HISTORIA DEL ELECTROMAGNETISMO

Rafael López Valverde

Los antiguos griegos, 800 años a.C., conocieron las propiedades eléctricas del ámbar, o capacidad para atraer pequeños cuerpos tras ser frotado, y también las propiedades magnéticas de ciertas rocas ígneas, llamadas μαγνηζ (magnes), que podían atraer pequeños trozos de hierro. La leyenda atribuye este nombre al pastor Magnes, quien observó cómo sus zapatos, provistos de tachuelas de hierro, se quedaban pegados al caminar por encima de dichas rocas. Como quiera que fuere, la magnetita, compuesta por óxido ferroso-férrico (Fe_3O_4), era relativamente fácil de hallar en las proximidades de Magnesia, una ciudad griega situada en el norte del Mar Egeo.

Algunos historiadores coinciden en que la brújula era ya utilizada por los chinos varios siglos antes de que los griegos tuvieran conocimiento de las propiedades de la magnetita. No obstante parece que su aparición en Europa tiene lugar hacia el año 1100 de nuestra era, coincidiendo con el interés despertado por la navegación.

El primer documento escrito sobre los imanes que ha llegado intacto hasta nuestros días data del 8 de agosto de 1269. Se trata de una carta que un ingeniero llamado Pedro de Maricourt (una ciudad de Picardía, no identificable hoy día) escribe a un amigo suyo en París. En ella se describe el comportamiento de pequeñas esferas de magnetitas que simulaban la Tierra, llamadas *terrellas*, y de las que Pedro observó que presentaban dos polos hacia los que se orientaban pequeñas agujas magnéticas.

Ya en el año 1436 aparece el primer mapa en el que se tiene en cuenta el hecho de que no en todos los sitios la brújula apunta al Norte exactamente (a esta conclusión hubiera podido llegar Pedro de Maricourt si hubiera medido, durante sus experimentos, la inclinación de las pequeñas brújulas que colocaba sobre sus terrellas). Los fabricantes de brújulas de entonces corregían esta desviación montando sus agujas con el ángulo compensado. Y no fue hasta el año 1576 cuando un fabricante de brújulas inglés, Robert Norman, midió por primera vez el ángulo de inclinación de una aguja magnética, gracias a que se le ocurrió instalar una de ellas con un eje horizontal en lugar de equilibrarla con el eje vertical como era habitual (McKeehan, 1971).

Estos trabajos sirvieron de base a William Gilbert, médico de la reina Isabel I de Inglaterra, quien en el año 1600 publicó en latín el primer libro sobre imanes: *De Magnete*. En él recoge todos los conocimientos sobre magnetismo de la época: describe cómo utilizar el *versorium*, un instrumento inventado por él y que consta de una aguja de acero imanada, suspendida de un hilo sin trenzar, con el que podía medir el ángulo de atracción entre dos imanes. Como conclusión de sus experimentos, Gilbert insiste en que el extremo norte de una brújula es similar al polo sur magnético de la Tierra, que la consideraba un gran imán permanente. También prueba que un hierro pierde su propiedad magnética si se le calienta adecuadamente, y la recupera si se enfría y se lo golpea simultáneamente.

Durante la primera mitad del siglo XVIII Dufay en Francia llegó a establecer la existencia de dos clases de electricidad, designadas más adelante positiva (la del vidrio) y negativa (la del ámbar) por Franklin; mientras tanto, en Inglaterra, Gray descubrió que la electricidad podía pasar de unos cuerpos a otros a través de hilos metálicos y en Holanda von Kleist y Musschenbroeck descubrieron que podía llegar a acumularse en una botella especial o botella de Leiden. Al mismo tiempo, se inventaron las primeras máquinas de electrización por rozamiento, que tuvieron aplicaciones médicas y, sobre todo, lúdicas al ponerse de moda como juego de sociedad en los aristocráticos salones de la época (Bernal, 1975).

