

El concepto de estado electro-tónico en Faraday

José Romo Feíto

ADVERTIMENT. La consulta d'aquesta tesi queda condicionada a l'acceptació de les següents condicions d'ús: La difusió d'aquesta tesi per mitjà del servei TDX (www.tesisenxarxa.net) ha estat autoritzada pels titulars dels drets de propietat intel·lectual únicament per a usos privats emmarcats en activitats d'investigació i docència. No s'autoritza la seva reproducció amb finalitats de lucre ni la seva difusió i posada a disposició des d'un lloc aliè al servei TDX. No s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant al resum de presentació de la tesi com als seus continguts. En la utilització o cita de parts de la tesi és obligat indicar el nom de la persona autora.

ADVERTENCIA. La consulta de esta tesis queda condicionada a la aceptación de las siguientes condiciones de uso: La difusión de esta tesis por medio del servicio TDR (www.tesisenred.net) ha sido autorizada por los titulares de los derechos de propiedad intelectual únicamente para usos privados enmarcados en actividades de investigación y docencia. No se autoriza su reproducción con finalidades de lucro ni su difusión y puesta a disposición desde un sitio ajeno al servicio TDR. No se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al resumen de presentación de la tesis como a sus contenidos. En la utilización o cita de partes de la tesis es obligado indicar el nombre de la persona autora.

WARNING. On having consulted this thesis you're accepting the following use conditions: Spreading this thesis by the TDX (www.tesisenxarxa.net) service has been authorized by the titular of the intellectual property rights only for private uses placed in investigation and teaching activities. Reproduction with lucrative aims is not authorized neither its spreading and availability from a site foreign to the TDX service. Introducing its content in a window or frame foreign to the TDX service is not authorized (framing). This rights affect to the presentation summary of the thesis as well as to its contents. In the using or citation of parts of the thesis it's obliged to indicate the name of the author.

UNIVERSIDAD DE BARCELONA
FACULTAD DE FILOSOFÍA
DEPARTAMENTO DE LÓGICA, HISTORIA Y FILOSOFÍA DE LA CIENCIA

EL CONCEPTO DE ESTADO ELECTRO-TÓNICO EN FARADAY

Tesis doctoral presentada por
José Romo Feito
Dirigida por
Manuel G. Doncel

Barcelona, octubre de 1991

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
1. EL DESCUBRIMIENTO DEL ELECTROMAGNETISMO Y SUS PRIMERAS CONSECUENCIAS	9
1. 1. Electricidad y Magnetismo (1800-1820)	9
1. 2. El descubrimiento de Oersted	14
1. 3. Dos reacciones al descubrimiento de Oersted: Ampère y Faraday	22
1. 3. 1. La electrodinámica de Ampère	22
1. 3. 2. Las rotaciones electromagnéticas de Faraday	30
1. 3. 2. 1. Faraday crítico de Ampère	30
1. 3. 2. 2. Las rotaciones electromagnéticas	36
1. 4. Intentos de producir la inducción de corrientes	40
1. 4. 1. Inducción a partir de imanes	40
1. 4. 2. Inducción a partir de corrientes	42
2. EL DESCUBRIMIENTO DE LA INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA: TEORÍA DEL ESTADO ELECTRO-TÓNICO	50
2. 1. La búsqueda de corrientes inducidas	50
2. 1. 1. Primeros intentos infructuosos	50
2. 1. 2. El descubrimiento de la inducción electromagnética	54
2. 1. 3. Faraday comunica sus resultados	67

2. 2. Cuestiones de cronología	77
2.3. La ley de la inducción magneto-eléctrica	85
2. 4. La Serie I: teoría del estado electro-tónico	92
2. 4. 1. La inducción de corrientes y sus tipos:	
volta-eléctrica y magneto-eléctrica	92
2. 4. 2. Presentación del estado electro-tónico	97
2. 5. El abandono del estado electro-tónico	108
2. 5. 1. Problemas en la teoría del estado	
electro-tónico	108
2. 5. 2. El estado electro-tónico rechazado: la Serie II	111
2. 5. 3. ¿Por qué se ha abandonado	
el estado electro-tónico?	114
 3. AUTOINDUCCIÓN	 123
3. 1. La reintroducción del estado electro-tónico	126
3. 1. 1. El estado electro-tónico detectado: la carta	
a Phillips de 17 de octubre de 1834	126
3. 1. 2. La investigación de la autoinducción	
según el <i>Diary</i>	134
3. 2. El estado electro-tónico en la Serie IX	141
3. 2. 1. Experimentos	141
3. 2. 2. Análisis de los experimentos: nueva visión del	
estado electro-tónico	146
3. 3. Whewell y Faraday sobre la inducción	156
 4. HACIA UNA TEORÍA UNIFICADA DE LA ELECTRICIDAD Y	
EL MAGNETISMO	166
4. 1. El descubrimiento de la acción del medio	

en la transmisión de la inducción electrostática	169
4. 1. 1. El principio de Inducción	169
4. 1. 2. La capacidad inductiva específica	173
4. 1. 3. La curvatura de las líneas de fuerza inductiva	182
4. 2. El estado electro-tónico, la fuerza transversal de la corriente y la transmisión del magnetismo: Serie XIII	187
4. 2. 1. La fuerza transversal de la corriente y la fuerza transversal de las líneas de inducción electrostática	187
4. 2. 2. La trasmisión de la fuerza magnética	194
4. 3. El estado electro-tónico y la relación entre la fuerza eléctrica y la fuerza magnética: Serie XIV	197
4. 3. 1. Experimentos y análisis	197
4. 3. 2. Relación general entre la electricidad y el magnetismo	205
5. LA REALIDAD DE LAS LÍNEAS DE FUERZA MAGNÉTICA	211
5. 1. La magnetización de la luz y el estado electro-tónico : Serie XIX	213
5. 1. 1. El descubrimiento de la rotación del plano de polarización la luz: nuevos indicios del estado electro-tónico	213
5. 1. 2. Relación con las ideas de las Series XIII y XIV	218
5. 2. Las líneas representativas de fuerza y el estado electro-tónico	222
5. 2. 1. Valor representativo de las líneas de fuerza	222
5. 2. 2. Necesidad del estado electro-tónico	230

5. 3. Las líneas físicas de fuerza y el estado	
electro-tónico (1852)	232
5. 3. 1. La realidad física de las líneas de fuerza	232
5. 3. 2. La naturaleza de las líneas físicas	
de fuerza	237
5. 3. 3. El estado electro-tónico, fundamento estático	
de las líneas de fuerza magnética	242
6. LA NOCION DE ESTADO ELECTRO-TÓNICO	
EN LA HISTORIOGRAFÍA	253
6. 1. Primeras referencias al estado electro-tónico	254
6. 1. 1. El estado electro-tónico en el Continente	254
6. 1. 2. El estado electro-tónico en Inglaterra	260
6. 2. La historiografía moderna	264
CONCLUSIONES	275
BIBLIOGRAFÍA	282

The conjecture of a philosopher so familiar with nature may sometimes be more pregnant with truth than the best established experimental law discovered by empirical inquirers, and though not bound to admit it as a physical truth, we may accept it as a new idea by which our mathematical conceptions may be rendered clearer.

James Clerk Maxwell

"On Faraday's Lines of Force" (1856)

INTRODUCCIÓN

El 19 de octubre de 1861, James Clerk Maxwell escribía a Michael Faraday:

When I began to study electricity mathematically I avoided all the old traditions about forces acting at a distance, and after reading your papers as a first step to right thinking, I read the others, interpreting as I went on, but never allowing myself to explain anything by these forces. It is because I put off reading about electricity till I could do without prejudice that I think I have been able to get hold of some of your ideas, such as the electrotonic state, action of contiguous parts, etc., and my chief object in writing to you is to ascertain if I have got the same ideas which led you to see your way into things, or whether I have no right to call my notions by your names.¹

Ciertamente Maxwell utilizó gran número de las ideas de Faraday, no sólo las que menciona en su carta. Sin embargo, como este texto muestra, él era consciente de que no se había limitado a tomarlas, de ahí las dudas que manifiesta su carta.

Sabemos la centralidad que una de las ideas que Maxwell menciona en su carta, la noción de estado electrotónico, tuvo en la primera formulación de las ecuaciones que llevan su nombre. Utilizando notación vectorial, esta primera formulación, que data de 1856, es

$$\text{rot } \mathbf{A} = \mathbf{B}$$

$$\mathbf{E} = \frac{1}{c} \mathbf{K}$$

¹ CAMPBELL y GARNETT-1884, p.245.

$$\text{rot } H = K$$

$$H = \frac{1}{\mu} B$$

donde A representa lo que Maxwell bautizó posteriormente con el nombre de 'potencial vector' --que conservamos hoy--, y que en esta primera formulación constituye su reinterpretación matemática del concepto de estado electro-tónico original de Faraday.²

No conservamos la respuesta de Faraday a la carta de Maxwell, y sería tentador intentar suplantarle para proporcionar una. Sin embargo, mi enfoque ha sido distinto. No me he propuesto analizar el concepto de estado electro-tónico en la obra de su inventor, Faraday, para determinar en qué medida la interpretación de Maxwell del concepto hubiera merecido suficiente aprobación por parte de Faraday como para autorizarle a conservar el nombre. Esto hubiera contribuido quizá a intentar resolver el problema que Maxwell plantea en su carta. Yo, sin embargo, he escogido plantear la cuestión desde el punto de vista de la relevancia del concepto para el propio Faraday. Por consiguiente, mi objetivo ha sido trazar la historia de la noción de estado electro-tónico en su obra.

Es un concepto con el que Faraday luchó durante veinte años, desde su primera formulación a raíz del descubrimiento de la inducción

² Se encontrará un minucioso análisis del proceso de interpretación de Maxwell del concepto de estado electro-tónico en LORENZO-1990. La interpretación de Maxwell se ha estudiado fundamentalmente en su primer artículo "On Faraday's Lines of Force", *Transactions of the Cambridge Philosophical Society*, 10 (1855-1856), 27-83; Maxwell-Papers, I, 155-229. Apoyándose en documentos no examinados anteriormente, las actas correspondientes a la lectura de Maxwell en la Cambridge Philosophical Society de una versión de su artículo, Lorenzo recupera un paso anterior esencial en el proceso de interpretación de Maxwell.

electromagnética en 1831, hasta su aparición final en la década de los cincuenta, en los artículos en que Faraday se esfuerza por sistematizar sus ideas respecto a las líneas de fuerza magnética. Formulado para resolver aspectos problemáticos del fenómeno de inducción, el concepto se rechaza públicamente poco después, para ser reintroducido, dotándole de aspectos nuevos, en un contexto similar, la investigación de la autoinducción. A partir de entonces ya no volverá a ser rechazado.

Se trata pues de un concepto con una evolución y, por consiguiente, con una historia que es necesario trazar. No se trata de que la literatura especializada haya ignorado el concepto de estado electro-tónico. Sin embargo, no se encontrará un estudio detallado que haya hecho de este concepto su foco de interés. Quizá porque la imagen habitual de Faraday como el "padre" de la teoría de campos haya provocado que la atención de los especialistas se concentre en determinar el origen en su obra de este concepto crucial de la física moderna, y por consiguiente se hayan descuidado otros elementos importantes para Faraday. Aquí nos encontramos, sin embargo, con la paradoja de que, en su elaboración final, el concepto de estado electro-tónico se encuentra íntimamente relacionado con el de las líneas de fuerza magnética.

Concentrar la atención en el concepto de estado electro-tónico de Faraday tiene otro interés, más allá del intrínseco de examinar un concepto importante en su marco teórico. Significa penetrar en su física desde un punto de vista distinto al habitual que, como señalé anteriormente, suele preocuparse fundamentalmente de intentar determinar cuándo llegó Faraday al concepto de campo. Examinar los problemas que motivaron la introducción del concepto de estado electro-tónico y su evolución permite ver la aplicación concreta que Faraday

hace de principios constitutivos de su física, notablemente los de unidad y convertibilidad de las fuerzas y conservación de la fuerza.

Este trabajo pretende hacer una aportación a lo que podría llamarse el estudio de la "estructura fina" de la obra de Faraday. Creo que en un tema de esta índole este enfoque es, en principio, razonable. Mi confianza en ello se ha visto reforzada por el hecho de que, aunque los estudios sobre la obra de Faraday forman una bibliografía considerable, un examen detallado de las fuentes permite descubrir, incluso en temas cuidadosamente estudiados, como lo es el del descubrimiento de la inducción electromagnética, cuestiones problemáticas previamente pasadas por alto. Dos particularmente notables se explican en el capítulo 2.

El capítulo 1 se ocupa, en primer lugar, de proporcionar algunos elementos para comprender la situación de la electricidad y el magnetismo en las dos décadas del siglo XIX previas al descubrimiento del electromagnetismo en 1820. Posteriormente se discute el descubrimiento de Oersted, y dos de los resultados más notables del impacto que dicho descubrimiento produjo: la electrodinámica de Ampère y el descubrimiento de Faraday de sus rotaciones electromagnéticas. Por último se discuten los primeros intentos de detectar corrientes inducidas, en particular el de Ampère.

Como es bien sabido, el descubrimiento de las corrientes inducidas se debe a Faraday. Con ello conseguía poner fin, en 1831, a años de intentos infructuosos, y llevaba a cabo su ambición de convertir magnetismo en electricidad. El capítulo 2 se ocupa del descubrimiento, y de la primera respuesta de Faraday a las anomalías que presentaba frente a sus expectativas teóricas. El concepto de estado electro-tónico, aquí introducido, resuelve estas anomalías, explicando por qué se

interrumpe la primera corriente inducida y por qué se origina una en sentido opuesto al eliminar la fuerza inductiva.

En el capítulo se proporciona la fecha en que Faraday leyó en la Royal Society una primera versión de la memoria que expone sus primeros resultados sobre la inducción, y se propone una explicación de por qué Faraday difundió una fecha inexacta, aceptada posteriormente por todos los estudiosos. Asimismo, se llama la atención sobre un error que Faraday cometió en el sentido de las corrientes inducidas en el mismo día en que descubrió la inducción. Error que se mantuvo durante tres meses y que es posible seguir mediante las anotaciones de su diario de investigación. El examen del diario permite identificar el momento en que Faraday corrigió su error. Esta circunstancia había sido pasada por alto hasta la fecha.

El capítulo termina analizando las razones que llevaron a Faraday al "abandono", en 1832, de su estado electro-tónico. Se sugiere, sin embargo, que ya desde este mismo momento Faraday intentaba armonizar su concepto con el otro que había puesto a punto para explicar la inducción: el corte de curvas magnéticas por el conductor. Desde el punto de vista de Faraday, ambos conceptos, el de estado electro-tónico y el del corte de curvas magnéticas eran necesarios para proporcionar una explicación más completa de la inducción electromagnética.

El capítulo 3 aborda un tema poco estudiado previamente: la investigación de Faraday, en 1834, del fenómeno de autoinducción. Sin embargo, es aquí donde Faraday reintroduce el estado electro-tónico en el contexto de la inducción electromagnética. En lo que después iba a identificar como la inducción de la corriente sobre sí misma, Faraday creyó encontrar primeramente un fenómeno peculiar de inducción que

presentaba indicios del estado electro-tónico abandonado públicamente dos años antes. En el capítulo se explica cómo incluso después de darse cuenta de la verdadera naturaleza del supuesto fenómeno peculiar, Faraday mantuvo el concepto de estado electro-tónico y le dotó de una dimensión causal que estaba ausente en su primera formulación. Asimismo se explica cómo esta dimensión causal se desprende del principio de conservación de la fuerza.

Es suficientemente conocido que Faraday es el descubridor de la acción del medio en la transmisión de la inducción electrostática, acción que él veía representada por su concepto de capacidad inductiva específica y la curvatura de las líneas de fuerza inductiva estática. El capítulo 4 discute estos dos temas para facilitar la comprensión de las especulaciones de Faraday, en 1838, con respecto a la relación entre electricidad y magnetismo. Más concretamente estas especulaciones se ocupan de dos problemas que tienen un origen común: el principio de unidad de las fuerzas. Este principio, piensa Faraday, exige, por un lado, la correspondencia entre estados de la fuerza eléctrica y magnética y, por otro, que el modo de transmisión del magnetismo sea el mismo que el de la electricidad. Para resolverlos recurre a su estado electro-tónico que aparecerá, no sin una cierta ambigüedad, como el estado estático de la fuerza magnética que debe existir para preservar la correspondencia con el estado estático de la fuerza eléctrica, y como el estado que adoptan las partículas de la materia en su transmisión de la fuerza magnética.

A raíz de su descubrimiento, en 1845, de la rotación del plano de polarización de la luz por la materia sometida a la fuerza magnética, Faraday creyó de nuevo encontrar indicios de su estado electro-tónico. El capítulo 5 comienza analizando esta investigación. Posteriormente se

centra en el papel del estado electro-tónico en la sistematización de las ideas de Faraday sobre las líneas de fuerza magnética. Para ello se discute en detalle el artículo crucial "On the Physical Character of the Lines of Magnetic Force" (1852), donde Faraday se plantea el problema de la naturaleza física de las líneas de fuerza magnética. Retomando el tema de la correspondencia entre estados de la fuerza eléctrica y magnética, Faraday reflexiona sobre la naturaleza de las líneas de fuerza magnética esforzándose en determinar si su naturaleza es estática o dinámica. En el capítulo se propone que la solución de Faraday es considerar que esas líneas tienen una naturaleza dinámica, pero con un fundamento estático que se identifica con el estado electro-tónico. Con ello el concepto de estado electro-tónico llega al punto final de su evolución en la obra de Faraday.

El capítulo 6 revisa, en primer lugar, las referencias al estado electro-tónico en la historiografía anterior a la monumental biografía de Faraday que Williams publicó en 1965. Posteriormente se discuten algunos puntos dudosos en la interpretación que hace Williams del concepto de estado electro-tónico, y en las de trabajos posteriores, como los de Agassi, Berkson y Gooding.

Las fuentes más importantes para el estudio de la actividad científica de Faraday son los tres volúmenes de sus *Experimental Researches in Electricity (ERE)* y el diario de sus investigaciones entre los años 1820 y 1862 (*Diary*), publicado en siete volúmenes en 1932-1936. Las *ERE* recogen 29 memorias publicadas en las *Philosophical Transactions*, que Faraday llamó 'Series', y otros artículos suyos. Como Faraday numeró correlativamente los párrafos de las Series, las referencias a textos de las Series constarán simplemente del número de la Serie y el número del párrafo que contiene el texto. Las referencias a otros artículos recogidos

en las *ERE* se harán mediante el volumen y la página. La gran mayoría de los párrafos del *Diary* están también numerados correlativamente, pero como Faraday comenzó la numeración dos veces, las referencias a textos del *Diary*, además del volumen, número de párrafo y la fecha correspondiente, incluirán la página.

Parte de las ideas de este trabajo nacieron en el segundo año de mi estancia de dos en la Universidad de Stanford, que fue posible gracias a la concesión de una beca Fulbright-"la Caixa" para los cursos 1986-87 y 1987-88. Allí tuve la oportunidad de contrastar mis ideas en el marco proporcionado por el Seminario Graduado de Historia y Filosofía de la Ciencia dirigido por Peter Galison y Margaret Morrison. Mi agradecimiento a ellos y a los demás compañeros del Seminario.

Antonio Beltrán ha leído con paciencia y meticulosidad una versión previa de este trabajo. Gracias a ello el texto ha mejorado y he podido librarme de algunos errores. De los que quedan soy el único responsable.

Manuel G. Doncel ha dirigido con escurpulosidad la elaboración de este trabajo. Son muchas las horas que ha pasado escuchando pacientemente mis especulaciones sobre las especulaciones de Faraday, y muchas también sus sugerencias para resolver puntos difíciles, además de su aliento constante.

Luisa Trueba ha soportado filosóficamente mis lamentaciones en los momentos en que me sentía enredado en las líneas de fuerza, pero nunca ha perdido su confianza en que yo podría encontrar un camino de salida. Sin su apoyo constante, esto no hubiera sido posible.

