

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

2. 4. 2. Presentación del estado electro-tónico

Esta condición eléctrica peculiar, el estado electro-tónico, es el objeto de toda la sección tercera de la Serie I. La sección va precedida por una nota añadida para la publicación de la Serie en las *Philosophical Transactions*, en la que Faraday explica que conserva la sección como parte de la Serie porque se leyó en la Royal Society, y además porque sus contenidos eran conocidos en la Academia de París merced a su carta a Hachette. Faraday advierte, sin embargo, que investigaciones posteriores sobre las leyes que rigen los fenómenos de inducción le hacen pensar que dichos fenómenos pueden explicarse completamente sin admitir el estado electro-tónico, y termina anunciando que en la Serie II explicará sus opiniones sobre este punto.⁷⁴

El primer párrafo de la tercera sección introduce la noción de estado electrotónico:

Whilst the wire is subject to either volta-electric or magneto-electric induction, it appears to be in a peculiar state; for it resists the formation of an electric current in it, whereas, in its common condition, such a current would be produced; and when left uninfluenced it has the power of originating a current, a power which the wire does not possess under common circumstances. This electrical condition of matter has not hitherto been recognized, but it probably exerts a very important influence in many if not most of the phenomena produced by currents of electricity. For reasons which will immediately appear (71), I have, after advising with several learned friends, ventured to designate it as the *electro-tonic state*.⁷⁵

La existencia del estado peculiar se apoya en dos circunstancias. En

⁷⁴ ERE, I, p. 16.

⁷⁵ ERE, Serie I, §80.

primer lugar se nos dice que si el alambre inducido estuviera en su condición usual, se produciría una corriente en él --obviamente se refiere a una corriente permanente-- cuando sometido a inducción. Si esto no ocurre, es decir, si la corriente es meramente transitoria es, piensa Faraday, porque el alambre sometido a inducción opone una resistencia dinámica al desarrollo de la corriente. Además, otro aspecto del fenómeno de inducción apoya la idea de un estado peculiar en el alambre inducido. Que éste no se encuentra en su condición usual se puede deducir porque, cuando se interrumpe la corriente en el alambre inductor, se origina una corriente en él.

Así pues el estado electro-tónico se introduce con dos características definitorias: en primer lugar, es un obstáculo dinámico a la formación de la corriente; en segundo lugar, en un conductor en estado electro-tónico hay un poder que puede originar una corriente opuesta a la anterior. Este último aspecto es particularmente interesante porque pone en una relación a los dos factores, el estado y la corriente, más estrecha que el primero. En este segundo aspecto el uno es el origen de la otra. Ahora bien, ¿en qué sentido es el estado electro-tónico origen de una corriente? El párrafo apenas si permite proporcionar una clara respuesta pero, como tendremos ocasión de ver más abajo, lo que parece sugerirse ya aquí es que la corriente es el resultado del decaimiento del estado electro-tónico hasta su anulación cuando se interrumpe la corriente en el circuito primario. La segunda corriente inducida parece simultánea a la variación del estado aunque, a juzgar por el texto, no parece que la corriente y la variación del estado puedan identificarse.

La fuerza de las preconcepciones de Faraday aparece con toda claridad en este párrafo. La "common condition" es claramente una

construcción teórica que forma parte de las expectativas sobre el fenómeno de inducción dominantes en la época y que Faraday, como ya hemos anticipado previamente, comparte. Si escribiera basándose exclusivamente en sus experimentos tendría que concluir que, en lo que respecta al fenómeno de inducción, ese estado peculiar es precisamente la "common condition" de un alambre sometido a inducción.

Faraday no nos dice qué es lo que produce ese estado peculiar del conductor sometido a inducción, pero si tenemos en cuenta su definición del fenómeno de inducción, proporcionada en los primeros párrafos de la Serie, parece que podemos concluir que la causa reside en la fuerza magnética, bien la fuerza asociada con la corriente eléctrica, en el caso de la inducción volta-eléctrica, o bien la fuerza asociada con los imanes, permanentes o no, en el caso de la inducción magneto-eléctrica.

El problema con el estado es que no parece gozar de ninguna propiedad observable. Faraday señala que ha intentado detectar propiedades atractivas o repulsivas de metales que deberían haber adquirido el estado electro-tónico por estar sometidos a la acción de potentes imanes, pero no ha obtenido el menor indicio.⁷⁶ Asimismo, el estado no modifica el poder conductor de las sustancias que lo adoptan. Si se envía una corriente eléctrica por un alambre y luego se le somete a inducción, la corriente que pasa será idéntica a la que pasaba antes de someterlo a inducción.⁷⁷

⁷⁶ *Ibidem*, §62. El experimento se describe en *Diary*, I, §§338-341, p. 415, 17 de enero de 1832.

⁷⁷ ERE, Serie I, §65. El experimento se describe en *Diary*, I, §183, 5 de diciembre de 1831. En él se utiliza una bobina conectada al galvanómetro que se mueve cerca de los polos de un imán. En el circuito se introduce un pequeño dispositivo voltaico que produce una desviación constante de la aguja del galvanómetro. Al moverse la bobina se induce

Pero, dejando a un lado la ausencia de evidencia empírica, la teoría del estado electro-tónico se enfrenta con un problema que debe ser resuelto para que pueda proporcionar una explicación unificada de las características fundamentales de los dos tipos de inducción, la volta-eléctrica y la magneto-eléctrica. Los experimentos han revelado un aspecto que diferencia claramente ambos tipos de inducción: las corrientes inducidas en la inducción volta-eléctrica, al abrir y cerrar el circuito inductor, son momentáneas, mientras que en la inducción magneto-eléctrica pueden producirse corrientes de duración apreciable. Faraday aclara este punto distinguiendo tres casos, la inducción de una corriente por otra corriente, la inducción mediante la imantación de un núcleo de hierro y la inducción producida en conductores que se mueven relativamente a imanes.

La explicación parte de la base de que el estado electro-tónico se adopta instantáneamente. En primer lugar, Faraday se esfuerza en explicar por qué en el caso de la inducción producida por una corriente voltaica en un alambre paralelo, la primera corriente inducida parece instantánea. Supongamos dos bobinas coaxiales, una de ellas conectada a una batería, la otra a un galvanómetro. Cuando se cierra el circuito en el primario,

the action will seem still more instantaneous, because, as there is an accumulation of power in the poles of the battery before contact, the first rush of electricity in the wire of communication is greater than that sustained after the contact is completed; the wire of induction becomes at the moment electro-tonic to an equivalent

una corriente, pero la aguja vuelve inmediatamente a su posición inicial. Faraday anota: "Hence electrotonic state does not affect current passing through wires (*sensibly*)", subrayado de Faraday. Esta es la primera vez que el término 'electrotonic' aparece en el *Diary*.

degree, which the moment after sinks to the state in which the continuous current can sustain it, but in sinking, causes an opposite induced current to that at first produced. The consequence is, that the first induced wave of electricity more resembles that from the discharge of an electric jar, than it otherwise would do.⁷⁸

Debido a la acumulación de poder en los polos de la batería, hay una diferencia entre la corriente que pasa inmediatamente después de cerrar el circuito y la que la batería produce normalmente. El alambre sometido a inducción adopta instantáneamente el estado electro-tónico, pero éste disminuye de grado y esta disminución produce una especie de contracorriente que hace aún más breve la duración de la primera corriente inducida. La primera corriente inducida es anulada inmediatamente por la contracorriente opuesta debida a la variación del estado. Así se explica el carácter momentáneo de la primera corriente inducida en la inducción volta-eléctrica, cuando se abre y cierra el circuito inductor. La idea importante contenida en el texto es que el estado electro-tónico tiene grados, lo cual refuerza su aspecto de obstáculo dinámico a la corriente inducida.

Para analizar el segundo caso mencionado, la inducción producida por la imantación de un núcleo de hierro, Faraday utiliza las dos mismas bobinas coaxiales del ejemplo anterior, pero dotándolas de un núcleo de hierro. Al establecer el contacto en el circuito que contiene la batería se inducirán innumerables corrientes eléctricas en el hierro, convirtiéndolo en un imán. Este proceso ocupa tiempo y en su transcurso la fuerza inductiva del imán se suma a la de la corriente, produciendo una corriente inducida en la bobina secundaria suficiente para producir una desviación apreciable de la aguja del galvanómetro.⁷⁹

⁷⁸ ERE, Serie I, §68.

⁷⁹ *Ibidem*, §69.

Por último, para que la explicación unificada de la inducción en términos de la noción de estado electro-tónico funcione queda por analizar el caso de la inducción magneto-eléctrica, donde intervienen únicamente imanes permanentes, y la corriente se produce en el movimiento relativo de imanes y conductores :

In all those cases where the helices or wires are advanced towards or taken from the magnet (50. 55.), the direct or inverted current of induced electricity continues for the time occupied in the advance or recession; for the electro-tonic state is rising to a higher or falling to a lower degree during that time, and the change is accompanied by its corresponding evolution of electricity.⁸⁰

El texto es importante porque en él se indica inequívocamente que el estado electro-tónico tiene grados, o sea, opone una resistencia dinámica mayor o menor a la corriente inducida. Cuando el conductor se aproxima al imán se induce en él una corriente, a cuyo desarrollo se va oponiendo progresivamente el estado electro-tónico que va aumentando de grado. Cuando el conductor se aleja del imán se induce una corriente en sentido opuesto al ir simultáneamente disminuyendo el estado electro-tónico.

Ahora bien, a la vista de este análisis de Faraday cabe preguntarse, ¿por qué varía el estado al moverse el conductor? En los dos párrafos anteriores, si bien no se formulaba una explicación pormenorizada del proceso de variación del estado electro-tónico sí se proporcionaban algunas pistas. En el caso de la inducción provocada por una corriente voltaica se indicaba que el estado variaba al cambiar la corriente de la batería. Sin embargo, en el texto que estamos discutiendo se guarda silencio al respecto. Quizá podrían empezar a entenderse las ideas de

⁸⁰ *Ibidem*, § 70.

Faraday respecto de por qué varía el estado al moverse el conductor recordando sus consideraciones acerca de que la inducción se produce cuando el conductor está dentro de la esfera de la acción magnética. Aplicando esta idea al caso que nos ocupa, podríamos aventurar la idea de que Faraday considera, aun sin hacerlo explícito, que el estado electro-tónico varía porque el conductor en su movimiento de aproximación o alejamiento del imán atraviesa regiones de fuerza magnética variable.

Hasta ahora, la noción de estado electro-tónico ha permitido explicar las características más sobresalientes de la inducción de corrientes, pero no se ha tratado de su naturaleza como nuevo estado de la materia. Al respecto Faraday explica:

This peculiar state appears to be a state of tension, and may be considered as *equivalent* to a current of electricity, at least equal to that produced either when the condition is induced or destroyed (...) All the results favour the notion that the electro-tonic state relates to the particles, and not to the mass, of the wire or substance under induction exerted by electricity of tension.⁸¹

La característica fundamental del estado electro-tónico es que se trata de un estado en el que las partículas de la materia se encuentran en una disposición forzada, en un estado de tensión. Un estado de tensión equivalente a la corriente inducida al principio o al final del proceso de inducción. No está muy claro el sentido de esta equivalencia que Faraday afirma entre el estado electro-tónico y las corrientes inducidas.

⁸¹ *Ibidem*, §§71 y 73, subrayado de Faraday. Es interesante notar que Faraday parece mantener aún ideas ortodoxas con respecto a la inducción electrostática, puesto que señala que ésta no se relaciona con las partículas de la sustancia sometida a inducción. Como veremos, más adelante su electrostática se basará precisamente en la idea de la inducción como una acción de partículas.

Para empezar a entenderlo debemos fijarnos en la segunda corriente inducida. Esta segunda corriente se produce cuando se elimina la fuerza inductiva, esto es, en el caso de la inducción volta-eléctrica, cuando se interrumpe la corriente en el circuito inductor. Al eliminarse la causa que mantiene la tensión del estado, ésta se descarga y el resultado es la segunda corriente inducida opuesta. Faraday identifica la segunda corriente inducida con una descarga del estado electro-tónico⁸², y es en este sentido que ambas son equivalentes.

Asimismo, sugiere que el estado electro-tónico puede ser adoptado por las partículas de la materia no conductora. En este sentido escribe que

the state may be assumed in liquids when no electrical current is sensible, and even in non-conductors; the current itself, when it occurs, being as it were a contingency due to the existence of conducting power, and the momentary propulsive force exerted by the particles during their arrangement.⁸³

Debemos retener la sugerencia de que el estado electro-tónico puede ser adoptado por las partículas de la materia no conductora porque, como veremos, unos años más tarde, cuando haya desarrollado su teoría de la inducción electrostática y se esfuerce por construir una teoría unificada de la electricidad y el magnetismo, la idea jugará un papel clave en la resolución del problema de la transmisión del magnetismo.⁸⁴

Basándose en su teoría del estado electro-tónico, Faraday predice un efecto similar al de autoinducción. Ya había observado anteriormente que el estado electro-tónico no es incompatible con el paso de la

⁸² *Ibidem*, §74.

⁸³ *Ibidem*, §73.

⁸⁴ Véase Capítulo 4, sección 4.3.2.

corriente; la materia en estado electro-tónico resiste la formación de una corriente inducida, pero no se opone al paso de otra corriente voltaica. Por tanto sería perfectamente posible que la corriente que pasa por un alambre produzca en él el estado electro-tónico. Al interrumpirse la corriente, la descarga del estado electro-tónico produciría una corriente de retorno detectable. Sin embargo, el experimento diseñado para detectar dicha corriente de retorno tiene resultados negativos.⁸⁵

No son sólo los metales los que adoptan el estado electro-tónico, todos los conductores por los que pasa la corriente adoptan dicho estado. Esta consideración da pie a Faraday para esbozar su teoría de la electrólisis. La corriente que pasa por un conductor produce en éste el estado electro-tónico. Si el conductor es fluido, debido a la tensión del estado sus partículas adoptan una disposición forzada en una dirección que coincide con la de la corriente. La tensión a que están sometidas las partículas se relaja cuando partículas asociadas se separan y van a unirse con otras partículas vecinas. Pero inmediatamente la tensión se renueva, puesto que la corriente sigue pasando por el fluido y el proceso se repite. El resultado es una transferencia de las partículas que componen el fluido circulando en sentidos opuestos, pero paralelos a la corriente.

Con la teoría del estado electro-tónico Faraday tiene una explicación del nuevo fenómeno de la inducción de corrientes y sus anomalías, esto es, que se produzcan dos corrientes inducidas opuestas en lugar de una corriente permanente.⁸⁶ Un conductor sometido a inducción se

⁸⁵ ERE, Serie I, §74. El experimento se describe en *Diary*, I, §66, p. 377, 18 de octubre de 1831.

⁸⁶ Discrepo en este punto de la interpretación de Williams. El señala (WILLIAMS-1965, p. 198) que la noción de estado electro-tónico se introduce para explicar la aparición

encuentra en un estado peculiar, un estado de tensión, que es el responsable de que la primera corriente inducida se interrumpa. En el caso de la inducción volta-eléctrica, cuando tenemos dos circuitos, la variación de fuerza magnética asociada al establecimiento e interrupción de la corriente en el circuito primario produce el electro-tónico que resiste la primera corriente inducida. La corriente es transitoria porque, habiendo alcanzado el estado electro-tónico su grado máximo, el ulterior desarrollo de la corriente se bloquea. La segunda corriente inducida se debe a la descarga de la tensión del estado electro-tónico ocasionada por la desaparición de la fuerza inductiva. En el caso de la inducción magneto-eléctrica, se desarrollan corrientes inducidas al aproximarse o alejarse el conductor del imán porque el estado electro-tónico va aumentando o disminuyendo de grado. Si el conductor se mantiene en reposo, el grado de tensión del estado permanece invariable y el resultado es la ausencia de corrientes.

Siguiendo la estructura que Faraday había anunciado en la carta a Phillips, la Serie I termina con una sección dedicada a la explicación del fenómeno descubierto por Arago. Como ya vimos, Arago había descubierto que si se hacía girar un disco de un material conductor encima de un imán recto que puede girar según los diámetros del disco, el imán seguía el movimiento del disco, y viceversa, si el imán giraba el disco seguía su movimiento. Para estudiar el fenómeno Faraday utilizó un disco de cobre que giraba entre los polos de un imán, y detectó de una corriente en el circuito secundario cuando se interrumpe la corriente en el primario. Me parece que, aun siendo importante, no era ésta la única anomalía que presentaba el nuevo fenómeno. El hecho de que la primera corriente inducida se interrumpa es una anomalía igualmente importante. En este sentido mi análisis es similar al de Gooding en la p. 13 de su GOODING-1980a.

corrientes en el disco en la dirección de sus radios y con sentido desde el centro a la periferia o desde la periferia al centro según el sentido de giro del disco.

Una vez convencido de la existencia de corrientes inducidas en el disco, la explicación del fenómeno de Arago es sencilla para Faraday. La explicación combina el nuevo fenómeno de inducción de corrientes con las rotaciones electromagnéticas que Faraday había descubierto diez años antes. Cuando el disco gira se inducen corrientes eléctricas radiales en él, y la fuerza magnética circunferencial, en torno a los radios, asociada con estas corrientes actúa sobre el polo magnético haciéndolo girar.⁸⁷

La investigación sobre el fenómeno de Arago es una de las circunstancias que ha atraído la atención de Faraday sobre el movimiento como condición necesaria en la inducción magneto-eléctrica. Dicho factor ya había hecho su aparición en el experimento en que se introducía o se extraía un imán de una bobina, pero su importancia no había sido reconocida ante la variedad de las formas de producir la inducción. Pero en el estudio del fenómeno de Arago, el movimiento del conductor en una zona de fuerza magnética pasa a primer plano, pues la inducción de corrientes en el disco siempre se produce merced a su giro entre los polos del imán. Ya hemos visto cómo en la investigación sobre el sentido de las corrientes inducidas, llevada a cabo los días 8 y 9 de diciembre de 1831, Faraday había conceptualizado el factor del movimiento mediante la noción del corte de curvas magnéticas por el conductor. En la Serie I, Faraday ofrece la siguiente definición de la noción de curvas magnéticas :

⁸⁷ ERE, Serie I, §§121-122.