En la segunda mitad del siglo aparecieron las primeras medidas cuantitativas de los fenómenos eléctricos y magnéticos: en 1750 John Michell utilizó una balanza de torsión para establecer que las fuerzas que ejercen los polos magnéticos entre sí varían inversamente con el cuadrado de la distancia que los separa, y, pocos años después, Charles Coulomb, utilizando una balanza de torsión por él diseñada, estableció en 1785 la ley que lleva su nombre para cargas eléctricas puntuales en reposo. En definitiva, la ley fundamental descubierta por Coulomb venía a establecer el mismo re-

sultado anterior: la acción a distancia entre dos cargas dependía del inverso del cuadrado de su distancia. De este modo las primeras leyes cuantitativas sobre la electricidad y el magnetismo parecían seguir la idea newtoniana de atracción entre cuerpos celestes: las fuerzas eléctricas y magnéticas entre dos cuerpos separados se ejercen como una *acción a distancia*, es decir, instantáneamente y sin intermediar materia alguna. ¿Cómo es esto posible?, se preguntaron los cartesianos de la época (Cazenobe, 1984).

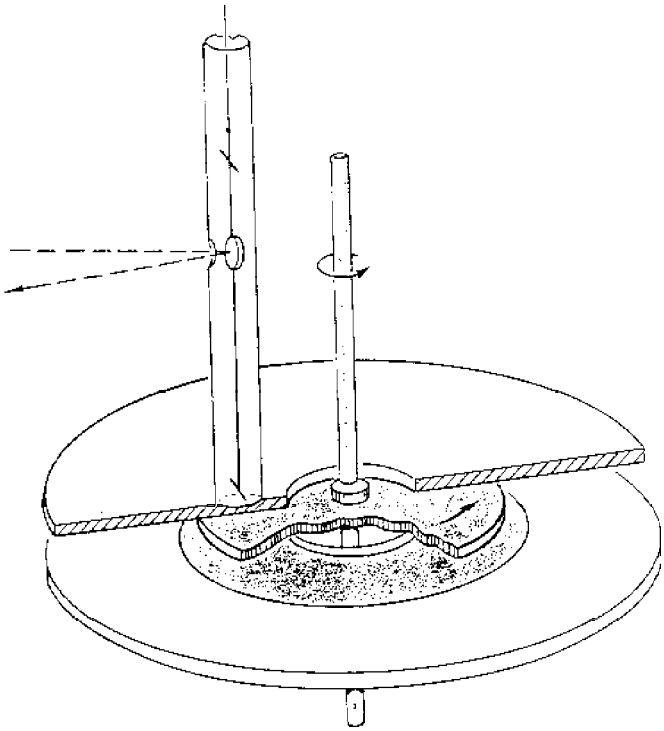
El descubrimiento de la electricidad propiamente dicha no tiene lugar hasta el comienzo del siglo XIX. En una carta dirigida al presidente de la Royal Society de Londres, con fecha del 20 de marzo de 1800, Volta daba a conocer el primer generador eléctrico (pila de Volta), hecho que originó una desenfrenada carrera por construir la pila de mayor número de elementos y sus posibles aplicaciones, entre ellas el descubrimiento de los primeros metales alcalinos (Davy) por electrólisis de sus sales fundidas (Bocanegra, 1997).

Las pilas de Volta presentaban el inconveniente de la polarización. Observado por Ritter en 1803, esto consistía en que los electrodos se polarizaban hasta convertirse en pilas secundarias de corrientes inversas, una vez abierto el circuito. Para remediar el problema aparecieron las pilas impolarizables: Becquerel, 1829; Daniell, 1837; Bunsen, 1841; Grove, 1839 (de gas) y los acumuladores de Planté, 1860.

Por otro lado, el efecto Seebeck, publicado en 1823, o efecto termoeléctrico, hizo posible el descubrimiento de G. S. Ohm de 1826, por el cual la intensidad de corriente que recorre un circuito es el cociente entre la tensión que suministra el generador y las resistencias del circuito: $I = E/(r+R)$. Estas conclusiones aparecieron publicadas en su célebre *Die Galvanische Kitte mathematisch bearbertet*, donde se sigue un paralelismo con la teoría del calor de Fourier (1822). Sin embargo, hasta 1845 Kirchoff no identificó la fuerza electroscópica de Ohm con el potencial eléctrico de Poisson y de Green. Por esta misma época, Weber diseñó instrumentos para medir y definir diversas magnitudes eléctricas y magnéticas, estudios que llevaron a establecer las equivalencias actuales entre ambas (Taton, 1988).