CAPÍTULO 1

EL DESCUBRIMIENTO DEL ELECTROMAGNETISMO Y SUS PRIMERAS CONSECUENCIAS

1. 1. Electricidad y Magnetismo (1800-1820)

Al comienzo del siglo XIX la física había alcanzado un orden y una estabilidad bien percibida por sus cultivadores. En 1867, en la necrológica que escribió a raíz de la muerte de su amigo Faraday, Auguste de la Rive describía la situación con una cierta nostalgia:

At the commencement of the present century, thanks to the important works of which it had been the subject, the science of physics had acquired a character of precision and clearness which seemed almost to make of it a mathematical science. The fine treatise, in four volumes, on Experimental and Mathematical Physics, published in 1816 by M. Biot, gives the most correct and complete idea of the point at which this science had arrived. To the confusion which still reigned in the middle of the eighteenth century between the various departments of the science, to the ignorance which then still prevailed upon a great number of these departments, succeeded a clear and substantial analysis of all the phenomena, brought under simple and rigorous laws. Heat, light, electricity, and magnetism were regarded in it as so many distinct agents, having their special properties and obeying their own laws.¹

De La Rive se está haciendo eco del éxito de la física de los fluidos. Una física que procede por compartimentación, cada fenómeno está

¹ LA RIVE-1867, p. 244.

producido por un agente con sus propias leyes. Esto no quiere decir que nunca se planteara la cuestión de la posible relación entre, por ejemplo, fuerza eléctrica y fuerza magnética. De hecho la Academia de la Ciencia de Baviera ofreció en 1780 un premio para la mejor memoria sobre la analogía entre electricidad y magnetismo. Sin embargo, cuando van Swinden publica las memorias presentadas, después de un examen de todas las analogías propuestas concluye que electricidad y magnetismo son fenómenos esencialmente diferentes.

Dentro de esta física, los fenómenos eléctricos y magnéticos eran considerados como el resultado de la interacción de fluidos imponderables. Así, un imán contenía dos fluidos magnéticos, austral y boreal, distribuidos en su materia de tal forma que sus respectivas densidades alcanzaban el máximo en dos puntos opuestos, los polos del imán. Las partículas de cada fluido se repelían entre sí y atraían las partículas del fluido de signo opuesto. El esquema era similar en el caso de la electricidad, si bien aquí existían dos teorías rivales. Para una de ellas, impulsada por Franklin, los fenómenos eléctricos podían explicarse admitiendo un fluido que coexistía en los cuerpos junto con la materia ponderable. Las partículas de este fluido se repelían entre sí y atraían las partículas de la materia ponderable. La electrificación de un cuerpo consistía en su pérdida o ganancia de una cantidad de fluido eléctrico. Esta teoría era dominante en Inglaterra.² En el Continente tenía más partidarios otra teoría que prefería considerar dos fluidos eléctricos, positivo y negativo, cuyas partículas se repelían entre sí y atraían a las de signo opuesto. Las dos teorías coexistían pacíficamente porque ambas

² Es la que Cavendish desarrolla matemáticamente en 1771: "An Attempt to explain some of the Principal Phaenomena of Electricity, by means of an Elastic Fluid", *Philosophical Transactions*, 61 (1771), 564-677.

eran capaces de explicar los fenómenos conocidos.

Nadie parecía estar excesivamente preocupado por demostrar la existencia de los fluidos eléctricos o magnéticos, lo esencial era que permitían formular una hipótesis de los fenómenos que se prestaba a la investigación experimental y matemática de las leyes que describían la interacción entre los fluidos. El punto culminante de la investigación experimental lo marca la obra de Coulomb. Ingeniero militar y miembro de la Academia de París desde 1781, Coulomb, firme partidario de la teoría de los dos fluidos eléctricos y tan convencido como los demás de la separación entre los fenómenos eléctricos y magnéticos, se esforzó en determinar la ley de la interacción entre los fluidos. Inventor de una técnica que le permitía medir con gran precisión fuerzas muy pequeñas, la balanza de torsión, pudo determinar que la fuerza repulsiva entre dos bolas cargadas con el mismo tipo de electricidad era inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa. Concluyó además que había una diferencia importante entre los fluidos magnéticos y los eléctricos. Los primeros estaban confinados en el interior de las moléculas de la materia magnética, mientras que los fluidos eléctricos podían moverse en los espacios intermoleculares.³

En 1812, apoyándose en los resultados experimentales de Coulomb y en el trabajo previo de Laplace, Poisson construye una elaborada teoría matemática de la electrostática. Cumbre de esta teoría es la ecuación que lleva su nombre, a la que obedece el potencial en un punto debido a una densidad de carga eléctrica ρ ,

³ Coulomb comunicó sus resultados en siete memorias leídas en la Academia de las Ciencias de París entre 1785 y 1791.

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = -\frac{\rho}{\epsilon_0}$$

Doce años después, refiriéndose a su teoría Poisson escribe triunfante:

les résultats du calcul se son trouvés parfaitement d'accord avec les nombreuses expériences que Coulomb a faites, il y a près de quarante ans, sur cette matière; et maintenant cette partie de l'électricité où l'on suppose les deux fluides en repos (...) est complète, ou du moins elle ne présente plus que des difficultés d'analyse relatives à la forme et au nombre des corps soumis à leur influence mutuelle.⁴

Aplicando el análisis matemático a la hipótesis de los dos fluidos eléctricos, y aceptando como modelo de la interacción entre los fluidos la que se produce mediante fuerzas que se ejercen a distancia entre sus partículas, Poisson ha terminado de insertar firmemente a la electrostática dentro de la tradición newtoniana.

El avance de la magnetostática, sin embargo, fue más lento. En primer lugar, porque se consideraba que en la determinación de la ley que describe la interacción entre imanes --la misma ley cuadrático inversa-- Coulomb había conseguido una precisión menor que en el caso de su análoga para la electrostática. En segundo lugar, porque la relación entre los fluidos magnéticos y la materia ponderable era más complicada. Así, sólo en 1824 Poisson atacó el problema. Su enfoque global, sin embargo, corre paralelo con el que había utilizado en el caso

⁴ "Mémoire sur la théorie du magnétisme", *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences*, 1826, p. 247, citado en BLONDEL-1962, p. 16.

de la electrostática.

En 1800, la perspectiva de los fenómenos eléctricos se amplió considerablemente con la invención de la pila. Habiendo estudiado cuidadosamente los experimentos de Galvani, Volta pronto rechazó cualquier intervención del nuevo agente postulado por el primero, la "electricidad animal". Para Volta la "electricidad animal" no era nada más que el fluido eléctrico ordinario puesto en movimiento por una acción electromotriz que se generaba de alguna manera en el contacto de dos metales. Con esta idea construyó su pila como una serie de pares de discos de zinc y cobre en contacto y placas de cartón húmedo intercaladas entre los pares de discos para asegurar la circulación del fluido. Volta explicaba el funcionamiento de la pila señalando que en el contacto entre un disco de cobre y uno de zinc se generaba una fuerza que ponía en movimiento los fluidos, provocando la acumulación de fluido eléctrico positivo en el zinc y fluido eléctrico negativo en el cobre. Los fluidos en movimiento recibían un nuevo impulso en el siguiente par metálico.

La teoría con que Volta intentó explicar el funcionamiento de su pila no contó con una aceptación unánime. El descubrimiento de la electrólisis del agua por la acción del fluido eléctrico en movimiento, llevado a cabo por Nicholson y Carlisle casi inmediatamente después de la noticia de la invención de la pila --el anuncio del descubrimiento llegó a la Royal Society antes que la segunda parte de la carta en que Volta anunciaba su invención-- tuvo como una de sus consecuencias la propuesta de una teoría alternativa de la pila. Para Davy, la fuerza que se genera en la pila tiene su origen en la afinidad química entre el zinc y el líquido que conecta los pares de discos metálicos. Los fenómenos químicos que se producían en la pila, la oxidación de la placa de zinc,

que para Volta eran fenómenos secundarios, son para Davy la causa de los efectos eléctricos.

En resumen, en las dos primeras décadas del siglo XIX, el estudio de los fenómenos eléctricos y magnéticos se encuentra dividido en tres parcelas: investigación de los fenómenos producidos por la acción de los fluidos eléctricos en reposo, fenómenos producidos por la acción de los fluidos magnéticos y fenómenos producidos por la acción de los fluidos eléctricos en movimiento. Dicho más brevemente, la ciencia de la electricidad y el magnetismo se divide en electrostática, magnetostática y galvanismo. Las dos primeras parecen firmemente asentadas dentro de la tradición newtoniana: sus fenómenos se conceptualizan siguiendo la hipótesis de los fluidos que interaccionan mediante fuerzas centrales que actúan a distancia entre sus partículas, es decir, siguiendo el modelo de la acción gravitatoria. A pesar de la similitud entre las leyes de la electrostática y la magnetostática, la gran mayoría de investigadores comparte la idea de la independencia entre los fenómenos eléctricos y magnéticos.⁵ El galvanismo, por su parte, no ha alcanzado el mismo desarrollo que las otras dos. No hay una opinión unánime respecto al funcionamiento de la pila. De hecho, la rivalidad entre las dos teorías en presencia, la teoría de contacto y la teoría química se extenderá a lo largo de la primera mitad del siglo.

1. 2 . El descubrimiento de Oersted

La idea de la separación de los fenómenos eléctricos y magnéticos era mayoritaria pero no unánimemente aceptada. La excepción principal

⁵ BLONDEL-1982, p. 19.

para nuestra historia la constituye el danés Hans Christian Oersted. Nacido en 1777, sus primeros intereses fueron más filosóficos que científicos, y en 1799 se doctoró en filosofía con una tesis sobre los *Principios metafísicos de la ciencia de la naturaleza* de Kant. Viajó a Alemania con una beca en 1801 y allí asistió a las clases de Fichte. Familiarizado con los escritos de Schelling, principal figura de la *Naturphilosophie*, Oersted, aunque sin aceptar los excesos de esta corriente filosófica, sí hizo suya una de sus ideas fundamentales: la unidad de todas las fuerzas de la naturaleza. Años más tarde, refiriéndose a sí mismo Oersted escribía:

Throughout his literary career, he adhered to the opinion, that the magnetical effects are produced by the same powers as the electrical. He was not so much led to this, by the reasons commonly alleged for this opinion, as by the philosophical principle, that all phenomena are produced by the same original power.⁶

En su obra publicada en 1812 *Ansicht der chemischen Naturgesetze durch die neueren Entdeckungen gewonnen*, cuya versión francesa, extensamente revisada, apareció el año siguiente con el título *Recherches sur le l'identité des forces chimiques et électriques*, Oersted se esfuerza por desarrollar su idea de que el poder que está en el origen de todas las fuerzas de la naturaleza, la naturaleza viviente incluida, se identifica con las fuerzas eléctricas. Establece una jerarquía entre las diversas formas de actividad de la electricidad: electricidad de frotamiento (o sea, la electricidad estática), electricidad galvánica y

⁶ Artículo "Thermo-Electricity", *The Edinburgh Encyclopaedia*, vol. XVIII, Edinburgh, 1830. La parte del artículo al que corresponde este texto se reproduce como Apéndice I en STAUFFER-1957, pp. 33-50.

magnetismo. Oersted no justifica esta jerarquía, pero se ha observado que la explicación podría residir en la jerarquía de las fuerzas necesarias para suscitar las distintas formas de actividad: frotamiento, contacto y acción a distancia.⁷ En el capítulo VIII, dedicado al magnetismo concluye: "Il faudrait essayer si l'électricité dans son état le plus latent [o sea, la corriente eléctrica] n'a aucune action sur l'aimant".⁸

Transcurrieron siete años antes de que, en la primavera de 1820, descubriera efectivamente esta acción de la corriente eléctrica sobre el imán. Contamos con tres relatos de su descubrimiento escritos por el propio Oersted.⁹ En el primero de ellos, escrito un año después, se lee:

When I began to investigate the nature of electricity, I conceived the idea that the propagation of electricity consisted of an incessant disturbance and restoration of equilibrium and thus included an abundance of activity which would not be foreseen in regarding it as a uniform current. Hence I regarded the transmission of electricity as an electric conflict and found myself, particularly in my investigations of the heat produced by the electric discharge, induced to show that the two opposite electrical forces in the conductor heated by their action are there combined so as to escape all observation, without, however, having reached perfect equilibrium; so that they might still show great activity, although under a form entirely different from that which can properly be termed electrical (...)

Since for a long time I had regarded the forces which manifest themselves in electricity as the general forces of nature, I had to derive the magnetic effects from

⁷ BLONDEL-1982, pp. 31-32.

⁸ *Recherches sur le l'identité des forces chimiques et électriques*, p. 238. BLONDEL-1982, p.32.

⁹ Escribió el primero en 1821. Stauffer sugiere que los otros dos fueron escritos en 1827. El primero de ellos está incluido en el artículo "Thermo-electricity" que Oersted escribió para la *Edinburgh Encyclopaedia* de Brewster; el segundo forma parte de la autobiografía que escribió para el *Conversations-Lexikon* de Kotod (STAUFFER-1957, p. 46).

them also (...) I still remember that, somewhat inconsistently, I expected the predicted effect particularly from the discharge of a large electric battery and moreover only hoped for a weak magnetic effect. Therefore I did not pursue with proper zeal the thoughts I had conceived; I was brought back to them through my lectures on electricity, galvanism, and magnetism in the spring of 1820. The auditors were mostly men already considerably advanced in science; so these lectures and the preparatory reflections led me on to deeper investigations than those which are admissible in ordinary lectures. Thus my former conviction of the identity of electrical and magnetic forces developed with new clarity, and I resolved to test my opinion by experiment. The preparations for this were made on a day in which I had to give a lecture the same evening (...) I called attention to the variations of the magnetic needle during a thunderstorm, and at the same time I set forth the conjecture that an electric discharge could act on a magnetic needle placed outside the galvanic circuit. I then resolved to make the experiment. Since I expected the greatest effect from a discharge associated with incandescence, I inserted in the circuit a very fine platinum wire above the place where the needle was located. The effect was certainly unmistakable, but still it seemed to me so confused that I postponed further investigation to a time when I hoped to have more leisure. At the beginning of July these experiments were resumed and continued without interruption until I arrived at the results which have been published.¹⁰

La idea de la propagación de la electricidad como un "electrical conflict" estaba presente ya en sus *Recherches*. Explicaba allí, con no mucha claridad, que la propagación de la electricidad en un alambre conectado a los polos de una pila no debía considerarse como un flujo uniforme de fluido, como el de un líquido por un canal, sino como una sucesión continua de combinaciones y separaciones de dos fuerzas eléctricas

¹⁰ Este texto pertenece a una introducción que Oersted escribió para su artículo "Betrachtungen über den Elektromagnetismus", *Journal für Chemie und Physik*, 32 (1821), 199 y ss. Yo he utilizado la versión inglesa que Stauffer proporciona en las pp. 44-45 de su STAUFFER-1957.

opuestas. Añadía que podría expresarse este establecimiento y ruptura del equilibrio entre las dos fuerzas diciendo que la electricidad se propaga ondulatoriamente. El conflicto eléctrico es la noción clave en la interpretación teórica que proporcionará de su descubrimiento.

Tal y como su relato indica, fue en julio de 1820 cuando llegó a resultados experimentales concluyentes acerca de la acción de la corriente sobre la aguja magnética. Inmediatamente escribió un breve artículo en latín describiendo sus resultados, "Experimenta circa effectum conflictus electrici in acum magneticam", y lo envió a los científicos y sociedades más importantes de Europa, siendo publicado rápidamente en las revistas más prestigiosas.¹¹

Pueden distinguirse dos partes en el artículo de Oersted. En la primera describe los resultados experimentales que ha obtenido, en la segunda avanza una breve explicación teórica de los hechos. Después de describir el aparato galvánico, o sea la batería, que ha utilizado, introduce la noción teórica que le servirá para interpretar los hechos:

The opposite ends of the galvanic battery were joined by a metallic wire, which, for shortness sake, we shall call the uniting conductor, or the uniting wire. To the effect which takes place in this conductor and in the surrounding space, we shall give the name of the *conflict of electricity*.¹²

El conflicto eléctrico ya no está, como podría interpretarse en las *Recherches*, confinado al alambre conductor conectado a los polos de la

¹¹ "Experimenta circa effectum conflictus electrici in acum magneticam", *Journal für Chemie und Physik*, 29 (1820), 275-281. Citaré este artículo por la versión inglesa: "Experiments on the Effect of a Current of Electricity on the Magnetic Needle", *Annals of Philosophy*, 16 (1820), 273-276.

¹² OERSTED-Experiments, p. 274.

batería, se extiende en el espacio que le rodea. Tanto el alambre como el espacio son la sede del conflicto eléctrico.

¿Cuál es la acción del conflicto eléctrico sobre la aguja magnética? Si se sitúa el alambre conductor encima de la aguja y paralelo a ella, "Things being in this state, the needle will be moved, and the end of it next the negative side of the battery will go westward."¹³ Si el alambre se sitúa por debajo de la aguja y paralelo a ella, el mismo polo de la aguja se desvía hacia el este. El ángulo de desviación de la aguja, precisa Oersted, depende de la distancia al conductor y de la potencia de la batería. Si la aguja se sitúa paralelamente al alambre y en el mismo plano horizontal, al establecerse la corriente el polo de la aguja no se desvía, asciende o desciende en el plano de inclinación.¹⁴

Hay un punto que Oersted quiere dejar muy claro, y es que el efecto que ha descubierto no puede interpretarse en términos de las bien conocidas atracciones y repulsiones producidas por la electricidad. Su primer argumento depende de las características de los movimientos observados de la aguja. Cuando se sitúa el alambre encima de la aguja y paralelo a ella, y se mueve el alambre hacia el este o hacia el oeste manteniéndolo paralelo a la aguja, si el efecto dependiera de atracciones o repulsiones, el mismo polo de la aguja que se aproxima al alambre cuando éste se encuentra en el este debería aproximarse también cuando se le sitúa al oeste. Un segundo argumento depende de las características de la transmisión del efecto sobre la aguja. El efecto tiene lugar igualmente cuando se interponen entre el alambre y la aguja materiales diversos como, por ejemplo, láminas de vidrio, metales, maderas, agua o piedras. Oersted concluye

¹³ *Ibidem*.

¹⁴ *Ibidem*, p. 275.

It is needless to observe that the transmission of effects through all these matters has never before been observed in electricity and galvanism. The effects, therefore, which take place in the conflict of electricity are very different from the effects of either of the electricities.¹⁵

Los efectos del conflicto eléctrico no son eléctricos. Qué tipo de efectos son nos lo dice claramente en el relato de su descubrimiento que escribirá un año después, y que hemos visto ya: el conflicto eléctrico provoca efectos magnéticos. Es aquí donde reside la trascendencia de su descubrimiento, que para él no puede por menos de respaldar su idea de la unidad de las fuerzas.

Las peculiaridades de los movimientos de la aguja magnética requieren una explicación que Oersted avanza en la segunda parte de su memoria. Observa en primer lugar que el conflicto eléctrico sólo actúa sobre las partículas magnéticas de la materia. Los cuerpos no magnéticos son permeables al conflicto eléctrico, pero las partículas magnéticas de los cuerpos magnéticos oponen resistencia al paso del conflicto, y de esta forma son arrastradas por el ímpetu de las acciones contrarias que dan lugar al conflicto eléctrico. Añade que las desviaciones opuestas de la aguja cuando se encuentra encima y debajo del alambre conductor sólo pueden comprenderse si se admite que el conflicto forma un círculo alrededor del alambre, puesto que es propio del círculo actuar en sentidos contrarios en los extremos de un diámetro. Termina mostrando cómo las ideas que acaba de introducir permiten explicar los movimientos de la aguja:

All the effects on the north pole above mentioned are easily und...

¹⁵ *ibidem*.

by supposing that negative electricity moves in a spiral line bent towards the right, and propels the north pole, but does not act on the south pole. The effects on the south pole are explained in a similar manner, if we ascribe to positive electricity a contrary motion and power of acting on the south pole, but not upon the north.¹⁶

La memoria de Oersted planteaba dos problemas. En primer lugar, establecía una conexión entre electricidad y magnetismo que desafiaba la firme creencia en la independencia de ambos campos de fenómenos. Así, al intentar Ampère explicar a su amigo Roux-Bordier, en una carta de 21 de febrero de 1821, la actitud de los miembros de la Academia de París cuando Arago les informó de los experimentos de Oersted, hacía responsable a la idea de Coulomb de los fluidos magnéticos, que

écartait absolument toute idée d'action entre l'électricité et les prétendus fils magnétiques. La prévention en était au point que, quand M. Arago parla de ces nouveaux phénomènes à l'institut, on rejeta cela comme on avait rejeté les pierres tombées du ciel (...) Ils décidaient tous que c'était impossible.¹⁷

En segundo lugar, las características de esta conexión "imposible" eran sumamente inquietantes desde otro punto de vista. Recordemos que electrostática y magnetostática había alcanzado sus éxitos con un modelo de interacción que seguía la ortodoxia newtoniana: fuerzas centrales actuando entre las partículas de los fluidos. Pues bien, Oersted ha descubierto una acción que no parece someterse a este modelo. La fuerza con que el alambre actúa sobre el polo de la aguja magnética es transversal al alambre.

¹⁶ *Ibidem*, p. 276.

¹⁷ Louis de Launay (ed.), *Correspondance du grand Ampère*, 3 vols., Paris, 1936-1943, vol. II, p. 586. Citado en BLONDEL-1982, p. 44.