By magnetic curves I mean the lines of magnetic forces, however modified by the juxtaposition of poles, which would be depicted by iron filings; or those to which a very small magnetic needle would form a tangent.⁸⁸

Apoyándose en esta noción Faraday introduce la ley de la inducción magneto-eléctrica cuya formulación hemos visto anteriormente en las anotaciones del *Diary* correspondientes al 9 de diciembre de 1831.⁸⁹

2. 5. El abandono del estado electro-tónico

2. 5. 1. Problemas en la teoría del estado electro-tónico

Ya hemos señalado que la investigación del fenómeno descubierto por Arago ha concentrado la atención de Faraday sobre el movimiento relativo entre conductor e imán como factor decisivo en la inducción magneto-eléctrica. La cuestión es importante porque la consideración de dicho factor va a hacer aflorar un problema latente en la teoría del estado electro-tónico. De acuerdo con esta teoría, las corrientes inducidas no eran permanentes porque a su desarrollo se oponía el estado electro-tónico. Ahora bien, esta oposición podría ser descrita como una resistencia dinámica a la corriente inducida, aspecto que Faraday subrayaba señalando que el estado varía de grado. Esta variación, presumiblemente, estaba asociada a la variación de fuerza magnética que, actuando sobre el conductor, producía el estado electro-tónico. Pero si se demuestra que puede producirse una corriente inducida incluso cuando el conductor se mueve por una región de fuerza magnética constante, entonces la variación del estado queda sin justificación y, por

⁸⁸ *Ibidem*, §114, n.

⁸⁹ *Ibidem*, §114.

lo tanto, es dudoso el papel del estado en la explicación de la inducción magneto-eléctrica.

El *Diary* proporciona indicios de que Faraday ha visto así el problema. Como atestigua el *Diary*, el trabajo sobre el fenómeno de Arago y la ley de la inducción magneto-eléctrica da paso, sin solución de continuidad, al estudio de la inducción producida por el magnetismo terrestre. El primer día de trabajo, 14 de diciembre de 1831, Faraday consigue inducir corrientes mediante el magnetismo terrestre haciendo girar su disco en un plano horizontal, y dos días después repite el experimento con un dispositivo similar, comparando las corrientes producidas con las que obtiene haciendo girar el disco encima de un imán. En relación a este último experimento anota

This shews that so long as the wheel moves, electricity is evolved, and as the radii are here not passing the pole as a whole but are always in the same relation to it, it shews that it is not mere vicinity but motion which evolves the electricity. Must consider this more presently.⁹⁰

La última parte de esta anotación nos proporciona el primer indicio de la preocupación a que hemos aludido antes: aparentemente basta el movimiento del conductor para que se produzcan corrientes inducidas.

Una semana más tarde, en una anotación correspondiente al 23 de diciembre de 1831, el problema se plantea de forma más explícita:

Can it be true that continued motion of wire or plate is sufficient alone, without removal into increasing or decreasing intensity of power (...) That it is so would seem to be the case from revolution of plate subject to earth's magnetism evolving electricity, for there the power must be equal over all parts of the

⁹⁰ *Diary*, I, §229, p. 397, 16 de diciembre de 1831.

plate.⁹¹

y una línea más abajo

Important to decide whether electricity is evolved so long as wire moving, or only whilst moving across magnetic curves of different intensity of power -- the former most probable.⁹²

La figura 14 representa el dispositivo experimental diseñado para decidir la cuestión. Se trata de un disco fijado al extremo de un imán de

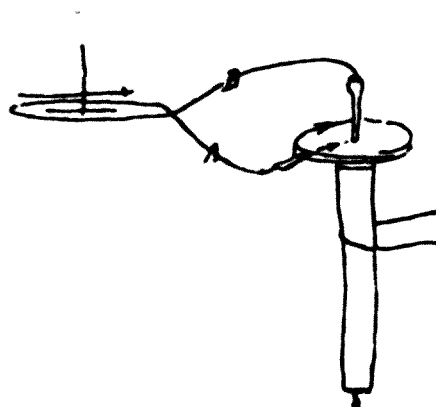


figura 14 (*Diary*, I, p. 402)

barra. Disco e imán pueden girar respecto de su eje de simetría a la vez o separadamente. Se produce una corriente cuando el disco gira mientras que el imán permanece estacionario, y cuando disco e imán giran a la vez. Si gira el imán mientras que el disco permanece estacionario no se produce corriente.⁹³ La simetría de la distribución de la fuerza magnética muestra que el conductor en su movimiento no atraviesa regiones de

⁹¹ *Ibidem*, §243, p. 400, 23 de diciembre de 1831.

⁹² *Ibidem*, §245, pp. 400-401, 23 de diciembre de 1831.

⁹³ *Ibidem*, §§255-257, p. 402, 26 de diciembre de 1831.

intensidad variable de la fuerza. La única condición para que se produzca una corriente es el movimiento del conductor.

Junto al que acabamos de ver, otro factor ha debido contribuir a las dudas sobre la teoría que explica la inducción en términos del concepto de estado electro-tónico. Ya anteriormente nos referimos a él, al examinar la investigación que permitió corregir el error en el sentido de las corrientes inducidas, y que culminó en la formulación de la ley de la inducción magneto-eléctrica. La noción del corte de las curvas magnéticas proporciona el medio de definir sencillamente los sentidos de las corrientes inducidas en este tipo de inducción. ¿Sería posible extender la noción del corte de las líneas de fuerza a la inducción volta-eléctrica? Si la respuesta es positiva, entonces podría formularse una ley única que proporcionara el sentido de las corrientes inducidas en los dos tipos de inducción, algo que no parece sencillo con el concepto de estado electro-tónico.

2. 5. 2. El estado electro-tónico rechazado: la Serie II

La Serie II de las *Experimental Researches*, cuya primera versión se leyó en la Royal Society el 12 de enero de 1832, incorpora el trabajo sobre la inducción producida por el magnetismo terrestre, junto con el experimento que acabamos de discutir y otros similares hechos con imanes giratorios. En los párrafos §§231-242 de la versión publicada nos encontramos con la elabouración teórica a que han dado lugar dichos experimentos: una nueva explicación unificada del fenómeno de inducción en términos del corte de las líneas de fuerza magnética.

Para Faraday, en el experimento del disco e imán rotatorios que acabamos de discutir, el hecho de que se produzca corriente sólo

cuando gira el disco, independientemente de que lo haga el imán, pone de manifiesto que las líneas de fuerza no participan del movimiento del imán. Si es así el disco no es imprescindible, sería posible obtener corrientes en un imán giratorio, puesto que, al girar, cortaría sus propias líneas de fuerza. Para comprobarlo utiliza un imán cilíndrico que hace flotar en posición vertical en una vasija con mercurio. Un alambre del galvanómetro se conecta con la parte superior del imán mediante una gota de mercurio en una pequeña cavidad, el otro alambre se sumerge en el mercurio de la vasija. Cuando se hace girar el imán se produce una poderosa corriente de electricidad. Faraday escribe: " Thus a *singular independence* of the magnetism and the bar in which it resides is rendered evident."⁹⁴

Las líneas de fuerza que se introdujeron en la Serie I han cobrado entidad. Además, los nuevos experimentos han proporcionado concreción a la ley de la inducción magneto-eléctrica expuesta en la Serie I, puesto que han mostrado que el factor decisivo para la producción de corrientes inducidas es el movimiento relativo del conductor y las líneas de fuerza, sin que sea necesario que el conductor se mueva por regiones de fuerza magnética variable. Es posible construir ahora una explicación de la inducción volta-eléctrica en términos del corte de líneas de fuerza, con lo que se tendrá una explicación unificada del fenómeno de inducción de corrientes.

Supongamos dos circuitos, por ejemplo, los dos circuitos en forma de W del experimento que discutimos varias páginas más arriba (véase la figura 13). Al establecerse una corriente eléctrica en el circuito primario, el alambre queda rodeado por anillos de fuerza magnética cuya intensidad disminuye con la distancia al alambre. Cuando el secundario

⁹⁴ ERE, Serie II, §220, subrayado de Faraday.

se acerca al primario, corta las líneas de fuerza magnética que lo rodean; cuando se aleja corta de nuevo sus líneas en sentido opuesto. El resultado son dos corrientes en sentidos opuestos. Cuando los dos circuitos permanecen estacionarios y se establece la corriente en el primario

the magnetic curves themselves must be considered as moving (if I may use the expression) across the wire under induction, from the moment at which they begin to be developed until the magnetic force of the current is at its utmost; expanding as it were from the wire outwards, and consequently being in the same relation to the fixed wire under induction, as if it had moved in the opposite direction across them, or towards the wire carrying the current. Hence the first current induced in such cases was in the contrary direction to the principal current (17. 235.). On breaking the battery contact, the magnetic curves (which are mere expressions for arranged magnetic forces) may be conceived as contracting upon and returning towards the falling electrical current, and therefore move in the opposite direction across the wire, and cause an opposite induced current to the first.⁹⁵

La noción del corte de líneas de fuerza ha permitido construir una explicación unificada del fenómeno de inducción. Aceptando que las líneas de fuerza se mueven, la inducción volta-eléctrica puede tratarse al mismo nivel que la magneto-eléctrica. Los dos problemas en la teoría del estado electro-tónico que mencionábamos antes: la imposibilidad de justificar el carácter de obstáculo dinámico del estado, y la dificultad de proporcionar una ley única que determine los sentidos de las corrientes inducidas en términos del estado, quedan superados. Así pues, escribe Faraday en el §242,

the reasons which induce me to suppose a particular state in the wire (60.) have

⁹⁵ *Ibidem*, §236, subrayado de Faraday.

disappeared; and though it still seems to me unlikely that a wire at rest in the neighborhood of another carrying a powerful electric current is entirely indifferent to it, yet I am not aware of any distinct facts which authorize the conclusion that it is in a particular state.⁹⁶

El texto parece poner un final a la corta vida del estado electro-tónico: introducido a raíz del descubrimiento de la inducción de corrientes, Faraday lo abandona en la Serie II.

2. 5. 3. ¿Por qué se ha abandonado el estado electro-tónico?

La historiografía se ha preocupado de analizar el proceso teórico que lleva de la adopción de la noción de estado electro-tónico a su rechazo en la Serie II. Sin duda, los supuestos que subyacen a este análisis se basan en las palabras del propio Faraday en esta Serie II. En el párrafo inmediatamente posterior a los que describen sus experimentos con imanes rotatorios ya había afirmado que los experimentos permiten concretar la ley de la inducción magneto-eléctrica expuesta en la Serie I, y añadía que esta ley

seem now even to apply to the cause in the first section of the former paper (26.) [esto es, la causa de la inducción volta-eléctrica]; and by rendering a perfect reason for the effects produced, take away any for supposing that peculiar condition, which I ventured to call the electro-tonic state (60.).⁹⁷

Asimismo, en el §242 de la Serie II que acabamos de citar, Faraday escribía que "the reasons which induce me to suppose a particular state in the wire (60.) have disappeared".

⁹⁶ Ibidem, §242, subrayado de Faraday.

⁹⁷ Ibidem, §231.

El supuesto básico de la historiografía ha sido la incompatibilidad entre las dos explicaciones de la inducción de corrientes que Faraday ha desarrollado en las dos primeras Series, una basada en la noción de estado electro-tónico y otra que tiene como noción fundamental el corte de líneas de fuerza. Consiguientemente, el esfuerzo ha ido encaminado a buscar el punto en que la teoría del estado electro-tónico deja de ser explicativa y se exige una explicación alternativa de la inducción.

Así, en la que sin duda puede considerarse como primera biografía moderna de Faraday, L. P. Williams, después de citar el párrafo en que Faraday desarrollaba su explicación de la inducción volta-eléctrica en el caso en que ambos circuitos permanecen estacionarios, escribe

The abandonment of the 'electrotonic state' appeared to be a necessary consequence of the discovery of the independence of the magnetic curves. He had first assumed that some kind of *material strain* had to exist in order to explain induction when a circuit was broken. He had, however, been quite unhappy with the fact that he had not been able to detect this strain. No such problem existed with the magnetic lines of force. These were clearly strains that could be detected by the use of iron filings. Of their existence, there could be no doubt. What now had to be assumed was the propagation of this force through space (i. e. the build-up and collapse of the field). The electrotonic state gave way to the field. Faraday bade good-bay to his early hypothesis of internal strain with considerable regret.⁹⁸

Así pues, según Williams, el motivo fundamental del abandono del estado electro-tónico en la Serie II reside en la falta de evidencia empírica. Cabría preguntarse al respecto si la noción del movimiento de las líneas de fuerza, crucial para la explicación de la inducción volta-eléctrica en términos del corte de líneas, goza de una mayor evidencia

⁹⁸ WILLIAMS-1965, p. 205, subrayado de Williams.

empírica. Williams precisa, no obstante, que lo que se descarta es la idea de tensión como un estado específico de un conductor; en su lugar, la tensión se transfiere a las líneas de fuerza. Sin embargo Williams no nos proporciona evidencia de que Faraday estuviera ya considerando las líneas de fuerza como tensiones. En este sentido, hay que tener en cuenta que las especulaciones de Faraday con respecto a la naturaleza de las líneas de fuerza son mucho más tardías.

Independientemente de esta observación, lo que nos interesa subrayar es la incompatibilidad entre las dos nociones, estado electro-tónico y líneas de fuerza, que parece deducirse del texto de Williams: el descubrimiento de la sustancialidad de las líneas, es decir, de su independencia de la materia, lleva al rechazo del estado electro-tónico. Lo segundo es una "necessary consequence" de lo primero. Parece como si no fuera posible conciliar ambas nociones, y la cuestión es importante puesto que, como veremos, hay indicios de que esto precisamente es lo Faraday intentaba hacer.

Agassi parte en su análisis de que en la Serie I se encuentran dos explicaciones para los dos tipos de inducción descubiertos.⁹⁹ La teoría del estado electro-tónico da cuenta de la inducción volta-eléctrica, mientras que la inducción magneto-eléctrica se explica mediante el corte de líneas de fuerza tal y como esta noción se expresa en la ley de la inducción magneto-eléctrica. Una vez concretada esta ley por el descubrimiento de que la corriente se induce incluso cuando el conductor se mueve por regiones de fuerza magnética constante, basta con asumir el movimiento de las líneas de fuerza, cuando se abre y cierra

⁹⁹ No parece que los textos respalden esta idea de Agassi. En el párrafo de la Serie I que introduce el estado electro-tónico, §80, Faraday deja claro que se está refiriendo tanto a la inducción volta-eléctrica como a la magneto-eléctrica.

el circuito inductor, para construir una explicación de la inducción volta-eléctrica en función también del corte de líneas. Entonces,

*the theory of magnetoelectric induction, namely that it is caused by cutting the lines of magnetic force, now applies also to the volta-electric induction, and there is no need to explain this fact by the electrotonic state theory.*¹⁰⁰

Así pues, según Agassi, la explicación de la inducción en términos del corte de líneas de fuerza hace redundante la teoría del estado electro-tónico. Desarrollada una sobre la otra.

Berkson ha localizado el problema de la teoría del estado electro-tónico en su incapacidad para dar cuenta de la corriente inducida en un conductor que se mueve en una región de fuerza magnética constante. Incapacidad que proviene del hecho de que Berkson ha identificado las corrientes inducidas con variaciones del estado electro-tónico.¹⁰¹ Entonces, al moverse por una región de fuerza magnética constante, el estado electro-tónico que el conductor adopta por estar actuando sobre él la fuerza magnética r.o puede variar, y por consiguiente no puede producirse una corriente. Así pues,

*The essential condition for induction, Faraday declared, was that a wire cut the lines of force. If a section of wire moves along a line of force, no inductive action takes place on the section, but if the wire intersects the lines of force and different parts of the circuit cut different numbers of lines of force (so that the effect does not cancel), a current results. So the lines of force theory could explain all that the 'electrotonic state' could, and more, without presuming the existence of the state.*¹⁰²

¹⁰⁰ AGASSI-1971, p. 100, subrayado de Agassi.

¹⁰¹ BERKSON-1974, p. 67.

¹⁰² *ibidem*, pp. 69-70, subrayado de Berkson.

Como Williams y Agassi, Berkson pone también el énfasis en la superioridad de la teoría de las líneas de fuerza.

No me propongo negar que para Faraday, desde el punto de vista de su posición pública, la explicación de la inducción en términos del corte de las líneas de fuerza tuviera ventajas sobre la explicación de la inducción que proporciona la teoría del estado electro-tónico. La primera permite formular una ley que da el sentido de las corrientes inducidas en todos los casos de inducción, algo que la segunda no consigue. Esta situación, unida a la falta de apoyo empírico del estado electro-tónico habría aconsejado la retirada pública de la noción.

Ahora bien, la complejidad del pensamiento de Faraday en este punto excede, en mi opinión, a la situación metodológicamente demasiado simple de una teoría que se abandona por falta de confirmación empírica. Que la noción de estado electro-tónico sigue muy presente en el pensamiento de Faraday se demuestra porque, como veremos en el capítulo siguiente de este trabajo, sólo dos años y medio después de su público abandono en la Serie II reaparece en su trabajo sobre autoinducción, esto es, en el mismo contexto teórico de la inducción de corrientes que aparentemente quedaba perfectamente explicada por la teoría de las líneas de fuerza. Esta reaparición sugiere la adopción de un punto de vista distinto al que ha adoptado la historiografía: explorar en qué medida las dos nociones, líneas de fuerza y estado electro-tónico son realmente incompatibles.

En realidad, este punto de vista resulta sugerido por la obra del mismo Faraday. Como tendremos ocasión de ver en detalle, en el último periodo de su trabajo, dedicado fundamentalmente a la sistematización

de sus ideas respecto a las líneas de fuerza, la compatibilidad entre líneas de fuerza y estado electro-tónico pasará a primer plano y será formulada explícitamente. Ahora bien, sabemos asimismo que en este último periodo, sus ideas sobre la inducción de corrientes no han sufrido un cambio cualitativo tal que excluiría todo intento de relacionarlas con las que están contenidas en estas dos primeras series. Por consiguiente, me parece legítimo, e incluso imprescindible, si lo que se pretende es trazar las vicisitudes de la noción de estado electro-tónico en la obra de Faraday, determinar si en esta etapa hay indicios de algún intento de establecer una conexión entre las dos nociones, estado electro-tónico y líneas de fuerza.

Desde este punto de vista podemos leer una anotación del *Diary* que pertenece al mismo periodo que la Serie II. En dicha anotación Faraday escribe:

When the travelling wire moves only through magnetic curves of equal intensity -- can the effect of induced current be due to any thing else than relief on one side of wire relative to its position to the curves and tension on the other, i. e. to time required in propagation?-- for the motion requires time and implies occupation of time in the powers producing the tension (tangential powers?).¹⁰³

Hemos tenido ya ocasión de llamar la atención sobre el carácter esquemático de las anotaciones del *Diary*. Sin embargo, aun teniendo en cuenta esta circunstancia, no parece descabellado ver aquí indicios de que Faraday intentaba ya conectar el estado de tensión que había introducido en la Serie I con las líneas de fuerza. Esta anotación parece particularmente importante porque incluye la idea de movimiento en una región de fuerza magnética constante que, como hemos tenido ocasión

¹⁰³ *Diary*, I, §396, 8 de marzo de 1832.

de comentar, planteaba una dificultad seria a la teoría del estado electro-tónico. Asimismo, el fragmento parece sugerir una línea de razonamiento que, como veremos, reaparecerá años más tarde: existe en el espacio que rodea a un imán un estado de tensión que está íntimamente conectado con la naturaleza física de las líneas de fuerza magnética.

