

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

CAPÍTULO 6

LA NOCIÓN DE ESTADO ELECTRO-TÓNICO EN LA HISTORIOGRAFÍA

En los capítulos anteriores hemos seguido las vicisitudes de la noción de estado electro-tónico en la obra de Faraday, desde su introducción a raíz del descubrimiento de la inducción electromagnética hasta su última aparición en un contexto teórico similar. La noción era capital para Faraday en dos aspectos fundamentales: en primer lugar para proporcionar una explicación más completa del fenómeno de inducción; en segundo lugar, para preservar la correspondencia entre estados de la fuerza eléctrica y magnética que pondría de relieve la profunda unidad de ambas fuerzas.

En el presente capítulo me ocuparé del eco que la noción de estado electro-tónico ha tenido en los estudios de la obra de Faraday. Partiré para ello de la convicción de que el primer estudio moderno es la biografía que publicó L. P. Williams en 1965, y de acuerdo con ello mi examen se dividirá en dos partes. Una primera sección se ocupa de trabajos anteriores al que acabo de mencionar. En ella se mezclarán trabajos de muy diversa índole, que nos llevarán desde los años treinta del siglo XIX hasta los primeros del presente. En la segunda sección me ocuparé fundamentalmente de la interpretación de la noción de estado electro-tónico proporcionada por Williams, que es en definitiva el primero que le ha dedicado la atención que merece, así como de las de Agassi, Berkson y Gooding.

Me esforzaré en mostrar que si bien modernamente la atención

dedicada al estado electro-tónico es mucho mayor que la de los costáneos de Faraday, es posible señalar no sólo la inexistencia de un intento por trazar las vicisitudes del concepto en su obra, sino además la pura y simple omisión en lugares clave en los que aparece entrelazado con nociones más familiares, en concreto, la de las líneas de fuerza. Notablemente, los autores modernos omiten indicar la relación entre estado electro-tónico y líneas de fuerza que hemos visto en el artículo "On the Physical Character of the Lines of Magnetic Force" de 1852.

6. 1. Primeras referencias al estado electro-tónico

6. 1. 1. El estado electro-tónico en el Continente

Auguste de La Rive fue uno de los pocos amigos que Faraday tuvo a lo largo de su vida. Se conocieron con motivo del viaje que Faraday hizo al Continente acompañando a Davy entre 1813 y 1815. Si en la historia de la ciencia hay personajes de más y menos importancia, de la Rive no se cuenta entre los primeros. Es conocido fundamentalmente por su ardiente defensa de la teoría química de la pila y por su amistad con Ampère y Faraday, con el que mantuvo una extensa correspondencia.

En el capítulo dedicado a la inducción electromagnética de su *Traité d'Électricité Théorique et Appliquée* (1854-1858), después de explicar algunos de los experimentos que Faraday había descrito en su Serie I, de La Rive recoge la problemática del estado electro-tónico de la siguiente manera:

Une question assez difficile à résoudre se présente ici, c'est de savoir quel est l'état du fil conducteur induit pendant qu'il est sous l'influence du courant

inducteur ou de l'aimant. Il semblerait que ce n'est pas un état naturel, puisqu'au moment où l'influence cesse, le fil donne naissance à un courant en repassant à l'état naturel; d'un autre côté le fil, pendant la durée de cette influence, ne manifeste aucun courant, aucune propriété particulière, ni électrique, ni magnétique, ni d'un autre genre quelconque. Faraday avait nommé *électro-tonique* cet état particulier. Il semble avoir été amené plus tard par de nouvelles recherches à renoncer à cette supposition d'un état électro-tonique dans le fil, et à admettre que le second courant induit est dû, comme le premier, à une action particulière et immédiate, et n'est pas simplement l'effet du retour du fil à son état naturel, état qui n'a pas cessé d'exister.

Dos puntos de interés aparecen en este texto. En primer lugar, se notará que de La Rive reproduce el argumento con que Faraday introducía su estado electro-tónico en el §60 de la Serie I. Allí Faraday suponía que el alambre inducido se encontraba en un estado peculiar por dos razones: porque resistía la formación de una corriente y porque originaba una corriente cuando se eliminaba la influencia del inductor. En segundo lugar, parece claro que de La Rive limita su información del estado electro-tónico a la que puede extraerse de las dos primeras Series, puesto que, como vimos, era en la Serie II donde Faraday renunciaba al estado electro-tónico, renuncia de la que de la Rive se hace eco en este texto. Nos interesa retener este punto pues, como veremos, hasta el estudio de Williams esta será la tónica casi general en los autores que dan alguna noticia del estado electro-tónico.

De la Rive no se limita a informar sobre la noción de estado electro-tónico, la incorpora además en una teoría propia de la inducción.² En la teoría juega un papel decisivo la consideración de la propagación de la

¹ LA RIVE-Tratté, vol. 1, pp. 360-361.

² Ibidem, pp. 445-447.

corriente eléctrica como una serie de descomposiciones y recomposiciones de las electricidades de las moléculas del conductor. La

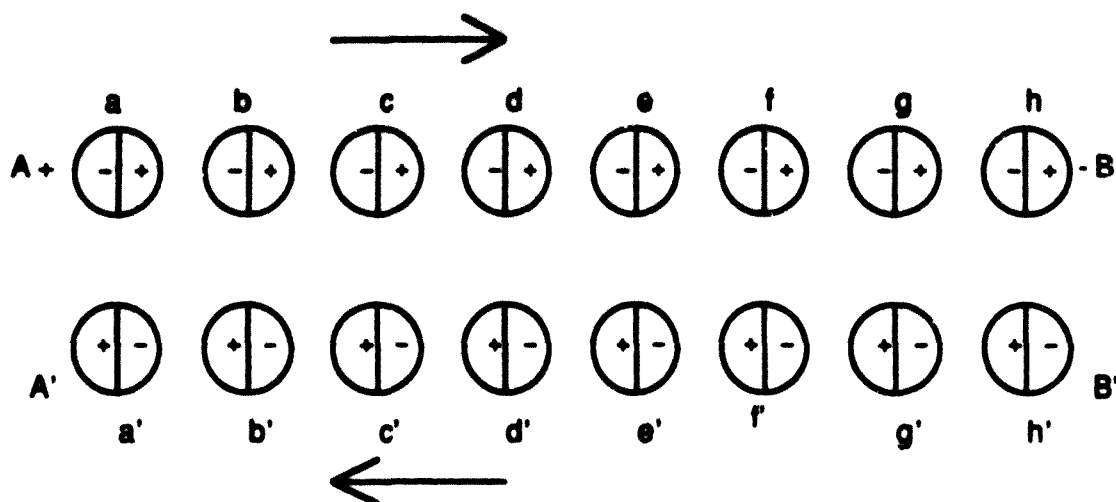


figura 27 (LA RIVE-Traité, figura 156)

figura 27 representa dos alambres conductores AB y $A'B'$. El primero está conectado a los polos de una batería. La acción de los polos descompone las electricidades de las partículas constituyentes como se muestra en la figura; esta separación es seguida instantáneamente por una recomposición de las electricidades de signo opuesto, a la cual le sigue una nueva descomposición y así sucesivamente. La sucesión de descomposiciones y recomposiciones es tan rápida que puede considerarse que hay siempre una tensión eléctrica en cada partícula del conductor que da lugar a un estado de polarización casi permanente, tal y como se representa en la figura.