1. 3. Dos reacciones al descubrimiento de Oersted: Ampère y Faraday

1. 3. 1. La electrodinámica de Ampère

Arago informa a la Academia de París del descubrimiento de Oersted en la sesión del 4 de setiembre de 1820, y en la sesión siguiente, el 11 de setiembre, repite los experimentos delante de sus incrédulos colegas. Ampère no forma parte de estos últimos; por el contrario, desde el primer momento se ha puesto a trabajar febrilmente sobre el nuevo fenómeno. En una carta a su hijo de 25 de setiembre de 1820 afirmaba

Tous mes moments ont été pris par une circonstance importante de ma vie. Depuis que j'ai entendu parler pour la première fois de la belle découverte de M. Oersted, professeur à Copenhague, sur l'action des courants galvaniques sur l'aiguille aimantée, j'y ai pensé continuellement, je n'ai fait qu'écrire une grande théorie sur ces phénomènes et tous ceux déjà connus de l'aimant.¹⁸

Los frutos de esta sostenida reflexión empezaron a mostrarse ya en la primera comunicación que leyó a la Academia el 13 de setiembre de 1820. En las dieciséis sesiones que mantuvo la Academia entre esta fecha y el 15 de enero de 1821 sus colegas tuvieron la oportunidad de escuchar hasta once comunicaciones más.¹⁹

¹⁸ *Correspondence du grand Ampère*, II, p. 562. Citado en BLONDEL-1982, p. 74. Caneva sugiere como hipótesis explicativa del interés de Ampère por el descubrimiento de Oersted frente al escepticismo de sus colegas su adhesión al grupo de antilaplacianos formado por Arago, Fresnel, Dulong, Petit y Fourier. Estos veían en el éter el concepto unificador de una física interesada en la conexión entre las diversas clases de fenómenos físicos. Véase su CANEVA-1980.

En su primera intervención ante la Academia, el 18 de setiembre de 1820, Ampère expone lo que en su opinión son los dos "resultados generales" que pueden deducirse de los experimentos de Oersted. El ha comprendido que la acción descubierta por Oersted es una resultante de dos: la acción que depende propiamente de la corriente que pasa por el alambre y la que se debe al magnetismo terrestre. Apoyándose en su aguja astática --dos agujas magnéticas fijadas antiparalelamente a un mismo eje que permiten eliminar la acción del magnetismo terrestre-- puede determinar que la acción directriz de la corriente sobre la aguja es perpendicular a la corriente. Este es el primer resultado general.

El segundo resultado, que el alambre conductor atrae o repele la aguja magnética, es el punto final de una reflexión crucial, pues es aquí donde parece encontrarse el origen de uno de los principios fundamentales de la electrodinámica de Ampère, esto es, que los imanes consisten en conjuntos de corrientes eléctricas. Observa Ampère que si la acción del magnetismo terrestre sobre la aguja magnética se hubiera

¹⁹ La reconstrucción de la génesis y el desarrollo de las ideas de Ampère es una tarea particularmente difícil. Para ello habría que determinar los contenidos de las distintas comunicaciones leídas ante la Academia. Una primera fuente serían los manuscritos relevantes de entre la gran masa --la gran mayoría de ellos sin fechar-- que se conserva en el Archivo de la Academia de las Ciencias de París. La segunda fuente fundamental es su primera memoria publicada, "De l'action exercée sur un courant électrique par un autre courant, le globe terrestre ou un aimant", *Annales de Chimie et de Physique*, 15 (1820), 59-76 y 170-208 (recibida en la Academia el 26 de diciembre de 1820). Aquí el mismo Ampère proporciona información relevante, pero difícil de ordenar porque mezcla contenidos pertenecientes a las comunicaciones leídas entre el 18 de setiembre y el 6 de noviembre de 1820.

La tarea ha sido abordada por Christine Blondel en su BLONDEL-1982, trabajo en el que se apoya fundamentalmente mi exposición. Williams ofrece una reconstrucción alternativa en su WILLIAMS-1983.

descubierto después de la acción directriz del alambre conductor sobre la aguja, hubiera sido natural atribuir la causa que opera en el primer fenómeno a la que se revela en el segundo. Entonces se habría pensado que la acción del magnetismo terrestre sobre la aguja magnética se debe a una corriente eléctrica que circula de este a oeste perpendicularmente al meridiano magnético. Ampère concluye

Maintenant, si des courants électriques sont la cause de l'action directrice de la Terre, des courants électriques seront aussi la cause de celle d'un aimant sur un autre aimant; d'où il suit qu'un aimant doit être considéré comme un assemblage de courants électriques qui ont lieu dans des plans perpendiculaires à son axe.²⁰

Como veremos, Ampère reformulará más tarde esta hipótesis en el sentido de considerar que las corrientes eléctricas a las que se reduce el imán no circulan alrededor de su eje, sino alrededor de cada una de sus moléculas. Por el momento, de la hipótesis parece deducirse que las corrientes eléctricas deben reproducir los efectos de los imanes, en particular los efectos atractivos y repulsivos que estos manifiestan. De aquí se sigue el segundo resultado general, esto es, el alambre conductor debe atraer o repeler la aguja magnética. Ampère verificó estas atracciones y repulsiones colgando verticalmente una aguja magnética frente a un alambre conductor horizontal.

Por último, en la misma sesión mostró que la corriente en el interior de la pila actuaba también sobre la aguja magnética. Con ello se demostraba el carácter cerrado del circuito formado por la pila y el alambre conductor conectado a sus polos. Más allá de su interés teórico -

²⁰ Ampère, "De l'action exercée sur un courant électrique par un autre courant, le globe terrestre ou un aimant", *MEMOIRES-1825*, pp. 7-53, p. 47.

-hasta entonces la pila y el alambre conductor se consideraban sedes de fenómenos cualitativamente distintos: en el alambre circulaban los fluidos eléctricos que la acción de pila separaba acumulándolos en los polos-- este resultado tenía una inmediata aplicación práctica sugerida por Ampère. La aguja magnética permitía detectar la corriente eléctrica sin perturbarla. Ampère llamó al dispositivo "galvanoscopio", denominación que en su memoria publicada transformó en "galvanómetro".

En su intervención del 18 de setiembre había prometido construir bobinas y espirales para llevar a cabo algunos experimentos con los que poder mostrar que todos los fenómenos magnéticos podían reducirse a efectos eléctricos. Es en la sesión histórica de 25 de setiembre de 1820 cuando realiza algunas de estas experiencias. En la tarde del mismo día escribe a su hijo explicándole que

Tout réussit à merveille; mais l'expérience décisive que j'avais conçue comme preuve définitive exigeait deux piles galvaniques; tentée avec des piles trop faibles chez moi avec Fresnel, elle n'avait point réussi. Enfin hier j'obtins de Dulong qu'il permit à Dumotier de me vendre la grande pile qu'il faisait construire pour le cours de physique de la Faculté et qui venait d'être achevée.

Ce matin l'expérience a été faite chez Dumotier avec un plein succès et répétée aujourd'hui à quatre heures, à la séance de l'Institut.

On ne m'a plus fait d'objection et voilà une nouvelle théorie de l'aimant qui en ramène, par le fait, tous les phénomènes à ceux du galvanisme. Cela ne ressemble en rien à ce qu'on en disait jusqu'à présent. ²¹

Durante la sesión ha presentado dos experimentos fundamentales. En el primero, sirviéndose de una espiral y un imán, ha mostrado cómo la espiral recorrida por una corriente eléctrica es fuertemente atraída o

²¹ *Correspondence du grand Ampère*, vol. II, p. 562. Cited in BLONDEL-1982, p. 74.

repelida por el polo de un imán situado con su eje perpendicular al plano de la espiral. La atracción o repulsión depende de que las corrientes en la espiral tengan el mismo sentido o sentido contrario respecto de las corrientes que él considera que existen en el imán. El segundo experimento es la "expérience décisive" a la que se refiere en la carta. Sustituyendo en el dispositivo anterior el imán por otra espiral, reproduce las atracciones o repulsiones, pero en este caso sólo mediante corrientes eléctricas. Generalizando este resultando afirma en la sesión que

M. Ampère a découvert ce fait, que deux courants électriques s'attirent lorsqu'ils vont dans le même sens, et qu'ils se repoussent s'ils vont en sens contraire.²²

Será en la sesión del 9 de octubre de 1820 cuando demostrará experimentalmente las atracciones y repulsiones entre alambres conductores paralelos.

Así pues, en las dos sesiones de 18 de setiembre y 25 de setiembre de 1820 Ampère ha establecido las bases fundamentales de esa teoría nueva que anunciaba triunfante en la carta a su hijo. La ley fundamental es la de la atracción y repulsión de corrientes eléctricas paralelas. Con esta ley, y admitiendo que los imanes se reducen a conjuntos de corrientes eléctricas que circulan en planos paralelos a sus ejes, todos los fenómenos electromagnéticos descubiertos por Oersted, así como los de interacción entre imanes, y aun los que dependen del magnetismo terrestre, pueden reducirse a la interacción de corrientes eléctricas.²³

²² Ampère, "Analyse des mémoires lus par M. Ampère à l'Académie des Sciences, dans les séances des 18 et 25 septembre, des 9 et 30 octobre 1820", *Annales Générales des Sciences Physiques*, 6 (1820), 238-257, p. 244. Citado en BLONDEL-1982, p. 76.

Naturalmente, para Ampère resulta esencial ofrecer una idea de la naturaleza de la corriente eléctrica, puesto que tan importante papel juega ésta en su teoría. Esta cuestión ocupará parte de su intervención ante la Academia el 9 de octubre de 1820, y a ella dedicará el comienzo de su primera memoria publicada. Ampère comparte la teoría que ve en el contacto de dos metales la acción electromotriz que separa los fluidos eléctricos. Estos se acumulan en los polos de la pila, produciéndose una tensión que se descarga mediante la circulación de los fluidos en el alambre que conecta los polos:

en sorte qu'il en résulte un double courant, l'un d'électricité positive, l'autre d'électricité negative, partant en sens opposés des points où l'action électromotrice a lieu, et allant se réunir dans la partie du circuit opposée à ces points. Les courants dont je parle vont en s'accélégrant jusqu'à ce que l'inertie des fluides électriques et la résistance qu'ils éprouvent par l'imperfection même des meilleurs conducteurs fassent équilibre à la force électromotrice, après quoi ils continuent indéfiniment avec une vitesse constante tant que cette force conserve la même intensité; mais ils cessent toujours à l'instant où le circuit vient à être interrompu. C'est cet état de l'électricité dans une série de corps électromoteurs et conducteurs que je nommerai, pour abrégé, *courant électrique*.²⁴

Ampère mezcla aquí ideas cuya compatibilidad parece un tanto forzada. Si bien en la primera frase sigue la teoría de contacto, y la corriente aparece como un movimiento de fluidos que se reúnen en algún punto indeterminado del circuito, en la siguiente parece que se decide por una

²³ Es lo que afirma en las conclusiones que publica en su memoria. Véase conclusiones 1, 4, 5, 6 y 7 en "De l'action exercée sur un courant électrique par un autre courant, le globe terrestre ou un aimant", *MEMOIRES-1825*, pp. 48-49.

²⁴ *Ibidem*, p. 10.

circulación continua de los fluidos en el circuito pila-conductor, lo cual es coherente con la demostración que ofreció anteriormente --sirviéndose de la acción sobre la aguja magnética-- del carácter cerrado de este circuito.²⁵

A partir de comienzos de diciembre de 1820 Ampère se va a dedicar casi fundamentalmente a determinar la ley matemática de la fuerza que actúa en la interacción de corrientes eléctricas que ha puesto en la base de su teoría. En una memoria leída el 4 de diciembre de 1820, señala que todos los fenómenos pueden reducirse a una misma ley

en admettant uniquement, entre les portions infiniment petites de ce que j'ai nommé *courants électriques*, des forces dirigées suivant la ligne qui joint leurs milieux, ne pensant pas qu'on puisse admettre entre elles, de quelque nature qu'elles soient, aucune sorte d'action dans une autre direction. ²⁶

Así pues, la fuerza entre los elementos de corriente --las "portions infiniment petites" de las corrientes que interaccionan-- ha de ser una fuerza central, con lo que Ampère parece haber resuelto el problema de las características sorprendentes de la fuerza electromagnética descubierta por Oersted. Asimismo, la fuerza debe ser inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre los elementos de corriente, directamente proporcional a las intensidades de corriente y depender además de los ángulos que determinan la orientación relativa de los elementos. En las sesiones posteriores seguirá infomando de sus investigaciones sobre la fórmula, que culminarán en su obra sistemática de 1827 *Mémoire sur la théorie mathématique des phénomènes électro-*

²⁵ BLONDEL-1982, p. 82.

²⁶ Ampère, "Mémoire sur l'expression mathématique des attractions et des répulsions des courants électriques", MEMOIRES-1885, pp. 128-135, p. 128.

dinámicas, únicamente deducida de l'expérience, donde pretende ofrecer una justificación completa de su fórmula.

Las investigaciones sobre la fórmula electrodinámica no ocupan toda su atención. En la última memoria que Ampère leyó en la Academia, el 15 de enero de 1821, antes que una enfermedad pulmonar le obligara a interrumpir temporalmente sus investigaciones, plantea otro tema importante para su teoría. Él había imaginado las corrientes eléctricas a las que había reducido el imán circulando en planos perpendiculares a su eje. Sin embargo, ahora menciona brevemente una alternativa:

Il s'agit de savoir si les courbes fermées, suivant lesquelles ont lieu les courants électriques qui donnent à l'acier aimanté les propriétés qui le caractérisent, sont situées concentriquement autour de la ligne qui joint les deux pôles de l'aimant, ou si ces courants sont répartis dans toute sa masse autour de chacune de ses parties, toujours dans des plans perpendiculaires à cette ligne.²⁷

Añade que él se inclina por la segunda posibilidad, pero que como todos los fenómenos concididos se explican igualmente bien utilizando la primera, prefiere dejar la cuestión abierta hasta que datos nuevos permitan decidir.

En realidad, él ya había decidido en favor de la segunda posibilidad y es la que mantendrá en adelante. Esta hipótesis de las corrientes moleculares le había sido sugerida por Fresnel, que seguía con atención sus investigaciones. Fresnel había encontrado varias objeciones a la primera hipótesis de Ampère. Así, por ejemplo, Fresnel observaba que, si se aceptaba la hipótesis de corrientes eléctricas circulando según la circunferencia del imán, en un imán cilíndrico hueco el magnetismo

²⁷ Ampère, "Analyse des mémoires lus à l'Académie les 11 et 26 décembre 1820 et les 8 et 15 janvier 1821", MEMOIRES-1885, pp. 136-140, p. 139.

debería desaparecer si se le cortaba longitudinalmente. Asimismo, el calor producido por las corrientes debería calentar el imán. En la hipótesis de las corrientes moleculares ambas objeciones desaparecerían. La segunda porque, según Fresnel, podía suponerse que las corrientes moleculares no producían calor.²⁸

Cuando Ampère se ve obligado a interrumpir sus investigaciones en los primeros meses de 1821, ha sentado las bases de la gran teoría que mencionaba en la carta a su hijo de 25 de setiembre de 1820. Oersted había creído descubrir efectos magnéticos producidos por la corriente. Ampère ha eliminado los efectos magnéticos: para él el magnetismo se reduce a electricidad en movimiento, y todos los fenómenos magnéticos pueden reducirse a interacciones de corrientes eléctricas. No es de extrañar, pues, que Ampère se interesara vivamente por el descubrimiento de un nuevo fenómeno electromagnético, que parece desafiar su teoría: las rotaciones electromagnéticas de Faraday.

1. 3. 2. Las rotaciones electromagnéticas de Faraday

1. 3. 2. 1. Faraday crítico de Amuère

Las primeras noticias de los experimentos de Oersted llegaron a Inglaterra a comienzos de octubre de 1820. En el laboratorio de la Royal

²⁸ Las dos notas en que Fresnel defendía la hipótesis de las corrientes moleculares, "Comparaison de la supposition des courants autour de l'axe avec celle des courants autour de chaque molécule" y "Deuxième note sur l'hypothèse des courants particuliers", se encontraron entre los papeles de Ampère. Se publicaron en *MEMOIRES-1865*, vol. II, pp. 141-147. Sobre el tema de las ideas de Ampère acerca de las corrientes moleculares vease WILLIAMS-1962.

Institution Davy y Faraday repitieron los experimentos de Oersted, aunque no parece que Faraday se interesara mucho al principio por los nuevos fenómenos.

La situación iba a cambiar drásticamente debido a una petición de Richard Phillips. Faraday había hecho amistad con Phillips cuando entró a formar parte en 1810 de la City Philosophical Society, un club de jóvenes interesados en temas científicos del que Phillips era miembro. Más tarde Phillips se haría químico y llegaría a ser miembro de la Royal Society y editor del *Philosophical Magazine*. De hecho fue Phillips el que redactó el certificado para la candidatura de Faraday a la Royal Society, y se ocupó de recoger las firmas necesarias. En 1821 Phillips, entonces coeditor de los *Annals of Philosophy*, sugirió a Faraday que escribiera una breve historia de lo que se había hecho en el campo del electromagnetismo.

Faraday se dedicó a ello en el verano de 1821. No se limitó a examinar los artículos escritos sobre el tema, además repitió gran parte de los experimentos que allí se describían.²⁹ Este trabajo tuvo un doble resultado: su "Historical Sketch of Electro-Magnetism", que publicó anónimamente en los *Annals of Philosophy*, y el descubrimiento de sus rotaciones electromagnéticas.

El "Historical Sketch" se publicó en tres partes, en setiembre y octubre de 1821 y febrero de 1822. En las dos primeras Faraday se concentra fundamentalmente en el trabajo experimental que se ha llevado a cabo en el campo desde el descubrimiento de Oersted. En la última Faraday se ocupa de las teorías que se han avanzado para dar

²⁹ Es lo que afirma en su "Historical Statement respecting Electro-Magnetic Rotations", *Quarterly Journal of Science*, 15 (1823), 288-292. *ERE*, II, pp. 159-162, p. 161.

cuenta de los nuevos fenómenos, en particular, de la interpretación que Oersted incluía en su breve artículo, y de la teoría de Ampère.³⁰

La observación más interesante en las dos primeras partes de su artículo aparece en el comienzo. Allí, después de describir brevemente el funcionamiento de la batería voltaica, escribe:

Those who consider electricity as a fluid, or as two fluids, conceive that a current or currents of electricity are passing through the wire during the whole time it forms the connection between the poles of an active apparatus. There are many arguments in favour of the materiality of electricity, and but few against it; but still it is only a supposition; and it will be as well to remember while pursuing the subject of electro-magnetism, that we have no proof of the materiality of electricity, or of the existence of any current through the wire.

Whatever be the cause which is active within the connecting wire, whether it be the passage of matter through it, or the induction of a particular state of its parts, it produces certain very extraordinary effects.³¹

Reconoce que los partidarios de los fluidos tienen argumentos en su favor, pero esos argumentos no son pruebas, y él se reserva el derecho de no creer en la materialidad de la electricidad. Este es el primer documento público de su escepticismo frente a las teorías que identifican la electricidad con uno o dos fluidos, escepticismo que no abandonará a lo largo de su carrera.

El parece apuntar una concepción alternativa de la corriente. Es muy difícil intentar precisarla puesto que sólo la menciona de pasada. La corriente no debería entenderse como el flujo de un fluido, sino como la inducción de un estado en el alambre. Es tentador ver aquí el embrión de

³⁰ Faraday, M., "Historical Sketch of Electro-Magnetism", *Annals of Philosophy*, 18 (1821), 195-200, 274-290; 19 (1822), 107-121.

³¹ *Ibidem*, pp. 196-197.

la noción de estado electro-tónico³² que tan importante papel va a jugar diez años después en sus ideas respecto de la inducción electromagnética, y a cuyo análisis detallado se dedican los siguientes capítulos del presente estudio. Sin embargo, esta interpretación del texto debe rechazarse puesto que, como veremos, el estado electro-tónico, en su primera formulación, lejos de plantearse como idea alternativa de corriente, es un estado que *resiste* la formación de una corriente inducida. Lo que es importante, sin duda, es retener que las ideas de Faraday con respecto a la corriente eléctrica no discurren por los mismos caminos que las de la gran mayoría de sus contemporáneos.