En general, los autores suelen coincidir en que la fecha del nacimiento del electromagnetismo moderno es el 21 de Julio de 1820, día en el que aparece en Copenhague la publicación en latín de la famosa experiencia de Oersted: la desviación que sufre una aguja magnética situada en las proximidades de un conductor eléctrico. El descubrimiento tuvo lugar unos meses antes y, al parecer, no fue tan al azar como se cuenta -generalmente se acepta que fue en el transcurso de una conferencia- puesto que H. C. Oersted (1777-1851) llevaba desde 1807 realizando experimentos para encontrar alguna relación entre electricidad y magnetismo. La idea no era del todo nueva ya que parece confirmado que desde el primer tercio del siglo XVIII se buscaba tal relación, pues se conocía suficientemente la imanación del hierro por el rayo.

Sin embargo, cuenta Gamow en su conocida *Biografía de la Física* que Oersted tuvo la idea, mientras se dirigía a clase, de que podría existir alguna interacción entre un imán y una corriente eléctrica, a pesar de que se había demostrado con anterioridad que las cargas eléctricas y los imanes no sufren interacción alguna. Al llegar a su aula realizó el experimento ante sus alumnos situando una brújula en las inmediaciones de un hilo conductor conectado a su pila de Volta. Repitió el experimento varias veces para asegurarse de que el efecto observado no dependía de las corrientes de aire generadas por el



Experimento de Rowland

calentamiento del conductor ni otros factores, y así llegó a establecer rotundamente la orientación de la brújula por interacción con el conductor.

Tras publicarse en Copenhague se publicó en Alemania, Inglaterra y Francia en *Annales de Chimie et de Physique*, donde el ambiente científico que reinaba en aquel momento en la Académie de Sciences, no cabe duda, debió ser idóneo para recoger el relevo de las experimentaciones. Así fue, el lunes 11 de septiembre de 1820, Arago comunica a los miembros de la Académie el resultado de la experiencia de Oersted, que había

conocido días antes en el curso de un viaje por Europa. André Marie Ampère había escuchado con atención la exposición de Arago y a la reunión plenaria del lunes siguiente (18/9/1820) presentó a los miembros de la Académie una primera memoria donde demostraba que las corrientes eléctricas se atraen o repelen recíprocamente según unas leyes concretas. El mismo Ampére introdujo el término "electrodinámica" para hacer referencia a estos nuevos fenómenos.

Aquel mismo mes de septiembre Arago descubrió la imanación del hierro por las corrientes e inventó el electroimán. Durante el mes siguiente se realiza la publicación de los resultados obtenidos por Biot y Savart (30/10/1820). Estos investigadores midieron la dirección de las oscilaciones de una aguja imantada en función de la distancia a una corriente rectilínea, indefinida. Establecieron experimentalmente que la fuerza depende de $1/r^2$ y de la intensidad de la corriente (Taton, 1988).

Semanas después, basándose en estos resultados, Laplace dedujo matemáticamente la ley de Biot y Savart y, como consecuencia, resultó que el campo magnético creado por un elemento de corriente dl a distancia r es transversal. Esto no agradó a los newtonianos, que no entendieron entonces cómo la nueva fuerza a distancia (la fuerza magnética) se manifestaba perpendicularmente a la dirección en la que interaccionaban los cuerpos.

De esta forma, a fines de 1820 se conocían las primeras leyes cuantitativas de la electrodinámica y hacia 1826 Ampère ultimaba una teoría que permaneció durante casi 50 años, hasta la llegada de la teoría electromagnética de Maxwell.

De la propia experiencia de Oersted se deduce la posibilidad de obtener corrientes eléctricas por métodos electrodinámicos y por ello muchos investigadores buscaron durante años la relación inversa, es decir, la obtención de corrientes inducidas. El mismo Ampère, junto con La Rive, realizó un experimento para obtener corrientes eléctricas por influencia de otras: una espira cuadrada está suspendida en el interior de una bobina circular colocada en el seno de un campo magnético de herradura; al cerrar y al abrir el circuito de la bobina, la espira se desvía siendo atraída o repelida por el imán. Ampère y La Rive no supieron interpretar este fenómeno y lo lamentaron años después.