En el momento en que la corriente comienza a pasar por AB , produciéndose la correspondiente polarización de sus partículas, tiene lugar en $A'B'$, merced a la acción de las partículas polarizadas del

conductor AB , una polarización molecular opuesta, y si sus extremos se unen a un galvanómetro, la electricidad positiva de la partícula a' se combinará con la negativa de h' y el resultado es una corriente inducida en sentido opuesto a la que pasa por AB . Cuando se interrumpe la corriente en AB , la electricidad negativa de a' se combina con la positiva de h' y el resultado es una corriente inducida del mismo sentido que la inductora.³

En la teoría el papel fundamental lo juega el estado de polarización de las partículas del conductor $A'B'$, y éste es precisamente el que de La Rive identifica con el estado electro-tónico de Faraday:

L'état de tension électrique dans lequel se trouve le fil $A'B'$ pendant que le courant traverse AB est celui que Faraday avait appelé *électrotonique*; et la cessation de cet état produit le second courant d'induction, tandis que sa création avait produit le premier. ⁴

Hay un punto fundamental, no obstante, que dificulta la identificación que quiere de La Rive. Ciertamente, como hace aquí de La Rive, Faraday siempre había descrito su estado de electro-tónico como un estado de tensión, pero con una diferencia fundamental: el estado electro-tónico de Faraday era adoptado por la materia sometida a la fuerza magnética; en la teoría de de La Rive el estado de polarización en que se encuentra el conductor inducido está producido por la acción a distancia de las electricidades de distinto signo separadas en el inductor por la tensión

³ Así formulada, la teoría explica lo que Faraday había llamado inducción volta-eléctrica, pero su extensión a la inducción magneto-eléctrica es inmediata, toda vez que para de La Rive, como buen amperiano, los imanes se reducen a ensamblajes de corrientes eléctricas.

⁴ LA RIVE-*Traité*, vol. 1, p. 446.

entre los polos de la batería. De la Rive ha suprimido toda mediación magnética en el fenómeno de inducción volta-eléctrica hasta convertirlo en un fenómeno puramente eléctrico; en definitiva, lo que ha hecho es pasar el estado electro-tónico de Faraday por su filtro amperiano.

Me he detenido en la discusión de la teoría de la inducción de de La Rive porque es el único caso que conozco en que el estado electro-tónico ha merecido una cierta atención teórica.⁵ En general la noción fue ignorada o se le dedicó una mención sumaria, aunque también hay casos en que despertó comentarios admirativos, pero sin un esfuerzo correspondiente de elucidación. Al menos lo primero podría explicarse por el impacto que pudo hacer la renuncia de Faraday a la noción en su Serie II.

Los Becquerel se cuentan entre los que le dedicaron una atención sumaria. En su breve historia de la electricidad y el magnetismo de 1858, después de describir el famoso experimento del anillo con que Faraday descubrió la inducción electromagnética, se limitan a proporcionar una breve noticia del estado electro-tónico que casi reproduce literalmente, sin ninguna discusión, el §60 de la Serie I, es decir, el párrafo donde Faraday introdujo su noción ⁶

Una breve referencia al estado electro-tónico se encuentra también en la conferencia que pronunció Helmholtz en memoria de Faraday ante la Sociedad de Química de Londres en 1881.⁷ El grueso de la

⁵ Dejando a un lado, naturalmente, el caso de Maxwell, que reinterpreta matemáticamente el estado electro-tónico de Faraday, y hace de su versión de este concepto una pieza clave en la primera presentación de sus ecuaciones. Véase su "On Faraday's Lines of Force", *Cambridge Philosophical Transactions*, 10 (1855), 27-83, MAXWELL-Papers, I, 155-229. Se encontrará un minucioso estudio de la matematización de Maxwell del estado electro-tónico en LORENZO-1990.

⁶ BECQUEREL, A. C., y BECQUEREL, A. E.-*Résumé* pp. 85-86.

conferencia está dedicado a la electroquímica, pero las primeras páginas tratan en general de la obra de Faraday. En ellas Helmholtz afirma en primer lugar que, a raíz de su descubrimiento de las corrientes inducidas, Faraday

concluded that in a part of space traversed by magnetic force there ought to exist a peculiar state of tension and that every change of this tension produces electromotive force. This unknown hypothetical state he called provisionally the electrotonic state, and he was occupied for years in finding out what this electrotonic state was.⁶

A renglón seguido Helmholtz agrega que Faraday obtuvo evidencia de efectos correspondientes a cambios en el estado electro-tónico en su estudio del estado de polarización de dieléctricos sometidos a una fuerza eléctrica y en su investigación del diamagnetismo.

Hay varios aspectos en los que las afirmaciones de Helmholtz son inexactas. En primer lugar, es cierto que, como hemos tenido ocasión de ver, Faraday identifica el estado electro-tónico con una condición del espacio cuya variación equivale a una corriente inducida --y no a la producción de fuerza electromotriz, concepto que es muy dudoso que se encuentre en la obra de Faraday--, pero sólo en el periodo final de sus reflexiones, no a raíz del descubrimiento de las corrientes inducidas como quiere Helmholtz. Asimismo es muy discutible que el estado electro-tónico pueda relacionarse con el estado de polarización de los dieléctricos o que haya jugado algún papel en la investigación del diamagnetismo. Tendremos ocasión de discutir la primera de estas dos ideas más abajo, puesto que parece haber sido recogida por la moderna

⁷ HELMHOLTZ-1881, pp. 409-436.

⁸ *Ibidem*, pp. 411-412.

historiografía.

6. 1. 2. El estado electro-tónico en Inglaterra

Si el balance de las menciones al estado electro-tónico por parte de autores continentales resulta bastante magro, no puede decirse que mejore cuando cruzamos el Canal.

Tan sólo un año después de la muerte de Faraday, Tyndall, que fue lo más parecido a un discípulo que jamás tuviera Faraday, le dedicó, en 1868, una biografía. No es muy extensa, pero recorre con algún cuidado la carrera científica de Faraday. Sin embargo, todo lo que tiene que decir Tyndall sobre el estado electro-tónico de Faraday se reduce a esto:

Faraday, for a time, believed that the secondary wire, though quiescent when the primary current had been once established, was not in its natural condition, its return to that condition being declared by the current observed at breaking the circuit. He called this hypothetical state of the wire the *electro-ionic state*: he afterwards abandoned this hypothesis, but seemed to return to it in later life.⁹

Como los demás --con la única excepción de Helmholtz-- Tyndall parece tan impresionado por el abandono del estado electro-tónico en la Serie II, que limita su noticia a parte del razonamiento con que se le introdujo en la Serie I, ; ni siquiera informa al lector del contexto en que Faraday juzgó necesario recurrir a él de nuevo.

Debemos esperar a 1898 para encontrar una información un poco más amplia de la noción de estado electro-tónico. Es lo que encontramos en una nueva biografía de Faraday debida a Silvanus Thompson.¹⁰

⁹ TYNDALL-1868, pp. 22-23.

Thompson relaciona la introducción de la noción de estado electro-tónico a raíz del descubrimiento de la inducción de corrientes con el rechazo de Faraday de cualquier explicación que recurriera a la acción a distancia. Así Thompson escribe:

When therefore he found that these new effects of the induction of one electric current by another could likewise cross an intervening space, whether empty or filled with material bodies, he instinctively sought to ascribe this propagation of the effect to a property or state of the medium.¹¹

Parece que Thompson, como Helmholtz antes que él, está proyectando sobre la primera noción de estado electro-tónico aspectos que se deben a una elaboración más tardía.