En la parte que dedica a las teorías del electromagnetismo, Faraday se ocupa en primer lugar de la interpretación teórica que Oersted ha proporcionado de sus experimentos. Advierte en primer lugar que será breve porque no acaba de comprender la teoría de Oersted.³³ Continúa siguiendo de cerca la explicación de Oersted y termina resumiéndola así:

The theory of M. Oersted, therefore, seems to require that there be two electric fluids; that they be not either combined or separate, but in the act of combining so as to produce an electric conflict; that they move nevertheless separate from each other, and in opposite spiral directions, through and round the wire; and that they have entirely distinct and different magnetic powers; the one electricity (negative) propelling the north pole of a magnet, but having no action at all on the south pole; the other electricity (positive) propelling the south pole, but having no power over the north pole.³⁴

Como sabemos, Oersted no había sido tan explícito, respecto a los

³² Así interpreta Williams la mención de este "particular state" en este texto del "Historical Sketch". Véase su WILLIAMS-1965, p. 154.

³³ FARADAY-Historical Sketch, p. 107.

³⁴ *Ibidem*, p. 108.

fluidos eléctricos como aquí interpreta Faraday. De hecho, en su artículo, había dejado la cuestión más indecisa, empleando las expresiones "negative electricity" o "positive electricity".

Faraday dedica mucho más espacio a la teoría de Ampère. De hecho, afirma, de todas las teorías del electromagnetismo que se han propuesto la de Ampère es la única que merece ese título.³⁵ Sin embargo, él es crítico con la teoría de Ampère, y su crítica se concentra básicamente en un aspecto: Ampère no ha proporcionado una idea clara de la corriente eléctrica, y este defecto es fundamental, porque su teoría se basa precisamente en la interacción de corrientes. Así, insistiendo en su idea de que la corriente es un estado del alambre que se conecta a los polos de la batería, Faraday escribe:

Now as it is in this state that the wire is capable of affecting the magnetic needle, it is very important for the exact comprehension of the theory that a clear and precise idea of its state, or of what is assumed to be its state should be gained, for on it in fact the whole of the theory is founded. Portions of matter in the same state as this wire, may be said to constitute the materials from which M. Ampère forms, theoretically, not only bar magnets, but even the great magnet of the earth; and we may, therefore, be allowed to expect that a very clear description will first be offered of it. This however, is not the case, and is, I think, very much to be regretted, since it renders the rest of the theory considerably obscure, for though certainly the highly interesting facts discovered by M. Ampère could have been described, and the general laws and arrangements both in conductors and magnets stated with equal force and effect without any reference to the internal state of the wire, but only to the powers which experiment proves it to be endowed with, yet as M. Ampère has chosen always to refer to the currents in the wire, and in fact founds his theory upon their existence, it became necessary that a current should be described.³⁶

³⁵ Ibidem, p. 111.

³⁶ Ibidem, p. 112, subrayado de Faraday.

Refiriéndose al texto de la primera memoria publicada donde Ampère describe la corriente, Faraday insiste en que no está claro si Ampère considera una doble corriente de fluidos eléctricos que se reúnen en un punto indeterminado del alambre de conexión o si, por el contrario, piensa en una circulación continua de los dos fluidos en sentidos contrarios. En el primer caso, afirma Faraday, Ampère debería haber explicado si los efectos magnéticos dependen de la reunión de los fluidos. En el segundo, Ampère debería haber explicado por qué la doble circulación produce magnetismo.³⁷ No es de extrañar pues que Faraday considere prematura la eliminación que Ampère ha hecho del magnetismo, reduciendo todos los fenómenos magnéticos a la interacción de corrientes eléctricas.³⁸

La exposición de Faraday termina mencionando las dos ideas de Ampère respecto de las corrientes que considera en los imanes. Corrientes circulando alrededor del eje del imán o alrededor de sus partículas. Aunque Faraday no manifiesta aquí su opinión al respecto, no estaba convencido de la existencia de las corrientes en cualquiera de los dos casos. Esto queda claro en una carta de esta misma época. Escribiendo a Gaspard de La Rive el 12 de setiembre de 1821, Faraday afirmaba:

I am by no means decided that there are currents of electricity in the common magnet (...) And (...) until the presence of Electrical currents is proved in the magnet by other than magnetical effects, I shall remain in doubt about Ampère's theory.³⁹

³⁷ *Ibidem*, pp. 112-113.

³⁸ *Ibidem*, p. 114.

³⁹ Citado en ROSS-1965, p. 199.

1. 3. 2. 2. Las rotaciones electromagnéticas

Como observé antes, para escribir su "Historical Sketch" Faraday no se limitó a revisar la literatura sobre electromagnetismo, además repitió la mayoría de los experimentos que allí se describían. El examen cuidadoso de los experimentos de Oersted, o sea, el análisis de los movimientos de la aguja magnética en la proximidad de un alambre conductor por el que pasa la corriente eléctrica, le condujo al descubrimiento de que el alambre parecía mostrar una tendencia a girar alrededor de cada uno de los polos de la aguja. El 3 de setiembre de 1821, el día en que comenzó la investigación según el *Diary*, después de una serie de anotaciones y diagramas que representan minuciosamente los movimientos de la aguja, Faraday anota: "Hence the wire moves in opposite circles round each pole and/or the poles move in opposite circles round the wire."⁴⁰

Para comprobarlo construyó un sencillo aparato. Fijó con un poco de cera un imán verticalmente al fondo de una vasija llena de mercurio, de forma que sólo sobresaliera un polo del imán. Un trozo de alambre pivotaba en su extremo superior en una cápsula de plata invertida y amalgamada con mercurio. Al cerrar el circuito, su extremo inferior provisto de un flotador de corcho trazaba una circunferencia en la superficie del mercurio alrededor del polo magnético. Para la rotación inversa, fijaba verticalmente el alambre conductor en el mercurio y sujetaba un polo del imán al fondo de la vasija mediante un hilo de platino. Al flotar el imán, el otro polo describía una circunferencia

⁴⁰ *Diary*, I, §6, p. 49, 3 de setiembre de 1821.

alrededor del alambre.⁴¹ Faraday concluye:

Every thing tends to prove that there is no attraction between the poles of the magnet and the wire, but only motion in a circular direction, and all the motions of the magnet or its poles about the wires may be deduced from this.⁴²

Rápidamente dió cuenta de su descubrimiento en su artículo "On some new Electro-Magnetical Motions, and on the Theory of Magnetism", fechado el 11 de setiembre de 1821.⁴³ Aquí vuelve a manifestar sus dudas sobre la teoría de Ampère. En particular, el punto de desacuerdo que él quiere poner en evidencia depende de la consideración de los movimientos de revolución de alambre y polo magnético que acaba de descubrir:

M. Ampère has shown that two similar connecting wires, by which is meant, having currents in the same direction through them, attract each other, and that two wires having currents in opposite directions through them, repel each other, the attraction and repulsion taking place in right lines between them (...) It is, indeed, an ascertained fact, that the connecting wire has different powers at its opposite sides; or rather, each power continues all round the wire, the direction being the same, and hence it is evident that the attractions and repulsions of M. Ampère's wires are not simple, but complicated results.⁴⁴

El resultado simple es el que él acaba de descubrir, o sea, el poder circunferencial alrededor del alambre conductor que obliga a girar al polo magnético, y no las atracciones y repulsiones de corrientes a las que

⁴¹ *Ibidem*, I, §§14-16, pp. 50-51, 4 de setiembre de 1821.

⁴² *Ibidem*, I, §20, p. 51, 4 de setiembre de 1821.

⁴³ "On some new Electro-Magnetical Motions, and on the Theory of Magnetism", *Quarterly Journal of Science*, 12 (1821), 74-96. *ERE*, II, pp. 127-147.

⁴⁴ *Ibidem*, pp. 131-132.

Ampère quiere reducir todos los fenómenos. En este poder circunferencial está el germen de las líneas de fuerza magnética que, diez años después, jugarán un papel decisivo en su explicación de la inducción electromagnética.

Faraday muestra cómo pueden reproducirse las atracciones y repulsiones que presentan los polos de los imanes mediante concentraciones de esas líneas de poder. Si se dobla un alambre

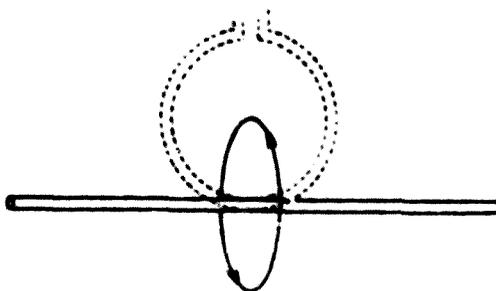


figura. 1 (ERE, II, plate II, fig. 14)

conductor recto en forma de espira (véase la figura 1) las líneas de poder circunferencial alrededor del alambre se concentran en el centro de la espira, con lo que los centros de sus caras actuarán como polos magnéticos.⁴⁵

Faraday ilustra su idea con un sencillo experimento. Se sumerge parcialmente en una vasija con agua una bobina construida arrollando en un tubo de cristal alambre de cobre aislado. Se sitúa en la superficie del agua una aguja magnética con flotadores de corcho. Entonces,

The helix being connected with the apparatus and put into the water in which the needle lay, its ends appeared to attract and repel the poles of the needle according to the laws before mentioned. But, if that end which attracted

⁴⁵ *Ibidem*, pp. 138-139.

one of the poles of the needle was brought near that pole, it entered the glass tube, but did not stop just within side in the neighbourhood of this pole (as we may call it for the moment) of the helix, but passed up the tube, drawing the whole needle in, and went to the opposite pole of the helix, or the one which on the outside would have repelled it; on trying the other pole of the magnet with its corresponding end or pole of the helix the same effect took place; the needle pole entered the tube and passed to the other end, taking the whole needle into the same position it was in before.

Thus each end of the helix seemed to attract and repel both poles of the needle; but this is only a natural consequence of the circulating motion before experimentally demonstrated, and each pole would have gone through the helix and round on the outside, but for the counteraction of the opposite pole.⁴⁶

El polo de la aguja se aproximaba al polo de signo opuesto de la bobina pero no se detenía al llegar a él, como debería ocurrir si todo lo que estaba en juego era la atracción entre polos de distinto signo; seguía moviéndose según el eje de la bobina hasta llegar al extremo opuesto. El polo se movía en el interior de la bobina siguiendo la dirección de la concentración de las líneas de poder en su eje. Los polos de la bobina se reducían a concentraciones de líneas de poder.

Ampère había reducido todos los fenómenos magnéticos a la interacción de corrientes eléctricas. La interacción elemental tenía lugar según una fuerza central entre elementos de corriente. Para Faraday el hecho básico es la revolución del alambre y el imán que indica un poder circunferencial alrededor del alambre.

Las diferencias que Faraday mantenía con la teoría de Ampère no deben entenderse en el sentido de un rechazo total. Sus puntos de desacuerdo se concentraban principalmente en dos aspectos. En primer

⁴⁶ *Ibidem*, pp. 141-142.

lugar, la existencia de corrientes en el imán. En este punto Faraday era tan escéptico respecto a la hipótesis de las corrientes circulares alrededor del eje del imán, como respecto a la de las corrientes alrededor de las partículas del imán. En segundo lugar, Faraday no suscribía que el principio básico fuera la fuerza a distancia entre elementos de corriente. Ahora bien, Faraday aceptaba que Ampère había puesto de relieve una cierta identidad de acción entre electricidad y magnetismo y, asimismo, consideraba que la teoría de Ampère era la mejor representación de los hechos.⁴⁷ De hecho, como veremos, la autoridad de Ampère iba a jugar un papel importante en su interpretación de los experimentos con que descubrió la inducción electromagnética.

1. 4. Intentos de producir la inducción de corrientes

1. 4. 1. Inducción a partir de imanes

El descubrimiento hecho por Oersted de la acción de la corriente eléctrica sobre la aguja magnética creó expectativas sobre la posibilidad de un cierto tipo de reciprocidad: la creación de una corriente eléctrica por la acción de un imán. Así recoge Faraday estas expectativas en su "Historical Sketch" :

It was earnestly hoped and expected that such an arrangement might be made of magnets, wires, &c. as to produce the decomposition of water, or some other electrical effects; for as electricity produced magnetism, it was considered that magnetism might produce electricity.⁴⁸

⁴⁷ En una carta de 19 de setiembre de 1835, Faraday escribía a Whewell: "I ought to say that I accept Ampère's theory as the best present representation of facts, but that still I hold it with a little reserve" (FARADAY-Corres, I, carta nº 190, pp. 294-296, p. 295).

Fresnel fue el primero que intentó detectar estos efectos eléctricos. Siguiendo los consejos de Ampère, Arago había conseguido imantar una aguja situada en el eje de una bobina por la que pasaba la corriente eléctrica. Partiendo de este resultado Fresnel razona que

il est naturel d'essayer si un barreau aimanté ne peut pas reproduire un courant voltaïque dans l'hélice enveloppante; non que cela paraisse, au premier abord, une conséquence nécessaire des faits; car, si l'état d'aimantation de l'acier n'était, par exemple, qu'un nouvel arrangement de ses molécules ou une distribution particulière d'un fluide, on conçoit que ce nouvel état pourrait bien ne pas reproduire le mouvement qui l'a établi.⁴⁹

Intentó detectar la corriente eléctrica mediante la descomposición del agua, y el 6 de noviembre de 1820 informó a la Academia de su éxito, pero antes de final de año se retractó, observando que diversas anomalías le forzaban a considerar muy dudosos sus resultados.

No mucha más suerte tuvo Colladon en 1825. En la descripción de su experimento escrita un tiempo después, Colladon explica que

J'avais admis, comme chose possible, que la présence du pôle d'un fort aimant présenté à la extrémité d'une hélice formée d'un fil de cuivre recouvert de soie pourrait développer dans cette hélice un courant électrique permanent.⁵⁰

Como empleaba un galvanómetro muy sensible, por miedo de que el

⁴⁸ FARADAY-Historical Sketch, p. 281.

⁴⁹ Fresnel, A., "Note sur des essais ayant pour but de décomposer l'eau avec un aimant", *Annales de Chimie et de Physique*, 15 (1820), 219 y ss., MEMOIRES-1885, pp. 7-79, p. 76.

⁵⁰ Colladon, M. D., "Expérience d'induction électromagnétique tentée à Genève en 1825". Este texto se reproduce en ROSS-1985, figura 20.

imán pudiera perturbar la aguja del galvanómetro, lo conectó a la bobina con cincuenta metros de alambre aislado y lo instaló en otra habitación. Hecho esto, situaba su imán en posición y, sin apresurarse, iba a mirar la aguja del galvanómetro. Comprobaba que permanecía exactamente en el mismo punto.⁵¹

Las palabras de Coládon nos proporcionan la razón de su fracaso, del de Fresnel e incluso, como veremos, del de los primeros experimentos de Faraday. Como el efecto descubierto por Oersted era permanente, ellos buscaban un efecto recíproco asimismo permanente.

1. 4. 2. Inducción a partir de corrientes

El único que parece que tuvo éxito en detectar una corriente inducida fue Ampère. En su caso la inducción se produjo a partir de otra corriente. Sin embargo, sorprendentemente, dejó a un lado su

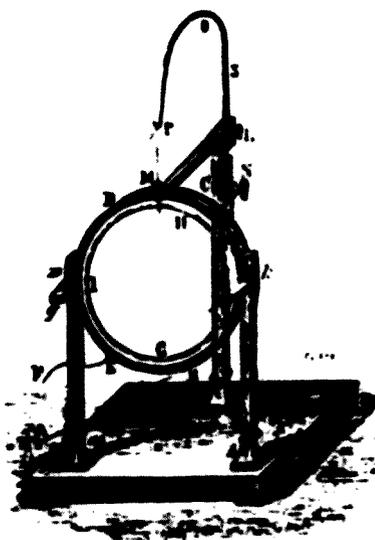


figura 2 (MEMOIRES-1885 p. 213)

descubrimiento. Ya vimos como Ampère, convencido por las

⁵¹ *Ibidem.*

observaciones críticas de Fresnel, había sustituido su primera hipótesis de las corrientes eléctricas coaxiales en los imanes por la de las corrientes alrededor de sus partículas. El problema que se le planteaba era determinar si estas corrientes se creaban en el proceso de imantación, o si en este proceso lo que tenía lugar era una orientación de corrientes moleculares ya existentes. La primera alternativa quedaría reforzada si se mostraba posible la creación de corrientes en conductores por la acción de corrientes cercanas.

En julio de 1821, para asegurarse de este último punto, Ampère realizó en París el siguiente experimento (véase la figura 2). *BCDE* es una espiral de cobre recorrida por una corriente eléctrica en cuyo interior cuelga el anillo de cobre *GHI*. La corriente inducida en el anillo por la que recorre la espiral se detectaría mediante el movimiento del anillo sometido a la acción de un imán de herradura situado en los soportes *kp, nq*. Ampère no observa ningún movimiento del anillo y concluye que lo que el experimento prueba directamente

c'est que la proximité d'un courant électrique n'en excite point, par influence, dans un circuit métallique de cuivre, même dans les circonstances les plus favorables à cette influence.⁵²

Asimismo, señala que el experimento le ha permitido concluir que las corrientes eléctricas que consideraba alrededor de las partículas de los imanes existían antes de la imantación, pero orientadas en todas las direcciones.⁵³

⁵² Ampère, "Réponse a la lettre de M. Van Beck, sur une nouvelle expérience électromagnétique", *Journal de Physique*, 93 (1821), 447 y ss., *MEMOIRES-1885*, pp. 212-237, p. 213.

⁵³ *Ibidem*, p. 214.

Un año después, en el verano de 1822, Ampère repitió el experimento en Ginebra con la ayuda de Auguste de La Rive. Utilizó el mismo dispositivo, salvo que en esta ocasión tenía a su disposición un imán más potente. El resultado fue completamente distinto: en esta ocasión sí observó movimientos del anillo. De vuelta a París, el 16 de setiembre de 1822 informa a la Academia del resultado de su experimento en estos términos:

Le circuit fermé [o sea, el anillo de cobre] placé sous l'influence du courant électrique redoublé, mais sans aucune communication avec lui, a été attiré et repoussé alternativement par l'aimant, et cette expérience ne laisserait, par conséquent, aucun doute sur la production des courants électriques par influence, si l'on ne pouvait soupçonner la présence d'un peu de fer dans le cuivre dont a été formé le circuit mobile.⁵⁴

El descarta esta última posibilidad, señalando que se preocupó de comprobar que no hubiera ninguna acción del imán sobre el anillo de cobre antes de establecer la corriente en la espiral. A renglón seguido concluye tranquilamente:

Ce fait de la production de courants électriques par influence, très intéressant par lui même, est d'ailleurs indépendant de la théorie générale de l'action électrodynamique.⁵⁵

⁵⁴ Ampère, " Notice sur quelques expériences nouvelles relatives à l'action mutuelle de deux portions de circuit voltaïque et à la production des courants électriques par influence, et sur les circonstances dans lesquelles l'action électrodynamique doit d'après la théorie, produire dans un conducteur mobile autour d'un axe fixe un mouvement de rotation continu, ou donner à ce conducteur une direction fixe". Esta memoria permaneció inédita. Se publicó por primera vez, según un manuscrito autógrafa de Ampère, en MEMOIRES-1885, II, pp. 329-337, p. 334.

El lector moderno no puede por menos de asombrarse. Ampère ha detectado una corriente inducida y no parece darle importancia. De hecho, su descripción del experimento es sumaria. Describe con cuidado su dispositivo pero nada más. No parece que se preocupara de determinar si la corriente inducida era permanente, o cuál era su sentido en relación a la corriente inductora.⁵⁵

La memoria de Ampère no se publicó, pero el experimento se conoció gracias a la información que daba un influyente manual de electrodinámica. Demonferrand, profesor de matemáticas en el Colegio real de Versalles y colaborador de Ampère, publicó en 1823 un trabajo en el que exponía la electrodinámica de Ampère. Su libro, *Manuel d'électricité dynamique*, mereció la aprobación de Ampère, que el 21 de agosto de 1823 escribía a Auguste de La Rive:

⁵⁵ *Ibidem*, p. 334.

⁵⁶ Explicar la actitud de Ampère es un problema que permanece abierto. Ross se toma en serio la afirmación de Ampère, y piensa que su idea de que el fenómeno de inducción era independiente de su electrodinámica explica su desinterés (ROSS-1965, p. 188). Blondel considera que el interés de Ampère estaba centrado en la cuestión de la preexistencia o no de las corrientes moleculares antes de la imantación, y que habiéndose decidido por la primera alternativa no estaba dispuesto a cambiar de opinión, en parte porque, en contra de lo que pensaba la primera vez que lo hizo, consideraba ahora que el experimento no podía resolver la cuestión (BLONDEL-1982, p. 134). La última aportación al debate es la de Williams en su WILLIAMS-1986. Su argumentación no es muy clara, pero su idea parece ser que Ampère minimizó su descubrimiento porque podría interpretarse como proporcionando evidencia en favor de su primera hipótesis de que las corrientes en los imanes circulan en planos perpendiculares a su eje. Según Williams, Ampère no podía volver a esta hipótesis debido a que había comprendido que las críticas de Faraday en su artículo sobre las rotaciones electromagnéticas la hacían insostenible (WILLIAMS-1986, p. 310).