Con estas consideraciones en mente debemos volver al §242 de la Serie II antes citado donde aparentemente se decía adiós al estado electro-tónico. Recordemos que Faraday escribía allí:

the reasons which induce me to suppose a particular state in the wire (60.) have disappeared; and though it still seems to me unlikely that a wire at rest in the neighborhood of another carrying a powerful electric current is entirely indifferent to it, yet I am not aware of any distinct facts which authorize the conclusion that it is in a particular state.

Inmediatamente advertimos la ambigüedad del párrafo. Se comienza diciendo que han desaparecido las razones que favorecen la suposición de un estado peculiar en un alambre sometido a inducción. Sin embargo, inmediatamente Faraday añade que le parece poco probable que un alambre en reposo permanezca indiferente a la corriente eléctrica de otro alambre próximo. Así pues, el fenómeno de inducción de corrientes no ha quedado explicado a su entera satisfacción por la teoría de las líneas de fuerza. Una vez que se ha establecido la corriente en el alambre inductor, el alambre inducido permanece indiferente en el seno de las líneas de fuerza y esto sigue siendo una anomalía. La teoría de las líneas de fuerza nos dice cómo se induce una corriente al variar la corriente en el circuito inductor, pero no resuelve la anomalía, ni explica por qué se induce una corriente. Como vemos, el punto de vista no es muy distinto del que se manifestaba al comienzo de la investigación sobre la inducción: el

fenómeno no puede ser transitorio.

Ahora bien, aun cuando la anomalía subsiste, "yet I am not aware of any distinct facts which authorize the conclusion that it is in a particular state." No hay hechos que permitan concluir que el conductor sometido a inducción se encuentra en un estado peculiar, pero precisamente el énfasis en el término 'facts' nos sugiere que la noción de estado electro-tónico sigue presente como hipótesis de trabajo. Que éste es el caso lo vemos corroborado por el mismo Faraday. En efecto, tres años después, en una carta a Whewell, Farady señalará que

I have given up this electrotonic state for the time (242) as an experimental result (remember my researches are EXPERIMENTAL) because I could find no fact to prove it but I cling to it in fancy or hypothesis.¹⁰⁴

Como vemos remite precisamente al mismo párrafo de la Serie II que ahora comentamos.

Lo que importa subrayar es que, al final de la Serie II, la noción de estado electro-tónico no ha desaparecido de las expectativas teóricas de Faraday, y que si bien se ha desarrollado una explicación de cómo se inducen corrientes en función del corte de las líneas de fuerza, las dos nociones no son incompatibles y subsisten anomalías que estimulan la búsqueda de su integración.

En los dos años y medio siguientes dos temas fundamentalmente van a ocupar su atención: la descomposición electroquímica y la teoría de la pila voltaica.¹⁰⁵ En octubre de 1834, un tanto por accidente, su

¹⁰⁴ M. Faraday a W. Whewell, 19 de septiembre de 1835, FARADAY-Corras, I, carta nº 190, pp. 294-2f. p. 296, mayúsculas de Faraday.

¹⁰⁵ Series V-VI; y VII respectivamente.

atención se va a dirigir a un fenómeno cuya investigación va a poner en primer plano de nuevo la noción de estado electro-tónico: la autoinducción.

CAPÍTULO 3

AUTOINDUCCIÓN

El 17 de octubre de 1834 Faraday escribió una carta a Richard Phillips, entonces editor del *Philosophical Magazine*,¹ para ser publicada en la revista. En la carta daba cuenta de un fenómeno peculiar de inducción que acababa de descubrir. Menos de un mes después, el 20 de noviembre, Faraday enviaba una breve nota a Phillips para corregir algunos errores cometidos en su primera carta, y anunciarle que, después de un examen más detenido de los hechos, había comprendido que el nuevo fenómeno podía reducirse al tipo de inducción de corrientes que ocupaba la primera sección de la Serie I, esto es, la inducción volta-eléctrica. La nota terminaba con el anuncio de la próxima lectura ante la Royal Society de una memoria dedicada íntegramente al tema. La memoria constituye la Serie IX de las *Experimental Researches* y está dedicada a la exposición y examen de la acción inductiva de una corriente sobre sí misma.

El trabajo de Faraday sobre la autoinducción no ha recibido la atención que merece, en mi opinión, por parte de los historiadores. En su biografía de Faraday, Williams justificaba su omisión de una discusión de

¹ Se recordará que Richard Phillips era en 1821 coeditor de los *Annals of Philosophy*. Posteriormente la revista se fusionó con el *Philosophical Magazine*, y Phillips pasó a ser el editor de ésta.

la autoinducción señalando que

*Faraday was led to it [la autoinducción] at the suggestion of a Mr Jenkin and it did not follow, as did his other discoveries, from his theoretical views. In the tracing of Faraday's ideas, therefore, it is only of peripheral interest.*²

No pueden dejar de sorprender estas palabras si se piensa que provienen del historiador que llamó la atención sobre la importancia de la noción de estado electro-tónico en el pensamiento de Faraday, puesto que, como veremos, fue precisamente aquí, en la investigación relacionada con el fenómeno de la autoinducción, donde Faraday reintrodujo el estado electro-tónico en el contexto de la inducción electromagnética. Además Williams pasa por alto el hecho de que, unos años antes, Faraday había previsto un efecto similar a la autoinducción basándose en su teoría del estado electro-tónico. Entonces no pudo detectar el efecto, y proporcionó una explicación de su falta de éxito.³

Agassi no ignora el trabajo sobre autoinducción pero lo trata sumariamente.⁴ Afirma que Faraday volvió al estado electro-tónico porque los fenómenos concordaban con expectativas manifestadas en la Serie I, pero que posteriormente retiró sus observaciones sobre el estado. En la Serie IX, prosigue Agassi, después de presentar el nuevo fenómeno introdujo tests cruciales entre la teoría del estado electrotónico y la de las líneas de fuerza, y a pesar de la evidencia empírica a favor de la segunda volvió a aludir al estado electro-tónico, situación que Agassi despacha expeditivamente, calificándola enfáticamente de extraña.

Berkson comparte la idea de que el estudio de la autoinducción

² WILLIAMS-1965, p. 319, n. 39.

³ Concretamente en el §74 de la Serie I. Véase Capítulo 2, pp. 104-105.

⁴ AGASSI-1971, pp. 259-260.

contribuyó a fomentar la convicción de Faraday de la superioridad de la teoría de las líneas de fuerza sobre la del estado electro-tónico. Sin embargo, no encuentra extraño que Faraday introdujera el estado de nuevo. Esto se justificaría porque el estado es necesario para preservar la conservación de la fuerza, principio inviolable para Faraday. Además, agrega Berkson, Faraday pensaba que si bien las líneas de fuerza permitían proporcionar la ley de la inducción electromagnética, era el estado electro-tónico el que proporcionaba la causa de la inducción.⁵

Desde mi punto de vista, el análisis de la investigación que Faraday llevó a cabo sobre la autoinducción resulta importante porque, como ya he mencionado, es aquí donde reintrodujo la noción de estado electro-tónico en el contexto de la inducción electromagnética. En este sentido me centraré en analizar las razones que motivaron esta reintroducción sólo dos años después de que en la Serie II se formulara una explicación, el corte de líneas de fuerza por el conductor, que aparentemente daba cuenta de todos los casos de inducción. ¿Se presentó algún nuevo fenómeno de inducción que escapaba a dicha explicación? ¿Nos encontramos simplemente ante un error de Faraday, que en un primer momento habría creído encontrar alguna evidencia nueva en favor de la existencia del estado electro-tónico, y posteriormente habría comprendido que el nuevo fenómeno era simplemente un caso de la ya estudiada inducción volta-eléctrica? Estas preguntas me parecen fundamentales y para responderlas analizaré en detalle los documentos relacionados con el estudio de la autoinducción: la carta a Phillips mencionada anteriormente, las anotaciones del *Diary* correspondientes a la investigación sobre la autoinducción y la Serie IX.

⁵ BERKSON-1974, pp. 70-72.

MI análisis tiende a corroborar la idea de Berkson de que en la investigación de la autoinducción surge una dimensión causal en la noción de estado electro-tónico, pero yo proporcionaré una justificación más completa de este punto.

3. 1. La reintroducción del estado electro-tónico

3. 1. 1. El estado electro-tónico detectado: la carta a Phillips de 17 de octubre de 1834

En su carta a Richard Phillips de 17 de octubre de 1834, Faraday informa de un efecto que le había sido comunicado por William Jenkins y sobre el que había estado trabajando.⁶ En un circuito formado por una pila de un par de placas y un electroimán, podía experimentarse un calambre eléctrico al abrir el circuito si se sujetaban unas asas soldadas a las terminales de los alambres de la bobina; el calambre desaparecía si se eliminaba el núcleo de hierro de la bobina. Faraday explica:

This effect appears very singular at first, in consequence of its seeming to be the shock of the electricity of a single pair of plates. But in reality it is not so. The shock is not due to the electricity set in motion by the plates, but to a current in the reverse direction, induced by the soft iron electro-magnet at the moment when, from the cessation of the original current, it loses its power. It is, however, very interesting thus to observe an original current of electricity, having a very low intensity, producing ultimately a counter current having an intensity probably a hundredfold greater than its own, and the experiment constitutes one of the very

⁶ La carta lleva por título "On the Magneto-electric Spark and Shock, and on a peculiar Condition of Electric and Magneto-electric Induction", *ERE*, II, pp. 204-210. Según informa Tyndall, Jenkins era un joven con una prometedora carrera científica por delante al que su padre había disuadido de seguirla (TYNDALL-1868, p. 33).

few modes we have at command of converting quantity into intensity as respects electricity in currents.⁷

Dos puntos resaltan en la explicación de Faraday. En primer lugar, el error que ha cometido, y que él mismo subsanará menos de un mes después, en el sentido de la corriente inducida: esta corriente no tiene sentido opuesto al de la que procede de la batería, sino el mismo. En segundo lugar, lo que ha llamado su atención en el "efecto Jenkins" es la diferencia de 'intensidad' entre la corriente de la batería y la corriente inducida que produce el calambre. Resulta que la corriente de la batería, que se caracteriza por su alta 'cantidad' y baja 'intensidad'⁸, es capaz de producir, por inducción, una corriente de alta 'intensidad'. El hecho le resulta sorprendente porque hasta ahora, las corrientes que ha producido por inducción eran de baja 'intensidad'.⁹

En la carta indaga sobre esta enigmática característica del fenómeno concentrando su atención en la chispa que, simultáneamente con el calambre, tiene lugar en el punto de apertura del circuito. Afirma en primer lugar, cometiendo con ello un error que corregirá más tarde, que la chispa y el calambre no son producidos por la misma corriente. La chispa se debe a la corriente de la batería, mientras que el calambre es producido por la corriente inducida.¹⁰ ¿Por qué concentra su atención en la chispa? Porque cree que la explicación de las características de la

⁷ "On the Magneto-electric Spark and Shock, and on a peculiar Condition of Electric and Magneto-electric Induction", *ERE*, II, pp. 204-210., p. 206.

⁸ Recuérdese lo que se dijo en la nota 8 del Capítulo 2 respecto de los conceptos de "quantity" e "intensity" que utiliza Faraday.

⁹ *ERE*, Serie I, §57. *Diary*, II, §179, p. 31, 1 de noviembre de 1832.

¹⁰ "On the Magneto-electric Spark and Shock, and on a peculiar Condition of Electric and Magneto-electric Induction", *ERE*, II, pp. 204-210., p. 206.

corriente inducida tiene que encontrarse en una alteración de la corriente de la batería debida a la presencia del núcleo de hierro en la bobina. Busca primero una alteración en la 'cantidad' de la corriente que está pasando antes de la apertura del circuito mediante la desviación del galvanómetro, pero comprueba que la desviación de la aguja es la misma con o sin núcleo de hierro, y que, por lo tanto, la 'cantidad' depende exclusivamente de la batería. Sin embargo,

the appearance of the spark is an evident and decisive proof, that the electricity which is passing at the moment of disjunction is of greater intensity when the iron is in the helix than when it is away, and this increased effect is evidently dependent, not upon any change in the state of things at the source of the electricity, but in a change of the condition of the conducting wire caused by the presence of the soft iron. I do not suppose that this change is *directly* connected with the magnetizing power of the current over the iron, but is due rather to the power of the iron after it becomes a magnet, to react upon the wire; and I have no doubt, though I have not had the time to make the experiment, that a magnet of very hard steel, of equal force with the soft iron magnet, if put into the helix in the same direction, would exert an equal influence over the wire.¹¹

El enfoque que se transparenta en el texto nos es familiar, lo hemos encontrado en un texto de nueve años antes, el texto de 1825 que describe el primer experimento del que tenemos noticia en que Faraday buscaba efectos inductivos.¹² Se nos explicaba allí que, dado que una corriente podía actuar sobre un imán con una tendencia a hacerle girar alrededor del alambre, cabía esperar que, recíprocamente, el imán reaccionara sobre la corriente variando las características de ésta, en particular aumentando o disminuyendo la 'intensidad' de la corriente. El

¹¹ *Ibidem*, pp. 207-208, subrayado de Faraday.

¹² Véase Capítulo 2, p. 51.

planteamiento es el mismo aquí: el aumento en la 'intensidad' de la corriente de la batería que revela el aspecto de la chispa proviene de la reacción, sobre la corriente, del imán que se produce al imantarse el núcleo de hierro de la bobina. El efecto no se produce debido al proceso de imantación del núcleo de hierro; el imán actúa en tanto que imán, y la prueba de ello, piensa Faraday, es que un imán permanente hubiera producido el mismo efecto.

Ahora bien, ¿cómo produce la reacción del imán un aumento de la 'intensidad' de la corriente? Ya que el galvanómetro revela que la 'cantidad' de electricidad que está pasando no ha variado, un aumento de la 'intensidad' sólo puede provenir de una alteración del poder conductor del alambre. Dicho en otras palabras, en presencia del imán el alambre se encuentra en una condición peculiar en la que su conductividad ha variado. Este era un efecto del que había manifestado expectativas en la sección de la Serie I dedicada al estado electro-tónico. El pensaba que la adopción del estado podría modificar la conductividad del alambre, pero no había encontrado evidencia de ello.¹³ Es ahora cuando cree tener alguna evidencia al respecto. Esta condición en que se encuentra el alambre debido a la presencia del imán no es otra que la que se introdujo en la Serie I con el nombre de 'estado electro-tónico'. Faraday aquí no utiliza el nombre pero, como veremos en un momento, lo hará antes de que termine la carta.

Además de la presencia del núcleo de hierro en la bobina, hay otro modo de incrementar la intensidad de la chispa que tiene lugar en el momento de apertura del circuito. Puede conseguirse también conectando las placas de la pila mediante un alambre conductor de gran longitud. Faraday apunta que en este último caso cabría pensar que la

¹³ ERE, Serie I, §65.

electricidad adquiere una especie de cantidad de movimiento al pasar por el largo conductor, idea que es independiente de la concepción de la corriente que se mantenga: el movimiento de un fluido o el paso de vibraciones. Pero descarta esta explicación observando que la noción de cantidad de movimiento no podría aplicarse en el caso del efecto producido en el circuito que contiene una bobina con un núcleo de hierro, y, por tanto, no sería aceptable proponer dos causas para el mismo efecto.¹⁴

Eliminada la explicación en términos de cantidad de movimiento, propone su alternativa. Supongamos el circuito que contiene la bobina con el núcleo de hierro. Al pasar la corriente por el alambre que forma el circuito, el alambre queda rodeado por curvas magnéticas, cuyo sentido, en relación a la corriente, coincide con el de las curvas del hierro imantado. Entonces,

If, therefore, we refer the increased spark to a peculiar effect of induction exerted by the magnetism over the passing electric current, all becomes consistent. Let us, for instance, for the sake of reference, represent the magnetism by the magnetic curves: then, in the first place, the longer the wire the greater the number of magnetic curves which can exert their inductive influence; and the effect in a wire of a hundred feet in length will be nearly a hundred times greater than in a wire of the same diameter only a foot in length. The reason why a core of soft iron produces the same effect as elongation of the wire, will be that it also brings magnetic curves into inductive action exactly in the same direction as those around the wire; and the rest of the circumstances, as far as I can perceive, will accord with the cause assumed.¹⁵

¹⁴ "On the Magneto-electric Spark and Shock, and on a peculiar Condition of Electric and Magneto-electric Induction", pp. 208-209.

¹⁵ *Ibidem*, p. 209.

Las curvas magnéticas permiten explicar por qué el incremento de la chispa se produce no sólo con la presencia del núcleo de hierro en la bobina, sino también aumentando la longitud del alambre conductor que forma el circuito. En este último caso tenemos un aumento del número de curvas magnéticas y, por tanto, un efecto inductivo mayor. Ahora bien, no debemos identificar sin más este efecto inductivo con los que nos hemos encontrado en las Series I y II, y habían sido, aparentemente, explicados satisfactoriamente. Faraday puntualiza al respecto que nos encontramos aquí delante de "a peculiar effect of induction". Es peculiar porque no se trata aquí, simplemente, de la producción de una nueva corriente; el efecto de inducción consiste ahora en una transformación de las características de la corriente que circula por el circuito.

Se recordará que en el §242 de la Serie II, el párrafo donde Faraday afirmaba que habían desaparecido las razones que le llevaba a suponer que un alambre sometido a inducción se encontrara en un estado peculiar -- el estado electro-tónico--, observaba que si bien le parecía sorprendente que un alambre situado en la proximidad de otro por el que pasa una corriente eléctrica poderosa permaneciera indiferente a ella, no podía aportar hechos que permitieran concluir que se encontrara en un estado peculiar. Pues bien, aunque en rigor no puede afirmarse que la investigación sobre la chispa haya proporcionado hechos que demuestren la existencia de ese estado peculiar, por lo menos puede admitirse que ha concedido verosimilitud al supuesto de esa noción. En el seno de las curvas magnéticas, el alambre que transporta la corriente de la batería se encuentra en un estado peculiar que es el responsable de la alteración en la 'intensidad' de la corriente que revela el aspecto de la chispa. Faraday concluye su carta aludiendo explícitamente al estado

electro-tónico:

In conclusion, I wish to say that I think I see here some of those indications of an electro-*tonic* or peculiar state, of which I have expressed expectations in the second series of my Experimental Researches, par. 242.; for though I here speak of magnetism and magnetic curves for the sake of reference, yet allowing Ampère's theory of the magnet, all the effects may be viewed as effects of induction produced by electrical currents.¹⁶

El imán producido por la imantación del núcleo de hierro de la bobina no es esencial para producir el efecto. Un alambre conductor suficientemente largo también produce un aumento en la intensidad de la chispa. Por tanto, si se admite la teoría de Ampère, es decir, si se considera que un imán se reduce a una colección de corrientes eléctricas, los efectos pertenecen esencialmente a la inducción producida por corrientes eléctricas.

