

Breve aproximación histórica¹

Muchos de los fenómenos físicos son susceptibles, desde muy antiguo, de observación inmediata y habitual; sin embargo, la electricidad no. Esto es, en contacto directo con la naturaleza la electricidad no se percibe de forma evidente y esto explica el desarrollo tardío de esta parte de la física. Los fenómenos meteorológicos, como elemento más próximo, no precisaban en la antigüedad de nuevas teorías para ser integrados en el conocimiento y en el lenguaje del día a día.

El poder atractivo del ámbar frotado y de la piedra imán son fenómenos conocidos desde los griegos y las experiencias sobre este poder atractivo se repitieron durante siglos sin aportar nada nuevo, con la excepción del empleo de la brújula en navegación, que fue introducida en Europa a finales del siglo XII procedente de China.

La primera exposición clara sobre los imanes, la debemos a Pedro Peregrino², quien en 1269 explicó como determinar los polos de la piedra imán mediante una aguja imanada, dio los nombres de polo Norte y Sur a los del imán y describió la ley de atracción de los polos opuestos y de repulsión de los de igual nombre.

Durante la Edad Media y el Renacimiento, no hubo mucho progreso, con excepción de William Gilbert (1544-1603), quien en el año 1600 publicó su tratado “De magnete” en el que analizaba las ideas de sus antecesores sometiéndolas a una comprobación experimental sistemática.³ No obstante, Gilbert no llegó a la completa interpretación de sus experimentos.

El estudio estructurado de los fenómenos eléctricos tuvo lugar en el siglo XVIII. Algunos investigadores relevantes, como Stephen Gray (1670-1736), Charles François Dufay (1698-1739), Benjamin Franklin (1706-1790) y Frank Aepinus (1724-1802), entre otros, dedicaron muchos de sus esfuerzos al estudio de la electricidad y contribuyeron no poco a los primeros experimentos y teorías. A pesar de todo, sus trabajos apenas guardaban relación, presentando un panorama acumulativo y disperso de experiencias sin una interpretación fundamental.

Otto de Guericke (1602-1685) inventó la primera máquina eléctrica y demostró que los cuerpos atraídos por “razones” eléctricas se repelen después del contacto. La teoría de los dos fluidos propuesta por Dufay fue admitida por varios investigadores que comenzaron un conjunto de experiencias para la

¹ Entre otras referencias puntuales, las que citamos a continuación han sido base en este apartado:

Rodríguez, M. ; Matemáticas y Electromagnetismo, Revista Española de Física 14(5) (2000) 31.

Pomer, F. (1989) Proyecto Docente.

Hernando, A., En el cuarto centenario de “De Magnete”. Revista Española de Física 14(4) (2000) 5.

Sánchez del Río (1986) “Los principios de la Física en su evolución Histórica”. Universidad Complutense de Madrid, Madrid.

Whittaker, E. (1989) “ A hystory of the Theories of Aether and Electricity”. Dover.

² “Epístola Peregrino de Maricourt de magnete”, 1269. Citada por A. Hernando en REF 14(4) (2000)5.

³ Se cumplen 500 años de esta publicación, que marca un cambio conceptual significativo en la evolución científica del magnetismo. Véase el artículo de A. Hernando (2000), Revista Española de Física 14, 5-6.

búsqueda de estos fluidos, marcando un punto de inflexión en lo que a metodología se refiere. A mediados del siglo XVIII Georg von Kleist (1700-1748) y Pieter von Musschenbrock (1692-1761), trabajando sobre la posibilidad de “embotellar” estos fluidos, descubrieron independientemente la llamada botella de Leiden, y poco después se puso de manifiesto la corriente eléctrica, identificándola como el movimiento del fluido o los fluidos eléctricos.

Como decíamos, durante este siglo proliferaron los experimentadores en fenómenos eléctricos. Benjamin Franklin introdujo la teoría del fluido único explicando la electrización por frotamiento por el paso de este fluido de un cuerpo a otro. Franklin observó, junto con Joseph Priestley (1733-1804), que una bolita de corcho frotada suspendida dentro de una copa metálica, no era afectada por la electrificación de ésta. Ello hizo pensar a Priestley que las atracciones eléctricas podrían obedecer leyes análogas a las de la gravitación.