Je ne sais si l'on connaît [en Ginebra] un Précis que je trouve très complet et très bon sur tout ce qui dépend de l'électricité dynamique; il est de M. de Monferrand [sic] et a été publié sous ce titre *Manuel d'électricité dynamique*.⁵⁷

Asimismo Ampère mandó un ejemplar a Faraday, que le agradeció el envío en una carta de 17 de noviembre de 1825.⁵⁸ Una traducción inglesa se publicó en 1827.

En su libro, Demonferrand introduce el experimento de Ampère en el contexto de su discusión sobre el proceso de imantación. Demonferrand indica que es necesario, en primer lugar, asegurarse de si una corriente eléctrica puede inducir otra en un conductor vecino. Para resolver la cuestión introduce el experimento de Ampère con su resultado positivo y concluye:

*Cette expérience ayant d'abord été faite avec un courant galvanique trop faible, M. Ampère avait annoncé qu'il est impossible de produire un courant par l'influence d'un autre courant; mais l'ayant répétée avec une pile plus énergique et un aimant puissant, il a reconnu l'erreur de sa première détermination. Il est donc constaté maintenant qu'un courant électrique tend à mettre en mouvement dans le même sens l'électricité des conducteurs près desquels il passe.*⁵⁹

Demonferrand ha introducido un detalle crucial que estaba ausente en las informaciones de Ampère. Según Demonferrand, una corriente induce otra del mismo sentido en un conductor próximo. Ahora bien, esto es incorrecto: la primera corriente inducida tiene sentido opuesto a la inductora. Algunas particularidades de la descripción del experimento

⁵⁷ Citado en BLONDEL-1962, p. 136.

⁵⁸ Faraday a Ampère (17 de noviembre de 1825), FARADAY-Corres, I, carta nº 74, pp. 153-154.

⁵⁹ DEMONFERRAND-*Manuel*, pp. 173-174, subrayado de Demonferrand.

que proporciona Demonferrand parecen apoyar la idea de que su información del experimento procedía del mismo Ampère. Aunque en su memoria leída en la Academia Ampère no se había referido en ningún momento al sentido de la corriente inducida que había detectado, ¿podría ser que él estuviera convencido de que el sentido de la corriente inducida debía coincidir con el de la inductora, y que comunicara su convicción a Demonferrand al informarle del experimento? De hecho Ampère, bien familiarizado con el libro de Demonferrand, no corrigió la frase.

En cualquier caso, hubo alguien que interpretó que la frase de Demonferrand estaba respaldada por la autoridad de Ampère: Faraday. En la memoria donde expone su descubrimiento de la inducción electromagnética, la Serie I de sus *Experimental Researches in Electricity*, Faraday señala que

all my results tend to invert the sense of the proposition stated by M. Ampère, "that a current of electricity tends to put the electricity of conductors near which it passes in motion in the same direction," for they indicate an opposite direction for the produced current.⁶⁰

La frase entrecomillada es la traducción de la de Demonferrand, que Faraday atribuye a Ampère. En una nota a pie de página fechada el 10 de febrero de 1832, Faraday abandona el tono cauteloso del texto y habla del "erroneous result" de Ampère.⁶¹

En una larga nota fechada el 29 de abril de 1833 que añade al final de la Serie III, Faraday reconoce que se ha equivocado al atribuir a Ampère el error sobre el sentido de la corriente inducida. Informa que

⁶⁰ ERE, Serie I, §78.

⁶¹ *Ibidem.*, p. 23.

M. Ampère tells me in a letter which I have just received from him, that he carefully avoided, when describing the experiment, any reference to the direction of the induced current; and on looking at the passages he quotes to me, I find that to be the case. I have therefore done him injustice (...) and am anxious to correct my error.⁶²

Y más abajo justifica su error explicando que

I have been in the habit of referring to Demontferrand's *Manuel d'Electricité Dynamique*, as a book of authority in France containing the general results and laws of this branch of science, up to the time of its publication, in a well arranged form.⁶³

Continúa reconociendo que la frase que citó en el §78 de la Serie I procedía del manual de Demontferrand, y termina indicando que, no habiendo Ampère aclarado nunca sus ideas sobre la cuestión, pensó, al escribir la Serie I, que estaba reproduciendo la opinión de Ampère.

Ahora bien, hay un punto que, comprensiblemente, Faraday no menciona. Él mismo, el descubridor de la inducción electromagnética, había cometido el mismo error que atribuyó a Ampère en la Serie I. Como tendremos ocasión de ver en el próximo capítulo, el análisis de las anotaciones de su diario de investigación correspondientes al día en que descubrió la inducción electromagnética, muestra que se equivocó en el sentido de la primera corriente inducida en relación a la inductora. Más aun, veremos que tardó meses en corregir su error y que lo mantuvo incluso en la primera versión de su Serie I ante la Royal Society. Es muy

⁶² ERE, Serie III, p. 108.

⁶³ *Ibidem*.

probable que en su error jugara un papel destacado la autoridad de Ampère.

CAPÍTULO 2

EL DESCUBRIMIENTO DE LA INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA: TEORÍA DEL ESTADO ELECTRO-TÓNICO

2. 1. La búsqueda de corrientes inducidas

2. 1. 1. Primeros intentos infructuosos

En el capítulo anterior hemos visto cómo Faraday recogía las expectativas que el descubrimiento de Oersted de la acción de la corriente eléctrica sobre la aguja magnética había creado sobre la posibilidad de un cierto tipo de reciprocidad: la producción de una corriente eléctrica por la acción de un imán. En su "Historical Sketch" Faraday escribía en octubre de 1821: "for as electricity produced magnetism, it was considered that magnetism might produce electricity". Que él participaba de esas expectativas puede verse por una anotación que hizo en 1823 en un cuaderno de notas titulado "Chemical Notes, Hints, Suggestions, and Objects of Pursuit". Faraday anota: "Convert magnetism into electricity".¹

Como es bien sabido, Faraday logró esta conversión en 1831. Sin embargo, fueron varios los intentos infructuosos antes de conseguir el éxito. El primer intento del que tenemos evidencia se remonta al 28 de diciembre de 1824.² Faraday publicó en 1825 la siguiente noticia de

¹ BENCE JONES - 1870, I, p. 361.

² *Diary*, I, p. 178, 28 de diciembre de 1824. En la anotación se puede leer:

estos experimentos:

As the current of electricity, produced by a voltaic battery when passing through a metallic conductor, powerfully affects a magnet, tending to make its poles pass round a wire, and in this way moving considerable masses of matter, it was supposed that a reaction would be exerted upon the electric current capable of producing some visible effect; and the expectations being, for various reasons, that the approximation of a pole of a powerful magnet would diminish the current of electricity, the following experiment was made. The poles of a battery of from 2 to 30 4-inch plates were connected by a metallic wire formed in one part into a helix with numerous convolutions, whilst into the circuit, at another part, was introduced a delicate galvanometer. The magnet was then put, in various positions, and to different extents, into the helix, and the needle of the galvanometer noticed; no effect, however, upon it could be observed. The circuit was made very long, short, of wires of different metals and different diameters down to extreme fineness, but the results were always the same. Magnet more and less powerful were used, some so strong as to bend the wire in its endeavours to pass round it. Hence it appears, that however powerful the action of an electric current may be upon a magnet, the latter has no tendency, by reaction, to diminish or increase the intensity of the former --a fact which, though of a negative kind, appears to me to be of some importance.-- M. F.³

En el planteamiento de los experimentos juega un papel importante las rotaciones electromagnéticas que había descubierto cuatro años antes. Si la corriente actúa sobre el imán tendiendo a hacer girar los polos a su alrededor, Faraday esperaba que el imán reaccionara sobre la

Expected that an electro magnetic current passing through a wire would be affected by the approach of a strong magnetic pole to the wire so as to indicate some effect of reaction in other parts of the wire --but could not perceive any effects of this kind.

³ Esta nota se reproduce en *ERE*, II, pp. 162-163. Fue publicada originalmente en *the Quarterly Journal of Science, Literature, and the Arts*, 19 (1825), 338.

corriente alterando sus características. Esta reacción del imán completaría el proceso del que Oersted ya había descubierto una parte. Oersted había descubierto la acción de la corriente sobre el imán, lo que trata Faraday es de detectar una reacción del imán sobre la corriente.⁴

El experimento es infructuoso, como los que realiza casi un año después; en este caso con el objetivo de producir una corriente inducida a partir de otra corriente. Con fecha 25 de noviembre de 1825 se registran en el *Diary* tres experimentos con este objetivo. En el primero se intenta inducir una corriente en un alambre de cobre mediante otro alambre paralelo que está conectado a los polos de una batería. En el segundo, el alambre en el que se intenta inducir una corriente se sitúa según el eje de una bobina conectada a los polos de la batería. En el tercer experimento se intenta inducir la corriente en una bobina situada encima del alambre conectado a los polos de la batería. Faraday anota: "Could not in any way render any induction evident from the connecting wire".⁵

El último experimento infructuoso de inducción registrado en el *Diary* lleva fecha 22 de abril de 1828. En este caso se trata también de inducir una corriente por medio de la acción de un imán. En el

⁴ Ver, por ejemplo, *ERE*, Serie XV, §§1789 y 1790. En este último Faraday señala que

Oersted showed how we were to convert electric into magnetic force, and I had the delight of adding the other member of the full relation, by reacting back again and converting magnetic into electric forces.

Gooding ha sido el primero en llamar la influencia del principio de acción y reacción en la idea de fuerza mantenida por Faraday. Su análisis está en GOODING-1980a, pp. 9-10.

⁵ *Diary*, I, p. 279, 28 de noviembre de 1825.

experimento se introduce un imán en un anillo de cobre suspendido como una balanza de torsión. La corriente inducida se detectaría mediante su acción sobre otros imanes, pero por muchos cambios que introduce en el dispositivo Faraday no obtiene ningún efecto.⁶

Un elemento común a todos los experimentos que hemos visto hasta ahora es que en ellos siempre se emplean dispositivos estacionarios. Esto se entiende si se tiene en cuenta, en primer lugar, que lo que Faraday está buscando, en definitiva, es una reacción que se opone a una acción permanente y que precisamente por ello debe serlo también. Desde este punto de vista se comprende que la posibilidad de que la corriente inducida fuera transitoria no formaba parte de sus expectativas. Así lo reconoce él mismo en una larga nota fechada abril de 1832 que añade al final de la Serie I. Allí, después de reproducir las anotaciones del *Diary* relacionadas con los tres experimentos del 25 de noviembre de 1825, observa que la causa del fracaso de estos experimentos es ahora evidente: la transitoriedad de los fenómenos de inducción.⁷

Hay otra razón que explica, al menos en lo que se refiere a los intentos de producir la inducción de una corriente por medio de otra, la utilización de dispositivos estacionarios. Es lo que podría considerarse como un paralelismo entre la electricidad estática y la corriente eléctrica. Para Faraday no puede establecerse una diferencia cualitativa, en lo que se refiere a la propiedad de inducir, entre dos tipos de electricidad, la electricidad estática y la corriente eléctrica. Ciertamente, la electricidad estática y la corriente eléctrica tienen características fenomenológicas

⁶ *Diary*, I, p. 310, 22 de abril de 1828. Probablemente este experimento está inspirado en el experimento que hizo Ampère con un anillo de cobre. Véase Capítulo 1, sección 1. 4. 2.

⁷ *ERE*, I, pp. 40-41, p. 41. Ver también §79 de la Serie I.

distintas que pueden expresarse mediante las ideas de 'cantidad' e 'intensidad'⁸: la primera se distingue por su elevada 'intensidad' y la segunda por su elevada 'cantidad'. Pero las dos electricidades son dos estados de una misma fuerza, no dos fuerzas distintas. Lo que es inadmisibile es que una de ellas pueda producir el fenómeno de inducción y la otra no; la inducción es una propiedad de la fuerza eléctrica como tal, no de un estado de dicha fuerza. Por consiguiente, la inducción de corrientes se encuentra en el mismo nivel que la inducción electrostática: debe ser un fenómeno permanente. Desde este punto de vista una corriente permanente debe inducir otra corriente, y esta última no puede ser transitoria, del mismo modo que la carga inducida permanece mientras que permanezca la carga inductora.

2. 1. 2. El descubrimiento de la inducción electromagnética

Una anotación del *Diary* correspondiente al 29 de agosto de 1831 registra los primeros experimentos de inducción con éxito.⁹ La figura 3

⁸ Faraday no proporciona una definición clara de sus nociones de "intensity" y "quantity". Lo más parecido a una definición, en lo que respecta a la primera, lo encontramos en un artículo de 1854. Allí define "intensity" como "the power of overcoming resistance" (*ERE*, III, p. 519) y señala que esta idea es tan necesaria a la electricidad, sea estática o en forma de corriente, como la de presión al vapor en una caldera. Es similar a nuestro concepto de tensión o diferencia de potencial. Por su parte, "quantity" alude a una idea similar a nuestro concepto de intensidad de corriente. En adelante, para evitar confusiones con las ideas modernas entrecomillaré siempre los términos que aluden a las dos nociones que utiliza Faraday.

⁹ Para la reconstrucción de la génesis del experimento véase WILLIAMS-1965, pp. 169-183. Una visión alternativa se encontrará en ROSS-1965. En la p. 218, nota 30, Ross critica la reconstrucción de Williams por dotar de excesiva coherencia lógica al proceso seguido por Faraday.

reproduce el diagrama del dispositivo experimental incluido

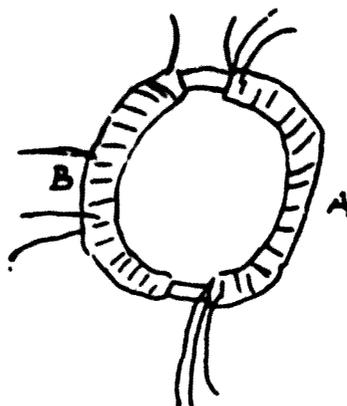


figura 3 (*Diary*, I, p. 367)

por Faraday en el *Diary*. Se trata de un anillo de hierro dulce con alambres de cobre arrollados en lados opuestos. La bobina del lado A (primario) se conecta a una batería y la del lado B (secundario) a un dispositivo similar al utilizado por Oersted, o sea un alambre situado encima de una aguja magnética. Después de describir cuidadosamente el dispositivo, Faraday escribe

Then connected the ends of one of the pieces on A side with battery; immediately a sensible effect on needle. It oscillated and settled at last in original position. On breaking connection of A side with Battery again a disturbance of the needle.¹⁰

Para examinar con más cuidado las características de los movimientos de la aguja, sustituyó el alambre del galvanometro por una espiral situada en el plano del meridiano magnético y al oeste del polo sur de la aguja magnética (véase la figura 4). Entonces,

When all was ready, the moment the battery was communicated with both

¹⁰ *Diary*, I, §3, p. 367, 29 de agosto de 1831, subrayado de Faraday.

ends of wire at A side, the helix strongly attracted the needle; after a few vibrations it came to a state of rest in its original and natural position; and then on breaking the battery connection the needle was as strongly repelled, and after a few oscillations came to rest in the same place as before.¹¹

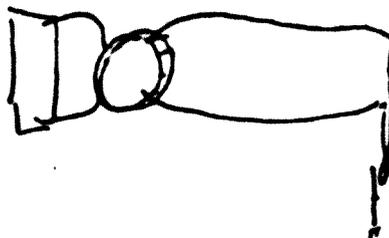


figura 4 (*Diary*, I, p. 367)

Con este experimento Farady acaba de determinar una característica crucial del fenómeno. Si la espiral atrae al polo sur de la aguja cuando se cierra el circuito en el lado A, y lo repele cuando se abre el circuito, se demuestra que las corrientes inducidas son de sentidos opuestos.

A renglón seguido Faraday observa

Hence effect evident but transient; but its recurrence on breaking the connection shews an equilibrium somewhere that must be capable of being rendered more distinct.¹²

En este importante texto se transparenta la sorpresa de Faraday ante dos aspectos concretos del nuevo fenómeno. En primer lugar, su sorpresa porque la primera corriente inducida sea transitoria. Como ya hemos visto antes, él esperaba un efecto permanente. Pero este no es su único motivo de perplejidad; le sorprende además que el fenómeno de

¹¹ *Ibidem*, §7, subrayados de Faraday.

¹² *Ibidem*, §8, p. 368.

inducción sea recurrente, esto es, que también se produzca una corriente en sentido opuesto cuando se interrumpe la corriente en el primario. Este segundo punto viene corroborado por el énfasis con que Faraday anota en los dos textos anteriores a éste que la aguja fue perturbada al abrirse el circuito en el lado A.

El texto no se limita a registrar sorpresa; si bien de forma muy esquemática, trasciende el plano meramente fenomenológico para señalar que la interrupción de la primera corriente inducida y la aparición de la segunda corriente en sentido opuesto es un indicio de la ruptura de un equilibrio. El esquematismo de la anotación apenas si nos permite ir más allá; sin embargo, si aceptamos que ese equilibrio que el texto se limita a situar "somewhere" tiene lugar dentro del alambre sometido a inducción, podemos aventurar la idea de que el equilibrio se establece entre la corriente inducida en el circuito secundario y algo que se le opone hasta detenerla y que tiene su sede en dicho circuito. Ese equilibrio permanece mientras fluye la corriente en el circuito primario. Interrumpida la corriente, el equilibrio se destruye y el resultado es una segunda corriente inducida de sentido opuesto. En la primera serie de las *Experimental Researches in Electricity*, este "algo" estará íntimamente relacionado con la noción de estado electro-tónico.¹³

Ahora bien, ¿cuál es el sentido de las corrientes inducidas con respecto a la inductora? Al respecto Faraday escribe tranquilamente, refiriéndose al dispositivo de la figura 4 :

The direction of the pole towards the helix was, when the contact was first made, as if the helix round B was a part of that at A, i. e. the electric currents in both were in the same direction; but when the contact with the battery was broken the

¹³ ERE, Serie I, §60 y ss. Más adelante nos ocuparemos extensamente de estos párrafos.

*motion of the needle was as if a current in the opposite direction existed for a moment.*¹⁴

Se advertirá el notable error que comete aquí Faraday: el sentido de la corriente inducida al establecer el contacto en el circuito primario no es el mismo que el de la corriente inductora, es opuesto.

Sorprendentemente, el error de Faraday ha sido pasado por alto por todos los estudiosos de su obra. Es sorprendente porque, incluso dejando a un lado este texto del *Diary*, había otros indicios de que el error se mantuvo durante algún tiempo, concretamente hasta primeros de diciembre de 1831. En primer lugar, como veremos, hay otra anotación posterior del *Diary* en que se repite el error. Además, en una carta a Phillips de 29 de noviembre de 1831, documento que tendremos ocasión de analizar en detalle más abajo, Faraday repetía en dos ocasiones el error en el sentido de las corrientes inducidas. Sólo en este último lugar un estudioso notó el error de Faraday. Cuando Silvanus Thompson cita la carta a Phillips en su biografía de Faraday, advierte, en una nota introducida en el primer lugar en que Faraday define erróneamente los sentidos de las corrientes inducidas, que "this is a slip in the description".¹⁵ Que era algo más que un simple error cometido al escribir la carta lo demuestra la anotación del *Diary* en la que el error aparece por primera vez, y su persistencia ulterior.

¿Qué ha provocado el error de Faraday? Es difícil dar una respuesta completa a esta pregunta, pero sí puede señalarse un elemento que debió jugar un papel fundamental: la autoridad de Ampère. Hemos visto en el capítulo anterior que durante un tiempo, Faraday pensó que la

¹⁴ *Diary*, I, §0, p. 366, 29 de agosto de 1831.

¹⁵ THOMPSON-1896, p. 115, n.

afirmación en el manual de Demonferrand acerca del sentido de la primera corriente inducida estaba avalada por la autoridad de Ampère, quien además, siempre según Demonferrand, parecía ser el primero en haber detectado una corriente inducida. Por consiguiente, parece razonable pensar que Faraday en este día, 29 de agosto de 1831, se ha concentrado en las características sorprendentes del fenómeno, transitoriedad y recurrencia, y aunque se ha preocupado de establecer la relación del sentido entre las corrientes inducidas, en la cuestión del sentido de dichas corrientes en relación a la corriente inductora simplemente ha aceptado lo que él creía ser la opinión de Ampère.

