentido, porque sin él no podría haber corrientes en circuitos no cerrados. Pero tales corrientes deben existir, como podemos ver en el siguiente ejemplo. Imaginen un condensador constituido por dos placas. Se lo carga mediante una corriente que fluye hacia una placa alineada con la otra, como se muestra en la figura 1-10. Tracemos una curva C alrededor de uno de los alambres y una superficie apoyada en C que cruce el alambre, como lo indica la superficie S_1 en la figura. De acuerdo con la ecuación (1.9), la circulación de B a lo largo de C está dada por la corriente en el alambre (multiplicada por c^2). ¿Pero qué sucede si hacemos que se apoye sobre la curva una superficie *diferente* S_2 , en forma de bol que pase entre las placas del condensador y sin cortar el alambre? Ciertamente no habrá ninguna corriente a través de esta superficie. ¿Pero, seguramente, por cambiar la ubicación de una superficie imaginaria no va a cambiar un campo magnético real? La circulación de

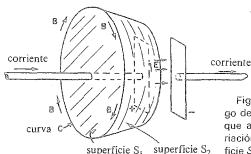


Fig. 1-10. La circulación de $\mathbf{B}$ a lo largo de la curva C está dada por la corriente que atraviesa la superficie S_1 , o por la variación del flujo de $\mathbf{E}$ a través de la superficie S_2 .

$\mathbf{B}$ debe ser lo que era anteriormente. El primer término del segundo miembro de la ecuación (1.9) debe dar, combinado con el segundo término, el mismo resultado para las superficies S_1 y S_2 . Para S_2 la circulación de $\mathbf{B}$ está dada por la derivada respecto al tiempo del flujo de $\mathbf{E}$ entre las placas del condensador. Se encuentra que el campo variable $\mathbf{E}$ está relacionado con la corriente justamente por la relación que es necesaria para que la ecuación (1.9) sea correcta. Maxwell vio que esta relación era necesaria y fue el primero en escribir la ecuación completa.

Con el dispositivo de la figura 1-6 podemos demostrar otra ley del electromagnetismo. Desconectemos los extremos del alambre de la batería y conectémoslos a un galvanómetro que nos indique cuándo una corriente pasa por el alambre. Cuando pongamos el alambre dentro del campo magnético del imán, observaremos una corriente. Tal efecto es simplemente otra consecuencia de la ecuación (1.1) —los electrones del alambre sufren la fuerza $\mathbf{F} = q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$. Los electrones tienen una velocidad lateral, puesto que se desplazan con el alambre. Esta $\mathbf{v}$ con un $\mathbf{B}$ vertical del imán produce una fuerza sobre los electrones dirigida según el alambre, la cual hace mover los electrones hacia el galvanómetro.

Supongan, en cambio, que dejemos el alambre y que desplazemos el imán. Esperamos, a causa de la relatividad, no encontrar diferencia, y observamos en efecto una corriente similar en el galvanómetro. ¿Cómo produce fuerzas el campo magnético sobre las cargas en reposo? De acuerdo con la ecuación (1.1) debe haber un campo eléctrico. Un imán en movimiento debe crear un campo eléctrico. La ecuación (1.7) expresa cuantitativamente cómo se produce. Esta ecuación describe numerosos fenómenos de gran interés práctico, tales como los que se producen en los generadores eléctricos y en los transformadores.

La consecuencia más notable de nuestras ecuaciones es que la combinación de la ecuación (1.7) y la ecuación (1.9) contiene la explicación de la radiación electromagnética a grandes distancias. La razón es a grandes rasgos la siguiente: supongan que en cierto lugar tengamos un campo magnético que está creciendo debido, digamos, a que una corriente se establece súbitamente en el alambre. Luego, por la ecuación (1.7) debe haber una circulación de un campo eléctrico. Como la creación de un campo eléctrico produce esta circulación, de acuerdo con la ecuación (1.9) deberá generarse una circulación magnética. Pero la creación de este campo magnético producirá una nueva circulación del campo eléctrico, y así sucesivamente. De esta manera avanzan los campos en el espacio sin recurrir a cargas o corrientes, excepto en la fuente. Es por esto que nos podemos ver los unos a los otros. Todo se encuentra en las ecuaciones de los campos electromagnéticos.