Pero fueron Henry Cavendish (1731-1810) y Charles Augustin Coulomb (1736-1806) los que descubrieron la ley de la atracción eléctrica. La influencia de Coulomb fue muy superior a la de Cavendish porque este no publicó sus resultados que sólo fueron conocidos cuando, un siglo más tarde, los sacó a la luz Maxwell. Coulomb empleó con toda claridad el concepto de carga eléctrica en sus experiencias y con ellas estableció las bases experimentales y teóricas de la electrostática. Durante algunos años, Coulomb estuvo trabajando sobre la interacción entre varillas imanadas y encontró también una ley inversamente proporcional al cuadrado de la distancia.

Los matemáticos de finales del siglo XVIII y principios del XIX constataron la analogía existente entre la ley de Coulomb y la ley de Newton de la gravitación, lo que les llevó a adaptar los métodos desarrollados para la mecánica celeste a la electrostática, edificando así la teoría del potencial. Lagrange demostró que las fuerzas gravitatorias y electrostáticas derivan de una función potencial. Laplace, por su lado, demostró que estas funciones potencial satisfacen en el espacio vacío una ecuación en derivadas parciales de segundo orden. Simeon Denis Poisson (1781-1842) en 1813 extendió los cálculos a las regiones que contienen materia, llamando la atención sobre su utilidad en electrostática y asignando a los conductores el papel de superficies equipotenciales; años después (1824) centró su atención sobre el magnetismo describiendo el estado de un cuerpo magnético por medio del vector imanación que mide localmente el momento magnético por unidad de volumen. Estas nuevas ideas fueron discutidas y precisadas durante el siglo XIX por George Green (1793-1841), Carl Friedrich Gauss (1777-1855) y Bernard Riemann (1826-1866). Asimismo, Peter Dirichlet (1805-1859) y Franz Neumann (1798-1895) demostraron la unicidad de la solución.

Como en otras ramas de la Física, las teorías de los fenómenos eléctricos y magnéticos tuvieron su origen en modelos mecánicos. De hecho, una buena parte del esfuerzo investigador hasta finales del siglo XIX se concentró en la construcción de un modelo mecánico de la electricidad y el magnetismo.

Finalizaba el siglo XVIII con el descubrimiento de la primera pila por Alessandro Volta (1745-1827). Volta inventó también el electrómetro de pan de oro, con el que ordenó los metales según su electronegatividad. Así fue elaborándose, poco a poco, el concepto de fuerza electromotriz. Con las pilas podían obtenerse corrientes duraderas y realizar experiencias con estas. Esto dio lugar a que se conocieran los primeros fenómenos electrolíticos y los efectos magnéticos de las corrientes descubiertos en 1820 por Hans Christian Oersted (1777-1851). El descubrimiento de Oersted causó un impacto inmediato. Dominique

François Arago (1786-1853) estudió cualitativamente el fenómeno con diversas experiencias e introdujo en París la noticia del descubrimiento de Oersted. Allí, Jean Baptiste Biot (1774-1862) y Felix Savart (1791-1841) realizaron los primeros estudios cuantitativos y de una forma más completa y extensa fueron las investigaciones de Andre Marie Ampère, las que permitieron la explicación de estos fenómenos, deduciendo y comprobando experimentalmente la ley de acciones electrodinámicas. Su labor se recoge en su "Memoire sur la théorie mathématique des phénomènes electrodynamiques".

Desde que se conoció que las corrientes eléctricas producen fuerzas magnéticas, muchos investigadores buscaron el efecto simétrico: fuerzas magnéticas producirían corrientes eléctricas. Fue el inglés Michael Faraday (1791-1867), quien en 1831 encontró la mencionada conexión. El fenómeno de la autoinducción fue descubierto por Faraday e independientemente, en 1837, por Joseph Henry (1797-1878).