Sus ideas respecto a que el nuevo efecto dependa de la inducción de corrientes eléctricas reciben ulterior aclaración en un experimento cuyo proyecto presenta al final de su carta, admitiendo que no lo ha realizado aún. Se trata de comparar la chispa que se produce al abrir un circuito formado exclusivamente por un largo alambre conductor conectado a una pila con la que se produciría si se dispusiera un alambre paralelo con una corriente circulando en el mismo sentido. Faraday predice que en el segundo caso la chispa sería mayor¹⁷, lo cual es evidente desde su punto de vista si se admite que al efecto que produce la primera corriente sobre sí misma se suma el de la segunda

¹⁶ *Ibidem*, p. 210, subrayado de Faraday.

¹⁷ *Ibidem*, p. 210. Como veremos, el resultado de este experimento será decisivo para rechazar su análisis del fenómeno de la chispa.

corriente actuando sobre la primera. El experimento remacha además la introducción del estado electro-tónico puesto que éste es precisamente el tipo de efecto del que se manifestaban expectativas en el §242: la alteración del estado de un alambre por la proximidad de otro por el que circula una corriente eléctrica.

Apenas transcurrido un mes, el 20 de noviembre escribe de nuevo una breve nota a Phillips rogándole que inserte en su carta anterior algunas correcciones.¹⁸ Admite haberse equivocado al considerar que el calambre y la chispa son producidos por corrientes distintas, la corriente inducida y la corriente de la pila respectivamente. En realidad, afirma ahora, los dos efectos son producidos por la misma corriente, la que se induce al cesar la corriente de la pila, en el mismo sentido. Asimismo, afirma haber comprobado que el resultado del experimento propuesto al final de carta no se produce. Termina su nota señalando que lo que creía un efecto peculiar de inducción se reduce a un caso de la inducción de corrientes que ya había analizado en su Serie I, y prometiendo que cuando termine la investigación del fenómeno expondrá sus resultados ante la Royal Society.

La nota no dice nada acerca de la mención de la carta al estado electro-tónico, pero parecería poder deducirse que excluye toda posibilidad de que el estado juegue algún papel en los efectos, puesto que si éstos quedan reducidos a un caso de la inducción de corrientes ya estudiada, ésta ya había recibido una explicación en la Serie II sin recurrir al estado. Veremos que la situación es más complicada, pero antes debemos retroceder en el tiempo, hasta el comienzo de la investigación del "efecto Jerkings", para analizar, apoyándonos en las

¹⁸ "Additional Observations respecting the Magneto-electric Spark and Shock", *ERE*, II, pp. 210-211.

anotaciones del *Diary*, el trabajo que condujo a la conclusión de que el efecto peculiar de inducción no era tan peculiar después de todo.

3. 1. 2. La investigación de la autoinducción según el *Diary*

El *Diary* muestra que la investigación sobre el "efecto Jenkins" comenzó el 15 de octubre de 1834, o sea dos días antes de enviar su primera carta a Phillips. La investigación se extiende hasta el 15 de febrero de 1835. El 15 de noviembre de 1834 anota que en la carta del 15 de octubre ha cometido algunos errores que debe corregir. Así lo hizo, como acabamos de ver, en su segunda carta de 20 de noviembre. Veamos el proceso que condujo a esta rectificación, y, en definitiva, a la asimilación del nuevo efecto a su bien conocida inducción volta-eléctrica.

Las anotaciones del *Diary* correspondientes al 15 de octubre de 1834 concuerdan bien con sus afirmaciones en la primera carta a Phillips. Faraday observa que en un circuito que contiene una bobina la chispa que se produce al abrir el circuito es más brillante cuando la bobina contiene un núcleo de hierro. Lo primero que se le ocurre es comprobar si el núcleo de hierro provoca una variación en la 'cantidad' de la corriente, pero éste no es el caso, la 'cantidad' de la corriente permanece constante. Faraday anota: "Notwithstanding that, there must be a change in the current or in its character, or else a brighter spark could not pass on breaking contact".¹⁹ Su convicción se refleja en sus palabras: "there must be". El aspecto de la chispa revela que hay una alteración de la corriente en el momento en que se abre el circuito. Su problema queda planteado con claridad en la penúltima anotación del día:

¹⁹ *Diary*, II, §2078, p. 330, 15 de octubre de 1834, subrayado de Faraday.

There is evidently an affection of the current independant of quantity passed. If it be independant of intensity also, then what quality of the current is it which is thus rendered evident by its exaltation?²⁰

Dos días después escribe la carta a Phillips que hemos discutido en la sección anterior, y el 27 de octubre vuelve a la investigación. Las anotaciones del 27 de octubre son de naturaleza teórica, y revelan la centralidad que en su pensamiento sigue ocupando la noción de estado electro-tónico en todos los fenómenos relacionados con la inducción. Su enfoque desarrolla lo que en la carta a Phillips ya se apuntaba, el papel del estado electro-tónico:

Electrotonic wire, i. e. effect of a long wire, magnet, etc. etc. Are effects of induction of *currents over currents*. May well be called the *electronic* [sic] state of a current. But the forces are well represented and related by the magnetic curves. The effect may be said to be as follows. Suppose a current (constant) to be subject to the induction of another current. As the second current is *formed* in the vicinity of the first, if in the same direction, it for the moment diminishes the first current; but that first current soon returns to its first amount and then has the peculiar state. When the inducing current is removed the peculiar state falls, and the induced current is for the moment increased. It then sinks to its natural quantity, and if the inducing current be renewed in the reverse direction to what it had at first, the induced current will increase for a moment; then (probably) have a state the opposite to that I describe, which it will keep until the inducing current ceases, when it will be found to diminish in quantity for a moment, and then rise to its full standard, free from all extraneous influence.²¹

Hemos encontrado una línea de pensamiento similar a la de este texto en

²⁰ *Ibidem*, §§2089, p. 331.

²¹ *Ibidem*, §§2092-2093, p. 332, 27 de octubre de 1834, subrayados de Faraday.

la Serie I, cuando se expuso la teoría del estado electro-tónico. Sin embargo, hay importantes diferencias que conviene señalar. En primer lugar, mientras que en la Serie I se nos hablaba del estado electro-tónico como estado del alambre sometido a inducción, aquí, en las primeras líneas del texto, se habla del estado electro-tónico de una corriente. El matiz podría explicarse si tenemos en cuenta que Faraday está pensando en la alteración de una corriente que se produce como resultado de un efecto peculiar de inducción de la corriente sobre sí misma. Por eso indica que se trata de efectos de corrientes sobre corrientes.

En segundo lugar, parece apuntarse en este texto el comienzo de una nueva visión del estado electro-tónico. Que este es el caso se confirmará más adelante; aquí debemos limitarnos a anotarlo. A diferencia de lo que ocurría en la Serie I, en este texto el estado no se ve como algo que resiste la formación de una corriente inducida. Parece más bien que las variaciones del estado producen cambios en corrientes. Así, se nos dice que cuando se forma la corriente inductora, la corriente sobre la que actúa la inducción disminuye, y *luego* ("and then") adopta el estado peculiar. O sea, el estado no resiste la corriente inducida, es más bien su variación la que produce la corriente inducida de sentido contrario a la inductora. Asimismo, cuando se elimina la corriente inductora, el estado peculiar decae, y esta variación del estado tiene como resultado un incremento de la corriente sobre la que actúa la inducción. Es precisamente este último proceso el que Faraday ve la explicación teórica del aumento de la corriente que el aspecto de la chispa revela.

Otra anotación perteneciente al mismo día es interesante porque

profundiza en las características de la acción inductiva de la corriente sobre sí misma:

As one wire or current act on its neighbour wire or current, there can be no doubt that the current in one part of a wire acts on the current in another part parallel to it; or the every part of a current acts on the other parts of the same current lateral to it. Hence peculiar mutual action and relation of the elements of an electric current which are in the same plane across the course of the current.²²

La fuerza inductiva de la corriente actúa en una región del espacio transversal a la trayectoria seguida por la corriente, por tanto cada elemento de corriente actúa sobre los demás elementos de corriente situados en un plano perpendicular a la trayectoria de la corriente.

La investigación experimental se retoma el 13 de noviembre de 1834. En primer lugar intenta confirmar sus ideas respecto a la inducción mutua de los elementos de corriente. Para ello compara la intensidad de la chispa que se produce al abrir el circuito en dos casos, en un circuito que contiene una bobina y en un circuito con casi la misma longitud de alambre (difieren sólo en 1 pie) extendido. La chispa en el primer circuito resulta ser más brillante, y Faraday comenta: "thus the effect of the mutual induction of the different convolutions of the helix fully shewn".²³

Sin embargo, las dudas sobre la peculiaridad del efecto inductivo empiezan a surgir al final del trabajo del día. Introduce un imán en una bobina y observa la chispa producida al abrir el circuito. Apenas se nota diferencia con la que produce la bobina por sí misma y además, observa Faraday, no provoca ninguna diferencia el que se sitúe el imán en la bobina de forma que sus curvas magnéticas concuerden con las de la

²² *Ibidem*, §2094.

²³ *Ibidem*, §2106, p. 334, 13 de noviembre de 1834.

bobina o no. Asimismo, el efecto se favorece cuando se introduce en la bobina un núcleo de hierro, pero no ocurre lo mismo con un núcleo de acero. Es claro lo que Faraday pretende con estos experimentos, está tratando de confirmar su idea, apuntada en la carta a Phillips, de que un imán en el circuito reacciona sobre el alambre produciendo un fenómeno peculiar de inducción. Desde su punto de vista, el efecto peculiar no depende de la imantación del núcleo de la bobina, sino de la presencia del imán; por eso predecía que un imán permanente tendría el mismo efecto que el núcleo de hierro imantado. Sin embargo, los experimentos que acabamos de describir están empezándole a mostrar que esta predicción no se cumple.

Al día siguiente, el 14 de noviembre de 1834, continúa investigando el mismo punto. Repitiendo uno de los experimentos del día anterior, inserta un imán en una bobina y la conecta a las placas de una pila. Entonces,

*the spark upon breaking contact was of the same brilliancy and size (sensible), whether the electric current was passed through the helix in accordance with the magnetism of the magnet, or in the opposite direction. Hence the magnet has no influence as a magnet over the phenomenon.*²⁴

La primera predicción hecha en la carta a Phillips no se cumple, la acción del imán en tanto que imán es casi irrelevante.

El siguiente experimento es el que había descrito al final de la carta a Phillips de 17 de octubre de 1834. Allí había predicho que la chispa que se producía al interrumpirse la corriente de la batería, podría aumentarse si se situara paralelamente otro alambre con una corriente eléctrica. Intenta verificarlo con un dispositivo formado por dos bobinas

²⁴ *Ibidem*, §2117, p. 335, 14 de noviembre de 1834, subrayado de Faraday.

concéntricas que se conectan cada una a una pila formando dos circuitos (véase la figura 15). El esperaba que al interrumpir la corriente en una de

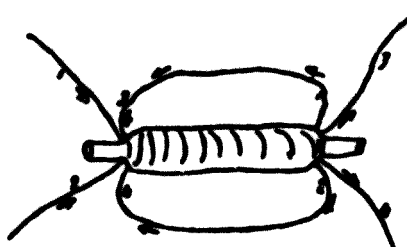


figura 15 (*Diary*, II, p. 336)

las dos bobinas, la presencia de la corriente paralela aumentara la chispa, pero no es así:

I found that either current in either helix could give a good spark on breaking contact, but that when a current was passing through one helix at the time the current in the other was broken, scarcely a sensible spark passed.²⁵

El efecto de la corriente paralela es opuesto al esperado. Lejos de aumentar la chispa en la bobina cercana, parece como si la eliminara. Este experimento es decisivo; la reflexión sobre él produce un cambio en la conceptualización del fenómeno. Hasta este punto, Faraday había considerado el aspecto de la chispa como la característica fundamental de un fenómeno peculiar de inducción; ahora ve el experimento como un caso reducible a la inducción volta-eléctrica que había investigado tres años atrás. Un poco más abajo, refiriéndose al experimento escribe:

Considered that, in the apparent destruction of the effect in one helix by the continuance of the current in the other, the effect most probably did not

²⁵ibídem, §2124, p. 336.

depend upon the current, but upon the circumstance that the second helix formed a closed circuit, through which any induced current might circulate. I removed one electromotor, and connected the ends of its helix together, and then found that the spark could no longer be obtained at the other. Hence, when the electromotor was used, it merely served to connect the ends of its helix, and its current went for nothing.²⁶

La corriente paralela no aumenta la chispa. En realidad, el papel que juega la bobina paralela con su pila es proporcionar un circuito para la corriente inducida. Con ello, el experimento ha resituado el fenómeno en el marco de la inducción de corrientes, como aprendemos en el párrafo inmediatamente siguiente:

Now then begin to see light. The phenomenon of increased spark is merely a case of the induction of electric currents. If a current be established in a wire, and another wire forming a complete circuit be placed parallel to it, at the moment the current in the first is stopped, it induces a current in the *same* direction in the second; itself then shewing but a feeble spark. But if the second be away, it induces a current in its own wire in the same direction, producing a strong spark. The strong spark in the current when alone is therefore the equivalent of the current it can produce in a neighbouring wire when in company.²⁷

Vale la pena, no obstante, retener el "merely", porque no va a expresar con precisión el alcance de los problemas que plantea a Faraday el fenómeno de la chispa. A juzgar por este texto, el fenómeno parece reconducido al marco teórico de la inducción de corrientes de la Serie I; sin embargo, la chispa sugerirá a Faraday una nueva dimensión del fenómeno de inducción, una nueva dimensión que le forzará a

²⁶ *Ibidem*, §2133, p. 338. Un electromotor es un tipo de pila.

²⁷ *Ibidem*, §2134, p. 338, subrayado de Faraday.

introducir en el trabajo publicado sobre autoinducción, la Serie IX, el estado electro-tónico.

3. 2. El estado electro-tónico en la Serie IX

3. 2. 1. Experimentos

Una vez reconocido que el fenómeno de la chispa puede reconducirse, en principio, al marco teórico de la inducción volta-eléctrica, Faraday siguió trabajando sobre él. Expone sus resultados en la Serie IX, que lleva por título "On the influence by induction of an Electric Current on itself: and on the inductive action of Electric Currents generally". La Serie se leyó en la Royal Society los días 29 de enero y 5 de febrero de 1835. Tal y como muestra el título, la Serie tiene dos partes: la primera, que abarca los §§1048-1106, analiza los efectos inductivos que tienen lugar al abrir y cerrar un circuito; la segunda, §§1107-1118, discute aspectos generales de la inducción producida por corrientes eléctricas. Es en esta última donde se introduce el estado electro-tónico, concretamente en el §1114.

Faraday comienza explicando brevemente el origen de su investigación. Jenkins le había hecho observar que podía obtenerse un calambre eléctrico con un circuito dotado de un electroimán cada vez que se rompía el contacto con la pila. Asimismo, en el lugar de la ruptura aparecía simultáneamente una brillante chispa. Continúa aludiendo a su carta al *Philosophical Magazine* y reconociendo los errores que había cometido en ella. Añade que una investigación más cuidadosa le permitió comprender que los nuevos efectos podían identificarse con los fenómenos de inducción que había analizado en la primera sección de la

Serie I, o sea la inducción volta-eléctrica. A continuación escribe:

Notwithstanding this identity, the extension and the peculiarity of the views respecting electric currents which the results supply, lead me to believe that they will be found worthy of the attention of the Royal Society.²⁸

Así pues, ya desde los primeros párrafos se nos advierte que, si bien la relación entre los nuevos efectos y la inducción de corrientes de la Serie I es de identidad, el estudio de la autoinducción ha servido para algo más que la mera confirmación de dicha identidad.

El planteamiento del problema nos es conocido. En un circuito con una pila se produce una fuerza adicional, responsable de la chispa y el calambre que tienen lugar al abrir el circuito, que depende del tipo de conductor conectado a las placas de la pila. Fuerza adicional porque Faraday considera que la chispa y el calambre producido al abrir un circuito en el que el conductor conectado a las placas de la pila es un alambre corto (10-12 pulgadas de longitud) muestran el efecto que puede producir la pila por su propio poder. Si en el circuito se incluye un electroimán, o se conecta a las placas de la pila un alambre de gran longitud, la chispa y el calambre en este caso muestran una fuerza adicional. Esa fuerza adicional, insiste Faraday, se debe a una alteración permanente o momentánea de la corriente.²⁹

Lo que Faraday va a probar, en primer lugar, es que la alteración de la corriente es momentánea, a diferencia de lo que había mantenido en su primera carta a Phillips. Para ello establece que la corriente constante previa a la apertura del circuito no sufre alteración alguna en su

²⁸ ERE, Serie IX, §1051.

²⁹ *Ibidem*, §1070.

'cantidad' o 'intensidad', cuando se varía el conductor que conecta las placas de la pila. Ya vimos cómo comprobaba lo primero. El punto respecto de la 'intensidad' se comprueba observando el poder de electrolización de la corriente. El poder no varía si la comunicación de las placas de la pila se efectúa mediante un corto alambre o un poderoso electroimán.

A la vista de estos dos resultados una primera conclusión parece imponerse:

Hence the spark and shock at the moment of disjunction, although resulting from great intensity and quantity of the current *at that moment*, are no direct indicators or measurers of the intensity or quantity of the constant current previously passing, and by which they are ultimately produced.³⁰

La chispa y el calambre muestran que hay una gran alteración de la corriente, pero dicha alteración se produce en el momento de la apertura del circuito, no antes.

La segunda conclusión relevante es que la chispa y el calambre son producidos por la misma corriente modificada, no por dos como se había anunciado en la primera carta a Phillips. Los efectos se deben a la corriente suplementaria que se induce en el momento de la interrupción del circuito. Para probarlo, la estrategia experimental de Faraday consiste en separar ambas corrientes, la inductora y la inducida, mediante una derivación en el circuito original. La figura 16 reproduce el esquema del circuito que Faraday emplea para estudiar dicha separación. *Z* y *C* representan las placas de zinc y cobre de la pila; *G* y *E* los puntos donde se establece o interrumpe el contacto; *D* representa el conductor utilizado para conectar las placas de la pila: un simple alambre, una

³⁰ *Ibidem*, § 1073, subrayado de Faraday.

bobina o un electroimán: *NP* la derivación que puede mantenerse en

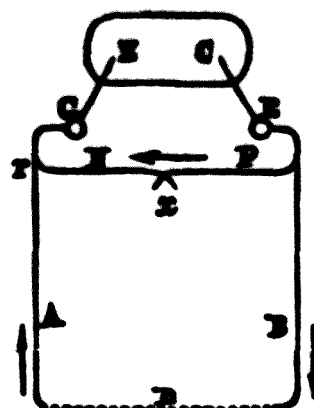


figura 16 (ERE, I, pag. 331)

circuito abierto o conectarse en el punto *x*, donde también puede introducirse un galvanómetro o un aparato de electrólisis. Las flechas muestran el sentido de la corriente producida por la pila.³¹

El sentido de la corriente inducida se establece introduciendo un aparato de electrólisis o un galvanómetro en *x*.³² Conectando en *D* un electroimán y utilizando una solución de yoduro de potasio en *x*, al abrir el circuito en *G* o *E* se deposita yodo en el alambre *N*, mostrándose que el sentido de la corriente inducida es opuesto al de la corriente que produce la pila. El mismo resultado se obtiene al conectar un galvanómetro en *x*. Cuando se interrumpe la corriente en *G* o *E*, la desviación de la aguja muestra una corriente en sentido opuesto al que indica la flecha en el punto *x*.

