

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

Supongamos dos cuerpos cargados con electricidad de signo opuesto. Las líneas de fuerza inductiva que los unen tienen una curvatura que depende de la tensión a que están sometidas las partículas del medio. Cuando esta tensión alcance un valor límite ocurre la descarga y las líneas de fuerza inductiva se debilitan y caen sobre la línea de descarga.³⁴ Faraday ve en este proceso una transformación de la fuerza repulsiva responsable de la curvatura de las líneas en una atracción entre líneas cuando se debilita dicha fuerza, y quiere asimilar esta atracción a la atracción entre corrientes del mismo sentido descubierta por Ampère. Desde este punto de vista, las líneas que se atraen son como pequeñas corrientes del mismo sentido. Asimismo, la analogía permite establecer un paralelismo entre la transformación del estado inductivo en corriente y la transformación de la tensión repulsiva entre líneas de inducción estática en la fuerza transversal asociada a la corriente. Así se resolvería el problema de la súbita aparición de fuerza magnética asociada a la corriente, puesto que ésta ya no surgiría de la

lateral repulsion of the lines of the pre-existing induction, just as the attraction and tension of direct induction is opposed to the cessation of attraction and tension of the following discharge. The two first must therefore be connected, and the former result is probably a direct consequence of the latter (related together as action and reaction) at the moment the latter is let down. (*Diary*, III, §4219, pp. 216-217, 14 de noviembre de 1837).

³⁴ Describiendo el mecanismo de la chispa Faraday escribía:

Theoretically it would seem that, at the moment of discharge by the spark in one line of inductive force, not merely would all the other lines throw their forces into this one (1406.), but the lateral effect, equivalent to a repulsion of these lines (1224. 1297.) would be relieved and, perhaps, followed by a contrary action, amounting to a collapse or attraction of these parts. (*ERE*, Serie XII, §1411, el subrayado es mío).

nada: sería la transformación de otra fuerza previamente existente, la fuerza transversal asociada con las líneas de inducción electrostática. Con ello se respaldaría la necesaria correspondencia entre estados de la fuerza eléctrica y estados de la fuerza magnética, que preservaría la unidad de ambas fuerzas.³⁵

Recurriendo al fenómeno descubierto por Ampère se ha planteado ya una primera conexión entre la fuerza transversal de la corriente y la fuerza transversal de la electricidad estática. Para dar más solidez a esta conexión, Faraday va a mirarla desde el punto de vista de la acción de dichas fuerzas sobre la materia, y esto quiere decir, al menos en lo que respecta a la fuerza transversal de la corriente, introducir el fenómeno de la inducción de corrientes:

The phenomena of induction amongst currents which I had the good fortune to discover some years ago (6. &c. 1048.) may perchance here form a connecting link in the series of effects. When a current is first formed, it tends to produce a current in the contrary direction in all the matter around it; and if that matter have conducting properties and be fitly circumstanced, such a current is produced. On the contrary, when the original current is stopped, one in the same direction tends to form all around it, and, in conducting matter properly arranged, will be excited.³⁶

Estamos ya familiarizados con los elementos de esta descripción del fenómeno de la inducción de corrientes. Sin embargo, debemos notar la introducción de una idea que ya había sido sugerida en la Serie I, y que aquí se recoge señalando que la formación de una corriente tiende a producir otra corriente de sentido opuesto "in all the matter around it",

³⁵ Se encontrará un análisis alternativo de este texto en BERKSON-1974, p. 90.

³⁶ ERE, Serie XII, §1680.

esto es, tanto en la materia conductora como en la no conductora, si bien se precisa que sólo en materia conductora la corriente inducida será efectiva.³⁷

A la vista de esta generalización uno podría preguntarse que ocurriría en el caso de materia no conductora:

Now though we perceive the effects only in that portion of matter which, being in the neighbourhood, has conducting properties, yet hypothetically it is probable, that the non-conducting matter has also its relations to, and is affected by, the disturbing cause, though we have not yet discovered them. Again and again the relation of conductors and non-conductors has been shown to be one not of opposition in kind, but only of degree (1334. 1603.); and therefore, for this, as well as for other reasons, it is probable, that what will affect a conductor will affect an insulator also; producing perhaps what may deserve the term of the electrotonic state (60. 242. 1114.).³⁸

La adopción del estado electro-tónico por las partículas de toda la materia se apoya en un argumento coherente con la teoría de la electricidad que Faraday está manteniendo. Cuando la fuerza eléctrica actúa sobre la materia, ésta adopta un estado de tensión descrito como una polarización de sus partículas. La única diferencia entre conductores y aislantes estriba en la incapacidad de los primeros en mantener la tensión; en ellos la tensión se descarga inmediatamente dando lugar a la corriente. Naturalmente, esta mera diferencia de grado entre conductores y aislantes no puede alterarse cuando se trata de la fuerza magnética, y por ello tanto conductores como aislantes adoptan el estado electro-tónico.

³⁷ ERE, Serie I, §73.

³⁸ ERE, Serie XII, §1661.

Ahora bien, ¿en qué sentido puede ser el fenómeno de inducción de corrientes un "connecting link" en la serie de efectos, como se señala en §1660? La respuesta a esta pregunta resulta crucial para reconstruir las especulaciones de Faraday. Desgraciadamente, lo que él considera especulaciones son simplemente reflexiones que, a su juicio, no cuentan con apoyo experimental, o sólo con uno escaso; no debemos esperar que en ellas Faraday relaje demasiado la habitual cautela de sus escritos. Por ello debemos contentarnos con una respuesta meramente tentativa a la pregunta anterior. La analogía con el efecto amperiano de la atracción y repulsión de corrientes, y la reflexión sobre la naturaleza magnética de la fuerza transversal de la electricidad estática, le impulsan a evocar la cadena de conversiones y reconversiones entre la fuerza eléctrica y la magnética de que trató en el §1114 de la Serie IX. Siguiendo esta línea de pensamiento quiere llamar la atención del papel del estado electro-tónico como causa de las corrientes inducidas y, por consiguiente, eslabón de esa cadena. Así se explicaría el comentario con que inicia el párrafo que sigue al que reintroduce el estado electro-tónico:

It is the feeling of the necessity of some lateral connexion between the lines of electric force (1114); of some link in the chain of effects as yet unrecognised, that urges me to the expression of these speculations.³⁹

Naturalmente el argumento ganará fuerza si es posible detectar algún efecto en un dieléctrico sometido a una fuerza magnética, bien una corriente inducida, bien algún indicio del estado electro-tónico. Faraday reconoce haber llevado a cabo gran número de experimentos al respecto, pero sin resultado alguno.⁴⁰ Anotaciones del *Diary*

³⁹ *Ibidem*, §1662.

correspondientes al 5 de junio de 1838 registran algunos de estos experimentos. La figura 20 muestra el dispositivo experimental empleado. *I* es una bobina con núcleo de hierro; *L* un núcleo de laca sólida; *V* la batería y *G* un galvanómetro. Al conectar y desconectar la

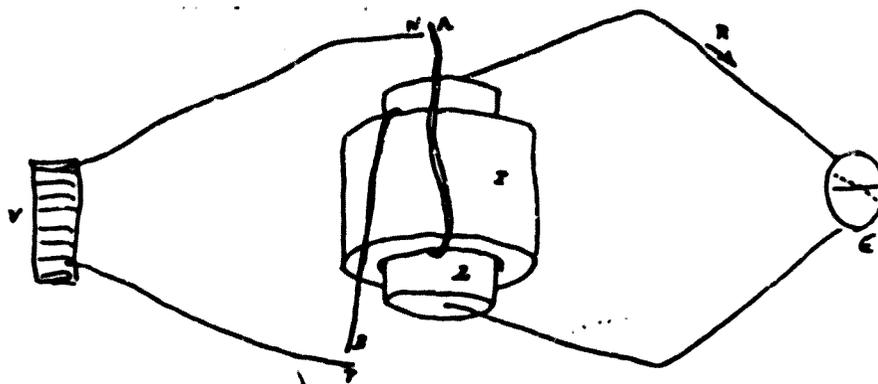


figura 20 (*Diary*, III, p. 282)

batería la aguja del galvanómetro permanece inmóvil. Faraday concluye: "So I cannot thus find any action on insulating bodies analogous to those which occur in conducting bodies: no transverse induction."⁴¹

4. 2. 2. La transmisión de la fuerza magnética

Se recordará que los párrafos de la Serie XIII que estamos analizando tenían dos objetivos: indagar sobre la naturaleza de la acción lateral o transversal de la corriente, y sobre la posible conexión entre esta fuerza transversal y esa tensión repulsiva responsable de la curvatura de

⁴⁰ *Ibidem*.