La idea directriz de la física de campos, forjada lentamente en el pensamiento científico se debe a Faraday y Maxwell, quienes intentaron explicar la fuerza a distancia mediante acciones que se ejercen por contigüidad, atribuyendo a cada entorno espacial propiedades físicas. Michael Faraday fue el investigador más destacado en el campo del electromagnetismo y probablemente uno de los científicos experimentales más importantes en la historia de la física. Faraday no tenía grandes bases matemáticas -quizás su origen humilde no le permitió toda la formación necesaria y la historia nos recuerda demasiado insistentemente esta carencia⁴-, pero sí gozaba de una gran intuición, que le llevó a visualizar las líneas de fuerza que rodearían a los cuerpos cargados y a los imanados; igualmente, intuyó que las ondas luminosas se transmitían por esas líneas de fuerza (1846)⁵. En su "Experimental Researches in Electricity", que data de 1855, muestra el desarrollo de sus experiencias guiadas por la intuición, experiencias cuyo contenido profundo solo aparecería al darles Maxwell la forma matemática adecuada. En esta gran obra aparece el concepto de línea y tubo de fuerza eléctrico, el concepto de tensión que ejercen entre sí dos elementos contiguos del tubo, el concepto de líneas de fuerza magnética y su relación con las líneas de corriente eléctrica. Faraday consideró el medio como transmisor de acciones eléctricas y magnéticas, introdujo el concepto de polarización, descubrió el día y el paramagnetismo, así como los fenómenos magnetoópticos, enunció las leyes de la electrólisis y culminó con la ley de inducción electromagnética, que establece las relaciones entre electricidad y magnetismo.

Las ideas de Faraday contribuyeron a consolidar el modo de acción por contacto frente a la acción a distancia que caracterizaba los fenómenos gravitatorios. El ejemplo típico de acciones por contacto, lo ofrecían las teorías de los medios continuos, que por entonces ya se conocían perfectamente.

Como ya hemos dicho, Poisson expresó las leyes de la gravitación mediante una ecuación en derivadas parciales semejante a la que gobierna el movimiento de los fluidos, estableciéndose así una analogía entre la acción gravitatoria y las acciones por contacto. Podía imaginarse un campo gravitatorio rodeando a los cuerpos materiales, que actuara como transmisor de las fuerzas, lo mismo que un fluido transmite las tensiones. Sin embargo, se apreciaba una diferencia entre ambos casos; mientras que el fluido

⁴ Hago este comentario al constatar que en general no es usual que se subrayen las posibles carencias matemáticas de muchos experimentadores que no aportaron nada desde el punto de vista del formalismo, igual como a los puramente formales no se les reprocha su más que posible inhabilidad e incompetencia experimental.

⁵ Es ésta la primera sugerencia de que la luz es una onda electromagnética. Resulta significativo constatar que esta idea no fue en absoluto aceptada inmediatamente. En 1856 Weber había medido la relación entre las unidades electrostática y electromagnética de carga encontrándose que coincidía con la velocidad de la luz medida por Fizeau y, no obstante, en 1857 (dos años después de la publicación del trabajo de Maxwell) afirmaba que el hecho anterior era pura coincidencia numérica.

existe realmente, el campo es potencial, en tanto que nos indica cuál sería la fuerza que se ejercería sobre una masa de prueba que se colocara allí.

La cuestión de la realidad de un campo de fuerzas se planteó a lo largo de todo el siglo XIX y se buscaron criterios para decidir cuál de las dos posibilidades era la correcta. Faraday propuso varios de estos criterios que posteriormente fueron considerados como condiciones suficientes para asegurar la existencia del campo. Éstos eran: que la acción se propagara con velocidad finita, que fuera afectada por cambios materiales en el medio y que la energía se encontrara en el medio. La aplicación de estos criterios a las interacciones eléctricas y magnéticas le llevó a afirmar la existencia del campo en estos casos.

Faraday no formuló una ley cuantitativa de la inducción. El primero en presentar una regla sencilla en relación con las corrientes inducidas fue Heinrich Friedrich Lenz (1804-1865), quien en 1834 enunció su famosa ley. Basado en esta ley y los resultados experimentales de Faraday, Franz Neumann (1798-1895) formuló años después la ley de inducción de forma equivalente a la actual.