Al día siguiente, 30 de agosto de 1831, Faraday vuelve al trabajo. Sigue intrigado por la característica de transitoriedad del fenómeno que ha descubierto y para examinarla más a fondo utiliza de nuevo el dispositivo del día anterior (véase la figura 4). Pero ahora, manteniendo conectado el circuito primario, conecta y desconecta alternativamente el circuito secundario. Entonces

No effect at such times on the needle --depends upon the change at battery side. Hence is no permanent or peculiar state of wire from B but effect due to a wave of electricity caused at moments of breaking and completing contacts at A side.¹⁶

Los hechos parecen testarudos. Mientras la corriente del primario es constante, el alambre del circuito secundario permanece inerte. Este alambre del lado B no se encuentra en un "permanent or peculiar state". Hay que notar que esta es la primera vez que Faraday utiliza una terminología, "peculiar state", que posteriormente, en la Serie I, aplicará al estado electro-tónico. El hecho de que aquí aparezca en sentido negativo ha movido a Heilbronn a considerar que "the electrotonic state

¹⁶ *Diary*, I, §14, p. 369, 30 de agosto de 1831.

was therefore a second thought".¹⁷ Sin embargo esta afirmación debe matizarse. Es cierto que sería aventurado pensar que en este momento Faraday ya ha elaborado la noción de estado electro-tónico al nivel que aparece en la Serie I. Sin embargo, el hecho de que Faraday niegue aquí la existencia de un "peculiar state" muestra que tenía la idea ya presente de alguna manera. Esto se ve con más claridad si, en vez de leer esta anotación por separado, se la relaciona con la del día anterior que habla de un "equilibrium somewhere". Ese equilibrio sólo puede entenderse entre la corriente inducida y algo que se le opone resistiendo a su formación.

La última anotación del día describe un experimento que parece reforzar la idea de que la sombra de Ampère ha influido sobre estos dos días de trabajo, puesto que el fenómeno descubierto parece ser producido únicamente por la corriente eléctrica. Faraday construye una bobina arrollando un alambre alrededor de un cilindro de hierro dulce. Conecta la bobina con el dispositivo de la espiral y la aguja magnética que ha utilizado anteriormente y hace contacto en los extremos del cilindro con potentes imanes:

*Brought the poles of strong magnets in contact with ends of the iron cylinder, but found no difference upon the needle at the flat spiral --all the effects seem due to the Electrical current only.*¹⁸

Así pues, en estos dos días de trabajo, ha descubierto por fin un fenómeno que había buscado largo tiempo, la inducción de corrientes. A juzgar por esta última anotación, el fenómeno parece producido

¹⁷ HEILBRON-1981, p. 213, n. 109.

¹⁸ *Diary*, I, §19, p. 369, 30 de agosto de 1831.

únicamente por corrientes eléctricas. Tiene además dos características sorprendentes: el fenómeno es transitorio y recurrente en sentido opuesto. Ambas son anomalías para Faraday, y para responder a ellas parece alumbrar una vaga idea de que algo en el alambre inducido resiste a la primera corriente inducida hasta llegar a un equilibrio que al deshacerse se resuelve en la segunda corriente inducida en sentido opuesto.

El siguiente día de investigación es el 24 de setiembre de 1831.¹⁹ Este día es crucial, porque las anotaciones del *Diary* muestran que, a pesar de su resultado negativo del 30 de agosto, Faraday no se había dado por vencido en el intento de producir la inducción a partir de imanes. Es en este día cuando Faraday consigue realizar su ambición de "convert magnetism into electricity", como había escrito en su cuaderno de notas ocho años antes. Que ahora sí estaba pisando terreno completamente nuevo podemos verlo por un pasaje de una carta que escribió a su amigo Phillips el 23 de setiembre de 1831. Farady le informa que

I am busy just now again on electro-magnetism, and think I have got hold of a good thing, but can't say. It may be a weed instead of a fish that, after all my labour, I may at last pull up.²⁰

Sacó el pez el 24 de setiembre de 1831. El dispositivo utilizado es parecido al que produjo un resultado negativo en el último experimento registrado el 30 de agosto (véase la figura 5). Dos imanes de barra se

¹⁹ Entre el 30 de agosto y el 24 de setiembre sólo parece haberse trabajado en el tema el 12 de setiembre, pero el día parece haberse dedicado exclusivamente a la construcción de una serie de bobinas y espirales.

²⁰ Citado en BENCE JONES-1870, vol. II, p. 3.

tocan en uno de sus extremos y una bobina con núcleo de hierro se sitúa entre los polos de los extremos opuestos de los imanes. La bobina



figura 5 (*Diary*, I, p. 372)

está conectada a otra bobina indicadora. Entonces,

Every time the magnetic contact at N or S was made or broken there was magnetic motion at the indicating helix, the effect being as in former cases not permanent, but a momentary push or pull (...) Hence here distinct conversion of Magnetism into Electricity.²¹

La reciprocidad entre electricidad y magnetismo parece establecida. Además, el fenómeno tiene las mismas características que el descubierto el 29 de agosto: al establecer e interrumpir el contacto se inducen dos corrientes transitorias de sentidos opuestos. En este experimento la inducción de corrientes se produce mediante la imantación y desimantación del núcleo de hierro, pero posteriormente se conseguirá utilizando un imán permanente.

²¹ *Diary*, I, §33, p. 372, 24 de setiembre de 1831.

Antes de esto, el 1 de octubre de 1831, Faraday intenta inducir corrientes por medio de otra corriente, sin la intervención de un núcleo de hierro como había hecho el 29 de agosto. Para ello se enrollan alrededor de un bloque de madera dos alambres de forma alternada constituyendo dos bobinas. Una de ellas se conecta a una espiral que puede actuar sobre una aguja magnética y la otra a una batería. Al cerrar el circuito del primario se obtiene un efecto sobre la aguja, pero apenas perceptible. Lo mismo ocurre cuando se reemplaza la espiral por un galvanómetro: se obtienen efectos al abrir o cerrar el circuito de la batería pero apenas visibles. Faraday concluye

Hence there is an inducing effect without the presence of iron, but it is either very weak or else so sudden as not to have time to move the needle. I rather suspect it is the latter.²²

La alternativa se aclara el 18 de octubre. En este caso el dispositivo es similar, salvo que los alambres se enrollan uno encima del otro en el núcleo de madera formando dos bobinas coaxiales, y el galvanómetro se sustituye por una bobina hueca con algunas agujas no magnéticas en su interior. Entonces

found they were made magnets instantly by contact of the other wires and magnets of the contrary kind when contacts broken. Hence mere wires do induce upon each other, but action very sudden and quick.²³

Con este experimento, el paralelismo entre la inducción de la electricidad estática y inducción de la corriente eléctrica queda establecido. La diferencia, no obstante, es que la inducción de corrientes no es un

²² *Ibidem*, §39, p.373, 1 de octubre de 1831.

²³ *Ibidem*, §64, p. 377, 18 de octubre de 1831.

fenómeno permanente.

El día anterior, o sea el 17 de octubre de 1831, Faraday había conseguido producir la inducción con un imán permanente. En una bobina hueca conectada a un galvanómetro se introduce el extremo de un imán cilíndrico,

*then it was quickly thrust in the whole length and the galvanometer needle moved --then pulled out and again the needle moved but in the opposite direction. This effect was repeated every time the magnet was put in or out and therefore a wave of Electricity was so produced from mere approximation of a magnet and not from its formation in situ.*²⁴

El experimento muestra de nuevo las características ya familiares, aunque no por ello menos sorprendentes: es transitorio y recurrente. Sin embargo introduce un factor nuevo: las corrientes se producen por la aproximación del imán a la bobina. Se plantea aquí una cuestión que causará problemas de conceptualización: determinar el papel que juega el movimiento en el fenómeno de inducción.

El 27 de octubre de 1831 Faraday intenta obtener corrientes inducidas mediante la descarga de la electricidad ordinaria. Este experimento es importante porque muestra lo arraigado que estaba en la mente de Faraday el error en el sentido de las corrientes inducidas con respecto a la inductora cometido el primer día de investigación, el 29 de agosto de 1831. En el experimento el circuito primario está formado por una botella de Leyden conectada a una bobina hueca (véase la figura 6). El circuito secundario está formado por otra bobina arrollada sobre la primera y una pequeña bobina indicadora hueca en cuyo interior se sitúa

²⁴ *Ibidem*, §57, pp. 375-376, 17 de octubre de 1831, subrayados de Faraday.

una aguja no magnética. Al descargarse la botella, la aguja se magnetiza

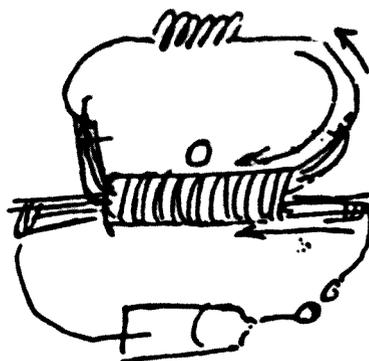


figura 6 (*Diary*, I, p. 379)

con el polo norte a la izquierda. Faraday concluye:

Hence it was proved that the magnetization in trial helix was not effect of induction, for induction would have caused a current in the direction of the inner arrow, whereas the effect was of a current in direction of outer arrow. In fact a little of the positive electricity had passed through the further as well as near helix and produced similar effects in both.²⁵

A pesar de que el experimento muestra que la corriente inducida al descargarse la botella va en sentido opuesto ("outer arrow"), él está tan firmemente convencido de que la corriente inducida va en el mismo sentido ("inner arrow"), lo cual descarta que el efecto se deba a inducción, que inventa una explicación alternativa: la magnetización de la aguja se debe a la difusión de parte de la corriente de la botella a través del circuito de la bobina indicadora.

Si hasta ahora Faraday sólo ha producido corrientes inducidas transitorias, en los días siguientes, aprovechandose del nuevo factor que uno de sus experimentos ha introducido, el movimiento de un conductor,

²⁵ *Ibidem*, §82, pp. 379-380, 27 de octubre de 1831.

consigue obtener una corriente inducida permanente. Esta larga serie de experimentos comienza el 28 de octubre de 1831. El dispositivo empleado es un disco de cobre que rota entre los polos de un potente

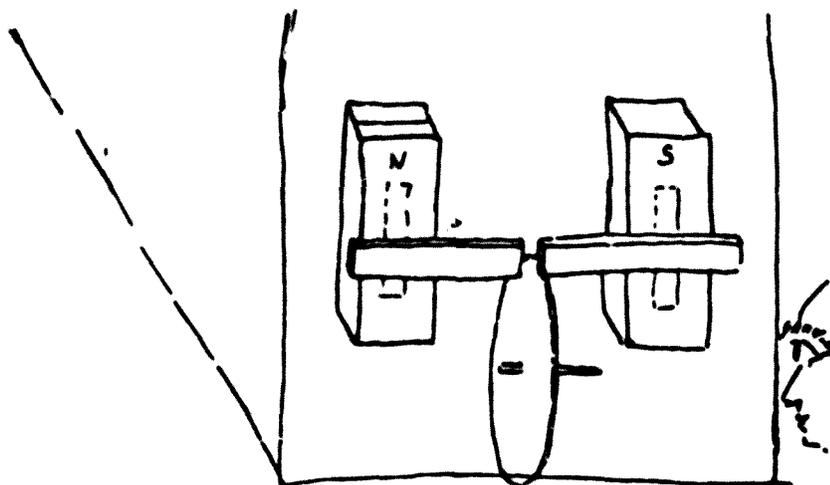


figura 7 (*Diary*, I, p. 381)

imán (véase la figura 7). Mediante dos colectores conectados en un punto de la periferia del disco y en el eje se obtiene una corriente permanente.²⁶ La corriente se produce en la dirección de los radios del disco cuando atraviesan el eje magnético norte-sur, dependiendo su sentido del de rotación del disco.

El 4 de noviembre Faraday estudia exhaustivamente el sentido de las corrientes inducidas que se producen en láminas de metal que se



figura 8 (*Diary*, I, §137 p. 386)

²⁶ *Ibidem*, §117-125, pp. 384-385, 28 de octubre de 1831.

mueven transversalmente al eje magnético. La figura 8 muestra un dispositivo típico. El pequeño rectángulo representa los dos polos situados simétricamente encima y debajo de la lámina. La flecha indica la dirección del movimiento de la lámina. Los pequeños rectángulos a los lados de la lámina son colectores de plomo conectados a los alambres A y B del galvanómetro representado en la parte izquierda de la figura.²⁷

En los once días de trabajo registrados en el *Diary* que van desde el 29 de agosto hasta el 4 de noviembre de 1831, Faraday ha obtenido corrientes de electricidad inducidas a partir de otras corrientes y a partir de imanes, realizando plenamente el objetivo de obtener electricidad a partir del magnetismo. Pero el éxito experimental no ha venido acompañado de la confirmación de las expectativas teóricas: la corrientes inducidas son transitorias; sólo con el disco rotatorio se obtiene una corriente permanente.

2. 1. 3. Faraday comunica sus resultados

Desde el 4 de noviembre al 5 de diciembre de 1831 no se registra ninguna anotación en el *Diary*. Conocemos las actividades de Faraday en este intervalo por un importante documento: una carta privada escrita a Richard Phillips desde Brighton el 29 de noviembre de 1831. Faraday escribe:

We are here to refresh. I have been working and writing a paper that always knocks me up in health, but now I feel well again, and able to pursue my subject; and now I will tell you what it is about. The title will be, I think, "Experimental Researches in Electricity": I. On the Induction of Electric Currents; II. On the

²⁷ *Ibidem*, §§137-155, pp. 386-388, 4 de noviembre de 1831.

Evolution of Electricity from Magnetism; III. On a new Electrical Condition of Matter; IV. On Arago's Magnetic Phenomena. There is a bill of fare for you; and, what is more, I hope it will not disappoint you. Now the fifth of all this I must give you very briefly; the demonstrations you shall have in the paper when printed. ²⁸

El "paper" que ha escrito es una primera versión de la memoria que se publicará con el mismo título mucho más tarde, en abril de 1832, en las *Philosophical Transactions*, y que posteriormente será la Serie I de las *Experimental Researches in Electricity*. Como argumentaré en una próxima sección, en contra de lo que todos los estudiosos repiten aceptando afirmaciones de Faraday al respecto, esta primera versión no se leyó el 24 de noviembre, sino en las sesiones del 8 y 15 de diciembre de 1831. La fecha 24 de noviembre de 1831 corresponde simplemente al día en que se recibió la memoria en la Royal Society.

Podemos obtener información sobre la memoria que ha entregado en la Royal Society de dos fuentes: la carta a Phillips de 29 de noviembre de 1831 y el informe que aparece publicado en los *Proceedings of the Royal Society* en el acta correspondiente al 15 de diciembre de 1831. Este último, sin embargo, es mucho más parco en detalles sobre sus ideas teóricas. Por consiguiente vamos a concentrarnos fundamentalmente en el análisis de la carta a Phillips, que nos proporciona una información preciosa sobre su concepción del estado electro-tónico.

Siguiendo el orden de las secciones que ha anunciado, prosigue escribiendo en su carta :

I. When an electric current is passed through one of two parallel wires, it

²⁸ M. Faraday a R. Phillips (29 de noviembre de 1831), FARADAY-Corres, I, carta nº 122, pp. 209-211, pp. 209-210.

causes at first a current in the same direction through the other, but this induced current does not last a moment, notwithstanding the inducing current (from the voltaic battery) is continued; all seems unchanged, except that the principal current continues its course. But when the current is stopped, then a return current occurs in the wire under induction, of about the same intensity and momentary duration, but in the opposite direction to that first formed. Electricity in currents therefore exerts an inductive action like ordinary electricity, but subject to peculiar laws. The effects are a current in the same direction when the induction is established; a reverse current when the induction ceases, and a peculiar state in the interim. Common electricity probably does the same thing; but as it is at present impossible to separate the beginning and the end of a spark or discharge from each other, all the effects are simultaneous and neutralise each other.²⁹

Lo primero que llama la atención en el texto es la persistencia del error de Faraday en lo que respecta al sentido de las corrientes inducidas en relación a la inductora. Por lo demás, se ofrece la primera descripción del proceso de inducción por medio de una corriente. La acción inductiva de la corriente eléctrica tiene tres efectos: (i) una corriente transitoria cuando se establece la corriente inductora; (ii) otra corriente transitoria opuesta cuando se interrumpe la corriente inductora; (iii) un estado peculiar en el ínterin. Se introduce aquí la terminología que habíamos visto en el *Diary*: el "peculiar state" será bautizado en el párrafo tercero de la carta. Desde su punto de vista, el estado peculiar forma parte del fenómeno de inducción en pie de igualdad con las dos corrientes inducidas. Esta descripción de la acción inductiva es necesaria para Faraday porque le permite resolver la anomalía que expresan claramente sus palabras cuando señala que la primera corriente inducida es transitoria "notwithstanding the inducing current (from the voltaic battery) is continued; all seems unchanged, except that the principal current

²⁹ *Ibidem*, p. 210, subrayado de Faraday.

continues its course". Dado que se está partiendo de que una corriente voltaica continua debe tener un efecto inductivo que dura mientras continúe fluyendo, el hecho de que el efecto inductivo sea transitorio es mera apariencia, la corriente inductora sí produce un efecto en su continuación, el estado peculiar.

La carta prosigue refiriéndose a la producción de corrientes por medio de imanes como otro caso de inducción e introduciendo los términos que ha inventado para designar los dos casos de inducción :

Then I found that magnets would induce just like voltaic currents, and by bringing helices and wires and jackets up to the poles of magnets, electrical currents were produced in them; these currents being able to deflect the galvanometer, or to make, by means of the helix, magnetic needles, or in one case even to give a spark. Hence the evolution of *electricity from magnetism*. The currents were not permanent. They ceased the moment the wires ceased to approach the magnet, because the new and apparently quiescent state was assumed, just as in the case of the induction of currents. But when the magnet was removed, and its induction therefore ceased, the return currents appeared as before. These two kinds of induction I have distinguished by the terms *volta-electric* and *magneto-electric* induction. Their identity of action and results is, I think, a very powerful proof of M. Ampère's theory of magnetism.³⁰

La producción de electricidad a partir de imanes (inducción magneto-eléctrica) también puede considerarse como un fenómeno de inducción. Como ocurría en el caso de la inducción producida por una corriente (inducción volta-eléctrica), el resultado son dos corrientes no permanentes en sentidos opuestos separadas por un estado peculiar, que aparentemente no tiene efectos observables ("apparently quiescent"), en el conductor sometido a inducción.

³⁰ *Ibidem*, p. 210, subrayados de Faraday.

Tanto en este pasaje como en el anterior parece desprenderse que el conductor adopta el estado peculiar simultáneamente a la inducción. El estado se opone a la formación de la corriente inducida que dura hasta que se alcanza el equilibrio. Cuando desaparece la fuerza inductiva, bien porque se interrumpa la corriente en el circuito inductor en el caso de la inducción volta-eléctrica, o bien porque se retire el imán en el caso de la inducción magneto-eléctrica, el equilibrio se deshace y el resultado es una corriente de retorno en sentido opuesto.

En esta descripción del fenómeno de inducción se distingue el papel de la idea errónea del sentido de las corrientes inducidas, particularmente en el caso de la inducción volta-eléctrica. Cuando se establece la corriente en el circuito inductor Faraday cree que debería inducirse una corriente permanente del mismo sentido en el circuito inducido. Si esto no ocurre es porque el circuito inducido ha adoptado un estado peculiar que se opone a la formación de la corriente.

La carta continúa explicando por qué no se habían detectado hasta entonces corrientes inducidas por los imanes. Es su carácter transitorio, debido a la adopción del estado peculiar, lo que ha impedido su detección. El párrafo termina introduciendo con grandes honores el término inventado para designar el estado peculiar:

The condition of matter I have dignified by the term *Electrotonic*, THE ELECTROTONIC STATE. What do you think of that? Am I not a bold man, ignorant as I am, to coin words? but I have consulted the scholars.³¹

En su biografía de Faraday, Silvanus Thompson afirmaba que uno de estos "scholars" debía ser sin duda Whewell, y respaldaba su afirmación

³¹ *Ibidem*, pp. 210-211, subrayado y mayúsculas de Faraday.

señalando que Faraday tenía la costumbre de recurrir al consejo de Whewell en cuestiones de terminología.³² Ahora bien, si se examina la correspondencia entre Faraday y Whewell que se conserva, no puede dejar de notarse el primer párrafo de la carta de Faraday a Whewell de 24 de abril de 1834. Faraday escribe:

I am in trouble which when it occurs at Cambridge is I understand referred by every body in the University to you for removal and I am encouraged by the remembrance of your kindness and on Mr. Willis' suggestion to apply to you also.³³

Y prosigue explicando que necesita algunos términos nuevos para su trabajo en electroquímica. La impresión que se deduce de este párrafo es que, si bien ya anteriormente había habido correspondencia entre ambos hombres³⁴, es ésta la primera vez que Faraday solicita la ayuda de Whewell en cuestiones de terminología. No parece que el texto citado se ajuste al que escribiría alguien ya en el hábito de recurrir a Whewell para la solución de problemas terminológicos.