Vamos a hacer ahora algunas aclaraciones sobre nuestra forma de examinar este tema. Ustedes podrán decir: "Toda esta historia de flujos y circulaciones es bien abstracta. Hay campos eléctricos en todo punto del espacio; luego están esas "leyes". ¿Pero qué está sucediendo *realmente*? Por qué no se puede explicar, por ejemplo, lo que sucede *realmente* entre las cargas". Bien, esto depende de los prejuicios que tengan. Muchos físicos solían decir que la acción a distancia, sin intermediarios, es inconcebible; (¿cómo podían encontrar una idea inconcebible si ya la habían concebido?). Ellos dirían: "Miren, las únicas fuerzas que conocemos son las que se ejercen en forma directa entre un trozo de materia y otro. Es imposible que pueda haber una fuerza sin nada que la transmita". ¿Pero qué sucede realmente cuando estudiamos "la acción directa" de un trozo de materia sobre el otro? Descubrimos que un trozo no está en contacto con otro: están ligeramente separados y hay fuerzas eléctricas actuando a una escala minúscula. Hallamos, desde luego, que para explicar las así llamadas fuerzas de acción directa debemos recurrir a las fuerzas eléctricas. ¡Es ciertamente poco razonable insistir sobre el hecho de que una fuerza eléctrica debe relacionarse a la vieja noción familiar de fuerza muscular que empuja o que tira, puesto que se encuentra que las fuerzas musculares deben ser interpretadas como fuerzas eléctricas! La única cuestión razonable es la de preguntar cuál es el método *más cómodo* para describir los efectos eléctricos. Algunos prefieren presentarlos como una interacción a distancia entre cargas, y utilizan una ley complicada. Otros se apasionan por las líneas de campo. Dibujan siempre líneas de campo y piensan que escribir los E o los B es muy abstracto. Las líneas de campo, sin embargo, son solamente una forma burda de describir un campo, y es difícil dar las leyes cuantitativas correctas directamente en términos de líneas de campo. Además el concepto de líneas de campo no contiene el principio fundamental de la electrodinámica que es el principio de superposición. Aunque conozcamos el aspecto de las líneas de campo para un conjunto de cargas y también para otro conjunto, no tenemos ninguna idea del aspecto de las líneas de campo obtenidas cuando los dos conjuntos de cargas se presentan simultáneamente. Desde el punto de vista matemático, por el contrario, la superposición es fácil —simplemente sumamos los dos vectores—. Las líneas de campo tienen la ventaja de dar una imagen viva, pero tienen algunas desventajas. La interacción directa es una forma de ver el problema que presenta grandes ventajas cuando se refiere a cargas eléctricas en reposo, pero tiene grandes desventajas cuando se trata de cargas en movimiento rápido.

El mejor método es utilizar el concepto abstracto de campo. Que sea abstracto es desafortunado, pero necesario. Las tentativas para tratar de representar el campo eléctrico como el movimiento de ruedas de un engranaje, o en términos de líneas de campo, o como tensiones en un cierto material, han costado mucho más esfuerzo a los físicos que el que hubiera costado obtener simplemente respuestas correctas sobre la electrodinámica. Es interesante hacer notar que las ecuaciones correctas para el comportamiento de la luz en cristales fue encontrado por McCullough en 1843. Pero los físicos le dijeron: "Sí, pero no hay ningún material real cuyas propiedades mecánicas puedan satisfacer estas ecuaciones, y puesto que la luz es una oscilación que debe vibrar en alguna cosa, no podemos creer en esta historia de las ecuaciones abstractas". Si los físicos hubiesen tenido una mentalidad más avanzada, habrían podido creer en las ecuaciones correctas para el comportamiento de la luz mucho antes de lo que lo hicieron.

En el caso del campo magnético podemos señalar lo siguiente: supongan que finalmente accedemos a construir una imagen del campo magnético en términos de alguna clase de líneas o de ruedas de un engranaje moviéndose en el espacio. Tratemos de explicar qué es lo que sucede cuando dos cargas se mueven en el espacio, paralelamente y con la misma velocidad. Dado que están en movimiento, se comportarán como dos corrientes y tendrán un campo magnético asociado con ellas (como las corrientes en el alambre en la figura 1-8). Sin embargo, un observador que se desplace con las dos cargas las verá como si estuvieran quietas y dirá que no existen campos magnéticos. ¡Las "ruedas de engranaje" o las "líneas" desaparecen cuando uno se desplaza con el objeto! Todo lo que hemos hecho no es más que inventar un *nuevo* problema. ¿¿Cómo pueden desaparecer las ruedas de engranaje?? Los que dibujan líneas de campo se encuentran con dificultades similares. No solamente es imposible decir si las líneas de campo se desplazan o no con las cargas —pueden desaparecer completamente en ciertos sistemas de coordenadas.