Sir W. Thomson (Lord Kelvin) (1824-1907) subrayó en 1855 que podía aplicarse el mismo formalismo matemático para expresar las leyes de los fluidos, la transmisión del calor, la elasticidad y los fenómenos eléctricos y magnéticos. Así llegó a concebir las cargas eléctricas y los polos magnéticos como análogos a las fuentes de un fluido o del calor; las líneas de fuerza análogas a las de corriente etc. Kelvin apuntó que no podía deducirse ningún hecho físico de estas analogías, pero que éstas sugerían que el modo de transmitirse las acciones eléctricas podía ser semejante al modo en que se transmiten el calor y las tensiones en un medio continuo. El principal interés radicaba, de hecho, en la demostración de que las fórmulas concernientes al campo eléctrico, que habían sido deducidas a partir de leyes de acción a distancia, eran idénticas a las de las teorías del calor, las cuales habían sido deducidas a partir de la hipótesis de acción entre partículas contiguas. Este aspecto, como dijo Maxwell mucho después, introduce por primera vez en matemáticas la idea de acción eléctrica por contacto, la cual, aunque había sido proclamada por Faraday, no había sido apreciada en su valor. Fue también Lord Kelvin quien impulsó a Maxwell a emprender su tarea de dar forma matemática a las ideas de Faraday.

Apoyándose en la obra de Faraday, James Clerk Maxwell (1831-1879) publicó en 1855 la memoria "On Faraday lines of force", en la que, mediante una analogía hidromecánica, aplicó sistemáticamente al electromagnetismo la teoría de los campos vectoriales. Maxwell introdujo en forma completa el teorema de Ampère y el potencial vector, expresando con él la ley de inducción de Faraday. Su inquietud científica le llevó a explorar otros campos de la Física durante varios años. Maxwell tenía una gran intuición física combinada con una sólida formación matemática, que le permitió presentar las leyes de la electricidad y el magnetismo desde un lenguaje matemático esencialmente nuevo utilizando la divergencia y el rotacional en la descripción de las fuentes y sumideros del campo. En 1864 Maxwell postuló un grupo de ecuaciones que permitían describir todos los fenómenos electromagnéticos hasta entonces conocidos, al mismo tiempo que predecían la interdependencia de los campos eléctricos y magnéticos. Al estudiar los fenómenos electromagnéticos variables con el tiempo resulta imposible mantener la idea de acción a distancia y dar una interpretación física concreta a los fenómenos potenciales. Por esta razón, Maxwell desarrolló la teoría de los fenómenos electromagnéticos de variación rápida por medio de la teoría de acciones de contacto extendiendo las ecuaciones locales obtenidas en los fenómenos estáticos. Al conjunto de ecuaciones que formulaban los hechos experimentales conocidos antes de Maxwell, éste incorporó dos novedades: la

corriente de desplazamiento y una interpretación de la ley de inducción. A la vista de los resultados en 1865⁶ proclamó su convicción de que la luz era una onda electromagnética.

Hoy con la perspectiva histórica y el conocimiento de la evolución de los hechos es fácil adjudicar a los investigadores visiones de futuro que quizás no tuvieron. El objetivo de Maxwell era “la reducción del electromagnetismo a la ciencia mecánica, mostrando que ningún fenómeno electromagnético es contradictorio con la suposición de que depende de acciones puramente dinámicas”. De hecho, consideró cumplido su objetivo al demostrar que el éter electromagnético tenía las mismas propiedades mecánicas que la luz y, por tanto, no había razón para distinguirlos. Se identifica así la luz como fenómeno electromagnético. En 1873 Ludwig Boltzmann (1844-1906) comprobó que el índice de refracción podía ser previsto a partir de la constante dieléctrica en medios transparentes no dispersivos. La primera aplicación sistemática de las ideas de Maxwell a la óptica está concentrada en la tesis doctoral, defendida en 1875, de Hendrick Antoon Lorentz (1853-1928).