⁴¹ *Diary*, III, §4648, p. 283, 5 de junio de 1838. Una corriente inducida en un dieléctrico fue detectada por Hertz en 1887 utilizando corrientes inductoras de muy alta frecuencia. Se trata de las corrientes de desplazamiento predichas por Maxwell.

la las líneas de inducción estática de la que nos hemos ocupado anteriormente. Los párrafos que hemos examinado hasta ahora, §§1658-1662, han abordado el segundo tema. El grupo de párrafos §§1663-1665 se dedican a la naturaleza de la acción transversal de la corriente, es decir, el magnetismo.

Faraday aborda la cuestión desde el punto de vista del modo de transmisión de la fuerza magnética:

I think the hypothetical question may at present be put thus: can such considerations as those already generally expressed (1658.) account for the transverse effects of electrical currents? are two such currents in relation to each other merely by the inductive condition of the particles of matter between them, or are they in relation by some higher quality and condition (1654.), which, acting at a distance and not by the intermediate particles, has, like the force of gravity, no relation to them?⁴²

El planteamiento es similar al que hacía al comienzo de la exposición y defensa de su teoría de la electricidad. Allí se trataba de determinar si la interacción entre cuerpos cargados podía ser correctamente descrita como una pura acción a distancia o si se trataba más bien de una acción transmitida por las partículas contiguas del medio. Aquí se plantea el mismo problema con respecto a la interacción entre corrientes. Se trata de determinar si la fuerza transversal responsable de la interacción se transmite, como ocurre en el caso de la fuerza directa de la electricidad, mediante las partículas del medio o si esta fuerza transversal merece ser descrita como una "higher quality and condition", es decir, una fuerza sin relación con la fuerza directa de la electricidad y que actúa a distancia.

⁴² ERE, Serie I, §1663.

Faraday admite, provisionalmente, inclinarse hacia esta segunda posibilidad, pero sin mucha convicción, y concentrándose, realmente, en los argumentos que lo desmentirían:

If the latter be the case, then, when electricity is acting upon and in matter, its direct and its transverse action are essentially different in their nature; for the former, if I am correct, will depend upon the contiguous particles, and the latter will not. As I have said before, this may be so, and I incline to that view at present; but I am desirous of suggesting considerations why it may not, that the question may be thoroughly sifted.⁴³

El argumento de Faraday en favor de que la fuerza transversal de la corriente se transmite mediante las partículas del medio y no a distancia se basa en su firme convicción de que éste es el modo de transmisión de las fuerzas polares, y la fuerza transversal lo es:

The transverse power has a character of polarity impressed upon it. In the simplest forms it appears as attraction or repulsion, according as the currents are in the same or different directions: in the current and the magnet it takes up the condition of tangential forces; and in magnets and their particles produces poles. Since the experiments have been made which have persuaded me that the polar forces of electricity, as in induction and electrolytic action (1298. 1343.), show effects at a distance only by means of the polarized contiguous and intervening particles, I have been led to expect that *all polar forces act in the same general manner (...)* And, as far as I remember, no case of polar action, or partaking of polar action, except the one under discussion, can be found which does not act by contiguous particles. It is apparently of the nature of polar forces that such should be the case, for the one force either finds or develops the contrary force near to it, and has, therefore, no occasion to seek for it at a distance.⁴⁴

⁴³ *Ibidem*, §1664.

⁴⁴ *Ibidem*, §1665, subrayado de Faraday.

Se ha hecho notar que para Faraday la polaridad era la característica esencial de la fuerza eléctrica. Y la polaridad, desde su punto de vista, lleva consigo un modo de acción: de una partícula a la contigua. Cada fuerza desarrolla su opuesta en la partícula contigua, por eso no puede sobrepasarla y actuar a distancia. Sólo fuerzas no polares, como es el caso de la gravitación, pueden actuar a distancia, es decir, indiferentes a las partículas intermedias. La fuerza transversal de la corriente parece ser polar y por lo tanto no puede actuar a distancia.⁴⁵

4. 3. El estado electro-tónico y la relación entre la fuerza eléctrica y la fuerza magnética: Serie XIV

4. 3. 1. Experimentos y análisis

Naturalmente, en el texto que acabamos de ver Faraday se ha limitado a dar razones por las que la fuerza magnética no debe actuar a distancia, pero sin conseguir mostrar que este es el caso. La reflexión sobre este tema, y sobre la posible relación entre la fuerza transversal de la corriente y la fuerza transversal de las líneas de inducción estática, que ha ocupado los párrafos de la Serie XIII que hemos discutido en el apartado anterior, se continúa en la Serie XIV. Concretamente en la sección titulada "Relation of the electric and magnetic forces", formada por los §§1709-1736. Podemos distinguir tres grupos de párrafos en este bloque: §§1709-1726 donde Faraday describe los experimentos llevados a cabo con el objetivo de determinar el modo de transmisión de la fuerza magnética; §§1727-1730 que dedica a analizar los experimentos y a

⁴⁵ GOODING-1978, pp. 127 y ss.

intentar mostrar que la evidencia que de ellos se desprende no debería ser considerada concluyente; y §§1731-1736 en que se retoma la cuestión de la relación entre las fuerzas transversales de la corriente y la electricidad estática. Veremos los dos primeros en este apartado y el tercero en el siguiente.

Los experimentos descritos en los §§1709-1726 son de inducción electromagnética.⁴⁶ En ellos se interponen materiales conductores y dieléctricos entre un imán o una bobina inductora y una bobina conectada con un galvanómetro, y se estudia la corriente inducida en esta última. Si la fuerza magnética se trasmite mediante la acción de las partículas intermedias, se espera que la corriente inducida varíe al interponer los diferentes materiales. En el *Diary Faraday*

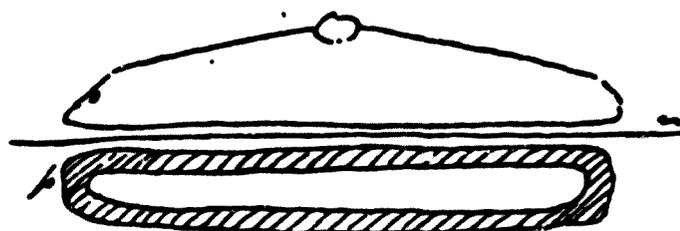


figura 21 (*Diary*, III, p. 339)

plantea claramente el problema:

Put the case thus. If a wire *n* [véase la figura 21] have a current suddenly sent through it, it tends to and will produce a contrary current in the wire *o*; but suppose a thick copper rod *p*, in form of a ring, put on its other side, will not that divert some of the force of *n* from *o*? *n* and *o* may be two helices and *p* a thick block of copper between.

⁴⁶ Cf., *Diary*, III, §§4896-4935, pp. 336-341, 21-28 de agosto de 1838.

If it does, it will show that neighbouring matter has its influence. If it does not, it will go greatly to show that Elect. and Magnetic action are essentially different in their nature.