Más abajo Thompson se ocupa brevemente de la investigación de la autoinducción e incluso cita parte del §1114 de la Serie IX, pero no lo relaciona con el estado electro-tónico y se limita a observar que la conclusión de Faraday en ese párrafo es sumamente interesante, aunque no nos dice por qué.¹² Algo parecido ocurre en las páginas que dedica a las Series XIII y XIV. En lo que respecta a la Serie XIII afirma que su parte final es una especulación sumamente notable sobre la

¹⁰ En 1870, Bence Jones, entonces Secretario de la Royal Institution, había publicado la biografía más conocida de Faraday, *The Life and Letters of Faraday*. Examinaremos en vano los dos volúmenes del trabajo de Bence Jones: el estado electro-tónico sólo aparece en la carta de Faraday a Phillips de 29 de noviembre de 1831 que Bence Jones reproduce, pero no merece el más mínimo comentario. La cosa no puede extrañar si tenemos en cuenta que en lo que respecta a la actividad científica de Faraday, Bence Jones descansaba ampliamente en el trabajo de Tyndall, y acabamos de ver la atención que le mereció a éste la noción de estado electro-tónico.

¹¹ THOMPSON-1898, pp. 128-129.

¹² *Ibidem*, p. 152.

efectos laterales o transversales de la corriente.¹³ Sin embargo, aunque observa que Faraday era confusamente consciente de que parece haber una tensión lateral o repulsión entre las líneas de acción inductiva eléctrica, no menciona la relación que Faraday se esfuerza en establecer entre esta tensión lateral y su estado electro-tónico. Sólo a raíz de su breve comentario de la Serie XIV, Thompson observa que Faraday recurrió de nuevo al estado electro-tónico cuando buscaba corrientes inducidas en medios dieléctricos, pero se limita a mencionar el hecho.¹⁴ Por último, en su comentario de "On the Physical Character of the Lines of Magnetic Force", Thompson cita el texto del §3269 que contiene una mención del estado electro-tónico, y parece interpretarlo como si Faraday hubiera querido identificar el estado con un estado de tensión del éter.¹⁵

La noción de Faraday del estado electro-tónico sigue sin atraer la atención de los historiadores al menos en la primera mitad del siglo XX. En 1910 Whittaker publicó una influyente historia de las teorías de la electricidad. La única mención al estado electro-tónico de Faraday se encuentra en una nota a pie de página donde Whittaker explica que "This name ['electro-tonic state'] had been devised in 1831 to express the state of matter subject to magneto-electric induction"¹⁶ y remite al lector al §60 de la Serie I, que es precisamente donde Faraday introdujo su noción sin hacer ninguna distinción entre la inducción magneto-eléctrica y la volta-eléctrica.

A mi juicio, la razón fundamental que puede explicar la falta de interés por la noción de estado electro-tónico por parte de biógrafos e

¹³ *Ibidem*, p. 165.

¹⁴ *Ibidem*, p. 166.

¹⁵ *Ibidem*, p. 215.

¹⁶ WHITTAKER-1910 p. 212, n.

historiadores del siglo XIX y primera mitad del XX es la subestimación de la dimensión teórica de la obra de Faraday. A sus ojos Faraday aparecía como un experimentalista genial y un soberbio descubridor pero poco más. No ignoraban sus ideas teóricas, pero las consideraban o con clara desaprobación o, en el mejor de los casos, como simplemente brillantes intuiciones. Un claro ejemplo de lo primero es de La Rive quien, en su obituario de Faraday, escribe refiriéndose a las ideas de Faraday con respecto a la naturaleza de las fuerzas y sus correlaciones:

We must, however, at once admit that his views on these matters are very contestable, and that, if they inspired him to make experimental researches of the highest interest, this is a proof that in the hands of a man of genius, even a bad theory may be the origin of the most beautiful discoveries.¹⁷

Tyndall forma parte de los que considera las ideas de Faraday como brillantes intuiciones, pero intuiciones que son menos el producto de una intensa reflexión teórica que de una inspiración que raya en lo irracional. Así, después de comentar las ideas que Faraday expone en su teoría de la inducción electrostática añade:

Amid much that is entangled and dark we have flashes of wondrous insight and utterances which seem less the product of reasoning than of revelation.¹⁸

Y más adelante, cuando se ocupa del descubrimiento de la rotación del plano de polarización de la luz, nos informa que

Faraday was more than a philosopher; he was a prophet, and often wrought by an inspiration to be understood by sympathy alone.¹⁹

¹⁷ LA RIVE-1867, p. 233.

¹⁸ TYNDALL-1868, p.73.

No es de extrañar, pues, la poca atención que mereció la noción de estado electro-tónico y su evolución en la obra de Faraday, si sumamos a la subestimación general de sus ideas teóricas su propia declaración en la Serie II de abandono de dicha noción.

6. 2. La historiografía moderna

En 1965 L. P. Williams publicó una monumental biografía de Faraday. En ella no encontramos, como era el caso en las anteriores, un catálogo de los descubrimientos de Faraday, sino un serio intento de precisar el origen de sus ideas y trazar su desarrollo. En lo que respecta a nuestro tema, hay que atribuir a Williams el mérito de haber comprendido la importancia que tenía para Faraday su noción de estado electro-tónico. Sin embargo, su interpretación debe criticarse desde dos puntos de vista. En primer lugar, en puntos concretos en los que su análisis resulta inadecuado, como he tenido ocasión de discutir en los capítulos precedentes. En segundo lugar, en puntos más generales que afectan a la evolución de la noción de estado electro-tónico en la obra de Faraday. Me ocuparé aquí de estos últimos.

Un primer tema de importancia es la discutible identificación que hace Williams del estado electro-tónico con el estado de polarización que adquieren las partículas de un dieléctrico sometido a la fuerza eléctrica.²⁰ Esta identificación es una de las consecuencias que extrae de su tesis fundamental, razonable sin duda, de que las ideas de Faraday sobre la inducción electrostática tienen su origen en sus

¹⁹ *Ibidem*, p. 81.

²⁰ WILLIAMS-1965, pp. 296, 318 n. 38, 396.

investigaciones en electroquímica.²¹ En estas Faraday habría comprendido que la descomposición de un electrolito por el que pasa la corriente no se debe a una acción a distancia con origen en los electrodos que produciría la disociación de los elementos que componen las partículas del electrolito, sino a una acción entre las partículas contiguas del electrolito. La corriente eléctrica orienta las fuerzas de afinidad química que operan en las partículas que componen la sustancia, intensificándolas en un sentido y debilitándolas en sentido opuesto, dando lugar a descomposiciones y recomposiciones de las partículas y produciéndose así la transferencia de elementos entre los electrodos. Faraday habría utilizado ideas similares en su explicación de la corriente generada por la pila voltaica.

Como es bien sabido, Faraday era un firme partidario de la teoría química de la pila y la Serie VIII está dedicada a exponer argumentos en su favor. En este contexto Faraday escribe:

Assuming it sufficiently proved, by the preceding experiments and considerations, that the electro-motive action depends, when zinc, platina, and dilute sulphuric acid are used, upon the mutual affinity of the metal zinc and the oxygen of the water (921. 924.), it would appear that the metal, when alone, has not the power enough, under the circumstances, to take the oxygen and expel the hydrogen from the water; for in fact no such action takes place. But it would also appear that it has power so far to act, by its attraction for the oxygen of the particles in contact with it, as to place the similar forces already active between these and the other particles of oxygen and the particles of hydrogen in the water, in a peculiar state of tension or polarity, and probably also at the same time to throw those of its own particles which are in contact with the water into a similar but opposed state.²²

²¹ *Ibidem*, p. 265.

²² *ERE*, Serie VIII, §949.

Cuando se completa el circuito, el estado de tensión se descarga produciéndose la corriente eléctrica. Es precisamente este "peculiar state of tension or polarity" el que Williams identifica con el estado electro-tónico, que por tanto habría sido reintroducido por primera vez en la electroquímica, después de su abandono en la Serie II. El mismo esquema teórico se reproduciría en la inducción electrostática, que se vería asimismo como una acción de partículas contiguas del medio dieléctrico que adoptan el estado electro-tónico.