Parece más verosímil pensar que uno de los "scholars" a que se refiere Faraday en la carta a Phillips es Whitlock Nicholl, su médico personal. Que Faraday consultaba a Nicholl en cuestiones de terminología queda claro en la misma carta de la que hemos visto el primer párrafo. A renglón seguido Faraday explicaba a Whewell que "I wanted some new names to express my facts in Electrical Science (...), &

³² THOMPSON-1898, p. 116, n.

³³ M. Faraday a W. Whewell (24 de abril de 1834), FARADAY-Corres, I, carta nº 160, pp. 264-265, p. 264.

³⁴ Véase, por ejemplo, la carta de Faraday a Whewell de 21 de febrero de 1831 en FARADAY-Corres, I, carta nº 107, pp. 190-191.

applied to a friend Dr Nicholl who has given me some that I intend to adopt."³⁵ La consideración de Faraday hacia Nicholl se revela en el hecho de que cuando Nicholl fue elegido Fellow de la Royal Society, el nombre de Faraday figuraba en segundo lugar en la lista de proponentes. Además, a raíz de la muerte de Nicholl, Faraday afirmaba en una carta que:

So correctly did he catch my thoughts and views that I have often gone to him, as the combined philosopher and scholar, for new words; and several that are now current in electrical science we owe to him.³⁶

Desgraciadamente para el historiador, la comunicación entre Faraday y Nicholl era fundamentalmente oral, y por consiguiente no tenemos pistas acerca de la deliberación que produjo el término 'electro-tónico'.

La cuestión tiene considerable interés pues sabemos la importancia que Faraday concedía a la elección correcta de términos científicos. Así, en la carta a Whewell que hemos visto antes, Faraday manifestaba sus dudas respecto de la expresión 'corriente eléctrica' y añadía "I want therefore names (...) without involving any theory of the nature of electricity"³⁷. En esta frase se condensa el desideratum de Faraday con respecto a los términos científicos: deben ser teóricamente neutrales; su finalidad es representar los hechos tan exactamente como sea posible

³⁵ M. Faraday a W. Whewell (24 de abril de 1834), FARADAY-Corres, I, carta nº 160, pp. 264-265, p. 264.

³⁶ La carta lleva la fecha 23 de enero de 1839. Fue publicada por Ross en su ROSS-1961, p. 190. He recogido la sugerencia que Ross hacía en dicho trabajo identificando a Nichol como uno de los "scholars" que aconsejó a Faraday respecto al término 'electro-tónico' (p. 191).

³⁷ M. Faraday a W. Whewell (24 de abril de 1834), FARADAY-Corres, I, carta nº 160, pp. 264-265, p. 264.

sin comprometerse con ninguna teoría. Esto es precisamente lo que Faraday afirma haber conseguido con sus términos 'volta-electric' y 'magneto-electric' aplicados a las dos clases de inducción.³⁸

Dejando a un lado el carácter problemático del desiderátum de Faraday, cabe preguntarse en qué medida se consiguió en la elección del nuevo término. 'Tone', sustantivo al que corresponde el adjetivo 'tonic', hace referencia en el contexto de la fisiología --no olvidemos que Nicholl era médico-- a la tensión que los músculos poseen en su estado normal. Por tanto, 'electro-tonic' podría referirse a un estado de tensión producido en el conductor sometido a inducción. Lo que parece claro es que el nuevo término no representa neutralmente los hechos, pues lo que la carta a Phillips presenta como observables son, en el caso de la inducción volta-eléctrica, dos corrientes transitorias separadas por un intervalo de tiempo en que el conductor parece permanecer inerte. La noción de estado electro-tónico se podrá compartir únicamente desde expectativas teóricas similares a las de Faraday, esto es, expectativas que no consideran la corriente inducida como un fenómeno transitorio.

La carta a Phillips termina con un párrafo jubiloso dedicado al efecto Arago. La alegría de Faraday se explica si se tiene en cuenta la afirmación de Tyndall de que el efecto Arago era el fenómeno más oscuro de la época.³⁹ El fenómeno consistía en que una aguja magnética suspendida encima de un disco conductor situado en un plano horizontal acompañaba el movimiento del disco cuando éste se ponía en rotación. La explicación de Faraday se basa en las corrientes inducidas en el disco rotatorio:

³⁸ Carta a Whewell de 19 de septiembre de 1835, FARADAY-Corres, I, carta nº 180, pp. 294 -296, p. 295.

³⁹ TYNDALL-1868, p. 25.

The new state has enabled me to make out and explain all Arago's phenomena of the rotating magnet or copper plate, I believe, perfectly; but as great names are concerned (Arago, Babbage, Herschel, &c.), and as I have to differ from them, I have spoken with that modesty which you so well know you and I and John Frost have in common, and for which the world so justly commend us. I am even half afraid to tell you what it is. You will think I am hoaxing you, or else in your compassion you may conclude I am deceiving myself. However, you need do neither, but had better laugh, as I did most heartily when I found that it was neither attraction nor repulsion, but just one of my *old rotations* in a new form. I cannot explain to you all the actions, which are very curious; but in consequence of the electrotonic state being assumed and lost as the parts of the plate whirl under the pole, and in consequence of magneto-electric induction, currents of electricity are formed in the direction of the radii; continuing, for simple reasons, as long as the motion continues, but ceasing when that ceases. Hence the wonder is explained that the metal has powers on the magnet when moving, but not when at rest.⁴⁰

El intenso trabajo que se registra en el *Diary* en los días 28 de octubre y 4 de noviembre de 1831 ha dado su fruto en la explicación del fenómeno del disco de Arago. Debido a la rotación del disco en presencia del imán, se inducen corrientes en sus radios. Este descubrimiento ha sido crucial para Faraday, que diez años antes había investigado cuidadosamente el poder circunferencial alrededor de las corrientes eléctricas. Es este poder circunferencial el que arrastra al imán. En definitiva el fenómeno, una vez comprendido el papel de la inducción magneto-eléctrica, se reduce a sus "old rotations".

La segunda fuente de información respecto de la memoria que ha entregado en la Royal Society es el informe que, en el acta del 15 de

⁴⁰ M. Faraday a R. Phillips (29 de noviembre de 1831), FARADAY-Corres, I, p. 211, subrayado de Faraday.

diciembre de 1831, aparece publicado en las *Proceedings of The Royal Society*.⁴¹ Este informe está mucho más apegado a los resultados experimentales que la carta a Phillips, apenas si deja traslucir las concepciones teóricas que hemos visto en la carta. Sobre la noción de estado electro-tónico el informe dice simplemente que:

In the third part of the paper the author regards the condition in which a conducting wire exists while it is subject either to volta-electric, or magneto-electric induction, as a peculiar one, which he designates by the term *Electro-tonic state*. This peculiar condition shows no electrical effects while it continues, nor does it exert any sensible action on matter, or on other electrical currents, either of an attractive or repulsive kind; nor does it tend either to accelerate or to retard those currents.⁴²

Se subraya aquí lo que ya se había mencionado en la carta a Phillips, que el estado electro-tónico no tiene efectos detectables.

Un punto notable en este informe es que se mantiene el error en el sentido de las corrientes inducidas con respecto a la inductora. El informe presenta la inducción volta-eléctrica mediante el experimento de las dos bobinas concéntricas arrolladas alrededor de un bloque de madera, con una conectada a la batería y la otra a un galvanómetro. Al establecer e interrumpir la corriente en el primario se detectaba una corriente en el secundario. El informe afirma:

Hence it is inferred that the electric current sent by the battery through one wire, induced a similar current through the other wire, but only at the moment

⁴¹ No consta que el informe fuera escrito por el propio Faraday. Le consulté sobre esa posibilidad a la señora Sheila Edwards, bibliotecaria de la Royal Society, y ella me informó que "the report in *Proceedings* Vol. 3, pp.91-93 is a report, probably written by the Clerk or the Secretary, there is no definite record."

⁴² *Proceedings of The Royal Society*, 3 (1830-1837), pp. 91-93, p. 92.

the contact was made; and a current in the contrary direction when the passage of the electricity was suddenly interrupted.⁴³

La terminología empleada, "similar current", es inequívoca. El propio Faraday la utiliza para referirse a corrientes del mismo sentido.⁴⁴ Lo notable es que, como veremos más abajo, según el *Diary* el error sobre el sentido de las corrientes se ha corregido mediante una exhaustiva investigación los días 8 y 9 de diciembre de 1831, mientras que la lectura de su memoria se hace los días 8 y 15 de diciembre. Naturalmente, Faraday no va a leer algo que él sabe que no es correcto, así que debemos pensar que el informe se está basando en la memoria que entregó el 24 de noviembre.

Antes de examinar la investigación que permitió corregir el error en el sentido de las corrientes inducidas, debemos detenernos para abordar algunos puntos de cronología. Afirmé anteriormente que la memoria que Faraday menciona en su carta a Phillips no se leyó el 24 de noviembre de 1831, sino los días 8 y 15 de diciembre. Es el momento de justificar mi afirmación, y de proponer una explicación de por qué Faraday ha insistido en una fecha inexacta.

2. 2. Cuestiones de cronología

Para poder seguir las vicisitudes de la noción de estado electro-

⁴³ *Ibidem*, pp. 91-92.

⁴⁴ Así, por ejemplo, en el artículo en que daba cuenta de su descubrimiento de las rotaciones electromagnéticas, como hemos visto, escribía: "M. Ampère has shown that two similar connecting wires, by which is meant, having currents in the same direction through them, attract each other." (*ERE*, II, p. 131). Véase asimismo *ERE*, Serie XIII, §1659.

tónico, y del desarrollo de la investigación de la inducción electromagnética, es necesario aclarar algunos puntos de cronología. Hata ahora hemos visto que, según el *Diary*, la investigación comenzó el 29 de agosto de 1831. A partir de esta fecha hay un periodo de trabajo que concluye, siempre según el *Diary*, el 4 de noviembre de 1831. La investigación se volverá a reanudar el 5 de diciembre de 1831. El 29 de noviembre Faraday escribe a Phillips desde Brighton comunicándole su descubrimiento y afirmando que ha estado escribiendo una memoria, de la cual le da un resumen.

Esa memoria es conocida por la versión que meses después, concretamente en abril de 1832, se publicará en las *Philosophical Transactions* con el título de "Experimental Researches in Electricity".⁴⁵ Posteriormente, en 1839, este título pasa a ser el del volumen donde recoge sus primeras catorce memorias, que entonces se distinguen como Series. Así, la primera memoria publicada en las *Philosophical Transactions* se convierte en la Serie I de las *Experimental Researches in Electricity*. Podemos establecer la fecha de abril de 1832 para la publicación de esta memoria por medio del propio Faraday. En primer lugar, el 5 de abril de 1832, Faraday escribe a Ampère anunciándole que

On writing to you at present it is merely to announce that I shall be able to send you a copy of my recent papers on Electricity &c &c in the course of a week provided I find means of conveyance (...) The time between reading & the printing has been however sadly prolonged in consequence of new regulations at our *Royal Society* and has far exceeded what I thought would be required.⁴⁶

⁴⁵ Faraday, M., "Experimental Researches in Electricity", *Philosophical Transactions*, 122 (1832), 125-162.

⁴⁶ Faraday a Ampère, 5 de abril de 1832, FARADAY-Corres, I, carta nº 133, p. 220.

Faraday habla de "papers" porque el mismo volumen de las *Philosophical Transactions* contiene también la Serie II. Las nuevas disposiciones a que alude la carta, responsables del retraso de la publicación, son la adopción por parte de la Royal Society del requisito de que *referees* den el visto bueno para la publicación de artículos en la revista, requisito que se adoptó en 1832.⁴⁷ En segundo lugar, el 1 de diciembre de 1832, Faraday escribe a Gay-Lussac, entonces editor de los *Annales de chimie et de physique*, una carta destinada a la publicación, y en ella menciona que una traducción al francés de su primera memoria se publicó en esa revista en mayo de 1832.⁴⁸

En la carta a Ampère, Faraday afirma que ha transcurrido un largo periodo de tiempo entre la lectura y la publicación de su memoria. ¿Cuándo hizo Faraday su lectura en la Royal Society? Todos los estudiosos de la obra de Faraday dan la misma respuesta: el 24 de noviembre de 1831. Lamentablemente esta fecha es inexacta. El acta de la sesión correspondiente al 24 de noviembre no registra ninguna lectura de una memoria de Faraday.⁴⁹ Sin embargo, el acta correspondiente al 8 de diciembre de 1831 señala que "The reading of a paper, entitled "Experimental Researches in Electricity," by Michael Faraday, Esq. F. R.

⁴⁷ Conozco este dato gracias a K. Moore, antiguo archivero de la Royal Society. Los *referees* de la primera memoria de Faraday fueron dos miembros del Consejo de la Royal Society: Samuel Hunter Christie y John Bostock.

⁴⁸ *Annales de chimie et de physique*, 51(1832), 404 y ss. *ERE*, II, pp. 179-200, p. 180. La referencia de la traducción francesa de la memoria de Faraday es *Annales de chimie et de physique*, 50 (1832), 5-69.

⁴⁹ *Proceedings of The Royal Society*, 3 (1830-1837). 77-78. En esta sesión se leyeron dos memorias: "Facts adduced in refutation of the assertion that the Female *Ornithorhynchus Paradoxus* has Mammæ" de sir Everard Home, y "On an Inequality of long Period in the Motions of the Earth and Venus" de George Biddell Airy.

S. was commenced."⁵⁰ Y en el acta de la sesión siguiente, el 15 de diciembre, se señala que "The reading of Mr. Faraday's paper, entitled "Experimental Researches in Electricity," was concluded."⁵¹ E inmediatamente sigue un informe de la memoria que Faraday había leído.

¿Cómo es posible que durante tanto tiempo se haya mantenido la inexactitud respecto a las fechas de la lectura de Faraday? Después de todo había algún indicio de que la fecha 24 de noviembre de 1831 era extraña. Si se lee con atención la carta a Phillips de 29 de noviembre, no puede por menos de sorprender que Faraday no haga ninguna mención a la lectura supuestamente realizada cinco días antes. Phillips era su amigo, ¿no hubiera sido normal mencionar la lectura, las reacciones de los Fellows, etc.? Faraday lo único que dice es que ha estado escribiendo una memoria, nada más. La explicación reside en que los estudiosos han aceptado un tanto acríticamente las afirmaciones reiteradas del propio Faraday. Así, cuando se publicó su memoria en las *Philosophical Transactions*, entre el título y el texto aparecía : "Read November 24, 1831".⁵² Incluso en su *Diary*, las anotaciones correspondientes al 4 de noviembre de 1831 terminan con una nota, obviamente añadida posteriormente, en la que se lee: "R. S. Paper Read 24 Nov. 1831".⁵³

⁵⁰ *Ibidem*, p. 91.

⁵¹ *Ibidem*. La señora Edwards amablemente accedió a comprobar las fechas una vez más y me informó que " According to the Society's Journal Book (which constitutes the official record of the Society's meetings), Faraday's paper was indeed read to the Society on 8 and 15 December".

⁵² Faraday, M., "Experimental Researches in Electricity", *Philosophical Transactions*, 122 (1832), 125-162, p. 125.

¿Por qué Faraday se ha preocupado de insistir en una fecha inexacta para su lectura? Empezamos a encontrar la respuesta en la larga nota fechada en abril de 1832 que añade al final de su memoria publicada. Allí explica que, antes de la publicación de su memoria, mandó noticia del descubrimiento de la inducción electromagnética a Hachette, Secretario de la Academia de París, mediante una carta fechada 17 de diciembre de 1831 que se leyó en la Academia de las Ciencias el 26 de diciembre. Una copia de la carta se publicó el 28 de diciembre en *Le Temps*, y la noticia llegó a dos físicos italianos, Nobili y Antinori, que se pusieron inmediatamente a experimentar sobre el tema y obtuvieron algunos de los resultados que Faraday mencionaba en su carta a Hachette. Entonces, explica Faraday,

These results by Signori Nobili and Antinori have been embodied in a paper dated 31st January 1832, and printed and published in the number of the *Antologia* dated November 1831, (according at least to the copy of the paper kindly sent me by Signor Nobili). It is evident the work could not have been then printed; and though Signor Nobili, in his paper, has inserted my letter as the text of his experiments, yet the circumstance of back date has caused many here who have heard of Nobili's experiments by report only, to imagine his results were anterior to, instead of being dependent upon, mine.⁵⁴

Debido a la fecha del número de la revista que contenía el artículo de Nobili y Antinori, parecía que sus resultados precedían a los de Faraday. Cualquiera podría darse cuenta de que ello no era así, por la fecha del artículo de Nobili y Antinori, y porque en su artículo ellos reconocían que habían comenzado a trabajar después de haber tenido noticia del descubrimiento de Faraday. Sin embargo, a juzgar por el texto se ve que

⁵³ *Diary*, I, p. 309.

⁵⁴ *ERE*, I, p. 41.

no todos habían llegado a esta sencilla conclusión, y Faraday se sintió presa del nerviosismo, algo comprensible si se tiene en cuenta que llovía sobre su pasado: ya diez años antes se había visto, involuntariamente, envuelto en un asunto parecido. Wollaston había pensado, a raíz del descubrimiento de Oersted, que un alambre conductor sometido a la acción de un imán podría girar sobre su eje. Lo que Faraday había descubierto, y explicaba en su artículo sobre las rotaciones electromagnéticas, es que un polo magnético giraba alrededor de un alambre conductor y viceversa. A pesar de la diferencia evidente, al publicar su artículo se extendió el rumor de que Faraday se había apropiado de las ideas de Wollaston. El asunto se aclaró, pero dejó su huella sobre Faraday. No es extraño su disgusto cuando diez años después la historia volvía a repetirse.

La intensidad de su nerviosismo puede apreciarse por su persistencia en asegurar su prioridad. Primero puso la fecha falsa a la cabeza de su memoria y además añadió una larga nota al final. En segundo lugar, cuando se publicó en el *Philosophical Magazine* una traducción del artículo de Nobili y Antinori, Faraday añadió notas donde explicaba el problema de las fechas minuciosamente, repitiendo de nuevo la fecha falsa de la lectura: " My first paper was read to the Royal Society, November 24, 1831; and my letter to M. Hachette was dated the 17th of December, 1831."⁵⁵ Además, incluía en el texto de la traducción del artículo de Nobili y Antinori referencias a párrafos de su memoria publicada y de la Serie II, para mostrar que los experimentos descritos en

⁵⁵ "On the Electro-motive Force of Magnetism. By Signori Nobili and Antinori (from the *Antologia*, nº 131) with Notes by Michael Faraday, F. R. S., &c". *ERE*, II, pp. 164-179, n. 2, pp. 164-165.

el artículo repetían algunos de los ya hechos por él. No contento con todo esto, el 1 de diciembre de 1832 escribió a Gay-Lussac una carta rogándole publicarla, en la cual volvía de nuevo sobre la cuestión, asegurando una vez más que la lectura de su memoria fue el 24 de noviembre.⁵⁶

Ahora que tenemos una idea de la magnitud de su nerviosismo podemos contestar la pregunta de por qué escogió la fecha de 24 de noviembre. Cuando Nobili le mandó una copia de su artículo --en febrero de 1832--, Faraday, que había descubierto la inducción electromagnética en agosto de 1831, se encontró en la peor situación: él no había *publicado nada* aún sobre el tema. Las dos únicas noticias de su descubrimiento eran: la lectura de su memoria en la Royal Society --8 y 15 de diciembre de 1831-- y la carta a Hachette de 17 de diciembre de 1831. Seguramente creyó que ninguna de las dos podía demostrar su prioridad en el descubrimiento, puesto que ambas eran posteriores a la fecha del número de la *Antología*. Desde su punto de vista, la única manera de justificar públicamente su prioridad era afirmar que la lectura se hizo en una fecha suficientemente temprana: el 24 de noviembre de 1831.