Must there not be some effect on non-conductors, lateral to a wire carrying a current, correspondent to the effect on conductors?⁴⁷

Todos los experimentos son infructuosos. No importa si entre el dispositivo inductor y el inducido se interpone un material conductor o no conductor, la corriente inducida permanece invariable. La conclusión parece inevitable: a diferencia de la fuerza inductiva de la electricidad estática, la fuerza inductiva de la corriente no se transmite mediante las partículas intermedias.⁴⁸

Pero Faraday no está dispuesto a aceptar esta conclusión:

It is however very evident that such a conclusion cannot be considered as proved. Thus when the metal copper is between the pole and the helix (1715. 1719. 1725.) or between the two helices (1721.) we know that its particles are affected, and can by proper arrangements make their peculiar state for the time very evident by the production of either electrical or magnetical effects. It seems impossible to consider this effect on the particles of the intervening matter as independent of that produced by the inductive coil or magnet C, on the inductive coil or core A (1715. 1721) [véase la figura 22]; for since the inductive body is equally affected by the inductive body whether these intervening and affected particles of copper are present or not (1733. 1725), such a supposition would imply that the particles so affected had no reaction back on the original inductive forces. The more reasonable conclusion, as it appears to me, is, to consider these affected particles as efficient in continuing the action onwards from the inductive to the inductive body, and by this very

⁴⁷ *Diary*, III, §§4916-4918, pp. 339-340, 23 de agosto de 1838, subrayado de Faraday.

⁴⁸ *ERE*, Serie XIV, §1726.

communication producing the effect of *no loss* of induced power at the latter.⁴⁹

Para comprender el oscuro argumento de Faraday debemos fijar

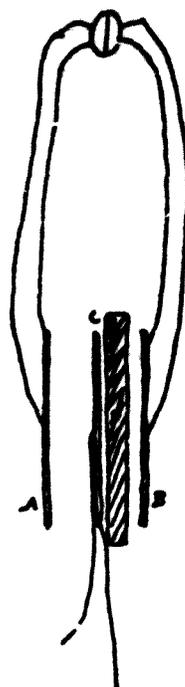


figura 22 (Diary III, p. 340)

primeramente nuestra atención en el dispositivo experimental representado en la figura 22. Se notará la semejanza con el dispositivo de inducción electrostática descrito en la nota suplementaria añadida a la Serie XI.⁵⁰ Allí se utilizaban tres placas metálicas separadas por distancias iguales; se introducía una lámina de material dieléctrico entre dos de ellas y se observaba la redistribución de la fuerza inductiva que tenía lugar. Dicha redistribución, era la prueba de una capacidad diferencial para la transmisión de la inducción electrostática entre el aire y el medio dieléctrico. Aquí la idea es la misma. *A* y *B* son dos espirales conectadas con un galvanómetro; *C* es una tercera espiral conectada

⁴⁹ *Ibidem*, §1727, subrayado de Faraday.

⁵⁰ Véase más arriba, pp. 177-178.

con una batería. Al establecer e interrumpir el contacto con la batería, *C* induce corrientes de sentido contrario en *A* y *B*, y si las distancias *CA* y *CB* se ajustan convenientemente las corrientes inducidas son iguales y la aguja del galvanómetro no se mueve.⁵¹ Lo que Faraday esperaba era que al introducir el bloque de cobre *D* entre *C* y *B*, el movimiento de la aguja del galvanómetro proporcionara indicios de la existencia de una 'capacidad inductiva específica' para la transmisión de la fuerza inductiva magnética, análoga a la detectada en el caso de la inducción electrostática.⁵² Pero éste no es el caso: al introducir el bloque de cobre la aguja permanece en reposo.

Faraday no está dispuesto a plegarse a la evidencia e introduce en el párrafo citado una interpretación de los hechos que los mostrará compatibles con su convicción de que la transmisión de la fuerza magnética no tiene lugar mediante una pura acción a distancia. En primer lugar da por sentado que cuando un conductor se encuentra en la línea de acción magnética sus partículas adoptan un "peculiar state". Este estado no puede ser otro que el estado electro-tónico, y el punto es crucial porque vemos aquí públicamente integrado el estado como algo cuya existencia es muy evidente. Ahora bien, una vez aceptada la existencia del estado en el bloque de cobre, caben dos interpretaciones del experimento. Podría pensarse que la acción de *C* sobre *A* es independiente de la acción de *C* sobre el bloque de cobre y sobre *B*. Desde este punto de vista la aguja permanece en reposo porque la espiral inductora actúa sobre las inducidas como si no hubiera bloque. En otras palabras, la acción inductiva sería como la gravitatoria, y la espiral inductora *C* actuaría del mismo modo que una masa situada en

⁵¹ *Diary*, III, §§4026-4035, pp. 340-341, 28 de agosto de 1838.

⁵² GOODING-1978, p. 130.

C actúa gravitacionalmente a distancia sobre masas situadas en A, B o D, esto es, de forma independiente.

Esta explicación es inaceptable para Faraday, y en su lugar propone otra en la que el papel fundamental lo juega la reacción del bloque D al ser sometido a la acción inductiva. Esta reacción debe entenderse como un efecto de apantallamiento de la fuerza inductiva de C. El bloque D intercepta parte de la acción inductiva de C, pero este efecto se compensa con la mayor eficacia de sus partículas para la transmisión de la acción inductiva. El resultado de esta compensación es que no haya pérdida de poder inducido en B, y por consiguiente que la aguja del galvanómetro permanezca en equilibrio.

Este análisis de la argumentación de Faraday, y en particular la interpretación del efecto de reacción como un apantallamiento de parte de la fuerza inductiva en acción, cobra fuerza si se tiene en cuenta que ya unos años antes había experimentado sobre el efecto de apantallamiento que producían metales interpuestos en la línea de acción magnética. En anotaciones del *Diary* correspondientes a abril de 1832 se registran experimentos en los que aparentemente se tiene éxito en detectar dicho apantallamiento cuando la fuente de fuerza magnética es un imán. Faraday escribe:

Hence moving metals screen: magnetic power off when still metals do not, i. e. the currents of electricity generated by the vicinity of the mag. pole react upon it and neutralize part of its magnetism. As it ought to do and as was expected.⁵³

Ahora bien, el argumento que ha intentado dejar abierta la

⁵³ *Diary*, I, §418, p. 427, 17 de abril de 1832, el subrayado es mío.

posibilidad de la acción de partículas intermedias de la materia conductora en la transmisión de la fuerza magnética, debe completarse con respecto a las partículas de materia no conductora, so pena de establecer una diferencia cualitativa entre conductores y no conductores que la teoría ha negado desde el primer momento. En este caso, sin embargo, la situación es más complicada:

But then it may be asked what is the relation of the particles of insulating bodies, such as air, sulphur, or lac, when they intervene in the line of magnetic action? The answer to this is at present merely conjectural. I have long thought there must be a particular condition of such bodies corresponding to the state which causes currents in metals and other conductors (26. 53. 191. 201. 213.); and considering that the bodies are insulators one would expect that state to be one of tension (...) Nevertheless, as any such state must be of exceedingly low intensity, because of the feeble intensity of the currents which are used to induce it, it may well be that the state may exist, and may be discoverable by some more expert experimentalist, though I have not been able to make it sensible.⁵⁴

También en los no conductores la fuerza inductiva magnética crea un estado que corresponde a ese "estado peculiar" que hemos visto creado en los conductores en un texto anterior. Obviamente este estado no puede ser otro que el estado electro-tónico que, debemos subrayarlo, siguiendo la idea del concepto adquirida en la investigación de la autoinducción, aparece aquí como la *causa* de las corrientes inducidas. Sin embargo, así como en los conductores es un hecho la existencia de corrientes inducidas y cabe la inferencia de este efecto a su causa, el caso de los no conductores es mucho más problemático puesto que Faraday, a pesar de todos sus esfuerzos, no ha sido capaz de detectar

⁵⁴ ERE, Serie XIV, §1728, subrayado de Faraday.

ningún efecto en dieléctricos sometidos a la acción de la fuerza magnética.