La interpretación de Williams no es, sin embargo, convincente. Es cierto que, como vimos en la Serie I, en la sección dedicada al estado electro-tónico Faraday había hecho un intento de explicar cómo la noción podría aplicarse a la descomposición de un electrolito por el que pasa una corriente.²³ Sin embargo, cuando realmente se expone la teoría de la descomposición electroquímica, esto es, en los §§518-525 de la Serie V, parece haberse abandonado el intento de aplicar la noción de estado electro-tónico. No se menciona ningún estado de tensión ni se recurre a ninguna noción que pueda relacionarse con el estado electro-tónico. Por consiguiente, la evidencia que podría respaldar la idea de Williams de que Faraday reintrodujo el estado electro-tónico en la electroquímica se reduce al texto de Faraday que acabo de citar. Ahora bien, ¿podemos concluir que ese estado de tensión que allí se menciona coincide con el estado electro-tónico? No parece que sea así, puesto que lo que se nos dice en el texto es que el estado de tensión se crea por las fuerzas de afinidad química existentes entre el zinc y el oxígeno del agua, o sea, algo muy distinto de la causa de la producción del estado que estos momentos Faraday considera.

²³ ERE, Serie I, §76.

Con ello no quiero decir que no se pueda ver en este estado de tensión, cuya descarga constituye la corriente generada en la pila voltaica, el antecedente más próximo de ese estado de polarización de las partículas del dieléctrico sometido a la fuerza electrostática. Ciertamente, es razonable pensar que el segundo constituye básicamente una aplicación del primero al caso de la inducción electrostática. Máxime cuando se piensa que la idea de esta última como una acción de partículas contiguas, tan claramente expuesta en la Serie XI, no está presente en los primeros escritos --de hecho en la Serie I la inducción electrostática no se ve como una acción de partículas.²⁴ Lo que estoy argumentando es que ni el estado de tensión en el electrolito ni el estado de polarización del dieléctrico pueden ser identificados con el estado electro-tónico.

Es cierto que el estado electro-tónico interviene en la teoría de la electricidad y el magnetismo que Faraday intenta construir una vez que ha desarrollado su teoría de la inducción electrostática, pero su papel es muy diferente, como hemos tenido ocasión de ver. Aparece, al final de las Series XIII y XIV, relacionado con dos problemas. En primer lugar, Faraday lo identifica con el estado que deberían adoptar las partículas de la materia, conductora o no, cuando están sometidas a la fuerza magnética y que sería responsable de la transmisión de esta última. En segundo lugar, el estado se relaciona de forma ambigua con la tensión repulsiva de las líneas de inducción electrostática. A este respecto parece identificarse con un estado estático de la fuerza magnética que Faraday está convencido de que debería existir, aunque es incapaz de encontrar ninguna evidencia experimental en su favor.

²⁴ *Ibidem*, §73.

Hay otros argumentos que se oponen a la interpretación de Williams. Argumentos que dependen del estilo con que Faraday introduce y discute sus ideas teóricas, y en particular su noción de estado electro-tónico. Cuando recurre a él en las Series XIII y XIV lo hace mencionándolo explícitamente. Asimismo, hemos visto cómo al comienzo de su investigación de la autoinducción no ha tenido ningún inconveniente en mencionarlo en la carta a Phillips de 17 de octubre de 1834, afirmando que veía ciertas indicaciones de la existencia del estado. También en el §1114 de la Serie IX, donde claramente está discutiendo las características del estado electro-tónico, aunque no lo menciona explícitamente se preocupa de remitir al lector a párrafos anteriores donde el estado sí es mencionado, de forma que la identificación es inequívoca. Si, como piensa Williams, el estado ha sido introducido en la electroquímica y, más tarde, aplicado a la inducción electrostática, ¿por qué no lo menciona nunca en ninguno de los dos contextos? ¿por qué se deja en esta ocasión que sea el lector el que deduzca por su cuenta que se trata del estado electro-tónico, cuando otras veces se le dirige cuidadosamente? Por último, resulta también significativo en esta misma línea de argumentación que, a partir de la Serie IX, siempre que Faraday recurre al estado electro-tónico remite al lector a un grupo de párrafos anteriores donde se trata de la noción. Pues bien, en ninguno de estos grupos se encontrarán párrafos que formen parte de las Series dedicadas a la electroquímica o de la exposición de su teoría de la inducción electrostática.

Un segundo punto de la interpretación del estado electro-tónico que Williams ofrece en su biografía de Faraday requiere discusión. Está relacionado con el descubrimiento de la rotación del plano de

polarización de la luz en 1845. Ya hemos visto que a finales de agosto de 1845 Faraday, a sugerencia de Kelvin, comenzó de nuevo a experimentar con dieléctricos sometidos a una fuerza eléctrica. Pasando un rayo de luz polarizada intentaba descubrir evidencia del estado de polarización en que debían encontrarse sus partículas, de acuerdo con su teoría de la inducción electrostática. En un momento dado decidió cambiar la fuerza eléctrica por una intensa fuerza magnética, y obtuvo la rotación del plano de polarización de la luz.

Williams, fiel a su identificación del estado de polarización de los dieléctricos con el estado electro-tónico, explica el cambio de fuerza eléctrica por fuerza magnética así:

In the case of electrostatic induction Faraday had argued that the fact that induction took place along curved lines implied that the transmission of force was from particle to particle. The intermolecular strain thus created was the electrotonic state. Surely the curves of magnetic lines of force implied equally a 'magneto-tonic' state and, since the magnetic power could be multiplied almost at will by the use of electromagnets, this state might be detectable where the electrotonic state was not.²⁵

Este estado 'magneto-tónico' sería el responsable de la rotación del plano de polarización de la luz. Ahora bien, este estado 'magneto-tónico' lo inventa Williams, Faraday jamás utilizó este término. Y no lo hizo porque, en realidad, como he argumentado anteriormente²⁶, Faraday no cree haber encontrado un nuevo estado: el estado responsable del nuevo efecto es el estado electro-tónico. Para comprenderlo basta tener en cuenta la continuidad de la línea de investigación de Faraday en este

²⁵ WILLIAMS-1965, p. 386. También se refiere al estado 'magneto-tónico' en pp. 391 y 428.

²⁶ Véase sección 5. 1 del Capítulo 5.

punto con la problemática que había planteado al final de las Series XIII y XIV. Allí señalaba que la fuerza magnética debería transmitirse como la eléctrica, esto es, mediante la acción de las partículas contiguas del medio, las cuales en esta transmisión adoptarían el estado electro-tónico. Sus experimentos habían sido entonces infructuosos, pero ahora que cree haber encontrado alguna evidencia favorable, inmediatamente recurre a su estado electro-tónico, como queda claro por las referencias de la Serie XIX a párrafos de la Serie XIV, donde el estado era mencionado explícitamente.