En 1879 la Academia de Berlín ofreció un premio a quien consiguiera poner a prueba las teorías de Maxwell. Se establecían los siguientes objetivos: a) demostrar los efectos magnéticos de la corriente de desplazamiento⁷; b) demostrar que los campos eléctricos inducidos tienen los mismos efectos polarizadores en los dieléctricos que los campos electrostáticos, c) demostrar que ambos efectos ocurren también en el vacío.

Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894) se interesó en el problema y, tras unos años de trabajo, en 1887, puso de manifiesto experimentalmente la existencia de las ondas electromagnéticas, lo que constituyó la comprobación directa de las teorías de Maxwell. Los trabajos teóricos de Hertz no fueron menos importantes que sus experiencias. Desarrolló el método del superpotencial para resolver el problema de la radiación de un dipolo, formuló la electrodinámica tomando las ecuaciones de Maxwell como postulados de partida y deduciendo de ellas todos los fenómenos electromagnéticos. Con estos planteamientos, los modelos mecánicos resultaban innecesarios y las ecuaciones de Maxwell evidencian relaciones entre magnitudes accesibles experimentalmente.

Por otro lado, los fenómenos electrolíticos, los de conducción en gases y el descubrimiento de los rayos catódicos cooperaron a fundamentar el carácter atómico de la electricidad, surgiendo posteriormente el concepto de electrón. Se estudió entonces el movimiento de estas cargas en tubos de alto vacío, intentando hallar sus ecuaciones del movimiento. Joseph John Thomson (1856-1940) calculó, mediante la teoría de Maxwell, la fuerza que se ejerce entre dos esferas cargadas móviles y en 1889 Oliver Heaviside, siguiendo un método análogo, dio la expresión que hoy conocemos como fuerza de Lorentz para una carga en movimiento en un campo electromagnético. La misma expresión fue obtenida en 1892 por Hendrick Antoon Lorentz (1853-1928) a partir de la ley de Ampère y la añadió a las ecuaciones de Maxwell como postulado adicional, fundando así las bases de la electrodinámica, palabra cuyo origen se debe a Ampère.

El mismo tipo de interés por las cargas en movimiento llevó a Alfred Maris Lienard (1869-1940) en 1898 y Emil Wiechert (1861-1928) en 1900 a publicar independientemente sendos trabajos en los que obtuvieron los potenciales retardados de una carga en movimiento, es decir, teniendo en cuenta que la

⁶ J.C. Maxwell, “A dynamical theory of electromagnetic field”, citado por C. Sánchez del Río, (1986) “Los principios de la Física en su evolución histórica” UCM.Madrid.

acción electromagnética tarda un tiempo finito en recorrer la distancia que separa la partícula fuente de la que sufre la acción. Esto permitió el cálculo de las fuerzas que se ejercen entre dos cargas puntuales móviles. También permitió calcular el campo de una carga móvil, con lo que se demostró que toda carga acelerada emite energía en forma de radiación electromagnética. Se quiso entonces hallar una ecuación del movimiento de una carga que incluyera los efectos por pérdida de energía por emisión y el problema fue resuelto por Lorentz y Abraham considerando la carga como una pequeña esferita. El modelo presentaba el inconveniente de que, si se hacía tender a cero el radio de la carga, su energía se hace infinita, mientras que si el radio no es nulo, la carga no es estable y se hacía necesario postular otras fuerzas, además de las electromagnéticas, que aseguraran la estabilidad. Ésta fue la solución que propuso Poincaré.

Al mismo tiempo que se había desarrollado la teoría electromagnética de los medios en movimiento, se había observado una diferencia fundamental con relación a la mecánica. Mientras que las leyes de Newton no se modificaban al pasar de un sistema de referencia a otro inercial, no ocurría lo mismo con las ecuaciones de Maxwell. Lorentz encontró la transformación para pasar de un sistema inercial a otro que dejaba invariante las ecuaciones de la electrodinámica pero no vio el significado profundo que encerraban sus fórmulas.