Aun así, el estado debe existir, y su existencia garantizará la transmisión de la fuerza magnética mediante las partículas del medio:

It appears to me possible, therefore, and even probable, that magnetic action may be communicated to a distance by the action of the intervening particles, in a manner having a relation to the way in which the inductive forces of static electricity are transferred to a distance (1677.); the intervening particles assuming for the time more or less of a peculiar condition, which (though with a very imperfect idea) I have several times expressed by the term *electro-tonic state* (60. 242. 1114. 1661.). I hope it will not be understood that I hold the settled opinion that such is the case. I would rather in fact have proved the contrary, namely, that magnetic forces are quite independent of the matter intervening between the inductive and the inductive bodies; but I cannot get over the difficulty presented by such substances as copper, silver, lead, gold, carbon, and even aqueous solutions (201. 213), which though they are known to assume a peculiar state whilst intervening between the bodies acting and acted upon (1727.), no more interfere with the final result than those which have as yet had no peculiarity of condition discovered in them.⁵⁵

El estado electro-tónico es el estado que adoptan las partículas de la materia, conductora o no, cuando actúa sobre ellas la fuerza inductiva magnética. Es una idea que ya habíamos visto retomada en el §1661 de la Serie XIII, y que, como allí, se avanza con una cierta reserva puesto que la evidencia experimental no la apoya. Una reserva que no parece alcanzar al caso de los conductores puesto que, como ya hemos señalado, y en este texto se repite de nuevo, Faraday da por hecho que en ellos se adopta el estado peculiar. Se da con ello, en las series XIII y

⁵⁵ *Ibidem*, §1729, subrayado de Faraday.

XIV, un notable giro con respecto a la posición mantenida en escritos anteriores. La noción de estado electro-tónico se introdujo a raíz del descubrimiento de la inducción electromagnética, como algo que resistía la corriente inducida, y se abandonó públicamente casi inmediatamente. La hemos visto reaparecer en el mismo contexto teórico, la autoinducción, adquiriendo una dimensión causal, y ahora la vemos integrada en la teoría de la electricidad, conservando dicha dimensión causal y jugando un papel en la transmisión de la fuerza inductiva magnética.

4. 3. 2. Relación general entre la electricidad y el magnetismo

En los párrafos de la Serie XIV que hemos analizado hasta ahora se ha continuado la reflexión ya iniciada en la Serie XIII acerca del modo de transmisión de la fuerza magnética. Este tema se completa con una reflexión sobre la correspondencia que debe existir, según Faraday, entre los estados de la fuerza eléctrica y los estados de la fuerza magnética. El tema se había abordado también en la Serie XIII, concentrándose en la relación entre la fuerza transversal de la corriente y la fuerza transversal de la electricidad estática. Aquí se vuelve a la carga desde un punto de vista general: debe haber una correspondencia entre todos los estados de la fuerza eléctrica y todos los estados de la fuerza magnética. Sabemos la razón de su insistencia: si no fuera así estaría en peligro el principio de unidad de las fuerzas. Ahora bien, esta correspondencia depende de que pueda establecerse que la transmisión de la fuerza magnética se lleva a cabo, como la de la fuerza eléctrica, debido a la acción de las partículas intermedias. Si este fuera el caso --

algo que Faraday no ha conseguido mostrar-- se seguiría que las dos fuerzas son de la misma naturaleza, y la fuerza magnética debería tener un estado, asociado al estado estático de la electricidad, del mismo modo que el estado dinámico de la electricidad, esto es, la corriente, tiene asociado una fuerza transversal magnética:

I have already expressed a hope of finding an effect or condition which shall be to statical electricity what magnetic force is to current electricity (1658.). If I could have proved to my own satisfaction that magnetic forces extend their influence to a distance by the conjoined action of the intervening particles in a manner analogous to that of electrical forces, then I should have thought that the lateral tension of the lines of inductive action (1659.), or that state so often hinted at as the electro-tonic state (1661. 1662), was this related condition of statical electricity.⁸⁶

Se notará la ambigüedad en la identificación del equivalente magnético asociado con la electricidad estática. Se nos dice que ese equivalente magnético es la tensión lateral responsable de la curvatura de las líneas de inducción estática o el estado electro-tónico. Está claro que ambas nociones no pueden identificarse. Hasta ahora el estado electro-tónico se había identificado con el estado que adoptaban las partículas de la materia sobre las que actuaba la fuerza magnética. Sin embargo, aquí parece que el estado sería un candidato, junto con la tensión lateral de las líneas de inducción electrostática, para llenar el hueco estático que parece existir en la serie de estados de la fuerza magnética que debe corresponder con la serie de estados de la fuerza eléctrica. Pero en este último caso el estado electro-tónico más que un estado de la materia debería comprenderse como un estado de una fuerza, la fuerza

⁸⁶ *Ibidem*, §1733.

magnética.⁵⁷

La ambigüedad podría depender de una confusión entre causa y efecto si entendemos que el efecto producido en la materia por la tensión lateral de las líneas de inducción, que sería una fuerza de naturaleza magnética, es precisamente el estado electro-tónico. Así podría entenderse una anotación del *Diary* relacionada sin duda con el texto que estamos discutiendo:

Current electricity has for its lateral or transverse action magnetism or attraction of similar currents. Quiescent or Statical electricity has for its lateral or transverse action the transverse repulsion or state of tension; for the effect is equivalent to a repulsion amongst the lines of inductive force.

As direct tension, which is attraction, causes currents, so the lateral or transverse tension which is repulsive, causes Magnetism; Ampère's attraction of currents; my electrotonic state, etc. etc. It probably constitutes the electrotonic state.⁵⁸

Encontramos aquí una primera formulación de las ideas presentes en los textos de las Series XIII y XIV que hemos venido discutiendo y se notará que la confusión que hemos mencionado se encuentra ya en la parte final de esta anotación. Por una parte se afirma que la tensión lateral de las líneas de inducción causa el estado electro-tónico para, a renglón seguido, sugerir que esa tensión lateral constituye el estado electro-tónico.

Con la identificación del equivalente magnético en el caso de la

⁵⁷ Esta ambigüedad que me parece advertir en el pensamiento de Faraday en este punto no es compartida por otros historiadores que identifican el estado electro-tónico con la tensión lateral de las líneas de acción inductiva estática. Este es el caso de BERSKON-1974, p. 83, y NERSESSIAN-1984, pp. 51 y 52.

⁵⁸ *Diary*, III, §§4208-4209, p. 215, 24 de octubre de 1837.

electricidad estática es posible trazar un cuadro completo de la correspondencia entre estados de la fuerza eléctrica y magnética:

It may be said that the state of *no lateral action* is to static or inductive force the equivalent of *magnetism* to current force; but that can only be upon the view that electric and magnetic action are in their nature essentially different (1864.). If they are the same power, the whole difference in the results being the consequence of the difference of *direction*, then the normal or *undeveloped* state of electric force will correspond with the state of *no lateral action* of the magnetic state of the force; the electric current will correspond with the lateral effects commonly called *magnetism*; but the state of static induction which is between the normal condition and the current will still require a corresponding lateral condition in the magnetic series, presenting its own peculiar phenomena; for it can hardly be supposed that the normal electric, and the inductive or polarized electric condition, can both have the same lateral relation. If magnetism be a separate and a higher relation of the powers developed, then perhaps the argument which presses for this third condition of that force would not be so strong.⁵⁹

Si electricidad y magnetismo son fuerzas de naturaleza diferente entonces la fuerza transversal de la corriente no tiene equivalente en el caso de la electricidad estática, esto es, no hay acción lateral en el caso estático que corresponda con la acción lateral en el estado dinámico de la electricidad. Pero si electricidad y magnetismo tienen una naturaleza común, entonces debería haber una correspondencia entre los estados de ambas fuerzas que podemos representar así:⁶⁰

⁵⁹ ERE, Serie XIV, §1734, subrayados de Faraday.