No hace falta pues inventar ningún estado 'magneto-tónico' para dar cuenta de la actitud de Faraday ante su nuevo descubrimiento. Lo que ocurre es que Williams, al haber identificado el estado electro-tónico con el estado de polarización de los dieléctricos, ha pasado por alto los párrafos de las Series XIII y XIV que dificultan decisivamente esta identificación, y al analizar el descubrimiento de la rotación del plano de polarización de la luz, no ha visto la continuidad de la línea de investigación que sigue Faraday. Por eso se ha visto obligado a inventar un estado nuevo, el estado 'magneto-tónico'.²⁷

El último punto que quiero abordar en relación a la interpretación de Williams del estado electro-tónico no se trata, como en los dos casos anteriores, de una cuestión de diferencia de análisis. Se trata de una omisión inexplicable que dificulta decisivamente la correcta comprensión de la evolución que ha experimentado la noción de estado electro-tónico

²⁷ Berkson también critica la invención de Williams de un estado 'magneto-tónico', pero su comentario más que aclarar el problema lo oscurece, porque parece atribuir a Williams la creencia de que Faraday había abandonado el estado electro-tónico, lo cual es claramente incorrecto. Williams afirma claramente que después de abandonar el estado en la Serie II, Faraday lo reintrodujo en la electroquímica. (BERKSON-1974, p. 334).

en la obra de Faraday. En el capítulo anterior he discutido largamente el importante artículo en que Faraday argumentaba la realidad de las líneas de fuerza, "On the Physical Character of the Lines of Magnetic Force" publicado en 1852. En particular me he detenido en el §3269 de este artículo, pues era allí donde Faraday recurría de nuevo a su estado electro-tónico en un contexto dominado por el problema de la naturaleza de las líneas de fuerza magnética. Se trataba de ver si las líneas tenían una naturaleza estática o dinámica.²⁸

Williams, naturalmente, no ignora este problema crucial y lo discute detalladamente. Sin embargo, pasa por alto la explícita mención de Faraday al estado electro-tónico en el §3269. Recordemos que en dicho párrafo Faraday escribe:

Again and again the idea of an *electro-tonic* state (60. 1114. 1661. 1729. 1733.) has been forced on my mind; such a state would coincide and become identified with that which would then constitute the physical lines of magnetic force.

En este texto se deja claro que si las líneas de fuerza tuvieran un fundamento estático, éste consistiría en un estado de tensión que coincidiría con el estado electro-tónico. Lo que resulta inexplicable es que Williams, que en su discusión ha concluido que Faraday terminó por decidirse en favor de la alternativa estática, omita el papel del estado electro-tónico. Es curioso que casi el único párrafo que Williams no discute sea precisamente el §3269.²⁹

Con ello se omite la transformación final que la noción de estado electro-tónico ha sufrido. De esta forma Williams dificulta el

²⁸ Véase Capítulo 5, sección 5. 3. 3.

²⁹ Cf., WILLIAMS-1965, pp. 450-454.

reconocimiento de que lo que tenemos aquí es la etapa final de la historia del estado electro-tónico, y con ello traiciona de alguna manera al propio Faraday quien, en la lista de párrafos que añade después de la mención al estado electro-tónico, parece haber querido apuntar a los hitos principales de dicha historia.

Sólo cabe una explicación al descuido de Williams. Al haber situado la reintroducción del estado electro-tonico, después de su abandono en la Serie II, en la electroquímica, y posteriormente haberlo identificado con el estado de polarización de un dieléctrico sometido a la fuerza eléctrica, le ha pasado por alto el papel del estado en los dos problemas que se tratan en los párrafos finales de las Series XIII y XIV, esto es, la transmisión de la fuerza magnética y la correspondencia entre estados, estático y dinámico, de la fuerza eléctrica y magnética. Ello le ha llevado a ignorar el papel del estado electro-tónico en "On the Physical Character of the Lines of Magnetic Force", que es donde Faraday retoma este segundo problema y lo vincula con el de la naturaleza de las líneas de fuerza magnética.

Los trabajos posteriores a la biografía de Williams no han remediado totalmente sus omisiones o los puntos dudosos de su interpretación. Es el caso de Agassi, en su trabajo de 1971 *Faraday as a Natural Philosopher*. Agassi se ocupa de la teoría del estado electro-tónico en lo que respecta a la inducción electromagnética pero poco más. Ignora el papel del estado electro-tónico en el intento de construir una teoría unificada de la electricidad y el magnetismo, perceptible en los párrafos finales de las Series XIII y XIV, y también la inserción del estado en la problemática de la naturaleza de las líneas de fuerza magnética.

Por el contrario, Berkson, en su *Fields of Force* de 1974 se ha

mostrado más perceptivo frente a la noción de estado electro-tónico y ha señalado diversos puntos de interés. Aquí sólo quiero recordar el que hace referencia a su sugerencia de que para Faraday, si bien el corte de líneas de fuerza permitía expresar adecuadamente la ley de la inducción magneto-eléctrica, era el estado electro-tónico el que proporcionaba una explicación causal de la inducción. Sin embargo su trabajo adolece de la misma omisión fundamental que los de los autores anteriores: no sigue la evolución de la noción de estado electro-tónico hasta el final, y por tanto pasa por alto la íntima relación que Faraday establece entre el estado y las líneas de fuerza en el periodo final de su obra.

A mi juicio, después de la biografía de Williams el impulso más renovador en los estudios sobre la obra de Faraday se debe a las investigaciones de David Gooding. En diversos artículos ha clarificado multitud de puntos oscuros: los supuestos que moldearon el concepto de Faraday de la fuerza, su uso de los principios de conservación y conversión, el proceso que llevó al concepto de campo magnético en la investigación del diamagnetismo, entre otros. Sin embargo, en la cuestión del concepto de estado electro-tónico su atención se ha concentrado fundamentalmente en el origen del concepto en el descubrimiento de la inducción electromagnética, sin seguir la evolución posterior del concepto. En su caso la paradoja es que, habiendo sido él quien con más atención ha estudiado la problemática de la correspondencia entre los estados de la fuerza eléctrica y magnética, ha pasado por alto el papel del estado electro-tónico en ella.

En lo que respecta a la noción de estado electro-tónico, el común denominador de los trabajos de los autores mencionados reside en la parcialidad de sus análisis. El concepto ha atraído su atención

fundamentalmente en su nacimiento, a raíz del descubrimiento de la inducción electromagnética, lo cual quizá podría explicarse, en la mayoría de los casos, admitiendo que en ese contexto el estado se ha considerado como el contrapunto "oscuro" de la noción "clara", las líneas de fuerza, y por tanto el problema era determinar cómo se ha pasado del uno a las otras. Una vez afirmada la noción de las líneas de fuerza la noción de estado electro-tónico pierde interés. No era este el punto de vista de Faraday, y a lo largo de muchos años se esforzó en compatibilizar ambas ideas. El objetivo de los capítulos precedentes ha sido trazar la historia de este esfuerzo, intentando así llenar un hueco en la historiografía.

CONCLUSIONES

Como todos los que le habían precedido en la búsqueda de las corrientes inducidas, Faraday, asumiendo un paralelismo entre la electricidad estática y la corriente eléctrica, intentaba detectar una corriente inducida permanente. El concepto de estado electro-tónico constituye su respuesta a dos anomalías que, desde su punto de vista, el fenómeno de inducción electromagnética que ha descubierto en 1831 presenta: el carácter transitorio de la corriente inducida y el carácter recurrente del fenómeno. Si se supone que el conductor sometido a inducción se encuentra en un estado peculiar, ambas anomalías puede resolverse admitiendo que el estado resiste la formación de la primera corriente y origina la segunda.

En un primer momento, el error de Faraday en la determinación del sentido de las corrientes inducidas ha debido jugar un importante papel en el alumbramiento del concepto de estado electro-tónico, pues, si se cree que la corriente inducida tiene el mismo sentido que la inductora, resulta intuitivo considerar que "algo" resiste su desarrollo. Asimismo, parece igualmente intuitivo considerar que, cuando este "algo" desaparece, el resultado es otra corriente en sentido opuesto.

Con estas ideas Faraday pone a punto, en la Serie I, una explicación del proceso de inducción en sus dos variedades, volta-eléctrica y magneto-eléctrica. En ambas, un conductor sometido a inducción se encuentra en estado electro-tónico que se asume instantáneamente. En la primera o por una resistencia dinámica a la formación de la corriente

inducida hasta que corriente y estado llegan a un equilibrio. Cuando se elimina la fuerza inductiva el estado desaparece y la ruptura del equilibrio da lugar a una corriente inducida en sentido opuesto.