Para Faraday, los experimentos anteriores no permiten dudar de que la chispa y el calambre están producidos por una corriente inducida al interrumpirse la corriente de la pila. Como prueba definitiva describe el

³¹ *Ibidem*, §1079.

³² *Ibidem*, §§ 1084, 1087.

experimento de las bobinas concéntricas que hemos visto al discutir las anotaciones del *Diary*. El experimento muestra, a su juicio, la posibilidad de separar totalmente las corrientes inductora e inducida. Con ello el problema de la chispa y el calambre al interrumpir el circuito se reduce a un caso de inducción de corrientes, y Faraday reproduce casi literalmente en la Serie como explicación el texto del *Diary* que hemos citado anteriormente. La chispa que se produce al abrir el circuito es el equivalente de la corriente que se induciría en otro conductor si estuviera presente.³³

Asimismo, el hecho de que la chispa vaya aumentando cuando se utiliza para conectar los polos de la pila, sucesivamente, un largo alambre, una bobina o un electroimán se explica por la creciente acción inductiva de los diversos dispositivos. En el caso del alambre el aumento de longitud redundaría en un aumento de fuerza inductiva, mientras que en el caso de la bobina actúa la acción inductiva mutua de las espiras que la forman. En el electroimán se suma además la acción inductiva debida a la desimantación del núcleo al interrumpirse la corriente del circuito.³⁴

Hasta ahora Faraday ha mostrado la inducción de la corriente sobre sí misma en el momento de abrir el circuito. Para que el fenómeno se inscriba plenamente dentro del concepto de la inducción volta-eléctrica, es necesario mostrar asimismo que también en el momento de cerrar el circuito se producen efectos inductivos. Para ello utiliza de nuevo el circuito representado en la figura 16, con un electroimán en *D* y un aparato de electrólisis en *x*. Se ajusta la pila de forma que su corriente produzca una ligera descomposición en el aparato en *x*. El alambre *N*

³³ *Ibidem*, §1003.

³⁴ *Ibidem*, §§1003-1005.

se separa de *A* en el punto *r*, de forma que se pueda establecer o interrumpir el contacto a voluntad. Entonces se procede repetidamente de la siguiente manera: se interrumpe el contacto en *r* y luego en *G*; se establece el contacto en *r* y luego en *G*. Con ello se evita la corriente en sentido *NP* inducida al abrir el circuito, pero se puede observar el efecto de la corriente en sentido *PN* inducida al cerrar el circuito. Reiterando el procedimiento se observa una descomposición en el aparato situado en *x* mayor que la que produciría la corriente de la batería. Faraday la atribuye a que, al cerrar el circuito, se produce un efecto inductivo en *ABD* que retarda el paso de la electricidad por esta porción del circuito, incrementado la 'cantidad' que pasa por el aparato de electrólisis en *x*. Con ello se demuestra la producción de efectos inductivos también al cerrar el circuito.³⁵

3. 2. 2. Análisis de los experimentos: nueva visión del estado electro-tónico

Señalamos más arriba que la Serie IX podía dividirse en dos bloques de párrafos. Como hemos visto hasta aquí, en el primero de ellos, §§1048-1106, Faraday ha mostrado que la chispa y el calambre que se obtienen al interrumpir la corriente en un circuito son producidos por la corriente inducida, corrigiendo así el error de su análisis en la primera carta a Phillips. En el segundo bloque, §§1107-1118, Faraday plantea algunas reflexiones generales sobre la inducción de corrientes eléctricas que deben entenderse como complementando el análisis contenido en las Series I y II. Pueden distinguirse dos temas en este segundo bloque: en primer lugar, Faraday se ocupa de la dirección y

³⁵ *Ibidem*, §1102.

modo de acción de la fuerza inductiva; el segundo tema, que se arrastra de la carta a Phillips, está relacionado con la variación en 'intensidad' que el aspecto de la chispa revela.

Respecto del primer tema Faraday escribe:

From the facility of transference to neighbouring wires, and from the effects generally, the inductive forces appear to be lateral, *i. e.* exerted in a direction perpendicular to the direction of the originating and produced currents; and they also appear to be accurately represented by the magnetic curves, and closely related to, if not identical with, magnetic forces.³⁶

Supongamos dos bobinas concéntricas como las que se representan en la figura 15. Cuando se interrumpe la corriente en la bobina primaria, la fuerza inductiva actúa en una dirección transversal a la corriente. Cada elemento de corriente actúa sobre todas las demás porciones del alambre de la bobina secundaria situadas lateralmente. Asimismo, si consideramos un alambre conductor, la fuerza inductiva de cada elemento de corriente actúa sobre todas las demás porciones del mismo alambre que pueden unirse con él mediante una línea más o menos oblicua, anulándose cuando dicha línea sea paralela a la dirección de la corriente.

Ahora bien, precisa Faraday, la afirmación de que un elemento de corriente actúa inductivamente sobre otras partes del mismo conductor no debe entenderse en el sentido de que la acción inductiva sea esencialmente una acción de corrientes.³⁷ La inducción actúa sobre la

³⁶ *Ibidem*, §1108. *Cf.*, *Diary*, II, §2187, p. 345, 17 de noviembre de 1834.

³⁷ De acuerdo con el análisis de Berkson (BERKSON-1974, p. 71) lo que Faraday pretende aquí es excluir la posibilidad de una interpretación ampérian de la inducción de corrientes, es decir, la reducción de la inducción a la interacción entre elementos de

electricidad presente en el conductor independientemente del estado en que ésta se encuentre, en forma de corriente o en reposo:

Now when a current acts by induction upon conducting matter lateral to it, it probably acts upon the electricity in that conducting matter whether it be in the form of a *current* or *quiescent*, in the one case increasing or diminishing the current according to its direction, in the other producing a current, and the *amount of the inductive action is probably the same in both cases.*³⁸

En relación con el segundo punto señalado más arriba, el cambio de 'intensidad', el párrafo más relevante es el 1114. Este párrafo es el que más claramente nos revela que su estudio de la autoinducción ha servido para algo más que para añadir un nuevo fenómeno al conjunto de los efectos que caen bajo el concepto de inducción volta-eléctrica. Ya en el §109 se ha afirmado que la corriente inductora y la inducida se diferencian en sentido, en lo que respecta a la primera corriente inducida, y en 'cantidad' e 'intensidad'. Pues bien, lo que la reducción del nuevo efecto a la categoría de inducción volta-eléctrica no ha conseguido resolver es esta diferencia en 'cantidad' e 'intensidad' entre la corriente inducida y la inductora. Este problema es capital para Faraday porque plantea una dificultad a un principio constitutivo de su física: el principio de la conservación de la fuerza. En un artículo dedicado a este principio escribe

Agreeing with those who admit the conservation of force to be a principle in physics as large and sure as that of the indestructibility of matter, or the invariability of gravity, I think that no particular idea of force has a right to unlimited or unqualified acceptance, that does not include assent to it; and also, to *definite*

corriente.

³⁸ *Ibidem*, §1110. *Cf.*, *Diary*, II, §2223, p. 351, 17 de diciembre de 1834.

*amount and definite disposition of the force, either in one effect or another, for these are necessary consequences: therefore, I urge, that the conservation of force ought to be admitted as a physical principle in all our hypotheses, whether partial or general, regarding the actions of matter.*³⁹

En el caso que nos ocupa, a juzgar por los fenómenos, la corriente inductora, la causa, produce un efecto mucho mayor, la corriente inducida; esto es, parece como si tuviera lugar una creación de fuerza, y por tanto una violación de la "definite amount" de la fuerza.

Que el problema ha estado presente en la mente de Faraday desde un principio lo sabemos bien por el contenido teórico de la explicación del efecto proporcionada en la carta a Phillips de 17 de octubre de 1834. La evidencia de que no ha encontrado solución en la reducción a un caso de inducción volta-eléctrica la encontramos en una anotación del *Diary* fechada sólo un día después de que Faraday haya visto la conexión entre el nuevo efecto y la inducción de corrientes que había analizado en la Serie I. En dicha anotación podemos leer:

*It seems to me as if there must be some intermediate link of action between the current as produced from the electromotor and that occurring at moment of disjunction; and that this link is also the same with that which connects electrical and magnetic properties.*⁴⁰

Parece inconcebible que la corriente de la pila, con 'cantidad' e 'intensidad' determinadas, pueda producir por inducción, al abrir el circuito, otra corriente de 'intensidad' y 'cantidad' mayores. Tiene que haber una mediación entre las dos corrientes que explique la aparente

³⁹ Faraday-Conservation, p. 444, subrayados de Faraday.

⁴⁰ *Diary*, II, §2170, p. 343, 15 de noviembre de 1834.

creación de fuerza, una mediación que lo será también entre las fuerzas eléctricas y magnéticas en juego.

El tema reaparece en el §1114 de la Serie IX en forma más desarrollada que en el texto del *Diary* que acabamos de ver. Faraday escribe:

Notwithstanding that the effects appear only at the making and breaking of contact, (the current remaining unaffected, seemingly, in the interval), I cannot resist the impression that there is some connected and correspondent effect produced by this lateral action of the elements of the electric stream during the time of its continuance (80. 242). An action of this kind, in fact, is evident in the magnetic relations of the parts of the current. But admitting (as we may do for the moment) the magnetic force to constitute the power which produces such striking and different results at the commencement and termination of a current, still there appears to be a link in the chain of effects, a wheel in the physical mechanism of the action, as yet unrecognised. If we endeavour to consider electricity and magnetism as the results of two forces of a physical agent, or a peculiar condition of matter, exerted in determinate directions perpendicular to each other, then, it appears to me, that we must consider these two states or forces as convertible into each other in a greater or smaller degree; *i. e.* that an element of an electric current has not a determinate electric force and a determinate magnetic force constantly existing in the same ratio, but that the two forces are, to a certain degree, convertible by a process or change of condition at present unknown to us. How else can a current of a given intensity and quantity be able, by its direct action, to sustain a state which, when allowed to react, (at the cessation of the original current,) shall produce a second current, having an intensity and quantity far greater than the generating one? This cannot result from a direct reaction of the electric force; and if it result from a change of electrical into magnetic force, and a reconversion back again, it will show that they differ in something more than mere direction, as regards *that agent* in the conducting wire which constitutes their immediate cause.⁴¹

⁴¹ ERE, Serie IX, §1114, subrayado de Faraday.

Aunque no hubiera incluido las referencias explícitas a los párrafos 60 de la Serie I y 242 de la Serie II, el planteamiento de la frase inicial nos habría sido igualmente familiar. Mientras que la corriente sigue fluyendo en un alambre conductor, la fuerza lateral de la corriente --y no olvidemos que esta fuerza está íntimamente relacionada, si es que no coincide, con el magnetismo-- debe producir algún efecto. Es precisamente la idea implícita en §60, cuando se introdujo el estado electro-tónico: la corriente en un alambre, o la fuerza magnética a ella asociada, debe producir algún efecto permanente. Se encontraba asimismo la idea, explícitamente formulada esta vez, en el §242 de la Serie II, aquél en el que se rechazaba el estado electro-tónico. Se nos decía allí que era improbable que un alambre situado en la vecindad de otro que transporta una poderosa corriente eléctrica permaneciera indiferente.⁴²

En segundo lugar, es interesante observar cómo con esta frase inicial Faraday nos intenta hacer entrar en una línea argumental que desdice anteriores afirmaciones suyas en la misma Serie IX y que nos retrotrae a la atmósfera teórica de la carta a Phillips de 17 de octubre de 1834. Así, unos párrafos antes, después de haber ofrecido la evidencia experimental de que los efectos en consideración son debidos a la inducción de una corriente sobre sí misma, afirmaba:

Thus all the phenomena tend to prove that the effects are due to an inductive action, occurring at the moment when the principal current is stopped. I at one time thought they were due to an action continued during the whole time of the current.⁴³

⁴² He discutido estos dos párrafos cruciales en el Capítulo 2 de este trabajo, secciones 2. 4. 2 y 2. 5. 2.

⁴³ ERE, Serie IX, §1100, subrayado de Faraday.

La alusión a la carta a Phillips es inequívoca, era allí donde se explicaba la chispa producida al abrir el circuito por un efecto peculiar continuado producido por las curvas magnéticas sobre la misma corriente que les daba origen. Aquí, en la frase inicial del §1114 se vuelve precisamente sobre esta idea de acción continuada.

El núcleo del argumento está contenido en la interrogación, pero antes de entrar en ella algunas observaciones son pertinentes. Se notará la inflexión en el tono respecto de la primera frase del párrafo que estamos discutiendo. Leíamos allí "Notwithstanding that... I cannot resist"; en la frase interrogada ya no se nos comunican impresiones irresistibles, se nos exige que razonemos partiendo de la base de que la corriente primaria *sostiene un estado*. Un estado que, naturalmente, no puede ser otro que el estado electro-tónico que es así reintroducido en la obra publicada en el contexto de la inducción electromagnética. Hago hincapié en este punto que me parece de importancia: el estado se introdujo en la Serie I y se rechazó en la Serie II; volvió a aparecer explícitamente en la carta a Phillips que se centra en la chispa magneto-eléctrica; y ahora, aunque sin mencionar su nombre, se introduce en la Serie IX. La diferencia capital con la situación en la Serie II es que ya no volverá a ser rechazado.

Se nos pide que admitamos la existencia de un estado mantenido por la corriente original, un estado que es el que produce, por reacción, la corriente inducida cuando se abre el circuito. Como puede verse, nos encontramos en un marco teórico similar al delineado en el §60 de la Serie I; se requiere una explicación de la corriente inducida al interrumpirse la inductora y se encuentra en la descarga de un estado de tensión previo. ¿Cómo podríamos visualizar este estado? El mismo

Faraday nos proporciona una analogía útil en una anotación del *Diary* que guarda estrecha relación con las ideas del párrafo que estamos analizando:

That the original current should be able to exalt and sustain a power which can react like a spring when the original current ceases, and with an intensity very much greater than that original force, implies, I think, some intermediate or collateral state of the force or forces aside from direct electrical action --for reaction is higher in the quality of intensity than the original action.⁴⁴

A lo que aquí se atribuye un poder de reaccionar, y en el texto de la Serie IX que estamos discutiendo se llama 'state', es como un muelle que ha sido tensado paulatinamente y que salta al eliminarse la corriente inductora que lo comprime. Es la corriente original, es decir, la fuerza magnética a ella asociada, la que sostiene el estado de tensión que, al interrumpirse la corriente, se descargará produciendo una corriente de 'intensidad' mayor. Ese estado está jugando el papel de una especie de acumulador de fuerza que se manifiesta cuando se abre el circuito. 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.

Ahora bien, el mecanismo de actuación del estado exige una cadena de acción, en definitiva una convertibilidad entre la fuerza eléctrica y la magnética. No basta con que consideremos la fuerza eléctrica y la

⁴⁴ *Diary*, II, §2188, p. 345, 17 de noviembre de 1834, el subrayado es mío.

magnética como dos fuerzas que, con un soporte físico común o dependiendo de una condición peculiar de la materia, se ejercen en direcciones perpendiculares entre sí, como ya sabemos a raíz del estudio de la inducción electromagnética.⁴⁵ Debemos admitir que la una es convertible en la otra y recíprocamente, con lo que no están en una proporción fija; la conversión se lleva a cabo mediante un proceso en el que un eslabón imprescindible es el estado electro-tónico. Lo que Faraday tiene en mente aquí es un proceso complejo que podríamos quizá intentar entender imaginando los siguientes términos conectados entre sí: fuerza eléctrica, fuerza magnética, estado electro-tónico y corriente inducida final. Un proceso cuyas particularidades confiesa desconocer pero cuya necesidad se le impone. Lo vemos claramente en las frases finales del párrafo, donde afirma que el proceso de producción de la corriente inducida no puede explicarse mediante la simple reacción de la fuerza eléctrica sobre sí misma. Tiene que entrar en juego la fuerza magnética y la acción de ésta produce un estado capaz de acumular fuerza. Con ello, el estado electro-tónico aparece como un eslabón en la

⁴⁵ El 26 de marzo de 1832, mientras está completando las investigaciones que culminan en la Serie II, anota:

The mutual relation of electricity, magnetism and motion may be represented by three lines at right angles to each other, any one of which may represent any one of these points and the other two lines the other points. Then if electricity be determined in one line and motion in another, magnetism will be developed in the third; or if electricity be determined in one line and magnetism in another, motion will be developed in the third; or if electricity be determined in one line and magnetism in another, motion will occur in the third. Or if magnetism be determined first then motion will produce electricity or electricity motion. Or if motion be the first point determined, Magnetism will evolve electricity or electricity magnetism (*Diary*, I, §403, p. 425, 26 de marzo de 1832).

cadena de acción que produce la corriente inducida, y se confirma así la visión causal del estado que se apuntaba en el texto del *Diary* que vimos anteriormente.⁴⁶

Apreciaremos mejor este último punto si lo comparamos con el enfoque del americano Joseph Henry, el cual, como es bien sabido, había descubierto la autoinducción dos años antes de que Faraday se ocupara de ella. Henry informa de su descubrimiento en el párrafo final de un breve artículo en el que describe algunos experimentos que ha hecho sobre inducción de corrientes utilizando electroimanes. Como Faraday dos años más tarde, Henry ha observado la chispa que se produce en un circuito al interrumpir la corriente. La estudia variando los conductores que conectan los polos de la batería y concluye:

The effect appears somewhat increased by coiling the wire into a helix; it seems also to depend in some measure on the length and thickness of the wire; I can account for these phenomena only by supposing the long wire to become charged with electricity which by its reaction on itself projects a spark when the connection is broken.⁴⁷

A Henry no le causa ningún problema admitir una reacción directa de la electricidad sobre sí misma que es precisamente lo que excluye Faraday. Desde el punto de vista de este último, la reacción de la fuerza eléctrica no podría producir este fenómeno de aparente creación de fuerza; hay un proceso complejo de conversión y reconversión entre fuerza eléctrica y magnética en el que ocupa un lugar fundamental el estado electro-tónico.⁴⁸

⁴⁶ Véase más arriba, pp. 135-136.

⁴⁷ HENRY-1832, p. 406. Henry amplía sus observaciones en su HENRY-1835.