⁶⁰ El cuadro siguiente es similar al propuesto por Gooding en la p. 22 de su GOODING-1980a. Sin embargo, no se entiende su omisión del estado electro-tónico como candidato a llenar el hueco magnético correspondiente al estado estático de la

<u>estado de la fuerza eléctrica</u>	<u>estado de la fuerza magnética</u>
normal (no desarrollado)	no acción lateral
inducción estática	acción lateral (tensión lateral de las líneas de inducción o estado electro-tónico)
corriente	acción lateral (comúnmente llamado magnetismo)

La novedad en este cuadro reside en la aparición de un estado "normal" de la fuerza eléctrica que resulta difícil de identificar. Si tenemos en cuenta la idea de Faraday de la electricidad como un poder de la materia, el estado "normal" podría referirse a un estado no excitado de la electricidad.

En las Series XIII y XIV se refleja una notable elaboración de la noción de estado electro-tónico que vimos surgir con el descubrimiento de la inducción electromagnética. El elemento más evidente es el desarrollo de la sugerencia, ya contenida en la Serie I, de que el estado podía ser adoptado por toda la materia. Esta generalización resulta ser ahora una consecuencia de una teoría de la electricidad que ha eliminado toda diferencia cualitativa entre conductores y no conductores. Además esta generalización aparece íntimamente ligada con el modo de transmisión de la fuerza magnética, aspecto éste que marca una diferencia con la idea introducida en la Serie I. Si la fuerza magnética no se transmite mediante la pura acción a distancia, entonces las partículas contiguas que transmiten la acción magnética se encuentran en estado electro-tónico. Esto es, el estado electro-tónico es el análogo para la fuerza eléctrica.

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

Notaremos, además de la elaboración teórica, que la noción de estado electro-tónico aparece totalmente integrada en el marco teórico de Faraday. Parecen haber desaparecido las vacilaciones que habíamos visto en la Serie I y II. Ahora, como lo indican claramente las expresiones escogidas por Faraday, la existencia del estado es algo que, al menos en lo que respecta a los conductores, se considera un hecho conocido. Asimismo, continuando con el análisis ya iniciado en la investigación de la autoinducción, se señala al estado como la causa de las corrientes inducidas en los conductores.

CAPÍTULO 5

LA REALIDAD DE LAS LÍNEAS DE FUERZA MAGNÉTICA

Cronológicamente, el periodo que hemos cubierto en los capítulos anteriores abarca los años treinta del siglo XIX. En estos años el ritmo de trabajo ha sido febril: baste tener en cuenta que en siete años, 1831-1838, Faraday ha publicado catorce Series en las *Philosophical Transactions*. En 1838 escribió la Serie XV sobre la fuerza eléctrica del gimnoto y en 1839 las Series XVI y XVII donde volvía sobre la cuestión de la teoría de la pila voltaica. En 1840 la intensidad de su trabajo se cobró su precio y Faraday sufrió un colapso nervioso del que se recuperó suficientemente aunque no totalmente en 1843.¹ En este mismo año escribió la Serie XVIII sobre la electricidad desarrollada por la fricción del agua y el vapor.

A partir de 1845 comienza otro intenso periodo de trabajo en el cual podemos distinguir dos fases. La primera comienza con el descubrimiento de la rotación del plano de polarización de la luz por la materia sometida a un intenso campo magnético, y prosigue con una pormenorizada investigación sobre las propiedades magnéticas de la materia, descubriendo el diamagnetismo. La investigación culminará en una teoría que da cuenta de dichas propiedades en terminos de la interacción entre la materia y las líneas de fuerza magnética. La segunda

¹ BENCE JONES-1870, II, p. 126 y ss.; TYNDALL-1868, pp. 75-79; WILLIAMS-1965, pp. 358-359.

fase, que abarca una buena parte de los años cincuenta, se dedica casi exclusivamente a articular la noción de líneas de fuerza magnética. Faraday distinguirá aquí dos niveles. En primer lugar, el nivel representacional, esto es, las líneas de fuerza como meros representantes de la disposición de la fuerza magnética. En segundo lugar, dando un paso más, Faraday quiere ir más allá, planteará además la cuestión en el nivel físico, es decir, en el nivel en que el problema crucial pasa a ser el de la realidad de las líneas.

En los capítulos anteriores hemos seguido las vicisitudes de la noción de estado electro-tónico desde su aparición a raíz del descubrimiento de la inducción electromagnética, hasta su ambiguo status en la teoría de la electricidad del año 1838. Por una parte, el estado aparece relacionado de alguna manera con un "hueco" existente en la serie de estados de la fuerza magnética que corresponde a la serie de estados de la fuerza eléctrica. Pero además, la idea del estado electro-tónico que Faraday mantiene en las Series XIII y XIV parece relacionarse con un supuesto estado que adoptarían las partículas de la materia sometida a la fuerza magnética y que sería responsable de la transmisión de ésta.

El presente capítulo tratará en primer lugar el descubrimiento de la rotación del plano de polarización de la luz porque es aquí donde Faraday cree encontrar una vez más evidencia en favor de la existencia del estado electro-tónico. Posteriormente se discutirá la articulación de la teoría de las líneas de fuerza en los dos niveles antes mencionados, y particularmente en el nivel físico, pues es precisamente al argumentar en favor de la realidad de las líneas cuando Faraday introduce de nuevo el estado electro-tónico. Lo hará retomando la problemática de la correspondencia entre estados de las dos fuerzas, eléctrica y magnética.

Pero en este punto se ha producido un cambio crucial en la vieja noción pues, como veremos, el estado electro-tónico ya no aparecerá únicamente asociado a la materia, será una condición del espacio íntimamente ligada con las líneas físicas de fuerza magnética.

5. 1. La magnetización de la luz y el estado electro-tónico : Serie XIX²

5. 1. 1. El descubrimiento de la rotación del plano de polarización de la luz: nuevos indicios del estado electro-tónico

El 6 de agosto de 1845 William Thomson, más tarde lord Kelvin, escribe a Faraday una carta que termina requiriéndole información respecto a tres cuestiones que en su opinión merecen ser investigadas experimentalmente. La primera es la siguiente:

A third question which, I think, has never been investigated is relative to the action of a transparent dielectric on polarized light. Thus it is known that a very well defined action, analogous to that of a transparent crystal, is produced upon polarized light when transmitted through glass in any ordinary state of violent constraint. If the constraint, which may be elevated to be on the point of breaking the glass, be produced by electricity, it seems probable that a similar action might be observed.³

² He tomado prestado para el título de esta sección parte del que Faraday utilizó para la memoria en que presentó su descubrimiento de la rotación del plano de polarización de la luz. La memoria, que constituye la Serie XIX de las *Experimental Researches*, lleva por título "On the magnetization of light and the illumination of magnetic lines of force".

³ W. Thomson a M. Faraday (6 de agosto de 1845), *FARADAY-Corres*, I, carta nº 310, pp. 458-460, p. 460. La importancia de esta consulta de Thomson

La cuestión distaba mucho de ser nueva para Faraday, pues, como sabemos, su electrostática se basaba en la adopción de un estado de polarización, un estado forzado, por las partículas de un dieléctrico que transmite la inducción. De hecho él mismo había utilizado el método recomendado por Thomson sin obtener resultado.⁴ La carta, no obstante, le animó a intentarlo de nuevo, aunque sin más éxito, en principio, que en anteriores ocasiones.⁵

Esta vez, sin embargo, introdujo una afortunada variación en sus experimentos. Después de infructuosos intentos en los que hacía pasar luz polarizada por sustancias sometidas a una fuerza eléctrica, decidió sustituir ésta por una intensa fuerza magnética. No puede sorprender este cambio si se recuerdan las reflexiones de Faraday en los párrafos finales de la Serie XIV. Allí se esforzaba en argumentar a favor de una transmisión de la fuerza magnética análoga a la que había propuesto para la fuerza eléctrica, esto es, mediante las partículas contiguas del medio. Identificaba además el estado que adoptaban las partículas en su transmisión de la fuerza magnética con el estado electro-tónico. Esto es precisamente lo que le vemos hacer aquí: intentar de nuevo detectar el estado electro-tónico. Por eso se entiende bien su decisión de cambiar la fuerza eléctrica por la magnética en sus experimentos con luz polarizada.

como estímulo para el descubrimiento del efecto magneto-óptico ha sido puesta de relieve por Williams en su WILLIAMS-1965, pp. 383 y ss. Un examen detallado de la interacción entre los dos hombres se encontrará en GOODING-1980b y GOODING-1982.