En el caso de la inducción magneto-eléctrica, el aspecto dinámico de la resistencia opuesta por el estado electro-tónico a la corriente inducida es particularmente claro. Cuando un conductor se aleja o se acerca a un imán se induce una corriente de mayor duración que en el caso de la inducción volta-eléctrica porque el estado-eléctrotónico va variando de grado. Esto es, cuando el conductor se va acercando tanto la corriente inducida como el estado van aumentando hasta que se llega al equilibrio y la corriente se detiene. Cuando el conductor se aleja del imán el estado electro-tónico va disminuyendo de grado con lo que disminuye su resistencia a la corriente y el resultado es de nuevo una corriente inducida.

El examen del *Diary* revela la percepción de Faraday de dos dificultades en la teoría del estado electro-tónico. La primera tiene que ver con su descubrimiento del error cometido en la determinación del sentido de las corrientes inducidas. Por una parte, el descubrimiento del sentido correcto de la primera corriente inducida en la inducción volta-eléctrica respecto del de la inductora debilita el aspecto intuitivo del obstáculo al desarrollo de la corriente inducida. Por otra parte, el descubrimiento simultáneo de que, apoyándose en la noción del corte de las curvas magnéticas, es posible formular una ley que proporcione el sentido de las corrientes en la inducción magneto-eléctrica, estimula la búsqueda de una extensión de esta ley a la inducción volta-eléctrica. Cuando esto se consigue, se hace evidente la ventaja de la noción del corte de curvas magnéticas: permite formular una explicación unificada de una de las características más relevantes del fenómeno de inducción,

el sentido de las corrientes inducidas, algo que el concepto de estado electro-tónico no consigue.

La segunda dificultad tiene que ver con la idea de Faraday de que el estado electro-tónico está producido por la fuerza magnética. Si es así, para que el estado oponga una resistencia dinámica a la corriente inducida, esto es, varíe de grado, parece requerirse que, en la inducción magneto-eléctrica, el conductor atravesase regiones de fuerza magnética variable. La variación del estado parece exigir una variación de su causa, la fuerza magnética. El *Diary* muestra que Faraday percibió así el problema cuando descubrió que bastaba el movimiento relativo del conductor respecto a las líneas de fuerza magnética para que se indujera en él una corriente.

Estos dos problemas condujeron al abandono en la Serie II de la noción de estado electro-tónico. Sin embargo, el concepto siguió formando parte de sus reflexiones sobre el fenómeno de inducción. Y ello por dos razones. En primer lugar, porque Faraday seguía aferrado a su idea de que el fenómeno debía ser permanente. En segundo lugar, porque, desde su punto de vista, con la noción del corte de las líneas magnéticas no se tiene una explicación completa del fenómeno de inducción. El corte de líneas explica cómo se produce la inducción, pero no da idea del proceso físico en el conductor. Lo que se requiere para una explicación completa es una armonización de ambos conceptos, el corte de líneas de fuerza y el estado electro-tónico.

Con la investigación del fenómeno de autoinducción, en 1834, Faraday va a dotar de una dimensión causal a su concepto de estado electro-tónico, eliminando su aspecto de resistencia a la corriente inducida. En la investigación del fenómeno Faraday ha concentrado su

atención en los efectos inductivos que se producen al interrumpirse la corriente inductora. Para preservar el principio de conservación de la fuerza, Faraday recurre a su estado electro-tónico. La fuerza magnética asociada a la corriente inductora es la que sostiene el estado de tensión en el conductor, estado de tensión que, al interrumpirse la corriente, se descargará produciendo una corriente inducida de 'intensidad' mayor. El estado está jugando el papel de una especie de acumulador de fuerza que se manifiesta cuando se interrumpe la corriente inductora. Así se evita lo que para Faraday sería inconcebible: la creación de fuerza. El que la corriente inducida tenga 'cantidad' e 'intensidad' mayor que la inductora no implica que se cree fuerza en el proceso; de alguna manera esa fuerza adicional se ha ido almacenando en el acumulador, el estado electro-tónico, y proviene de la fuerza magnética de la propia corriente original.

El mecanismo de actuación del estado se inscribe dentro de un proceso de conversión y reconversión entre la fuerza eléctrica y la magnética. Un proceso en el que la convertibilidad no sigue una proporción fija, y que Faraday intenta comprender imaginando los siguientes términos conectados entre sí: fuerza eléctrica, fuerza magnética, estado electro-tónico y corriente inducida final, aunque confiesa desconocer sus particularidades. Con ello, el estado electro-tónico aparece como un eslabón en la cadena de acción que produce la corriente inducida.

Con los resultados alcanzados en su investigación de la inducción electrostática, Faraday cree tener, en 1838, los elementos para construir una teoría unificada de la electricidad y el magnetismo. Dos problemas deben ser superados para que ello sea posible. En primer lugar, que exista la necesaria correspondencia --exigida por el principio de unidad

de las fuerzas-- entre estados de la fuerza eléctrica y magnética. En segundo lugar, que se demuestre la igualdad del modo de transmisión de ambas fuerzas. En ambos problemas Faraday recurrirá de nuevo a su estado electro-tónico.

En lo que respecta al primer problema, el estado electro-tónico parece suplir, de forma no muy clara, el estado estático del magnetismo que Faraday necesita para completar la correspondencia entre las fuerzas eléctrica y magnética. La fuerza eléctrica parece tener claramente dos estados, la electricidad estática y la corriente. Este última lleva asociada un estado de la fuerza magnética representado por las líneas de fuerza magnética que la rodean. La dificultad estriba en identificar el correspondiente estado de la fuerza magnética asociado con la electricidad estática. Faraday identifica este estado de la fuerza magnética con la tensión repulsiva de las líneas de inducción electrostática y, asimismo, parece identificar esta tensión repulsiva con su estado electro-tónico.

El problema del modo de transmisión de la fuerza magnética intenta resolverlo retomando una sugerencia, ya contenida en la Serie I, según la cual el estado electro-tónico podía ser adoptado por toda la materia. Esta generalización resulta ser ahora una consecuencia de una teoría de la electricidad que ha eliminado toda diferencia cualitativa entre conductores y no conductores. Lo que Faraday propone es que, si la fuerza magnética no se transmite mediante una pura acción a distancia, esto es, si sigue el modelo de transmisión que él cree haber demostrado para la fuerza electrostática, o sea la acción de partículas contiguas, entonces las partículas que transmiten la acción magnética se encuentran en estado electro-tónico. Esto es, el estado electro-tónico es

el análogo para la fuerza magnética del estado de polarización de las partículas del medio que transmiten la fuerza eléctrica.

El problema de la correspondencia entre estados de la fuerza eléctrica y magnética se aborda de nuevo en la etapa final de las investigaciones de Faraday, en los años cincuenta del siglo XIX, una etapa presidida por su esfuerzo de sistematización de sus ideas sobre las líneas de fuerza magnética. El contexto teórico es el de las reflexiones sobre la naturaleza de las líneas. Una vez establecida la curvatura de las líneas de fuerza magnética, y por consiguiente, desde el punto de vista de Faraday, su existencia física, se plantea el problema de su naturaleza física.