Fue necesario esperar hasta 1905 en que Albert Einstein (1879-1955), a partir de dos sencillos postulados, elaboró su teoría especial de la relatividad para explicar todos estos fenómenos. De acuerdo con la teoría de la relatividad las interacciones físicas se propagan con una velocidad finita, y esto, siguiendo los criterios de Faraday, excluye el concepto de acción a distancia. Al mismo tiempo, esta teoría exige que todas las leyes físicas, formuladas adecuadamente deben tener la misma forma para cualquier observador inercial, la mejor forma de conseguirlo es describir esas leyes en forma tensorial, ya que una igualdad entre tensores se escribe de la misma forma en cualquier sistema de referencia.

El cálculo tensorial tiene su origen en la geometría diferencial, con las aportaciones fundamentales de Gauss, Riemann y Elwin Bruno Christoffel (1829-1900). La primera exposición sistemática referente al cálculo tensorial aparece en 1901 en una memoria que se ha hecho célebre, publicada por Gregori Ricci-Cubarstro (1853-1925) y su discípulo Levi-Civita y cuyo objeto fundamental consiste en la investigación de las propiedades de invarianza frente a los grupos de transformaciones de coordenadas. La representación tensorial independientemente del sistema de referencia adoptado en el espacio-tiempo de Minkowski se presenta con atributos de síntesis y generalidad que no posee la formulación tridimensional.

El sistema de ecuaciones de Maxwell, aparte de reunir casi todas las explicaciones hasta ahora conocidas de los fenómenos electromagnéticos a escala macroscópica, proporciona un ejemplo de lo que ha venido siendo el esquema fundamental de la física de los últimos 150 años. Desde un punto de vista formal, el electromagnetismo se había elaborado a partir de una simbiosis entre experimentos, conceptos inducidos, axiomas y propiedades geométricas y matemáticas. Probablemente, no sea posible desde un punto de vista macroscópico una presentación teórica alternativa de las ecuaciones de Maxwell esencialmente distinta.

En el siglo pasado ha sido una evidencia que las teorías relativistas y la teoría cuántica han acaparado gran parte de la atención de los físicos, quedando algo abandonada la teoría electromagnética.

⁷ Cuestión nada evidente. Ha hecho falta mucho tiempo y mucha tecnología para ponerlo claramente en evidencia. Así, en 1985 se publicaron las primeras medidas de estos efectos magnéticos (Phys. Rev. Letters 55 (1985) 59).

No obstante, al mismo tiempo que las teorías cuánticas han evolucionado rápidamente, la electrodinámica cuántica se ha desarrollado y modeliza la interacción entre partículas cargadas como un intercambio de partículas de masa nula con momento y energía diferentes de cero (fotones). Común a todos los campos de fuerzas descritos cuánticamente subyace la idea de unificación. Con el descubrimiento del bosón intermedio, se ha conseguido unificar las interacciones electromagnéticas con las débiles. Con la cuantización del campo electromagnético se esperaba eliminar las divergencias asociadas a las cargas puntuales que aparecían en la teoría clásica. Pero no fue así. Paul Adrien Maurice Dirac (1902-1984), cuya contribución a la electrodinámica clásica es fundamental, dedujo, a partir de las ecuaciones de Maxwell y los principios de conservación, las ecuaciones del movimiento de una partícula cargada en un campo exterior incluyendo la reacción debida a la radiación, abriendo nuevos problemas y aportando significativas contribuciones.

Son varios los aspectos del electromagnetismo que quedan aún por esclarecer, algunos desde muy antiguo, como la deducción rigurosa de las ecuaciones de Maxwell en un medio material a partir de las correspondientes en el vacío⁸, es decir concluir la teoría de los electrones de Lorentz. Se han propuesto diversas metodologías y todas ellas conducen a las ecuaciones de Maxwell para un medio material identificando, con la polarización y magnetización macroscópica, unas expresiones en las que aparecen las posiciones de los electrones, pero no dan la relación entre estas magnitudes y los campos que deben establecerse fenomenológicamente. La relación, entre estas cantidades determinadas fenomenológicamente y los componentes microscópicos, se ha ido desarrollado a partir de las ecuaciones de la mecánica cuántica y del estado sólido, y... la historia continúa.

⁸ Jackson, J.D. (1980) Introducción a la Electrodinámica. Ed. Alhambra.