Pero, ¿por qué precisamente esa fecha? ¿Es una invención de Faraday? El propio Faraday nos proporciona los elementos con los que poder construir una respuesta. En el Prefacio del primer volumen de sus *Experimental Researches in Electricity* --publicado en 1839-- se siente obligado a explicar las fechas que aparecen en la parte superior de las distintas Series, y lo hace en los siguientes términos:

The date of a scientific paper containing any pretensions to discovery is

⁵⁶ *Annales de chimie et de physique*, 51(1832), 404 y ss. *ERE*, II, pp. 179-200, p. 180.

frequently a matter of serious importance, and it is a great misfortune that there are many most valuable communications, essential to the history and progress of science, with respect to which this point cannot now be ascertained. This arises from the circumstance of the papers having no dates attached to them individually, and of the journals in which they appear having such as are inaccurate, *i. e.* dates of a period earlier than that of publication. I may refer to the note at the end of the First Series, as an illustration of the kind of confusion thus produced. These circumstances have induced me to affix a date at the top of every other page, and I have thought myself justified in using that placed by the Secretary of the Royal Society on each paper as it was received. An author has no right, perhaps, to claim an earlier one, unless it has received confirmation by some public act or officer.⁵⁷

A la vista de este texto parece razonable concluir que la fecha 24 de noviembre de 1831 es la del día en que su memoria fue aceptada en la Royal Society para ser leída más tarde, los días 8 y 15 de diciembre de 1831. Así se entiende que no mencionara a Phillips ninguna lectura y sí la memoria que acababa de escribir y presentar para su lectura en la Royal Society. Asimismo, que la situación respecto a la Serie I era excepcional se ve en que desde la Serie IV hasta la XXIX --la última Serie recogida en los tres volúmenes de las *Experimental Researches*-- siempre se incluye la fecha en que se recibieron en la Royal Society y la fecha en que se leyeron. En la Serie II aparece una fecha que sí coincide con la de la lectura. En la Serie I aparece una sólo fecha, que Faraday da como la de su lectura cuando en realidad fue la de su recepción. Escogió la fecha 24 de noviembre porque era la más temprana que podía justificar documentalmente.

⁵⁷ ERE, I, "Preface", p. x.

2. 3. La ley de la inducción magneto-eléctrica

El 17 de diciembre de 1831, Faraday escribió la carta a Hachette, Secretario de la Academia de París, anunciándole sus descubrimientos en el campo de la inducción de corrientes. En la comunicación de Hachette a la Academia se informa que Faraday ha enviado una memoria a la Royal Society dividida en cuatro partes. En la primera, señala la comunicación, se contiene un hecho importante:

qu'un courant d'électricité voltaïque qui traverse un fil métallique, produit un autre courant dans un fil qui en est voisin; que ce dernier courant est dans une direction contraire au premier et ne dure qu'un moment; que si l'on éloigne le courant producteur, un second courant se manifeste sur le fil soumis à l'influence du courant producteur, dans une direction contraire au premier courant d'influence, et par conséquent dans le même sens que le courant producteur.⁵⁸

Tenemos aquí la evidencia de que, como máximo el 17 de diciembre de 1831, Faraday ya había corregido su error respecto al sentido de las corrientes inducidas. En este texto se deja claro que la corriente inducida al establecerse el contacto en el circuito inductor es de sentido opuesto al de la inductora, y la corriente inducida al romperse el contacto del mismo sentido.

El *Diary* revela que Faraday detectó el error en el sentido de las corrientes inducidas mediante una febril investigación cuyos resultados se registran con las fechas 8 y 9 de diciembre de 1831. La primera anotación del día 8 da indicios de alguna intranquilidad:

⁵⁸ "Extrait d'une lettre de M. Faraday à M. Hachette, communiquée à l'Académie des sciences le 17 décembre", *Annales de Chimie et de Physique*, 48 (1831), pp. 402-403, p. 402.

I have got my apparatus at home to act and have been making precise observation upon the directions of the currents, etc., for in former notes there is much confusion from North end and North Pole.⁵⁹

Tanto el 5 de diciembre como el 4 de noviembre había estado experimentando en casa de Christie, que conservaba el potente imán de la Royal Society que Faraday había estado utilizando, de ahí que anote que ahora vuelve a trabajar en su laboratorio. En esos dos días había hecho experimentos de inducción magneto-eléctrica moviendo espirales y bobinas en presencia del imán y, ciertamente había bastante confusión terminológica en lo que se refiere al polo norte del imán y de la aguja del galvanómetro. En estos dos días empleará sistemáticamente la expresión "marked pole" para referirse al polo norte de un imán o de una aguja magnética.

La siguiente anotación va acompañada por un diagrama en el que con todo cuidado señala los polos de su batería y el sentido de la corriente que produce en un alambre conectado a un galvanómetro. No contento con esto, vuelve a asegurarse del sentido de la corriente de la batería magnetizando agujas con ella.⁶⁰

Inmediatamente después registra un experimento realizado con el dispositivo representado en la figura 9. Se trata de magnetizar una aguja mediante la corriente inducida en una bobina por la de la batería conectada a otra bobina concéntrica. Se notará el cuidado, en absoluto habitual, con que ha señalado en su diagrama los polos de la batería escribiendo "N or copp" y "P or zn" y los sentidos de las corrientes inductora e inducida. Asimismo en el circuito de la batería se lee "on making contact". Este era precisamente el problema, como sabemos.

⁵⁹ *Diary*, I, §190, p. 392, 8 de diciembre de 1831, subrayado de Faraday.

⁶⁰ *Ibidem*, §§191-192, p. 393.

Faraday escribe el 8 de diciembre:

Arranged helices exactly as in figure as to direction, and the needle at *a* became a magnet, marked pole beneath; therefore the electric current induced on making contact is the reverse or contrary in direction to the inducing current, as seen by tracing the circuits in helices *b*.

On breaking the voltaic contact the needle became oppositely polarized: hence then the induced current is the same as the inducing current.⁶¹

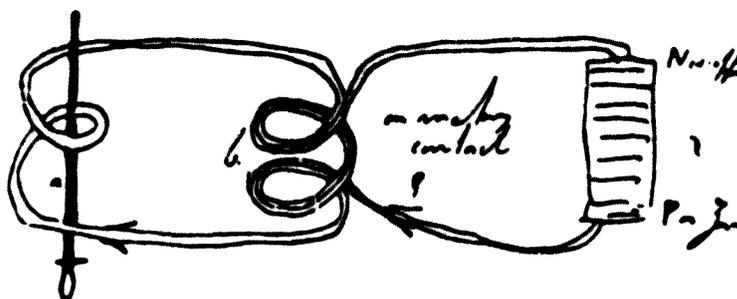


figura 9 (Diary, I, p. 393)

Desde la anotación del día 29 de agosto de 1831 --el día en que detectó por primera vez corrientes inducidas-- donde se definían incorrectamente los sentidos de las corrientes inducidas, no se encontrará ninguna otra que con tanta meticulosidad precise los sentidos de las corrientes inducidas, al establecer e interrumpir el contacto, con respecto al sentido de la inductora. Hasta esta anotación, Faraday se contentaba con apuntar que las corrientes inducidas eran de sentidos opuestos entre sí. La meticulosidad con que anota aquí el sentido de las corrientes inducidas con respecto a la inductora revela que es este experimento, sin duda, es el que le ha permitido detectar su error.

Este experimento era uno de inducción volta-eléctrica. Las restantes anotaciones del día 8 registran experimentos que examinan

⁶¹ *Ibidem*, §§193-194.

minuciosamente los sentidos de las corrientes inducidas en la inducción magneto-eléctrica. El objetivo es comprobar la concordancia con los nuevos sentidos de las corrientes inducidas en la inducción volta-eléctrica. Uno de los experimentos es la repetición del que sirvió, el 17 de octubre de 1831, para producir corrientes inducidas a partir de imanes

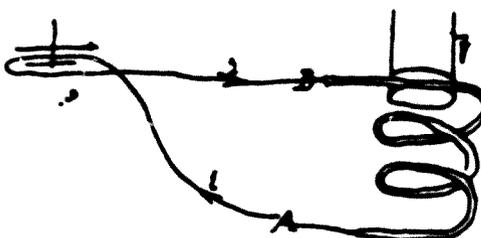


figura 10 (*Diary*, I, p. 393)

permanentes. La figura 10 muestra el dispositivo empleado. Faraday anota:

When the marked pole of the magnet entered the helix O as in the figure the marked end of the needle went west, hence electrical currents as indicated by the arrows. On withdrawing the Magnet, the *marked end went East*.⁶²

La primera anotación del día siguiente, 9 de diciembre de 1831, es reveladora. En ella se lee:

To-day went still more generally to work, for some of former directions only partial, and obtained I think very satisfactory and reconciling results.⁶³

Los resultados conciliadores se deben a un experimento que se describe

⁶² *Ibidem*, §§197-198, subrayados de Faraday.

⁶³ *Ibidem*, §209, 9 de diciembre de 1831.

un poco más abajo. Antes describe otro que introduce en el *Diary* una noción capital, la de curvas magnéticas. Construye una espiral con un

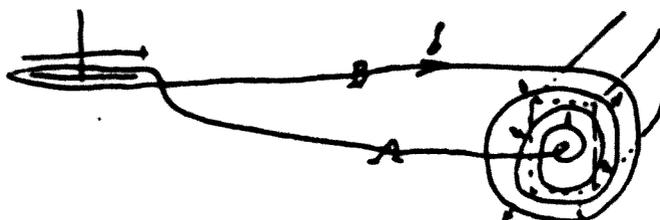


figura 11 (*Diary*, I, p. 395)

alambre de cobre y la conecta al galvanómetro. Entonces aproxima la espiral al polo norte de un imán (véase la figura 11). Con ello se induce una corriente en la espiral cuyo sentido se indica mediante la flecha en el alambre que va al galvanómetro. Las flechas pequeñas representan las curvas magnéticas. Faraday escribe: "Any one part of the spiral is as if it were going across the resultant's or magnetic curves as marked".⁶⁴

El experimento que produjo los resultados conciliadores a los que se refirió anteriormente es muy similar al que acabamos de ver, y se describe inmediatamente después. En él sustituye el imán por una espiral conectada a la batería de forma que al pasar la corriente se cree un polo norte en dicha espiral. Entonces, al aproximar la espiral conectada con el galvanómetro,

Marked pole of needle went west; therefore the electric currents opposite, for that in battery helix is against screw or watch hands, and that induced in approached helix with screw or watch hands. Consistent with yesterday's 193.⁶⁵

⁶⁴ *Ibidem*, §214.

⁶⁵ *Ibidem*, §215, subrayado de Faraday.

El experimento del día anterior, descrito en el §193, es precisamente el que le permitió corregir su error en el sentido de las corrientes inducidas en la inducción volta-eléctrica. Lo que parece sugerir la consideración conjunta del experimento descrito en el §193 y los dos que acabamos de ver, es que, respecto del sentido de la corriente que se induce en un conductor, establecer la corriente en un circuito inductor es equivalente a aproximar el conductor a un polo norte magnético. Con ello se tiene que concuerdan los sentidos de las corrientes inducidas mediante inducción volta-eléctrica e inducción magneto-eléctrica. Sin duda, esto merece ser descrito como "very satisfactory and reconciling results".

Además, la noción de curvas magnéticas va a permitir definir de forma sencilla los sentidos de las corrientes inducidas en la inducción magneto-eléctrica. La idea crucial al respecto se expresa en la conclusión que Faraday extrae de los últimos experimentos del día. En ellos Faraday utiliza de nuevo su disco de cobre, con dos colectores en un punto de la periferia y en el eje conectados a los alambres que van al galvanómetro. El disco gira siempre en el mismo sentido, contrario a las agujas del reloj, en un plano horizontal entre los polos de un imán. Faraday prueba varias posiciones del imán, pero manteniendo siempre su polo norte encima del disco. En estas condiciones se inducen siempre corrientes radiales que van de la circunferencia del disco a su centro. Faraday concluye:

If therefore the position and motion of the plate be the same, the current produced in it is the same in direction in whatever direction the magnet is applied or held, provided the same pole is applied to the same place, i. e. the position of the axis of the magnet is of no consequence provided the magnetic curves are cut

in the same direction.⁶⁶

Lo decisivo para determinar el sentido de las corrientes inducidas es el sentido en que el conductor corta las curvas magnéticas. Con esta idea se puede formular sencillamente lo que, más adelante, en la Serie I, aparecerá como la ley de la inducción magneto-eléctrica. La figura 12 representa un alambre que se mueve por delante del



figura 12 (Diary, I, p. 394)

polo norte de un imán. La flecha pequeña transversal indica el sentido del movimiento, y la flecha grande en el alambre el sentido de la corriente inducida. Faraday anota:

When the wire B A went before a marked pole of magnet in front from left to right as figured, the marked end of needle went west. Hence electric current from abc 'e downwards.⁶⁷

La ley de la inducción magneto-eléctrica aparecerá más tarde con todos los honores en el §114 de la Serie I. En estos dos días la ley aparece

⁶⁶ *Ibidem*, §216.

⁶⁷ *Ibidem*, §210.

como la culminación de una investigación que ha sido desencadenada por el reconocimiento de un error en el sentido de las corrientes inducidas en la inducción volta-eléctrica.

Aunque el *Diary* no dice nada al respecto, cabe imaginar que la aparición de la noción del corte de curvas magnéticas como el factor decisivo para la determinación del sentido de las corrientes inducidas en la inducción magneto-eléctrica, ha introducido elementos nuevos para la reflexión sobre la centralidad de la noción de estado electro-tónico en el fenómeno de inducción. En la carta a Phillips de 29 de noviembre de 1831, el estado era el concepto explicativo fundamental. El estado explicaba por qué se interrumpía la primera corriente inducida y el origen de la segunda, pero no se prestaba a la formulación de una ley que determinara el sentido de dichas corrientes. Las investigaciones de estos dos días han mostrado cómo se puede conseguir esto último, al menos en lo que respecta a la inducción magneto-eléctrica, y con ello se introduce una noción nueva, el corte de curvas, que habrá que compatibilizar con la anterior de estado electro-tónico.

2. 4. La Serie I: teoría del estado electro-tónico

2. 4. 1. La inducción de corrientes y sus tipos: volta-eléctrica y magneto-eléctrica

La Serie I de las *Experimental Researches in Electricity* --que, como sabemos se publicó en abril de 1832-- sigue la ordenación que Faraday había anunciado en su carta a Phillips de 29 de noviembre de 1831, como puede verse por el título de sus cuatro secciones: "1. Induction of electric currents. 2. Evolution of electricity from magnetism. 3. New

electrical state or condition of matter. 4. Explication of Arago's magnetic phenomena" La primera sección viene precedida por unos párrafos introductorios interesantes. En el primer párrafo Faraday define 'inducción' por analogía con la inducción estática, haciendo explícito el principio de paralelismo que habíamos visto más arriba:

The power which electricity of tension possesses of causing an opposite electrical state in its vicinity has been expressed by the general term of induction; which, as it has been received into scientific language, may also, with property, be used in the same general sense to express the power which electrical currents may possess of inducing any particular state upon matter in their immediate neighbourhood, otherwise indifferent.⁶⁸

En lo que respecta a la inducción de corrientes, la definición, parece tener un cierto aire de circularidad. Esto se evitaba en el caso de la inducción estática introduciendo el término 'causar'; sin embargo, en el caso de la corriente se nos dice que la inducción es el poder de inducir... Podríamos preguntarnos por qué no se ha utilizado también en este caso el término 'causar'.

Una respuesta parcial se encuentra en los párrafos siguientes, donde Faraday expresa su principio de reciprocidad entre magnetismo y electricidad:

It appeared very extraordinary, that as every electric current was accompanied by a corresponding intensity of magnetic action at right angles to the current, good conductors of electricity, when placed within the sphere of this action, should not have any current induced through them, or some sensible effect produced equivalent in force to such a current.⁶⁹

⁶⁸ ERE, Serie I, §1. 'Electricity of tension', como 'ordinary electricity' o 'common electricity' son expresiones usuales para referirse a la electricidad estática.

No hubiera sido adecuado introducir el término 'causar' para definir la inducción debida a una corriente porque se habría obviado el papel de la esfera de acción magnética de que se nos habla aquí. Entre la corriente eléctrica inductora o el imán y los efectos debidos a la inducción hay una mediación, la acción magnética asociada con ambos. Esta mediación magnética explica la inducción volta-eléctrica hasta ahora sólo exigida por el paralelismo, en lo que a la inducción se refiere, entre electricidad estática y la corriente eléctrica.

Hay otro punto de interés en el párrafo que define la noción de inducción en el caso de las corrientes eléctricas. La definición se ha formulado en función de la noción de estado electro-tónico puesto que se nos dice que las corrientes eléctricas pueden poseer el poder de inducir un "particular state" en la materia próxima. Este "particular state" es el resultado de la acción magnética asociada con la corriente eléctrica inductora.

Los párrafos introductorios terminan con la advertencia de Faraday de que no va a exponer sus resultados en el orden en que fueron obtenidos, sino en el más adecuado para proporcionar una visión de conjunto.⁷⁰

La primera sección de la Serie está dedicada a la inducción volta-eléctrica. Desde nuestro punto de vista resulta particularmente interesante el experimento descrito en el §18 de esta sección.⁷¹ Este

⁶⁹ *Ibidem*, §3.

⁷⁰ *Ibidem*, §5.

⁷¹ Este es uno de los experimentos realizados, el 26 de diciembre de 1831, después de que se leyera en la Royal Society la primera versión de lo que luego se convertiría en la Serie I. Por lo general transcurría un largo periodo de tiempo entre la lectura de un trabajo en la Royal Society y su publicación en las *Philosophical*

experimento se propone para mostrar que la acción inductiva no tiene lugar únicamente en los momentos del establecimiento e interrupción de la corriente en el circuito primario, sino que continúa mientras la corriente siga fluyendo en dicho circuito. El experimento utiliza dos circuitos cuyos alambres están fijados en forma de zigzag en dos tablas dispuestas en la forma de un libro abierto que puede irse cerrando sin que los circuitos lleguen a tocarse debido al aislamiento superpuesto en uno de ellos (véase la figura 13). Cuando el circuito secundario se aproxima o se aleja

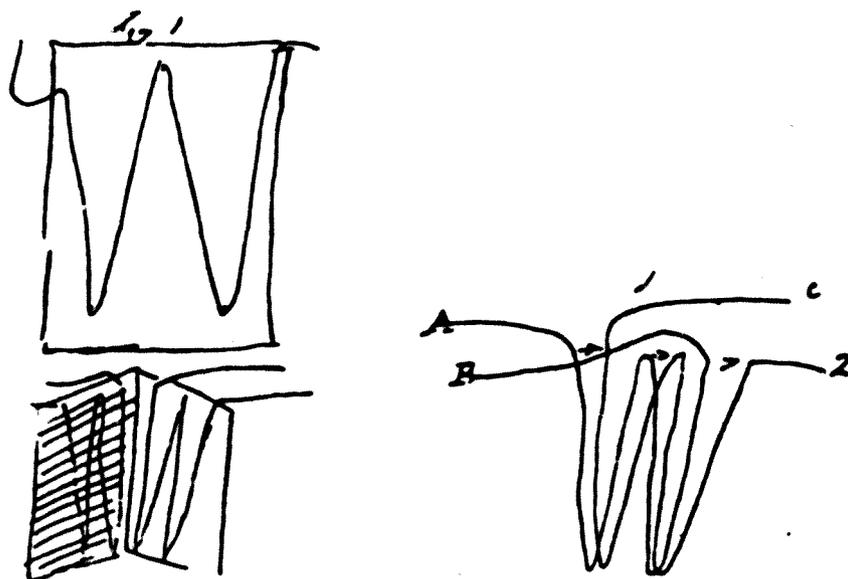


figura 13 (*Diary*, I, p. 401)

al primario se induce una corriente en él. En una de las anotaciones del *Diary* correspondientes a este experimento se lee

When galvanometer wire was approached to the battery wire carrying the current the marked pole of upper needle went east, and when withdrawn from battery wire and current the marked pole went west. Current therefore induced on

Transactions, y Faraday seguía la costumbre de la época de incorporar al trabajo que se iba a publicar resultados obtenidos después de la lectura de su primera versión.

approaching was opposite direction to the inducing current. and current induced on receding was in the same direction. Hence distinctly inducing power of voltaic current after it is formed, and not merely on making or breaking contact. Hence also intermediate electrotonic state.⁷²

La referencia al estado electro-tónico está ausente en el texto correspondiente de la Serie, pero la justificación del experimento es la misma: el fenómeno de inducción tiene lugar también mientras continúa la corriente en el circuito primario.⁷³

La segunda sección de la Serie se dedica a la inducción de corrientes producida por imanes y electroimanes. Comienza describiendo el experimento del anillo con el que se descubrió la inducción e incluye los demás experimentos que hemos discutido anteriormente basándonos en su descripción del *Diary*. En el penúltimo párrafo de la Serie Faraday introduce el término 'magneto-eléctrica' para designar la inducción de corrientes producida por imanes.

La primera sección terminaba con un párrafo en el que Faraday introducía el término 'volta-electrica' para designar la inducción producida por corrientes voltaicas o electroimanes y se anunciaba que en una sección posterior se trataría de la condición eléctrica peculiar en que se encuentra el alambre sometido a inducción mientras sigue fluyendo la corriente en el circuito inductor.

⁷² *Diary*, I, §§250-251, p. 401, 26 de diciembre de 1831. Se notará que Faraday no es consistente en su escritura del término 'electrotónico': a veces escribe 'electrotonic', otras intercala un guión y escribe 'electro-tonic'. Yo escribiré siempre 'electro-tónico' puesto que así es como apareció publicado el término por primera vez.

⁷³ *Ci.*, *ERE*, Serie I, §18.