Ya que en su análisis de la fuerza eléctrica había distinguido dos estados, estático y dinámico, la creencia en la unidad de las fuerzas le impulsa a distinguir también en la fuerza magnética dos estados correspondientes. Hay una fuerte analogía entre la línea de fuerza magnética y la corriente eléctrica que hablaría en favor de la naturaleza dinámica de la primera, pero con una matización crucial: no se trata de una naturaleza puramente dinámica. La línea de fuerza magnética tiene un fundamento estático en un estado de tensión, el estado electro-tónico. El estado ha adquirido una importancia decisiva en las reflexiones de la última etapa de la carrera de Faraday. El estado electro-tónico ocupa el "hueco" en la serie de estados de la fuerza magnética detectado desde sus investigaciones sobre la fuerza eléctrica. El estado se identifica con el estado estático de la fuerza magnética y por tanto permite preservar la necesaria unidad entre las dos fuerzas. Para poder cumplir este papel Faraday ha introducido una última transformación en su noción de estado electro-tónico. Hasta aquí el estado había sido únicamente una condición de la materia. En estas últimas reflexiones, dando un paso más, el estado

se independiza de la materia, al menos de la materia ponderable.

Con ello se consigue la deseada armonización entre las nociones de estado electro-tónico y corte de líneas de fuerza, que, desde el punto de vista de Faraday, permite una explicación más completa del fenómeno de inducción de corrientes. La corriente se induce en un conductor cuando se mueve cortando las líneas de fuerza, pero es la descarga de un estado de tensión existente en el espacio, que es el fundamento estático de las líneas de fuerza, el estado electro-tónico.

BIBLIOGRAFÍA

Nota: El asterisco (*) indica la edición a que se refiere en las notas.

AGASSI, Joseph

1971 *Faraday as a Natural Philosopher*, The University of Chicago Press, Chicago & London.

1978 "Williams Dodges Agassi's Criticism", *The British Journal for the Philosophy of Science*, 29, 248-252.

BECQUEREL, A. C., y BECQUEREL, A. E.,

Résumé *Résumé de l'histoire de l'électricité et du magnétisme, et des applications de ces sciences à la chimie, aux sciences naturelles, et aux arts*, Paris, 1858.

BENCE JONES, Henry

1870 *The Life and Letters of Faraday*, 2 vols. London; Lippincott and Co, Philadelphia * .

BERKSON, William

1974 *Fields of Force. The Development of a World*

View from Faraday to Einstein, Routledge and Kegan Paul, London.

1978 "Reply to L. Pearce Williams", *The British Journal for the Philosophy of Science*, 29, 243-248.

BLONDEL, Christine

1982 *A.-M. Ampère et la création of l'électrodynamique (1820-1827)*, Bibliothèque Nationale, Paris.

1985 "Ampère and the Programming of Research", *Isis*, 76, 559-561.

BROWN, Theodore M.

1969 "The Electric Current in Early Nineteenth-Century French Physics", *Historical Studies in the Physical Sciences*, 1, 61-10.

BUCHWALD, Jed Z.

1977 "William Thomson and the Mathematization of Faraday's Electrostatics", *Historical Studies in the Physical Sciences*, 8, 101-136.

CAMPBELL, Lewis y William GARNETT

1884 *The Life of James Clerk Maxwell*, Macmillan and Co, London.

CANEVA, Kenneth L.

1980

**"Ampère, the Etherians, and the Oersted
Connexion", *The British Journal for the History
of Science*, 13, 121-138.**

DAVY, Humphry

1823

**"On a New Phenomenon of Electro-
Magnetism", *Philosophical Transactions*, 113,
153-159.**

DEMONFERRAND, J. C. F.

Manuel

***Manuel d'électricité dynamique, ou traité sur
l'action mutuelle des conducteurs électriques
et des aimans, et sur la nouvelle théorie du
magnetisme; pour faire suite à
tous les Traités de Physique élémentaire,
Paris, 1823.***

DIBNER, Ben

1961

***Oersted and the discovery of
Electromagnetism, Burndy Library, Norwalk.***

DONCEL, Manuel G.

1982

***De la Física Mecanicista a la Teoría de
Campos, Universidad de Santander,
Santander.***

- 1987 *El campo electromagnético*, Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Madrid.
- DORAN, Barbara G.
1975 "Origins and Consolidation of Field Theory in Nineteenth-Century Britain: From the Mechanical to the Electromagnetic View of Nature", *Historical Studies in the Physical Sciences*, 6, 133-260.
- EVERITT, C. W. F.
1975 *James Clerk Maxwell, Physicist and Natural Philosopher*, Charles Scribner's Sons, New York.
- EULER, Leonhard
Lettres *Lettres à une Princesse d'Allemagne sur divers sujets de physique et de philosophie*, 3 vols., Imprimerie de l'Académie Impériale des sciences, Saint Petersburg, 1768-1772.
- FARADAY, Michael
Historical Sketch "Historical Sketch of Electro-magnetism", *Annals of Philosophy*, 18 (1821), 195-200,

274-290; 19 (1822), 107-121.

- ERE** *Experimental Researches in Electricity*, 3 vols., Taylor and Francis, London, 1839-1855. Reedición facsímil en 2 vols.: Dover, New York, 1965 *.
- Conservation** "On the Conservation of Force", *Philosophical Magazine*, 13 (1857), 225-239. También contenido en M. Faraday, *Experimental Researches in Chemistry and Physics*, Taylor and Francis, London, 1859 *.
- Diary** Martin, T., (ed.) *Faraday's Diary. Being the various philosophical notes of experimental investigation made by Michael Faraday, DCL, FRS, during the years 1820-1862 and bequeathed by him to the Royal Institution of Great Britain*, 7 vols., London, 1932-1936.
- Corres** Williams, L.P., (ed.), *The Selected Correspondence of Michael Faraday*, 2 vols., Cambridge University Press, London, 1971.
- 1971** *Investigaciones experimentales de electricidad. Series I a V*, traducción de Rosa Schapsis de Zimmerman; revisión técnica, introducción y notas de Ernesto E. Galloni,

**Editorial Universitaria de Buenos Aires,
Buenos Aires.**

GARDINER, K. R., y D. L. GARDINER

1965 "A. M. Ampère and his English Acquaintances",
The British Journal for the History of Science,
2, 235-245.

GOODING, David

1978 "Conceptual and Experimental Bases of
Faraday's Denial of Electrostatic Action at a
Distance", *Studies in the History and
Philosophy of Science*, **9**, 117-149.

1980a "Metaphysics versus Measurement: The
Conversion and Conservation of Force in
Faraday's Physics", *Annals of Science*, **37**, 1-
29.

1980b "Faraday, Thomson, and the Concept of the
Magnetic Field", *The British Journal for the
History of Science*, **13**, 91-120.

1981 "Final Steps to the Field Theory: Faraday's
Study of Magnetic Phenomena, 1845-1850",
Historical Studies in the Physical Sciences,
11, 231-275.

- 1982 "A Convergence of Opinion on the Divergence of Lines: Faraday and Thomson's Discussion of Diamagnetism", *Notes and Records of the Royal Society*, 36, 243-259.
- GOODING, David, y Frank A. J. JAMES (eds.)
- 1985 *Faraday Rediscovered. Essays in the Life and Work of Michael Faraday, 1791-1867*, Stockton Press, New York.
- GOWER, Barry
- 1973 "Speculation in Physics: The History and Practice of *Naturphilosophie*", *Studies in the History and Philosophy of Science*, 3, 301-356.
- GURALNICK, Stanley M.
- 1979 "The Contexts of Faraday's Electrochemical Laws", *Isis*, 70, 59-75.
- HARRIS, William S.
- 1867 *Treatise on Frictional Electricity, in Theory and Practice*, Virtue and Co, London.
- HEILBRON, John L.
- 1981 "The Electrical Field Before Faraday", Cantor, G. N. y M. J. S. Hodge, (eds.): *Conceptions of*

Ether. Studies in the History of Ether Theories, 1740-1900, Cambridge University Press, Cambridge, pp. 187-215.