⁴ Así se lo hace saber en su rápida respuesta. Véase M. Faraday a W. Thomson (8 de agosto de 1845), FARADAY-Corres, I, carta nº 311, p. 460.

⁵ *Diary*, IV, §§7434-7498, pp. 256-263, 30 de agosto de 1845 - 13 de setiembre de 1845.

Situando un prisma de silicato borato de plomo de forma que la líneas de fuerza de un electroimán tuvieran la misma dirección que el de avance de la luz polarizada a través de la sustancia

It gave no effects when the same magnetic poles or the contrary poles were on opposite sides (as respects the course of the polarized ray) --nor when the same poles were on the same side, either with the constant or intermitting current-- BUT, when contrary magnetic poles were on the same side, there was an effect produced on the polarized ray, and thus magnetic force and light were proved to have relation to each other. This fact will most likely prove exceedingly fertile and of great value in the investigation of both conditions of natural force.⁶

El efecto consistía en una rotación del plano de polarización de la luz cuando ésta pasaba a través de una sustancia sometida a una fuerza magnética.

La Serie XIX de las *Experimental Researches*, leída el 20 de noviembre de 1845, se dedica a la presentación y discusión de los resultados obtenidos en la investigación del nuevo efecto. No se trata, precisa Faraday, de una acción directa de la fuerza magnética sobre la luz:

The magnetic force do not act on the ray of light directly and without the intervention of matter, but through the mediation of the substance in which they and the ray have a simultaneous existence; the substances and the forces giving to and receiving from each other the power of acting on the light.⁷

⁶ *Ibíd.*, §7504, p. 264, 13 de setiembre de 1845, mayúsculas y subrayados de Faraday. En el manuscrito 'but' aparece escrito no sólo con mayúsculas, sino además subrayado tres veces.

La fuerza magnética actúa sobre la sustancia provocando un estado peculiar en sus partículas que es el responsable de la rotación del plano de polarización de la luz.⁸ El estado es peculiar en dos aspectos. En primer lugar, no cabe asimilarlo al estado en que presumiblemente se encuentran las partículas de las sustancias que son ópticamente activas por naturaleza. En estas últimas el estado es responsable de una rotación del plano de polarización que es siempre dextrógira, si la sustancia lo es. Sin embargo, en el efecto descubierto por Faraday, el sentido de la rotación depende de que el rayo avance en el mismo sentido de las líneas de fuerza magnética que atraviesan la sustancia, o en sentido opuesto.⁹

En segundo lugar, si bien el estado está producido por la fuerza magnética, Faraday lo distingue cuidadosamente del que identifica a las sustancias magnéticas reconocidas o aquellas susceptibles de magnetización:

If the magnetic force had made these bodies magnets, we could, by light, have examined a transparent magnet; and that would have been a great help to our investigation of the forces of matter. But it does not make them magnets (2171.), and therefore the molecular condition of these bodies, when in the state described, must be specifically distinct from that of magnetized iron, or other such matter, and must be a *new magnetic condition*; and as the condition is a state of tension (manifested by its instantaneous return to the normal state when the magnetic induction is

⁷ ERE, Serie XIX, §2224.

⁸ La interpretación del fenómeno en términos de un estado de las partículas de la materia producido por la fuerza magnética no fue privativo de Faraday. Véase KNUDSEN-1975, pp. 237-238.

⁹ ERE, Serie IX, §§2230-2233.

remove¹⁰), so the *force* which the matter in this state possesses and its mode of action, must be to us a *new magnetic force or mode of action of matter*.¹⁰

Para designar las sustancias que presentaban el nuevo efecto Faraday acuñó el término 'diamagnético': "By *diamagnetic*, I mean a body through which lines of magnetic force are passing, and which does not by their action assume the usual magnetic state of iron or loadstone"¹¹.

Así pues tenemos que, por un lado, el estado no es un estado natural como el de las sustancias que, naturalmente, son ópticamente activas, pero tampoco puede identificarse con el de los cuerpos reconocidamente magnéticos. Se trata de una condición magnética nueva que se describe con una terminología que nos resulta familiar, es un estado de tensión. Unas líneas más abajo se nos proporcionan ulteriores precisiones sobre este estado de tensión :

Perhaps this state is a state of *electric tension tending to a current*, as in magnets according to Ampère's theory, the state is a state of *current*. When a core of iron is put into a helix, everything leads us to believe that currents of electricity are produced within it, which rotate or move in a plane perpendicular to the axis of the helix. If a diamagnetic be placed in the same position, it acquires power to make light rotate in the same plane. The state it has received is a state of tension, but it has not passed on into currents, though the acting force and every other circumstance and condition are the same as those which do produce currents in iron, nickel, cobalt, and such other matters as are fitted to receive them. Hence the idea that there exists in diamagnetics, under such circumstances, a tendency to currents, is consistent with all the phenomena as yet described.¹²

¹⁰ *Ibíd.*, §2227, subrayados de Faraday.

¹¹ *Ibíd.*, §2149.

¹² *Ibíd.*, §2229, subrayados de Faraday.

Los dos textos que acabo de citar, leídos conjuntamente, nos revelan que el estado al que se refiere Faraday, aun sin mencionarlo explícitamente, es el estado electro-tónico. Cabría dudarlo si interpretáramos al pie de la letra su afirmación en el primer texto de que el estado es "a new magnetic condition" y recordáramos que catorce años antes, cuando el estado se introdujo en la Serie I, se le describió como una nueva "electrical condition of matter".¹³ Sin embargo, el segundo texto elimina nuestras dudas. Ciertamente, el estado puede describirse como una condición magnética, pero ello se refiere a que es el resultado de la acción de la fuerza magnética. Su naturaleza viene determinada en el segundo texto, cuando Faraday sugiere que el estado puede ser un estado de "electric tension tending to a current". La sugerencia es reveladora puesto que, como sabemos, el estado electro-tónico era un estado de tensión cuya descarga originaba una corriente. Precisamente en este sentido puede considerarse como una condición eléctrica de la materia. Así pues, la diferencia entre las expresiones "electrical condition of matter" y "new magnetic condition" no deben hacernos perder de vista que se refieren a dos dimensiones del mismo estado, el estado electro-tónico.

5. 1. 2. Relación con las ideas de las Series XIII y XIV

Otras consideraciones apuntan en la misma dirección. En primer lugar la continuidad que puede detectarse en el pensamiento de Faraday. Si tenemos en cuenta la discusión de los textos de las Series XIII y XIV realizada en el capítulo anterior veremos fácilmente que nos

¹³ ERE, Serie I, §60. Véase Capítulo 2, sección 2. 4. 2.

encontramos aún en el mismo marco teórico. En efecto, al analizar los §§1660-1661 de la Serie XIII vimos que Faraday sugería allí que, así como al actuar sobre los conductores la fuerza magnética podía inducir una corriente, en el caso de los dieléctricos generaba un estado en el que existía una tendencia a la producción de una corriente, estado que se identificaba con el estado electro-tónico.¹⁴ Si sustituimos conductores y dieléctricos por sustancias magnéticas y diamagnéticas, podremos apreciar la continuidad del análisis de Faraday, y por consiguiente afirmar que el estado responsable de la rotación del plano de polarización para él no es otro que el estado electro-tónico.