El 3 de septiembre de 1821 realiza Faraday (1791-1867) su primera investigación experimental en electricidad: el giro de un polo magnético alrededor de una corriente eléctrica y a la inversa, el giro de un conductor rectilíneo alrededor de un polo magnético sumergido en mercurio. Es el primer motor eléctrico, anterior incluso al que construye Barlow en marzo de 1822, su conocida rueda dentada.

En 1824 Faraday realiza infructuosamente los primeros intentos para lograr las corrientes inducidas. En ese mismo año, Arago observa que las oscilaciones de una aguja magnética se amortiguan al colocar un disco metálico debajo de ella, y que al girar el disco gira la aguja. Es el magnetismo de rotación de Arago. Este descubrimiento hubiera dado origen a las corrientes inducidas si se hubiera interpretado debidamente. Foucault investigó más adelante estas corrientes y Tyndal construyó un péndulo hueco que contenía un metal de bajo punto de fusión. La energía disipada por las oscilaciones calentaban el metal, se fundía y goteaba.

El 29 de agosto de 1831 Faraday descubre las corrientes inducidas: observó corrientes inducidas en un circuito provisto de un galvanómetro al abrir y cerrar otro circuito contiguo conectado a una batería, los cuales compartían un núcleo de hierro dulce. El 17 de octubre de 1831 descubrió que al acercar y al alejar un imán a una bobina se generaba igualmente una corriente inducida.

Estos resultados fueron publicados en 1832 en la *Philosophical Transactions* de la Royal Society con el título de *Experimental Researches in Electricity*, la primera de una serie monumental de 30 memorias que abarcó casi 25 años (Joshep Henry se adelantó en los EE.UU. pero no llegó a publicar su descubrimiento). Faraday demostró que la condición esencial para que se produzca la inducción magnética de una corriente eléctrica es que el circuito conductor corte el sistema de líneas que representan la fuerza magnética que emana de un imán o de otra corriente. Con esto, los fenómenos de inducción electromagnética parecían escaparse de la interpretación de acción a distancia de los demás fenómenos electromagnéticos.

El 28 de octubre del mismo año experimenta con la rueda de Faraday, muy similar a la de Barlow pero sin dientes, y en 1832 Pixii construyó su motor-generador de corriente alterna, en el que un imán en herradura gira frente a una bobina en forma de herradura. Poco después, en 1834 Lenz establece el sentido correcto de las corrientes inducidas, esto es, el de oponerse a la causa que la genera; más adelante, entre los años 1845-48 Franz Neumann (1798-1895) funda la primera teoría matemática de la inducción al estudiar la interacción entre dos circuitos en base a la ley de Lenz. De esta época data su conocida fórmula que da los coeficientes de inducción mutua entre dos circuitos.

Faraday fue un caso de excepcional relevancia. Sin mayor formación que la autodidacta, de aprendiz de encuadernador que leía con avidez todos los libros de ciencia que pasaban por sus manos, pasó a ayudante de laboratorio de Davy en la Royal Institution, donde vivió como científico profesional gracias a las subvencio-

nes populares que mantenían dicha institución. En los sótanos de la Royal Institution gozaba de uno de los laboratorios mejor equipados del mundo y se le conocen más de cuatrocientas publicaciones. En ellas, las aportaciones más importantes están relacionadas con el descubrimiento de la inducción electromagnética y con la introducción, por primera vez, de conceptos como el de campo y líneas de fuerza, electrólisis, iones, aniones, etc. Entre sus descubrimientos destacan: las leyes de la electrólisis, el descubrimiento del benceno (1824), la licuefacción del cloro y otros gases (1823), la fabricación de vidrios pesados de borosilicato de plomo (1825-29), la jaula de Faraday, los fenómenos de inducción electromagnética, el descubrimiento del diamagnetismo (1845) y del paramagnetismo, la rotación del plano de polarización de la luz en el seno de un campo magnético o efecto Faraday. Éste último, llamado también efecto magneto-óptico, fue descubierto en 1845 al hacer pasar un haz de luz polarizada a través de su vidrio pesado colocado sobre un potente imán (Cantor, 1991).