⁴⁸ Berkson analiza también la introducción en el §1114 de la noción de estado

3. 3. Whewell y Faraday sobre la inducción

A raíz de su lectura de la Serie IX, Whewell planteó a Faraday algunas reflexiones sobre el fenómeno de autoinducción y, más generalmente, sobre sus investigaciones relacionadas con la inducción electromagnética. Desde nuestro punto de vista, el interés que tiene el análisis del breve intercambio epistolar que transcurrió entre los dos hombres reside en dos puntos: en primer lugar, las consideraciones que se cruzan respecto al concepto de inducción; en segundo lugar, las precisiones de Faraday acerca de la noción de estado electro-tónico.

El 9 de septiembre de 1835 Whewell escribía a Faraday desde Cambridge anunciándole su reciente lectura de la Serie IX y su deseo de consultarle las dudas que la lectura le habían suscitado. Las dudas que Whewell plantea tienen su origen en su firme convicción de que los fenómenos de inducción descubiertos por Faraday deben analizarse en términos de inercia. Whewell escribe:

I have been strongly impressed with the notion of the inertia of the electrodynamic current, ever since I read your first series of researches. I state it thus. "A substance when put in motion by another substance, produces, at the first instant, an impulse opposite to that of the motion; if the velocity be uniform, no further effect is perceived till the motion is stopped; and at that instant, an impulse is produced in the direction of the motion." Now this description is a full and exact account of the laws, alike, of electrical currents and mechanical collision. How then can I help identifying the two cases? ⁴⁹

electro-tónico. En su análisis el estado se introduce para explicar el efecto de la fuerza magnética sobre el alambre (BERKSON-1974, p. 71). Por mi parte creo que el papel fundamental que juega el estado electro-tónico aquí es el de acumulador de fuerza y mediador de la conversión entre fuerza eléctrica y magnética.

Se recordará que en la carta a Phillips de 17 de octubre de 1834, Faraday también había mencionado la posibilidad de aplicar la noción de cantidad de movimiento al mismo efecto pero la había descartado inmediatamente observando que el efecto aumentaba con la modificación del conductor.⁵⁰ Sin embargo, como vemos Whewell no ha quedado convencido, y propone su analogía no sólo en el caso de la autoinducción, sino también en el de la inducción sobre un circuito secundario.

En el caso de la autoinducción la analogía parece clara: al establecer el contacto en el circuito, el fluido eléctrico antes en reposo se pone en movimiento produciendo un impulso en dirección contraria (la primera corriente inducida). Mientras que el movimiento del fluido prosigue a velocidad uniforme no se detecta ningún efecto; cuando se interrumpe el contacto en el circuito, el fluido se detiene y produce un impulso en la dirección del movimiento (la segunda corriente inducida). En términos similares transcurre la analogía en el caso de la inducción de una corriente sobre otro alambre. En este caso, sin embargo, Faraday apuntará una dificultad: el análisis de Whewell parece suponer en el alambre inducido un fluido en movimiento del que sólo son detectables sus efectos inerciales.

La segunda observación de Whewell hace referencia al concepto de inducción que Faraday ha utilizado. Whewell critica el uso de Faraday:

⁴⁹ W. Whewell a M. Faraday (9 de setiembre de 1835), FARADAY-Corres, I, carta nº 189, pp. 293-294, p. 293, subrayados de Whewell.

⁵⁰ El argumento se expone más explícitamente en §1077 de la Serie IX. Años después Maxwell reproducirá el argumento, el bien añadirá palabras de elogio respecto de la analogía mecánica. MAXWELL-Treatise, §§549-550.

The facts which occur at making or breaking contact are *not* induction, if induction means, as by analogy it should mean, the condition produced by the neighbourhood of an electric circuit. These facts mark the *beginning and end* of induction. Whether there is a permanent condition produced by a neighbouring circuit or not, this class of facts has no right to the name. But allowing the analogy of mechanical action to obtain in the action of electrodynamic wires (I have shown above how strong the analogy is) we see clearly what these facts of instantaneous action are. They are the *reaction* of the current in which motion is produced by induction. You have yourself so called them (1114) You say "a current sustains a state which when allowed to *react*, at the cessation of the original current, produces a second current." I think therefore that in consistence with your own views, all the facts produced by the beginning and end of electrodynamical proximity should be ascribed to *electrodynamical reaction*.⁵¹

Aparentemente, Whewell, como vimos que ocurría con el mismo Faraday, para considerar un fenómeno como perteneciente a la categoría de inducción requiere que sea permanente. Es por ello que los hechos que se producen al establecer o interrumpir el contacto en un circuito, o sea las corrientes inducidas, no le parecen formar parte de la inducción. 'Inducción', según Whewell, significa propiamente la condición producida por la proximidad de un circuito eléctrico. Whewell está utilizando la analogía con la inducción electrostática: la presencia de un cuerpo cargado provoca la aparición de carga en otro situado en su proximidad. Desde este punto de vista, lo que más se ajustaría a las exigencias de Whewell es el estado electro-tónico de Faraday, puesto que es el estado o condición en que supuestamente se encuentra un conductor en la proximidad de un circuito eléctrico.

Para identificar los hechos que se producen al establecer e

⁵¹ W. Whewell a M. Faraday (9 de setiembre de 1835), FARADAY-Corres, I, carta nº 189, I, pp. 293-294, subrayados de Whewell.

interrumpir el contacto Whewell utiliza su analogía con la acción mecánica. De acuerdo con ésta, las corrientes que se producen al conectar y desconectar el circuito son efectos inerciales del movimiento inducido de un fluido, como hemos visto más arriba. En apoyo de su análisis Whewell cita al propio Faraday, en particular el §1114 de la Serie IX que hemos analizado largamente. Sin embargo, parece pasársele por alto el hecho de que en el texto que cita, Faraday habla claramente de la reacción de un estado. Además, ignora también que sólo una línea más abajo del texto que cita, Faraday excluye una reacción directa de la fuerza eléctrica.

La carta de Whewell termina con una observación de interés con respecto a la ley de la inducción magneto-eléctrica que Faraday formuló en la Serie I.⁵² Whewell considera a esta ley como la "law which governs the direction of an electrodynamic current produced by motion", y refiriéndose a la teoría de Ampère escribe:

it seems to me that taking his theory, and supposing the electric fluid to have inertia, the only point in this part of the subject, which remains obscure, is the law of electrodynamic induction properly so called, that is the force by which a current produces a current in a neighbouring substance, whether a current be a vibration, a strain, or anything else.⁵³

Vemos como Whewell distingue claramente entre la ley que Faraday había descubierto y que se limita a proporcionar el sentido de la corriente inducida y la ley de la inducción propiamente dicha, esto es, la ley que explica la fuerza inductiva de la corriente.

⁵² ERE, Serie I, §114. Véase Capítulo 2, sección 2.3

⁵³ W. Whewell a M. Faraday (9 de setiembre de 1835), FARADAY-Corres. I, carta nº 189, I, p. 294.

La respuesta de Faraday no se hace esperar. Después de comentar algunas observaciones que Whewell le había hecho acerca de su terminología,⁵⁴ comienza abordando el problema del estatus de su ley de la inducción. Faraday se mostrará implícitamente de acuerdo con la distinción de Whewell comentado que "If I could see the true relations of the currents in the phenomena which I have called phenomena of *Volta-induction*, and which relation I think you say is *obscure*..."⁵⁵ La cuestión es importante porque muestra que la explicación de la inducción en términos del corte de las líneas de fuerza sigue sin ser completamente satisfactoria para Faraday. Continúa habiendo puntos oscuros en el fenómeno de inducción electromagnética, en particular en los fenómenos de inducción volta-eléctrica. De ahí que se mantenga la noción de estado electro-tónico, como hemos visto en nuestro análisis de la Serie IX.

A renglón seguido Faraday comienza a plantear sus dudas respecto del análisis que Whewell había desarrollado en términos de inercia

⁵⁴ En su carta Whewell había sugerido a Faraday la adopción del término 'electrodynamic induction' para referirse a todos los casos de inducción, en lugar de los dos que él había introducido, 'volta-electric induction' y 'magneto-electric induction'. Whewell basaba su sugerencia en el proceder de Ampère, el cual, después de haber mostrado la identidad de la acción electro-magnética, voltaica y magnética, había introducido el término 'electrodynamic action' para englobar a todas. (W. Whewell a M. Faraday, 9 de setiembre de 1835, FARADAY-Corres, I, carta nº 189, I, p. 293).

Faraday, sin embargo, no acepta la sugerencia porque, si bien reconoce que la teoría de Ampère proporciona la mejor representación de los hechos, puntualiza que tiene algunas reservas respecto de ella y, desde su punto de vista, utilizar el término 'electrodynamic' le comprometería inevitablemente con la teoría. Faraday prefiere sus términos porque piensa que son descriptivos, es decir, se limitan a describir cómo se producen los efectos sin transmitir carga teórica. (M. Faraday a W. Whewell, 19 de setiembre de 1835, FARADAY-Corres, I, carta nº 190, pp. 294-296, p. 295.)

⁵⁵ *Ibidem*, p. 295, subrayado de Faraday.

escribiendo:

Why for instance in the experiment (1090) should the action be transferred from the wire carrying the original current to the neighbouring wire if it be an effect of momentum? The second wire is carrying no current during the time that the electricity is moving through the first, why then on stopping the current in that first wire does not its effect of momentum appear in it also?⁵⁶

El experimento del §1090 de la Serie IX es el de las dos bobinas concéntricas que comentamos más arriba. Si una de ellas se conecta a una pila y los extremos de la otra se conectan entre sí, al abrir el circuito se induce una corriente en la bobina secundaria mientras que aparece una chispa casi imperceptible en el punto de apertura. Faraday está apuntando a la dificultad que señalamos anteriormente en el análisis de Whewell. Si la inercia juega algún papel, no se entiende por qué no produce también en la bobina primaria algún efecto cuando se interrumpe la corriente.

En relación a las observaciones de Whewell acerca del concepto de inducción que utiliza, Faraday escribe:

With respect to *induction* remember that when I first used the term I believed that the neighbouring wire assumed & retained a peculiar state (called the *electrotonic state*) as long as the original current was continued (60. 67); and considered the two currents produced only as the particular conditions belonging to the commencement & conclusion of this state. Considered as parts of that induced state I think they might then fairly be called phenomena of *induction*.⁵⁷

Faraday también considera que 'inducción' debe referirse a un fenómeno

⁵⁶ *Ibidem*, pp. 295-296.

⁵⁷ *Ibidem*, p. 296.

permanente que es precisamente la creación del estado electro-tónico. De hecho lo había dejado claro en la Serie I, cuando, refiriéndose al estado escribía: "This state is altogether the effect of the induction exerted"⁵⁸ Por eso, desde su punto de vista, las dos corrientes transitorias, siendo partes del estado, tienen derecho al nombre de 'inducidas'. Ahora bien, esta precisión de Faraday confirma la idea de que el estudio de la autoinducción ha provocado un cambio importante en la noción de estado electro-tónico. Si las corrientes inducidas forman parte del estado, parece innegable que pueden caracterizarse como los efectos que producen las variaciones del estado electro-tónico. Las corrientes inducidas son los efectos perceptibles de la variación del estado.

Obtenemos ulterior confirmación de este punto en la parte final de la respuesta de Faraday. El no acaba de comprender la analogía mecánica de Whewell, porque le parece que exige el movimiento uniforme del fluido en el conductor sometido a inducción, en el intervalo entre la dos corrientes inducidas. Desde su punto de vista, la única forma de entenderla es sustituir el fluido por su estado electro-tónico. Faraday escribe,

You say "a substance when put in motion by another substance, produces, at the first instant, an impulse opposite to that of the motion; if the velocity be uniform, no further effect is perceived till the motion is stopped; and at that instant, an impulse is produced in the direction of the motion" and you say "this is a full & exact account of the laws alike of electrical currents and mechanical collision"; then afterwards you add "we see clearly what these facts of instantaneous action are. They are the reaction of the current in which motion is produced by induction etc. " Now if this second current had had an existence during the time that the first current was continued I could have better conceived the notion of momentum. As

⁵⁸ERE, Serie I, §67.

the second instantaneous current does not exist I take it for granted you assume the electrotonic (60) or peculiar (1114) state; but still that will justify the application of the word induction to it either at its beginning its continuance or its termination. Now is it not possible that this state may be a condition accounting for the phenomena on some other principle than that of momentum merely?⁵⁹

Desde su punto de vista el estado electro-tónico es lo único permanente que puede jugar el papel del movimiento uniforme del fluido en la analogía mecánica de Whewell. En esta analogía los efectos inerciales al comienzo y final del movimiento del fluido se asimilan a las corrientes inducidas. Para Faraday, las corrientes inducidas pueden identificarse con el comienzo y final de algo permanente, el estado electro-tónico. Son las variaciones del estado electro-tónico las que causan las corrientes inducidas.

Ahora bien, a partir de la Serie II sus reflexiones sobre el estado electro-tónico han permanecido en el ámbito de lo privado, porque como le explica a Whewell,

I have given up this electrotonic state for the time (242) as an experimental result (remember my researches are EXPERIMENTAL) because I could find no fact to prove it but I cling to it in fancy or hypothesis (242. 1114) from general impressions produced by the whole series of results.⁶⁰

Sin embargo, la investigación sobre la acción inductiva de la corriente sobre sí misma ha revelado aspectos del fenómeno de inducción que le han forzado a reintroducir públicamente su estado electro-tónico. Sigue

⁵⁹ M. Faraday a W. Whewell, 19 de septiembre de 1835, FARADAY-Corres, I, carta nº 190, p. 296. La referencia al §60 de la Serie I no permite dudar de que en el §1114 de la Serie IX se refería al estado electro-tónico, aunque sin mencionar su nombre.

⁶⁰ *Ibidem*, mayúsculas de Faraday.

sin tener evidencia experimental de la existencia del estado, pero ello no obsta para que continúe siendo pieza fundamental en sus ideas sobre la inducción. Ya lo vimos precisamente en nuestro análisis del §1114 de la Serie IX que aquí cita Faraday: en la base del argumento estaba la existencia del estado. Desde su punto de vista, el estado está ligado a la explicación completa de la inducción, como parece desprenderse de sus palabras en el texto que precede a este último. Allí Faraday se preguntaba: " is it not possible that this state may be a condition accounting for the phenomena ? "

En el capítulo anterior y en éste nos hemos movido en el contexto de la inducción electromagnética. Hemos asistido al nacimiento del concepto de estado electro-tónico como la respuesta de Faraday a las anomalías presentadas por el fenómeno de inducción: transitoriedad de la primera corriente inducida y recurrencia del fenómeno en sentido opuesto. Con la extensión de la noción del corte de líneas a la inducción volta-eléctrica, el estado se "abandona" en la Serie II. Sin embargo, su permanencia como parte del esquema teórico con que Faraday se enfrenta al fenómeno de inducción se demuestra por su reintroducción en la investigación sobre la autoinducción. En su respuesta a las anomalías de este nuevo fenómeno, Faraday ha eliminado de su concepto de estado electro-tónico el aspecto de resistencia dinámica a la corriente inducida y lo ha dotado de una dimensión causal.

En el capítulo siguiente penetraremos en un nuevo contexto: la investigación sobre la inducción electrostática. El 3 de noviembre de 1835, Faraday anota en el *Diary*:

Have been thinking much lately of the relation of common and voltaic electricity: of induction by the former and decomposition by the latter, and am

quite convinced that there must be the closest connexion. Will be first needful to make out the true character of ordinary electrical phenomena.⁶¹

Como veremos, la investigación sobre los fenómenos producidos por la electricidad estática van a estimular reflexiones en las que de nuevo se recurrirá al estado electro-tónico.

⁶¹ *Diary*, II, §2468, p. 387, 3 de noviembre de 1835.

CAPÍTULO 4

HACIA UNA TEORÍA UNIFICADA DE LA ELECTRICIDAD Y EL MAGNETISMO

Los años 1837 y 1838 fueron testigos de una intensa actividad de Faraday. Es fundamentalmente el *Diary* el que nos lo revela: en las páginas correspondientes se registran infinidad de experimentos de los que sólo una parte alcanzarán las cuatro Series: XI, XII, XIII y XIV, que publica en estos dos años. En esta larga investigación se revela la ambición teórica de Faraday: se trata nada menos que de construir una teoría de todos los fenómenos eléctricos, tanto de los producidos por la electricidad estática como los que dependen de su descarga. La Serie XI está dedicada por entero a la exposición de la teoría de Faraday de la inducción electrostática. la Serie XII comienza un examen de los modos de descarga: conducción, descarga electrolítica, descarga disruptiva y convección, que prosigue en la Serie XIII, la cual finaliza con un par de secciones dedicadas a la naturaleza de la corriente eléctrica y su fuerza transversal, esto es, el magnetismo. La Serie XIV se dedica a la naturaleza de la fuerza eléctrica y vuelve al tema de la relación entre fuerza eléctrica y fuerza magnética.

Desde el punto de vista de este trabajo, no se trata, sin embargo, de llevar a cabo un análisis exhaustivo de la teoría de la electricidad de Faraday.¹ Nuestro objetivo es trazar la historia de la noción de estado

¹ Se encontrarán estudios de la electrostática de Faraday en WILLIAMS-1965, pp.

electro-tónico en la obra de Faraday, y en este sentido lo que nos interesa es ver cómo y por qué Faraday apela nuevamente a esta noción en las Series XIII y XIV cuando, después de haber desarrollado su teoría de la electricidad, intenta precisar la relación entre fuerza eléctrica y fuerza magnética.

Antes de analizar en detalle los párrafos dedicados a la relación entre electricidad y magnetismo, nos ocuparemos de dos temas en la teoría de la electricidad: el descubrimiento de la capacidad inductiva específica y la curvatura de las líneas de inducción estática. Ambos constituyen, desde el punto de vista de Faraday, casi una prueba concluyente de su idea básica: la acción inductiva no es una pura acción a distancia como lo quiere la teoría en vigor, sino una acción transmitida entre partículas contiguas del medio dieléctrico. El mismo Faraday nos indica el origen de esta idea fundamental, remitiéndonos a sus investigaciones en electroquímica:

When I discovered the general fact that electrolytes refused to yield their elements to a current when in the solid state, though they gave them forth freely if in the liquid condition (380. 394. 402.), I thought I saw an opening to the elucidation of inductive action, and the possible subjugation of many dissimilar phenomena to one law. For let the electrolyte be water, a plate of ice being coated with platina foil on its two surfaces, and these coatings connected with any continued source of the two electrical powers, the ice will charge like a Leyden arrangement, presenting a case of common induction, but no current will pass. If the ice be liquefied, the induction will fall to a certain degree, because a current can now pass (...). As, therefore, in the electrolytic action, *induction* appeared to be the *first* step, and *decomposition* the *second* (...); as the induction was the same in its nature as that through air, glass, wax, &c. produced by any of the

274-320; AGASSI-1971, pp. 259-291; BERKSON-1974, pp. 81-83; GOODING-1978, pp. 117-149; NERSESSIAN-1984, pp. 47-54.

ordinary means; and as the whole effect in the electrolyte appeared to be an action of the particles thrown into a peculiar or polarized state, I was led to suspect that common induction itself was in all cases an action of contiguous particles, and that electrical action at a distance (i. e. ordinary inductive action) never occurred except through the influence of the intervening matter.²

El primer tema del que nos ocuparemos, la capacidad inductiva específica, es importante porque, cuando se considera la acción inductiva de un cuerpo electrificado, traslada la atención al medio en que el cuerpo está inmerso. La acción inductiva no se transmite por igual en todos los medios, algunos de ellos tienen una mayor capacidad para la inducción. En lo que respecta al segundo tema, en la curvatura de las líneas Faraday ve la prueba más evidente de su concepción de la inducción; para él la curvatura de las líneas se sigue naturalmente de la acción de partículas contiguas.