El mismo Faraday viene en nuestra ayuda en este punto explicitando la continuidad. Así escribe:

The theory of static induction which I formerly ventured to set forth (1161, &c.), and which depends upon the action of the contiguous particles of the dielectric intervening between the inductric and inductive bodies, lead me to expect that the same kind of dependence upon the intervening particles would be found to exist in magnetic action; and I published certain experiments and considerations on this point seven years ago (1709-1736). I could not then discover any peculiar condition of the intervening substance or diamagnetic; but now that I have been able to make out such a state, which is not only a state of tension (2227.), but dependent entirely upon the magnetic lines which pass through the substance, I am more than ever encouraged to believe that the view then advanced is correct.¹⁵

La misma referencia a estos párrafos se encuentra en su carta a J. F. W. Herschel de 13 de noviembre de 1845. Allí Faraday escribe:

¹⁴ Véase Capítulo 4, sección 4. 2. 1.

¹⁵ *ERE*, Serie XIX, §2240.

I have however (guided by my views of the action of magnets across dimagnetics: Exp. Researches 1709-1736) discovered other means of examining the extraordinary state into which bodies generally are thrown by the magnetic forces, than their effect on a ray of light, and not only do doubly refracting crystals but opaque bodies --metals & I conclude all bodies come into subjection.¹⁶

Faraday cambió 'dimagnetics' por 'diamagnetics' en la Serie XIX.

No es posible pasar por alto lo que implica la clara referencia a los §§1709-1736 de la Serie XIV. Lo que está subrayando Faraday en este texto es que se han cumplido las expectativas que allí manifestó respecto a que la fuerza magnética se transmita, como cree haber establecido en el caso de la fuerza eléctrica, con el concurso de las partículas del medio. Y allí se señalaba que el estado que adoptaban las partículas del medio al transmitir la fuerza magnética era el estado electro-tónico.¹⁷

En lo que respecta a la evolución de la noción de estado electro-tónico, puede concluirse que con el descubrimiento de la rotación magnética del plano de polarización de la luz se ha cerrado una etapa que se abrió a raíz del intento de articulación de electricidad y magnetismo en las Series XIII y XIV. El denominador común de esta etapa ha sido la consideración del estado electro-tónico como estado de la materia. En esta etapa el estado, sin dejar de estar estrechamente relacionado con la explicación de la inducción electromagnética, se ha ligado al modo de transmisión de la fuerza magnética. Al igual que la fuerza eléctrica, la magnética se transmitiría mediante la acción de las

¹⁶ FARADAY-*Corres*, I, carta nº 313, pp. 463-465, pp. 464-465.

¹⁷ *ERE*, Serie XIV, §1729. He discutido estos párrafos de la Serie XIV en el Capítulo 4, sección 4. 3. 1.

partículas del medio que adoptarían el estado electro-tónico. Con el descubrimiento de la rotación magnética del plano de polarización de la luz Faraday cree haber obtenido por fin alguna evidencia de la existencia del estado y se propone investigarlo como estado magnético de toda la materia.

Sus expectativas serán defraudadas. Ciertamente, cuando prosigue su investigación sobre las propiedades magnéticas de la materia, descubre, tal y como manifiesta en su carta a Herschel que toda la materia goza de propiedades magnéticas. Sin embargo éstas presentan particularidades que no pueden explicarse en función de un estado magnético peculiar. Durante cinco años se esfuerza por encontrar una explicación que pueda unificar la variedad de fenómenos que se presentan. Por fin, en 1850 consigue articular una teoría general cuya piedra angular ya no será un estado magnético peculiar, sino la diferente capacidad de la materia para conducir las líneas de fuerza magnética.¹⁸

Pero que su atención se haya desplazado de un estado de la materia a las líneas de fuerza no implica, no obstante, que ese estado magnético de cuya existencia cree haber encontrado indicios en la rotación magnética del plano de polarización de la luz, esto es el estado electro-tónico, haya desaparecido de su marco teórico. En sus artículos de los años cincuenta, en los que su preocupación fundamental será articular su teoría de las líneas de fuerza, veremos reaparecer el estado electro-tónico bajo un aspecto que evidencia un cambio crucial en la noción: desaparecerá la conexión entre estado electro-tónico y materia que

¹⁸ La teoría se expone en las Series XXV y XXVI, leídas en la Royal Society el 28 de noviembre de 1850. Se encontrará un análisis magistral del atormentado proceso que produjo esta teoría en GOODING-1981.

hemos visto mantenerse hasta ahora y las dos nociones, estado electro-tónico y líneas de fuerza magnética, se entrelazarán profundamente.

5. 2. Las líneas representativas de fuerza y el estado electro-tónico

5. 2. 1. Valor representativo de las líneas de fuerza

En la década de los cincuenta la atención de Faraday se concentra casi exclusivamente en la articulación de la teoría de las líneas de fuerza magnética. Podría considerarse que con la Serie XXVIII, titulada "On lines of Magnetic Force; their definite character; and their distribution within a Magnet and through space" y leída el 27 de noviembre y 11 de diciembre de 1851, se inaugura la colección de trabajos que exponen los resultados de su reflexión en esta década. El primer párrafo de esta Serie condensa admirablemente su programa para estos años:

From my earliest experiments on the relation of electricity and magnetism (114. note), I have had to think and speak of lines of magnetic force as representations of the magnetic power; not merely in the points of quality and direction, but also in quantity. The necessity I was under of a more frequent use of the term in some recent researches (2149. &c.), has led me to believe that the time has arrived, when the idea conveyed by the phrase should be stated very clearly, and should also be carefully examined, that it may be ascertained how far it may be truly applied in representing magnetic conditions and phenomena; how far it may be useful in their elucidation; and also, how far it may assist in leading the mind correctly on to further conceptions of the physical nature of the force, and the recognition of the possible effects, either new or old, which may be produced by it.¹⁹

La noción de las líneas de fuerza encierra varios aspectos

¹⁹ ERE, Serie XXVIII, §3070.

fundamentales. En primer lugar, tenemos su carácter de medio de representación de la fuerza magnética en sus características de cantidad, dirección y sentido. Ciertamente, admite Faraday, la noción de las líneas de fuerza no proporciona la única representación posible de la fuerza magnética. Hay al menos dos representaciones alternativas: la que se basa en la idea de la fuerza concentrada en centros de acción, como serían los polos de los imanes, y la teoría de los dos fluidos magnéticos, norte y sur, difundidos en los polos o en las partículas de los imanes. Las tres representaciones pueden llevar a los mismos resultados, pero la noción de las líneas de fuerza es superior para el que razona físicamente.²⁰ Pero el contenido de la noción de líneas de fuerza no se agota en su aspecto representacional; además asisten en el análisis de los fenómenos magnéticos y, dando un paso más, permiten indagar en la naturaleza física de la fuerza. Por último la noción tiene para Faraday un notable contenido heurístico. Aquí este aspecto está meramente apuntado, pero al final de la Serie Faraday enumera algunos de los resultados a los que le ha llevado el estudio de las líneas. Entre ellos se encuentra la ley de la inducción magneto-eléctrica, la relación de magnetismo y luz y el descubrimiento del diamagnetismo.²¹

La Serie XXVIII se dedica al aspecto representacional de la noción de las líneas de fuerza. Se hará hincapié en la eficacia de las líneas para describir la distribución de la fuerza magnética. Se trata de examinar el sistema de líneas asociado a un imán para poner de relieve el carácter definido de la fuerza que representa. El método experimental escogido depende del fenómeno de inducción magneto-eléctrica descubierto

²⁰ *Ibíd.*, §3074.

²¹ *Ibíd.*, §3174.

veinte años antes. El sistema de líneas se explora mediante el examen de la corriente inducida en un alambre que se mueve cortando las líneas de fuerza. Este método es preferible al que depende de los movimientos de la aguja magnética por dos razones. En primer lugar, la aguja no puede dar indicaciones fiables de la magnitud de la fuerza magnética porque su mera presencia perturba la distribución de la fuerza ya que, como cualquier otro cuerpo magnético, concentra las líneas de fuerza. En segundo lugar, el alambre móvil, a diferencia de la aguja magnética, permite explorar la distribución de la fuerza incluso en el interior del imán. Esta última consideración puede sorprender, pero se comprenderá al tener en cuenta el dispositivo experimental empleado por Faraday.