Sin embargo, la mayor aportación de Faraday a la ciencia son sus publicaciones y sus libros de laboratorio, pues, gracias a la lectura de las primeras se pudo inspirar James Clerk Maxwell (1831-1879) para realizar su labor sintetizadora y compiladora recogida en cuatro célebres publicaciones. En ellas rechaza la idea newtoniana de acción a distancia al considerar la existencia de un éter elástico que permite la propagación de los campos de fuerza y de las ondas electromagnéticas. Inspirado en los trabajos sobre la propagación del calor de Fourier, en los de óptica ondulatoria de Fresnel y en las ideas de campo y líneas de campo de Faraday (introducidos por él en 1845), Maxwell termina por perfilar definitivamente en su obra cumbre, *A Treatise on Electricity and Magnetism* (1873), sus conocidas cuatro leyes de Maxwell en derivadas parciales, que sintetizan los conocimientos de electricidad y magnetismo, y lleva a cabo la segunda gran unificación de fenómenos físicos (aparentemente distintos) de la historia de la ciencia: los fenómenos eléctricos y magnéticos tienen el mismo origen y la luz no es más que la propagación de una perturbación electromagnética en el vacío; en resumidas cuentas, las cargas eléctricas generan los fenómenos eléctricos y el movimiento de dichas cargas genera los fenómenos magnéticos (Hendry, 1986).

Entre las confirmaciones experimentales de la teoría electromagnética de Maxwell están el conocido disco de Rowland (1878), con el que su autor confirmó la predicción de que un disco cargado en movimiento genera un campo magnético, el experimento de Roentgen de la lámina dieléctrica polarizada, la cual, en movimiento, se comporta igual que una corriente eléctrica, y el descubrimiento de las ondas electromagnéticas de Hertz (1888), uno de los más espectaculares de la historia de la Ciencia.

Tras la muerte de Maxwell, acaecida prematuramente en 1879 (año en que nace Einstein), se va desarrollando poco a poco la nueva teoría electromagnética. El paso a la forma vectorial de las ecuaciones de Maxwell fue obra de Oliver Heaviside (1850-1925), sin duda uno de los científicos más románticos de finales del siglo XIX, y del propio Hertz. Heaviside, empleado telegrafista y sobrino político de Sir Charles Wheastone, abandonó su puesto de trabajo para dedicarse al estudio del electromagnetismo. Durante varios años esta actividad ocupó todo su tiempo, hasta el punto de que su familia llegó a temer por su salud. A sus 24 años hizo un trabajo analítico sobre el puente de Wheastone que le valió una cita de Maxwell en la segunda edición del *A Treatise on Electricity and Magnetism* y, más adelante, utilizando cálculo vectorial, simplificó las 20 ecuaciones de Maxwell a la forma que actualmente tienen. Esto sería después conocido como la obra de Hertz-Heaviside. En 1884 junto con Poynting describió el camino que lleva la energía electromagnética al propagarse en el vacío. Predijo el fenómeno de Cerenkov, el papel de la ionosfera en la reflexión de las ondas de radio (onda larga) y, en 1891, como reconocimiento a su dedicación a la ciencia, fue nombrado Fellow de la Royal Society de Londres, la más alta distinción científica en el Reino Unido.

BIBLIOGRAFÍA

BERNAL, J.D. *La proyección del hombre. Historia de la Física clásica*. Siglo XXI. 1975.

BOCANEGRA, J.M. et al. *Ciencia y Sociedad en el Siglo XIX*. Cep Málaga. 1997.

CANTOR, G. et al. *Faraday*. Alianza Editorial. 1991.

CAZENOBE, J. *¿Fue Maxwell precursor de Hertz?* Mundo Científico, 40. 1984.

HENDRY, J. *James Clerk Maxwell and the Theory of de Electromagnetic Field*. Adam Hilder Ltd, Bristol and Bostom. 1986.

MCKEEHAN, L.W. *Magnetismo*. Van Nostrand Momentum Books. E. Reverté Mexicana. 1971.

TATON, R. *Historia General de las Ciencias*. Orbis. 1988.

Rafael López Valverde
I.E.S. "PABLO PICASSO"