1982 *Elements of Early Modern Physics*, University of California Press, Berkeley, Los Angeles, London.

HEIMANN, P. M.

1970 "Maxwell and the Modes of Consistent Representation", *Archive for the History of Exact Sciences*, 6, 171-213.

1971 "Faraday's Theories of Matter and Electricity", *The British Journal for the History of Science*, 5, 235-257.

1974 "Conservation of Forces and the Conservation of Energy", *Centaurus*, 18, 147-161.

HELMHOLTZ, Hermann von

1881 "The Modern Development of Faraday's Conception of Electricity", Kahl, R., (ed.), *Selected Writings of Hermann von Helmholtz*, Wesleyan University Press, Middletown, 1971*, 409-436.

HENRY, Joseph

1832

"On the Production of Currents and Sparks of Electricity from Magnetism", *American Journal of Science*, 22, 403-408.

1835

"Facts in reference to Spark &. from a long conductor uniting the poles of a Galvanic Battery", *American Journal of Science*, 28, 327-331.

1839

"On Electro-Dynamic Induction", *Transactions of the American Philosophical Society*, 6, 303-337.

HESSE, Mary B.

1962

***Forces and Fields. The concept of Action at a Distance in the history of physics*, Greenwood Press, Wesport.**

KARGON, Robert

1964

"William R. Hamilton, Michael Faraday, and the Revival of Boschovichean Atomism", *American Journal of Physics*, 32, 792-795.

KNUDSEN, Ole

1975

"The Faraday Effect and Physical Theory, 1845-1873", *Archive for the History of Exact*

Sciences, 15, 235-281.

KUHN, Thomas S.

1959 "Energy Conservation as an Example of Simultaneous Discovery", Kuhn, T. S., *The Essential Tension*, The University of Chicago Press, Chicago and London, 1977, 66-105.

1967 Recensión de WILLIAMS-1965, *The British Journal for the Philosophy of Science*, 18, 148-154.

LA RIVE, Auguste de

Traité *Traité d'Électricité Théorique et Appliquée*, 2 vols., Paris, 1854-1858.

1867 "Notice sur Michael Faraday, sa vie et ses travaux", *Archive des Sciences, de la Bibliothèque Universelle*, 30, 131-176.
Traducción inglesa: "Michael Faraday. His Life and Works", *Philosophical Magazine*, 34 (1867), 409-436, y *Annual Report of The Board of Regents of the Smithsonian Institution*, Government Printing Office, Washington, 227-245, 1872 *.

LEVERE, Trevor H.

- 1968 "Faraday, Matter and Natural Theology -- Reflections on an Unpublished Manuscript", *The British Journal for the History of Science*, 4, 95-107.

LORENZO, José Antonio de

- 1990 *Maxwell y la geometrización del estado electrotónico*. No publicado.

MARTIN, Thomas

- 1949 *Faraday's Discovery of Electro-Magnetic Induction*, Arnold and Co, London.

MAXWELL, James C.

- Treatise* *A Treatise on Electricity and Magnetism*, 2 vols., Clarendon Press, Oxford, 1873. Reedición en Dover, New York, 1954*.

- 1881 *An Elementary Treatise on Electricity*, Oxford.

- Papers* Niven, W. D., (ed.) *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell*, 2 vols., Cambridge University Press, Cambridge, 1890. Dover Publications, New York, 1965*.

McGUIRE, J. E.

- 1966 "Intellectual History or Scientific Biography?",

History of Science, 5, 140-144.

MEMOIRES

1885

Joubert, J., (ed.), *Collection de Mémoires relatifs à la physique*, tome II: *Mémoires sur l'Electrodynamique*, Gauthier-Villars, Paris.

MILLER, Arthur I.

1981

"Unipolar Induction: A Case Study of the Interaction Between Science and Technology", *Annals of Science*, 38, 155-189.

NERSESSIAN, Nancy J.

1984

Faraday to Einstein: Constructing Meaning in Scientific Theories, Martinus Nijhoff, Dordrecht.

OERSTED, Hans C.,

Experiments

"Experiments on the Effect of a Current of Electricity on the Magnetic Needle", *Annals of Philosophy*, 16 (1820), 273-276.

ORESQUES, Naomi

1987

"Michael Faraday's Lines of Force: Visual Imagery and Physical Reality". No publicado.

ROSS, Sydney

- 1961 "Faraday Consults the Scholars: The Origins of the Terms of Electrochemistry", *Notes and Records of the Royal Society*, 16, 187-220.
- 1965 "The Search for Electromagnetic Induction, 1820-1831", *Notes and Records of the Royal Society*, 20, 184-219.

SCOTT, W. T.

- 1964 "A Bibliographic Reference Table for Faraday's Papers on Electricity", *The Natural Philosopher*, 3, 77-95.

SPENCER, James B.

- 1967 "Boscovich's Theory and its Relation to Faraday's Researches: An Analytic Approach", *Archive for the History of Exact Sciences*, 4, 184-202.

STAUFFER, Robert C.

- 1953 "Persistent Errors Regarding Oersted's Discovery of Electromagnetism", *Isis*, 44, 307-310.
- 1957 "Speculation and Experiment in the Background of Oersted's Discovery of

Electromagnetism", *Isis*, 48, 33-50.

TAIT, Peter G.

1898

"Force", *Scientific Papers*, 2 vols., Cambridge University Press, Cambridge, 1898-1900, vol. 1, 256-269.

THOMPSON, Silvanus P.

1898

Michael Faraday. His Life and Work, London, Cassell and Company; reedición 1901*.

TRICKER, R. A. R.

1966

The Contributions of Faraday and Maxwell to Electrical Science, Pergamon Press, Oxford.

TYNDALL, John

1868

Faraday as a Discoverer, London: Appleton and Company, New York*.

WHEWELL, William

1837

History of the Inductive Sciences, from the Earliest to the Present Times, London.

WHITTAKER, Edmund

1910

A History of the Theories of Aether and Electricity from the Age of Descartes to the Close of the Nineteenth Century, Longmans, Green, and Co, London.

WILLIAMS, Leslie P.

- 1960 "Michael Faraday and the Evolution of the Concept of the Electric and Magnetic Field", *Nature*, 187, 730-733.
- 1962 "Ampère's Electrodynamical Molecular Model", *Contemporary Physics*, 4, 113-123.
- 1965 *Michael Faraday, A Biography*, Chapman and Hall, London.
- 1968 "Epistemology and Experiment: The Case of Michael Faraday", Lakatos, I., y Musgrave, A., (eds.), *Problems in the Philosophy of Science Proceedings of the International Colloquium in the Philosophy of Science, London, 1965, volume 3*, North-Holland Publishing Company, Amsterdam, 1968, 231-248.
- 1973 "Kant, *Naturphilosophie* and Scientific Method", Giere, R. N., y R. S. Westfall, (eds.), *Foundation of Scientific Method: The Nineteenth Century*, Indiana University Press, Bloomington, 3-22.
- 1975 "Should Philosophers Be Allowed to Write

History?", *The British Journal for the Philosophy of Science*, **26**, 241-253.

1980 *The Origins of Field Theory*, University Press of America, Boston.

1983 "What were Ampère's Earliest Discoveries in Electrodynamics?", *Isis*, **74**, 492-508.

1986 "Why Ampère Did Not Discover Electromagnetic Induction?", *American Journal of Physics*, **54**, 306-311.

WISE, M. Norton

1979 "The Mutual Embrace of Electricity and Magnetism", *Science*, **203**, 1310-1318.

1981 "The Flow Analogy to Electricity and Magnetism, Part I: William Thomson's Reformulation of Action at a Distance", *Archive for the History of Exact Sciences*, **25**, 19-70.