Estos dos temas están relacionados con la cuestión más arriba mencionada de la conexión entre electricidad y magnetismo como el lugar donde Faraday recurre una vez más a su estado electro-tónico. En primer lugar, en las Series XIII y XIV Faraday se preguntará si también la acción magnética se transmite, como la acción inductiva entre cuerpos electrificados, mediante las partículas de la materia interpuesta. Además, atribuirá esa curvatura que constituye, según su punto de vista, la característica esencial de las líneas de fuerza eléctrica a una tensión lateral o repulsión entre las líneas. Esta tensión lateral la identificará con un supuesto estado de la fuerza magnética, que sería el correspondiente a la fuerza transversal, magnética, de la corriente.

² ERE, Serie XI, §1164, subrayados de Faraday.

4. 1. El descubrimiento de la acción del medio en la transmisión de la inducción electrostática

4. 1. 1. El principio de Inducción

La teoría de la electricidad de Faraday se basa en un principio fundamental:

Amongst the actions of different kinds into which electricity has conventionally been subdivided, there is, I think, none which excels, or even equals in importance that called *Induction*. It is of the most general influence in electrical phenomena, appearing to be concerned in every one of them, and has in reality the character of a first, essential, and fundamental principle.³

Y unos párrafos más abajo,

All *charge* is sustained by induction. All phenomena of *intensity* include the principle of induction. All *excitation* is dependent on or directly related to induction. All *currents* involve previous intensity and therefore previous induction. INDUCTION appears to be the essential function both in the first development and the consequent phenomena of electricity.⁴

Para Faraday no hay carga libre. Este es un punto crucial que hay que comprender para poder penetrar en su electrostática y su teoría de la electricidad. Aquí se separa Faraday de sus contemporáneos partidarios de la teoría de los dos fluidos eléctricos o de un sólo fluido, en definitiva los que veían en la electricidad una sustancia, y del lector moderno que

³ *ibidem*, §1162, subrayado de Faraday.

⁴ *ibidem*, § 1178, subrayados y mayúsculas de Faraday.

se acerca a sus escritos desde la noción de partículas cargadas. Supongamos una botella de Leyden cargada, suprimamos la barra conectada al revestimiento interior con la que se ha cargado la botella y conectemos a tierra su revestimiento exterior. En esta situación la botella no presenta ningún fenómeno eléctrico exterior. Las fuerzas inductivas presentes están totalmente comprometidas en la inducción que tiene lugar entre los revestimientos de la botella a través de las partículas del vidrio que los separa. En esta especie de "caja de Faraday" no hay signos de electricidad ni en el exterior ni en el interior. Aislemos la botella y conectemos de nuevo la barra con el revestimiento interior. Entonces la barra mostrará signos de electricidad y el revestimiento exterior de la botella inducirá hacia otros objetos externos. Desde el punto de vista de Faraday, lo que ha ocurrido es una redistribución de las fuerzas inductivas. Antes el revestimiento exterior sólo podía inducir hacia el revestimiento interior y viceversa; ahora, parte de la fuerza inductiva del revestimiento interior se dirige, a través del aire, hacia objetos externos y por tanto, parte de la fuerza del revestimiento exterior que antes estaba dirigida sólo hacia el interior actúa necesariamente hacia objetos externos. Parece que en el revestimiento exterior de la botella ha aparecido carga, pero esto, para Faraday, es un error grave: lo que ha tenido lugar es una redistribución de las fuerzas inductivas.⁵

¿Qué es la inducción? La Serie XI se dedica a argumentar en favor de esta respuesta:

At present I believe ordinary induction in all cases to be an action of contiguous particles consisting in a species of polarity, instead of being an action of either particles or masses at sensible distances; and if this be true, the distinction and

⁵ ERE, Serie XIV, §§1682-1684.

establishment of such truth must be of the greatest consequence to our further progress in the investigation of the nature of electric forces. The linked condition of electrical induction with chemical decomposition; of voltaic excitement with chemical action; the transfer of elements in an electrolyte; the original cause of excitement in all cases; the nature and relation of conduc'tion and insulation; of the direct and lateral or transverse action constituting electricity and magnetism; with many other things more or less incomprehensible at present, would all be affected by it, and perhaps receive a full explication in their reduction under one general law.⁶

En las líneas precedentes de este mismo párrafo Faraday reconoce que ha tenido que vencer fuertes dudas nacidas de su respeto por los grandes nombres que aparecen en el otro campo : Aepinus, Cavendish, Poisson, han visto la inducción como una acción a distancia procediendo en líneas rectas; pero él considera que la acción a distancia sólo es posible mediante su transmisión entre las partículas del medio.⁷

⁶ *ERE*, Serie XI, §1165.

⁷ Tal y como la formula Faraday, para que su noción de inducción como una acción de partículas contiguas sea una alternativa a la concepción rival que ve en la inducción electrostática una acción a distancia se requiere una clarificación del significado de 'contiguous'. Si entre las partículas contiguas hay una distancia por pequeña que sea podría considerarse que Faraday no ha conseguido eliminar la acción a distancia. Este es precisamente el problema que le planteó un contemporáneo, Robert Hare, profesor de Química en la Universidad de Pensilvania. En su desarrollo de la teoría Faraday había admitido la posibilidad de que una partícula situada en un vacío pudiera actuar sobre otras situadas a una distancia de media pulgada. Con ello parece contradecir su afirmación de que la inducción no es "an action of ether particles or masses at sensible distances". Hare se pregunta: "What is a sensible distance if half an inch is not?" ("A Letter to Prof. Faraday, on certain Theoretical Opinions" (1840), *ERE*, II, pp. 251-261, p. 252.). En su respuesta Faraday niega la contradicción y remite a Hare al §1615 de la Serie XIII donde había aclarado que "the next existing particle being considered as the contiguous one" ("An Answer to Dr. Hare's Letter on certain Theoretical Opinions", (1840), *ERE*, II, pp. 262-

Faraday emplea una estrategia clásica para argumentar en favor de su concepción de la inducción: mostrar la confirmación que ha obtenido de dos consecuencias de dicha concepción.⁸ Si la inducción es una acción de partículas contiguas, la transmisión de la acción inductiva debe verse afectada por la naturaleza del medio en que tiene lugar, o sea, cada medio dieléctrico⁹ debe poseer una capacidad inductiva

274, p. 266.

Tyndall no se mostraba particularmente convencido por la respuesta de Faraday y comentaba "by transferring the conception from masses to particles, we simply lessen size and distance, but we do not alter the quality of the conception" (TYNDALL-1868, p. 68)

El problema ha sido vivamente discutido. Véase HESSE-1962, p. 199; WILLIAMS-1965, p. 311; TRICKER-1966, pp. 79-81; HEIMANN-1971, pp. 241-243. De particular interés resulta el análisis de Gooding en su GOODING-1978. Gooding argumenta que la posición de Faraday se hará comprensible si se admite que ha llevado a cabo una redefinición implícita de la noción de acción a distancia. Para Faraday el rasgo esencial de la acción a distancia es su capacidad de sobrepasar partículas intermedias. Si consideramos tres partículas x , y , z en la línea de acción, la acción a distancia procede de x a z ignorando y , mientras que la acción contigua no puede proceder de x a z sin pasar por y , que en este caso sería "the next existing particle". Cf., sin embargo, las reservas de Nersessian al análisis de Gooding en su NERSESSIAN-1984, p. 53.

⁸ ERE, Serie XI, §§1166-1167.

⁹ Debemos a Faraday la introducción del término 'dieléctrico' en la electrostática. La definición que ofrece en una nota añadida en 1838 al §1166 de la Serie XI es la siguiente: "I use the word *dielectric* to express that substance through or across which the electric forces are acting". El término había sido sugerido por Whewell. En una carta a Faraday del 29 de diciembre de 1836 Whewell escribía:

Thinking over your intended experiments a word occurs to me which, if I understand your arrangements may do very well to express the non-conducting body interposed between two inductive conductors. Call it a *Dielectric*: *Dia* means *through* and we are familiar with it in scientific words as dioptrics, diaphragm, and recently diathermal (citado en WILLIAMS-1965, p. 316, n. 16).

específica que lo caracteriza. En segundo lugar, considera que de su concepción de la inducción se sigue que las líneas de la acción inductiva deben ser curvas. La curvatura de las líneas es para Faraday un hecho incompatible con la concepción rival de la inducción como una acción a distancia.

4. 1. 2. La capacidad inductiva específica

El problema de la capacidad inductiva específica puede plantearse mediante el siguiente experimento mental:

Suppose A an electrified plate of metal suspended in the air, and B and C two exactly similar plates, placed parallel to and on each side of A at equal distances and uninsulated; A will then induce equally towards B and C. If in this position of the plates some other dielectric than air, as shell-lac, be introduced between A and C, will the induction be between them remain the same? Will the relation of C and B to A be unaltered, notwithstanding the difference of the dielectrics interposed between them?¹⁰

Para estudiar cuantitativamente el problema Faraday construye dos aparatos exactamente iguales (véase la figura 17). Cada uno de ellos está formado por dos esferas concéntricas con un espacio hueco entre ambas que puede llenarse con un medio dieléctrico. Un experimento típico con los dos aparatos procede de la siguiente manera. Supongamos que ambos aparatos contienen sólo aire. Se carga uno de ellos y se mide la fuerza electrostática de su bola *B*. Se conectan los dos aparatos para dividir la carga y se miden las fuerzas de sus bolas *B*. Ya que ambos aparatos contienen aire, las fuerzas son iguales y su suma es

¹⁰ ERE, Serie XI., §1252.

igual a la fuerza original.

Si se trata de examinar la diferencia de capacidad inductiva entre

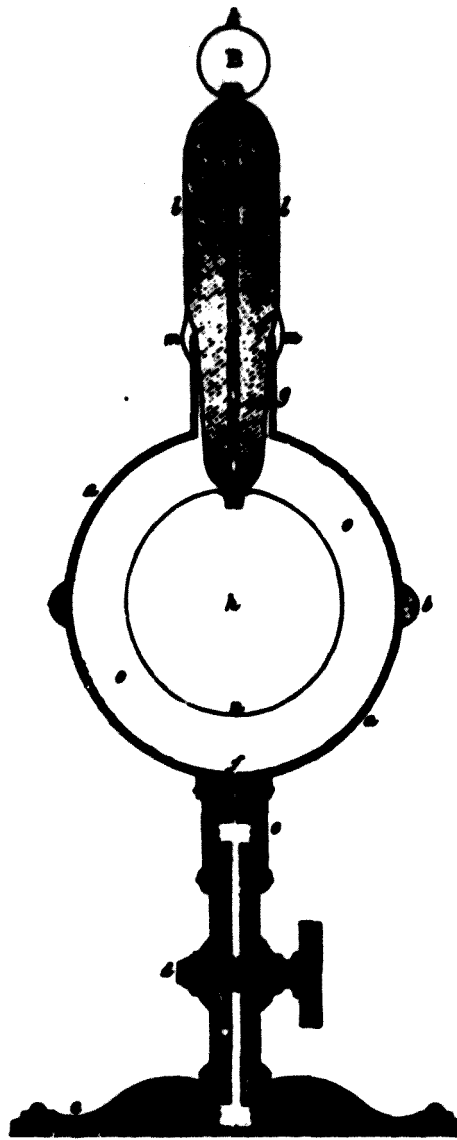


figura 17 (ERE, Plate VII, fig 104)

laca y aire, se llena el espacio entre las esferas de uno de los dos aparatos con una semicorona esférica de laca sólida, mientras que el otro queda lleno de aire. Se carga este segundo aparato y se divide su carga conectándolo con el de laca. Si la fuerza electrostática de la bola *B* del aparato de aire antes de la división es de 290^{11} , se comprueba que

después de la división la bola B del aparato de laca tiene una fuerza electrostática de 113° mientras que la del aparato de aire tiene una fuerza de 114° . Entonces,

it appears that whilst in the division the induction through the air has lost 176° of force [$290^\circ - 114^\circ$], that through the lac has only gained 113° . If this difference be assumed as depending entirely on the greater facility possessed by shell-lac of allowing or causing inductive action through its substance than that possessed by air, then this capacity for electric induction would be inversely as the respective loss and gain indicated above; and assuming the capacity of the air apparatus as 1, that of shell-lac apparatus would be $176/113$ or 1.55.¹²

Desde nuestro punto de vista interpretaríamos el experimento afirmando que al conectar los dos condensadores en paralelo igualamos la diferencia de potencial entre las armaduras en cada uno de ellos, y que el condensador cuyo dieléctrico es la laca, o sea el medio de mayor constante dieléctrica, tiene una capacidad mayor y absorbe más carga que el otro para adquirir el mismo potencial.

Interpretar el experimento dentro del marco teórico de Faraday es mucho más complejo. La dificultad proviene en parte de la brevedad del

¹¹ Los fuerzas se expresan en grados de círculo porque Faraday está utilizando un electrómetro de torsión similar al utilizado por Coulomb. Lo que se mide es el arco que se fuerza el hilo de torsión para que la bola colgada del hilo en el interior del electrómetro, repelida por una bola portadora que se ha cargado por contacto con la bola B del aparato, se aproxime a una posición de equilibrio fijada a una distancia estándar de 30° de arco. (ERE, Serie XI, §§1197-1198).

Nosotros diríamos que esta carga de la bola B es proporcional a la diferencia de potencial entre las placas esféricas, siendo el coeficiente de proporcionalidad la capacidad del conductor, que depende de la constante dieléctrica.

¹² ERE, Serie XI, §§1258-1259.

argumento, y en parte de la ambigüedad de algunos de los conceptos que forman el marco teórico que él utiliza para interpretar el experimento. Así, se nos dice que al conectar los dos aparatos la inducción en el aire ha perdido fuerza inductiva que no ha sido ganada por la inducción a través de la laca. Sin embargo, unas líneas más arriba se afirmaba que lo que había ganado la laca en el proceso era "power or tension".

Para comprender la escueta interpretación de Faraday debemos tener en cuenta que en su teoría la inducción se lleva a cabo mediante un proceso de polarización del medio dieléctrico que ocupa el espacio entre los conductores. Un conductor cargado actúa sobre otro mediante la polarización sucesiva de las partículas del medio circundante. En este estado de polarización,

the particles assuming positive and negative points or parts, which are symmetrically arranged with respect to each other and the inducing surfaces or particles. The state must be a forced one, for it is originated and sustained only by force, and sinks to the normal or quiescent state when that force is removed.¹³

Mientras que las partículas se encuentran en este estado forzado hay en ellas una tensión que proviene de su tendencia a volver a su estado natural. La tensión en cada partícula se representa por la cantidad de variación forzada respecto del estado natural.¹⁴ Se sigue que afirmar que un medio dieléctrico tiene mayor facilidad para permitir la inducción que otro significa que es más polarizable, es decir, si se polarizan las partículas de los dos medios hasta el mismo grado, en las partículas del primero hay menos tensión porque su tendencia a volver al estado

¹³ *Ibidem*, §1298.

¹⁴ *ERE*, Serie XII, §1370.

natural es menor.

Volvamos ahora al experimento de las dos esferas. Cuando se carga el aparato que contiene aire, la inducción se produce en él alcanzando las partículas de aire una determinada tensión. Al conectarlo con el aparato que contiene laca, la tensión en los aparatos se iguala, pero como la laca es más polarizable que el aire requiere un mayor grado de polarización para alcanzar la tensión común. Por consiguiente, el aparato con aire pierde tensión y el que contiene laca gana tensión, aunque menos que la que ha perdido el aparato con aire. El cociente entre ambas es 1.55. Refiriéndose al proceso inverso, esto es, la conversión de inducción en laca a inducción en aire, Faraday escribe en el *Diary*: "As to tension, there should be increase of it when shell lac induction is converted into air induction."¹⁵ Con la corrección debida al hecho de que el aparato que contiene laca está sólo parcialmente lleno, Faraday estima que la capacidad inductiva específica de la laca es doble de la del aire. Después de exponer otros experimentos con otras sustancias Faraday concluye:

I feel satisfied that the experiments altogether fully prove the existence of a difference between dielectrics as to their power of favouring an inductive action through them; which difference may, for the present, be expressed by the term *specific inductive capacity*.¹⁶

Las ideas de Faraday respecto de la inducción estática reciben una ilustración ulterior en la realización del experimento mental con que

¹⁵ *Diary*, III, p. 226, 4 de diciembre de 1837.