Lo que estamos diciendo, desde luego, es que el magnetismo es realmente un efecto relativista. En el caso de las dos cargas que acabamos de considerar, moviéndose paralelamente entre sí, es de esperar que tengamos que hacer correcciones relativistas a sus movimientos, con términos del orden de v^2/c^2 . Estas correcciones deben corresponder a la fuerza magnética. Pero ¿qué decir de la fuerza que se ejerce entre los dos alambres en nuestra experiencia (Fig. 1-8)? Allí la fuerza magnética es la *única* fuerza. No necesita una "corrección relativista". Además, si estimamos las velocidades de los electrones en el alambre (ustedes lo pueden hacer por sí mismos), encontramos que su velocidad promedio a lo largo del alambre es alrededor de 0.01 centímetro por segundo. Así pues, v^2/c^2 es alrededor de 10^{-25} . Seguramente una "corrección" despreciable. ¡Pero no! Aunque la fuerza magnética es, en este caso, 10^{-25} veces la fuerza eléctrica "normal" entre los electrones en movimiento, recuerden que las fuerzas eléctricas "normales" deben desaparecer en razón del equilibrio eléctrico casi perfecto —puesto que el alambre tiene el mismo número de protones que de electrones—. El equilibrio es mucho más preciso que una parte en 10^{25} , y el pequeño término relativista que hemos llamado fuerza magnética es el único que queda. Es entonces el término predominante.

Es la compensación casi perfecta de los efectos eléctricos la que ha permitido el estudio de los efectos relativistas (es decir el magnetismo) y descubrir las ecuaciones correctas —hasta el orden de v^2/c^2 — si bien los físicos no sabían lo que estaba sucediendo. Y por ello cuando la relatividad fue descubierta no se necesitó cambiar las leyes del electromagnetismo. Estas, contrariamente a las leyes de la mecánica, eran correctas con la precisión de v^2/c^2 .

1-6 El electromagnetismo en la ciencia y la tecnología

Terminaremos este capítulo puntualizando que, de los muchos fenómenos estudiados por los griegos había dos muy extraños: si se frotaba un pedazo de ámbar se podía levantar pequeños trozos de papiro y había extrañas piedras de la isla de Magnesia que atraían el hierro. Es sorprendente pensar que estos eran los únicos fenómenos conocidos por los griegos en los cuales aparecían los efectos de la electricidad y el magnetismo. La razón de que sólo estos dos fenómenos aparecieran se debe principalmente a la fantástica precisión del equilibrio de cargas que mencionamos anteriormente. Estudios de científicos posteriores a los griegos

descubrieron una serie de fenómenos nuevos que eran en realidad algunos aspectos de estos efectos del ámbar y de la piedra imán o de ella. Ahora comprendemos que los fenómenos de interacción química y, en última instancia, los de la vida misma, deben ser comprendidos en términos de electromagnetismo.

Al mismo tiempo que se desarrollaba el conocimiento del electromagnetismo, comenzaron a aparecer posibilidades técnicas que desafiaban la imaginación de las generaciones precedentes: se hizo posible el envío de señales a largas distancias por medio del telégrafo y la posibilidad de hablar con otra persona a muchos kilómetros de distancia sin ninguna conexión con la misma, y de comandar sistemas de enorme potencia —una inmensa turbina hidráulica conectada por medio de cables de cientos de miles de kilómetros con un motor que responde a la potencia suministrada por la turbina —muchos miles de cables de derivación— diez mil motores en diez mil lugares diferentes poniendo en funcionamiento las máquinas de la industria y del hogar— y todo ello debido al conocimiento de las leyes del electromagnetismo.

Hoy en día estamos aplicando efectos cada vez más sutiles. Las fuerzas eléctricas, enormes como son, pueden también ser muy pequeñas, y las podemos controlar y utilizar en miles de formas. Nuestros instrumentos son tan sensibles que podemos decir lo que está haciendo un hombre a varios cientos de kilómetros de distancia a través de los efectos que él produzca sobre los electrones de una pequeña varilla de metal. ¡Todo lo que necesitamos es hacer actuar la varilla como antena para un receptor de televisión!

Una larga mirada a la historia de la humanidad —vista digamos desde, hace diez mil años— mostrará, sin lugar a dudas, que el descubrimiento de Maxwell de las leyes de la electrodinámica es el hecho más significativo del siglo XIX. La guerra Civil norteamericana sería un hecho provinciano insignificante si la comparásemos con este importante evento científico de la misma década.