¹⁶ *ERE*, Serie XI, §1277, subrayado de Faraday. Mi comentario de los experimentos de Faraday sobre la capacidad inductiva específica se ha beneficiado de los análisis de Jed Z. Buchwald en su BUCHWALD-1977 y M. Norton Wise en su WISE-1981.

planteó la cuestión de la capacidad inductiva específica. El experimento se describe en su "Supplementary Note to Experimental Researches in Electricity. Eleventh Series". *A*, *B* y *C* son tres placas circulares de latón (véase la figura 18). *B* y *C* se conectan a dos láminas de oro. Las distancias *AB* y *BC* son iguales. Se carga libremente *A* con

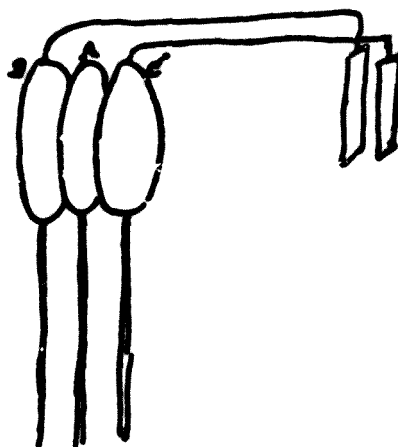


figura 18 (Diary, III, p. 271)

electricidad positiva, se tocan simultáneamente *B* y *C* y luego se aíslan. En esta situación las láminas de oro cuelgan paralelas. A continuación se introduce una lámina de laca sólida entre *A* y *B*. Inmediatamente las láminas de oro se atraen. La interpretación de Faraday es:

As *A* was positive, *B* and *C* were of course negative; but as the specific inductive capacity of shell-lac is about twice that of air (1270.), it was expected that when the lac was introduced between *A* and *B*, *A* would induce more towards *B* than towards *C*; that therefore *B* would become more negative than before towards *A*, and consequently, because of its insulated condition, be positive externally, as at its back or at the gold leaves; whilst *C* would be less negative towards *A*, and therefore negative outwards or at the gold leaves. This was found to be the case; for on whichever side of *A* the shell-lac was introduced the external plate at that

side was positive, and the external plate on the other side negative towards each other, and also to uninsulated external bodies.¹⁷

Mientras que la inducción se lleva a cabo a través del aire entre *A* y *B* y *A* y *C*, el dispositivo no muestra ninguna actividad eléctrica externa, por ejemplo, en las láminas de oro. El caso es análogo al de la botella de Leyden que vemos más arriba en la que toda la fuerza inductiva estaba comprometida en la inducción entre el revestimiento interno y el externo a través del vidrio que los separa. Ahora bien, cuando se introduce la lámina de laca entre *A* y *B*, debido a la mayor capacidad para la inducción de este material respecto del aire hay más inducción entre *A* y *B* que entre *A* y *C*, esto es, parte de la fuerza inductiva comprometida en la inducción entre *A* y *C* actúa ahora entre *A* y *B*. Dado que en todo proceso de inducción las dos fuerzas opuestas deben ser exactamente iguales, en *A* y *B* debe haber exactamente la misma fuerza y eso quiere decir que si ha quedado fuerza libre en *A* se excita más fuerza en *B* de signo opuesto y por tanto *B* es más negativo hacia *A*. Pero, a su vez, si hay más fuerza en *B* comprometida en la inducción hacia *A*, se libera parte de su fuerza que se manifiesta en la lámina de oro conectada con *B*. Análogamente, ya que hay menos fuerza comprometida en la inducción entre *A* y *C*, se sigue que parte de la fuerza de la placa *C* queda libre para manifestarse en la lámina de oro conectada con ella. El resultado es que cuando se introduce la laca entre *A* y *B* las láminas de oro se atraen.¹⁸

¹⁷ "Supplementary Note to Experimental Researches in Electricity. Eleventh Series", *ERE*, I, pp. 413-416, §1308. *Cl., Diary*, III, §§4561-4566, pp. 271-272, 26 de marzo de 1838, y la carta de M. Faraday a W. Whewell de 25 de octubre de 1837 (*FARADAY-Corres*, I, carta nº 213, pp. 315-316).

4. 1. 3. La curvatura de las líneas de fuerza inductiva

La existencia de una capacidad inductiva específica para cada medio dieléctrico pone de relieve el papel esencial del medio en la transmisión de la fuerza eléctrica. Esta era una de las consecuencias que, desde el punto de vista de Faraday, se seguían de su concepción de la inducción como una acción de partículas contiguas. Asimismo, él cree que dicha concepción implica que las líneas de la acción inductiva deben ser curvas. Para Faraday, establecer la curvatura de las líneas proporcionaría una prueba aún más contundente de la verdad de su concepción de la inducción. Al respecto escribía en el *Diary*: "It seems to me that (...) such action in *curved lines* is a better test of *molecular action* than Specific capacity will be."¹⁹ Y en la Serie XI, la sección dedicada a exponer la evidencia experimental en favor de la curvatura de las líneas se abre afirmando que

Amongst those results deduced from the molecular view of induction (1166.), which, being of a peculiar nature, are the best tests of the truth or error of the theory, the expected action in curved lines is, I think, the most important at present; for, if shown to take place in an unexceptionable manner, I do not see how the old theory of action at a distance and in straight lines can stand, or how the conclusion that ordinary induction is an action of contiguous particles can be resisted.²⁰

¹⁸ Debemos retener la estructura de este experimento puesto que, como veremos más abajo, se empleará de nuevo cuando Faraday intente establecer, sin éxito, que la fuerza magnética se transmite por la mediación de las partículas contiguas del medio.

¹⁹ *Diary*, III, §4016, p. 178, 7 de octubre de 1837, subrayados de Faraday.

²⁰ *ERE*, Serie XI, §1215.

Tuvimos ocasión de ver la definición de línea de fuerza magnética que Faraday ofrecía en la Serie I. En el caso de las líneas de fuerza inductiva estática, Faraday advierte que "I use the term *line of inductive force* merely as a temporary conventional mode of expressing the direction of the power in the cases of induction"²¹ Y al final de la Serie precisa que:

I have used the phrases *lines of inductive force* and *curved lines of force* (1231. 1297. 1298. 1302.) in a general sense only, just as we speak of the lines of magnetic force. The lines are imaginary, and the force in any part of them is of course the resultant of compound forces, every molecule being related to every other molecule in all directions by the tension and reaction of those which are contiguous.²²

Para mostrar la curvatura de las líneas de fuerza se vale de dispositivos experimentales muy sencillos. La figura 19a muestra uno de ellos. Se trata de un cilindro de laca sólida, cuya mitad superior se carga negativamente por frotamiento. En el extremo del cilindro se sitúa una bola de latón desprovista de electricidad. Cuando se explora el dispositivo mediante un electrómetro de Coulomb, se detecta carga en los puntos *a*, *b*, *c* y *d*. Para Faraday sólo cabe una interpretación:

the charges at *a*, *c*, and *d* were of such a nature as might be expected from an inductive action in straight lines, but that obtained at *b* is not so: it is clearly a charge by induction, but *induction in a curved line*; for the carrier ball whilst applied to *b*, and after its removal to a distance of six inches or more from *B*, could not, in consequence of the size of *B*, be connected by a straight line with any part

²¹ *Ibidem*, §1231, subrayado de Faraday.

²² *Ibidem*, §1304, subrayados de Faraday.

of the excited and inducing shell-lac.²³

En otro experimento similar se situa una semiestera de latón en el extremo superior del cilindro de laca (véase la figura 19b). Con

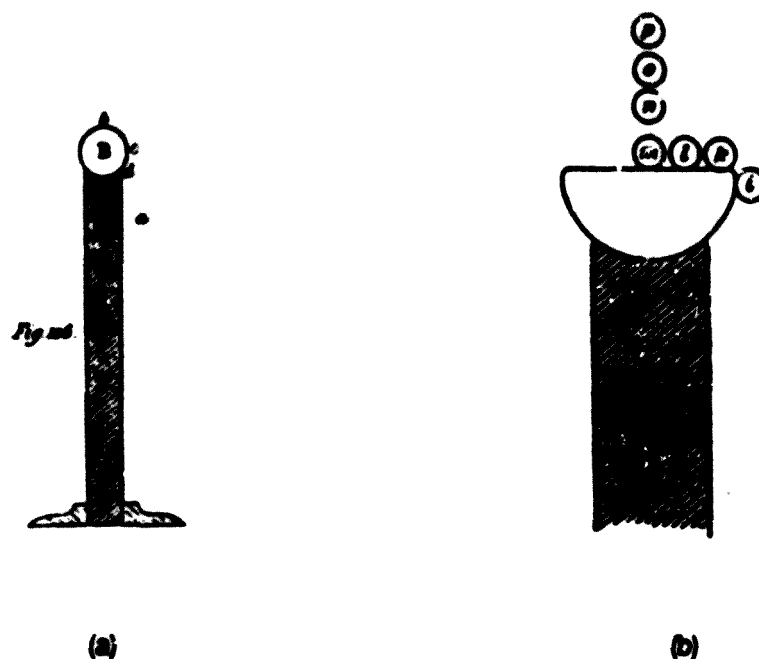


figura 19 (ERE, I, plats VII, fig. 106 y fig. 110)

el electrómetro puede detectarse carga en los puntos mostrados en la figura. Como en el experimento anterior la conclusión inevitable es que las líneas de inducción se curvan. Una línea que conecte un punto del cilindro de laca con n tiene que ser necesariamente curva puesto que no hay inducción a través del metal.

Faraday concluye

All this appears to me to prove that the whole action is one of contiguous particles, related to each other, not merely in the lines which they may be conceived to form

²³ *Ibidem*, §1219, subrayados de Faraday.

through the dielectric, between the *inductric* and the *inducteous* surfaces (1483), but in other lateral directions also. It is this which gives an effect equivalent to a lateral repulsion or expansion in the lines of force, and enables induction to turn a corner (1304). The power, instead of being like of gravity, which causes particles to act on each other through straight lines, whatever other particles may be between them, is more analogous to that of a series of magnetic needles, or to the condition of the particles considered as forming the whole of a straight or a curved magnet.²⁴

Se ha observado que la forma de las líneas de fuerza ha adquirido en la teoría de Faraday una importancia que no tenía en la teoría tradicional, esto es, la teoría matemática de la atracción.²⁵ Con esta última podría determinarse matemáticamente la forma de las líneas de acción, pero esta forma no se identificaba con su naturaleza. De hecho, en la teoría matemática de la atracción podían ocurrir líneas de fuerza curvas, como es el caso en los bordes de un condensador plano. Por el contrario, para Faraday, rectilinearidad y curvatura de las líneas de acción se identifican con acción a distancia y acción de partículas contiguas respectivamente. Rectilinearidad es el resultado de la indiferencia del medio a través del que la acción se transmite, y por tanto se identifica con acción a distancia, siendo el paradigma la acción gravitatoria. Por su parte la curvatura revela un proceso en el medio entre emisor y receptor de la acción.

Ya sabemos la idea que tiene Faraday acerca de este proceso, se trata de un proceso de polarización que procede partícula a partícula en

²⁴ *Ibidem*, §1231. 'inductric' y 'inducteous' son términos introducidos por Faraday: "I propose to call those bodies which are originally charged, *inductric* bodies; and those which assume the opposite state, in consequence of the induction, *inducteous* bodies" (ERE, Serie XII, §1483).

²⁵ GOODING-1978, p. 125 y n. 41.

el medio entre un conductor cargado y otro distante. Pero la acción entre las partículas del medio no se produce únicamente según la dirección de polarización, a lo largo de las líneas de fuerza que en el texto citado se identifican con cadenas de partículas polarizadas. Además, cada una de las partículas del dieléctrico interacciona con todas las partículas contiguas a ella. El resultado de dicha interacción es una repulsión lateral o tensión entre las líneas de fuerza que es lo que explica su curvatura.

Así pues, en todo proceso inductivo entre conductores se ejercen dos fuerzas:

The direct inductive force, which may be conceived to be exerted in lines between the two limiting and charged conducting surfaces, is accompanied by a lateral or transverse force equivalent to a dilatation or repulsion of these representative lines (1224.); or the attractive force which exists amongst the particles of the dielectric in the direction of induction is accompanied by a repulsive or a diverging force in the transverse direction (1304.).²⁶

Nos hemos encontrado anteriormente con otra fuerza lateral o transversal: se trataba de la fuerza lateral o transversal asociada con la corriente eléctrica y que Faraday identificaba con la fuerza inductiva de la corriente, esto es, el magnetismo.²⁷ Ahora en la inducción estática se identifica otra fuerza transversal, una repulsión responsable de la curvatura de las líneas de inducción, que Faraday va a tratar de relacionar, como veremos, en última instancia con el magnetismo. Si consigue mostrar la naturaleza magnética de esta fuerza transversal de la inducción estática, y además puede demostrar que la acción inductiva

²⁶ ERE, Serie XI, §1297.

²⁷ Ver Capítulo 3, p. 147.

magnética, al igual que la acción inductiva estática, se transmite por medio de las partículas contiguas, habrá conseguido mostrar la íntima conexión entre electricidad y magnetismo, tanto en la electricidad estática como en el caso de la corriente eléctrica, y podrá construir una teoría unificada de la electricidad cuya piedra angular será la idea de inducción como una acción de partículas contiguas.²⁸

Ya en la Serie XII, en su discusión de uno de los modos de descarga, la chispa, podemos encontrar una anticipación de sus ideas respecto de la fuerza transversal de la inducción estática. Señala que:

Having long sought for some transverse force in statical electricity, which should be the equivalent to magnetism or the transverse force of current electricity, and conceiving that it might be connected with the transverse action of the lines of inductive force already described (1297.), I was desirous, by various experiments, of bringing out the effect of such a force, and making it tell upon the phenomena

²⁸ En el *Diary* se encuentran algunos indicios de este ambicioso proyecto de Faraday. En una anotación correspondiente al 24 de octubre de 1837 se expone una larga lista de fenómenos que la teoría de la inducción puede explicar:

More easy discharge in rare than in dense air; insulation and conduction; induction; action of points, edges, etc.; ever occurring equality of Pos. and Neg.; unity and undivided condition of the current; residence of electricity on the surface of conductors; why different conductors hold the same quantity on surface; chemical excitation; chemical decomposition; discharge by flame; discharge as a brush --as a spark; conducting power given by acids and salts, etc., in solution. (*Diary*, III, §4202, p. 214, 24 de octubre de 1837).

Asimismo, aunque Faraday es aquí más cauteloso,

common excitation by friction; common excitation by change of form and state; thermo-electricity; induction of currents of Electricity-- this peculiar. (*Ibidem*, §4203).

*of electro-magnetism and magneto-electricity.*²⁹

Así pues, debería existir en la electricidad estática una fuerza transversal correspondiente a la fuerza transversal magnética de la corriente. Este problema junto con el del modo de transmisión de la fuerza magnética ocuparán las reflexiones de los §§1658-1666 de la Serie XIII y §§1709-1735 de la Serie XIV, a donde Faraday remite al lector en una nota insertada al final de este texto. Son los textos que nos van a ocupar en la próxima sección, puesto que en este contexto teórico Faraday recurre una vez más a su estado electro-tónico.

Los dos problemas mencionados, esto es, el problema de la correspondencia entre estados de la fuerza eléctrica y magnética y el del modo de transmisión de la fuerza magnética, tienen su origen más profundo en un principio básico del marco teórico de Faraday: el principio de unidad y convertibilidad de las fuerzas. En 1845 ofrecía la siguiente formulación de este principio:

I have long held an opinion, almost amounting to conviction, in common I believe with many others lovers of natural knowledge, that the various forms under which the forces of matter are made manifest have one common origin; or, in other words, are so directly related and mutually dependent, that they are convertible, as it were, one into another, and possess equivalent of power in their action.³⁰

Ya hemos visto cómo la convertibilidad de las fuerzas eléctrica y magnética jugaba un papel fundamental en la reintroducción del estado electro-tónico en la Serie IX. Ahora, la preservación del principio de unidad va a estimular, por un lado, el intento de identificación de la

²⁹ ERE, Serie XII, §1411.

³⁰ ERE, Serie XIX, §2146.

fuerza transversal de la electricidad estática con un estado de la fuerza magnética. Si esto no fuera posible se tendría una falta de correspondencia entre estados de la fuerza eléctrica y magnética, que pondría en peligro el principio de la unidad de las dos fuerzas. Por otro lado, el mismo principio inspira los argumentos de Faraday en favor de un modo de transmisión de la fuerza magnética igual al de la fuerza eléctrica, mediante la acción de partículas contiguas.

4. 2. El estado electro-tónico, la fuerza transversal de la corriente y la transmisión del magnetismo: Serie XIII

4. 2. 1. La fuerza transversal de la corriente y la fuerza transversal de las líneas de inducción electrostática

La Serie XIII culmina el examen de los modos de descarga: conducción, descarga electrolítica, descarga disruptiva y convección, que comenzó en la Serie XII. En la última sección de la Serie se analiza en primer lugar la naturaleza de la corriente eléctrica, y posteriormente, en los párrafos finales, §§1653-1666, la naturaleza de su fuerza transversal, esto es, el magnetismo. La identificación de la fuerza transversal de la corriente como una acción magnética resulta clara desde el principio. Faraday advierte que "It is time that I should call attention to the lateral or transverse forces of the *current* (...) I refer of course to magnetic action and its relations."³¹

En estos párrafos finales comienza subrayando un hecho conocido respecto a la fuerza transversal de la corriente: está presente en todos los

³¹ ERE, Serie XIII, §1653, subrayado de Faraday. Asimismo en el párrafo siguiente habla de "the magnetic or transverse action of the current".

modos de descarga y es constante en cada uno de ellos. El análisis de los hechos conocidos termina pronto, e inmediatamente Faraday nos advierte que las reflexiones que siguen son de índole especulativa. Van a dedicarse a la naturaleza de la acción lateral o transversal de la corriente, y a la posible conexión entre esta fuerza transversal y la tensión repulsiva responsable de la curvatura de las líneas de inducción estática de la que nos hemos ocupado anteriormente.

Faraday introduce este segundo tema repitiendo sus palabras del §1411 de la Serie XII que hemos visto antes, y, como justificación de la larga búsqueda de que nos hablaba allí, añade

for as the lines of discharge are associated with a certain transverse effect, so it appeared to me impossible but that the lines of tension or of inductive action, which of necessity precede that discharge, should also have their correspondent transverse condition or effect (951.).³²

Notemos la firme convicción que se transparenta en estas líneas: es imposible que no exista ese efecto o condición que será respecto de la electricidad estática lo que la fuerza magnética respecto de la corriente. Dado que toda descarga viene precedida de un estado inductivo de tensión, si la descarga va acompañada de una fuerza magnética, ésta debe estar ya de alguna manera presente en dicho estado previo. En concreto el argumento parece apoyarse en el principio de conservación de la fuerza. Si se niega la existencia de esa fuerza magnética que debe acompañar a la electricidad estática, parece que se afirma la súbita creación de una fuerza, la magnética que acompaña a la corriente.

Hay otra razón que refuerza su convicción de la existencia de esa

³² *Ibidem*, §1058.

fuerza transversal de la electricidad estática. Faraday cree tener en su teoría de la inducción como una acción de partículas contiguas la base de una teoría unificada de la electricidad. Una teoría que da cuenta de la acción de la electricidad estática y su descarga sin admitir ninguna diferencia cualitativa entre ambas. Desde este punto de vista puede comprenderse que busque un equivalente magnético en el estado estático de la electricidad a la fuerza transversal de la corriente. De no existir, la teoría está en peligro puesto que habría que admitir esa diferencia cualitativa que la teoría niega.

En primer lugar intenta establecer la conexión entre ambas fuerzas transversales mediante una analogía que se basa en el fenómeno descubierto por Ampère: la atracción y repulsión entre corrientes del mismo y opuesto sentido:

According to the beautiful theory of Ampère, the transverse force of a current may be represented by its attraction for a similar current and its repulsion of a contrary current. May not then the equivalent transverse force of static electricity be represented by that lateral tension or repulsion which the lines of inductive action appear to possess (1304.)? Then again when current or discharge occurs between two bodies, previously under inductical relations to each other, the lines of inductive force will weaken and fade away, and, as their lateral repulsive tension diminishes, will contract and ultimately disappear in the line of discharge. May not this be an effect identical with the attractions of similar currents? *i. e.* may not the passage of static electricity into current of electricity, and that of the lateral tension of the lines of inductive force into the lateral attraction of lines of similar discharge, have the same relation and dependences, and run parallel to each other?³³

³³ *ibidem*, §1659. En una anotación del *Diary* que puede considerarse, sin duda, como un esbozo del argumento contenido en este párrafo, Faraday escribía:

Ampère's lateral attraction of similar currents is directly opposed to the