El dispositivo se muestra en la figura 23. Se trata de dos imanes

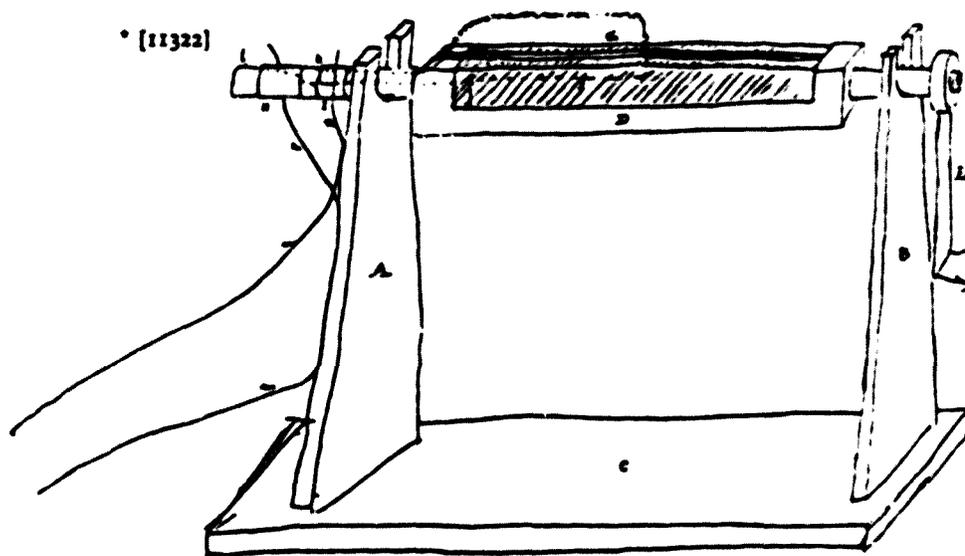


figura 23 (Diary, V, p. 392)

paralelos con polos del mismo signo coincidentes. Entre los dos imanes se deja una hendidura por donde discurre un alambre hasta la zona media de los imanes donde sale al exterior y vuelve hacia su punto de partida formando una espira. Un collar de cobre (no representado en la

figura) en la zona media de los imanes permite la rotación independiente de los imanes y el circuito. El examen de los casos en que la rotación produce corriente en el circuito, y el de aquellos en que dicha corriente está ausente permite a Faraday extraer importantes conclusiones acerca del sistema de líneas.

Faraday retoma aquí una línea de investigación que había iniciado veinte años antes, en sus experimentos con el imán y el disco rotatorio.²² Allí interpretaba el hecho de que se indujeran corrientes en el disco cuando éste rotaba, independientemente de que el imán lo hiciera o no, considerando que las líneas de fuerza no giraban con el imán. Aquí se parte de la misma idea²³ y los experimentos son similares, pero el objetivo es precisar las características del sistema de líneas asociado al imán. Los experimentos utilizan circuitos de formas distintas que rotan cortando las líneas de fuerza. Con estos experimentos Faraday considera probado el carácter definido del sistema de líneas. En primer lugar:

The amount of magnetic force, as shown by its effect in evolving electric

²² Ver Capítulo 2, pp. 110-111.

²³ Para Faraday las líneas de fuerza asociadas a un imán participan sólo del movimiento de translación de éste:

The system of power about the magnet must not be considered as necessarily revolving with the magnet, any more than the rays of light which emanate from the sun are supposed to revolve with the sun. (*ERE*, Serie XXVIII, §3090)

La cuestión de si las líneas de fuerza acompañan al imán en su rotación constituye el núcleo del problema de la inducción unipolar. Se encontrará un examen de los experimentos de Faraday y una historia de este problema en MILLER-1981.

currents, is determinate for the same lines of force, whatever the distance of the point or plane, at which their power is exerted, is from the magnet. Or it is the same in any two, or more, sections of the same lines of force, whatever their form or their distance from the seat of the power may be.²⁴

Por lo tanto

the quantity of electricity thrown into a current is directly as the amount of curves intersected.²⁵

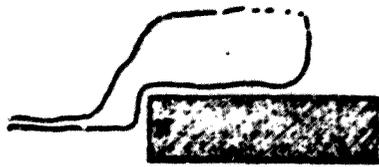
Se notará la importante aportación que introduce esta formulación en la ley de la inducción magneto-eléctrica. En el §114 de la Serie I, la ley se preocupaba simplemente de establecer el sentido de la corriente inducida en relación al corte de las líneas. Aquí se relaciona la 'cantidad' de electricidad de la corriente inducida con la cantidad de líneas cortadas.

Los experimentos permiten ir más allá. Permiten de hecho penetrar en el interior del imán para establecer la continuidad de las líneas de fuerza. La figura 24 muestra tres circuitos utilizados por Faraday. En la figura 24a el circuito es completamente externo al imán. En la figura 24b parte del circuito discurre por el eje del imán y se une con la parte externa mediante la porción vertical situada en la zona media del imán. En la figura 24c es el propio imán el que forma parte del circuito, jugando el papel de la parte interna del circuito de la figura 24b.

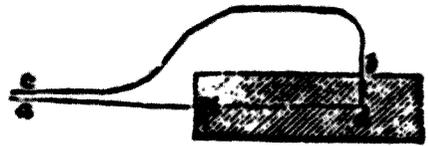
Consideremos el dispositivo representado en la figura 24a. Cuando el circuito y el imán rotan a la vez, siendo el eje de rotación el eje del

²⁴ *ERE*, Serie XXVIII, §3109, subrayado de Faraday.

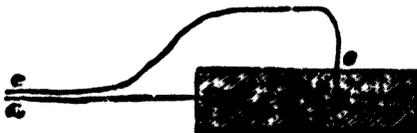
²⁵ *Ibíd.*, §3115.



(a)



(b)



(c)

figura 24 (ERE, III, pp. 336-339)

imán, no se detecta corriente en el circuito. Faraday explica el hecho señalando que distintas porciones del circuito cortan las líneas en sentidos opuestos, con lo que se producen efectos inductivos que se cancelan entre sí.

El hecho crucial tiene lugar con el dispositivo de la figura 24b. Como en el caso anterior, la rotación de circuito e imán no produce corriente. Ahora bien, la parte externa del circuito corta, en su rotación, todas las líneas de fuerza y por consiguiente se produce una tendencia a la formación de una corriente inducida. Si no se detecta corriente en el

circuito, la explicación, piensa Faraday, hay que buscarla en la parte interna del circuito, en particular en esa pequeña porción vertical situada en la zona media del imán. Admitiendo que las líneas de fuerza son continuas, se tiene que, al rotar el imán, esa pequeña porción vertical del circuito también corta todas las líneas y por tanto se produce una tendencia a la formación de una corriente inducida de la misma magnitud pero de sentido opuesto a la de la parte externa del circuito. El resultado neto es la ausencia de corriente en el circuito. La explicación es la misma para la ausencia de corriente en el caso de que el propio imán forme parte del circuito (véase la figura 24c). La sección ecuatorial del imán juega aquí el papel de la porción vertical del circuito de la figura 24b.²⁶ Faraday concluye:

there exists lines of force within the magnet of the same *nature* as those without. What is more, they are exactly equal in *amount* to those without. They have a relation in *direction* to those without; and in fact are continuations of them, absolutely unchanged in their nature, so far as the experimental test can be applied to them. Every line of force therefore, at whatever distance it may be taken from the magnet, must be considered as a closed circuit, passing in some part of its course through the magnet, and having an equal amount of force in every part of its course.²⁷

El método de exploración de la fuerza magnética basado en la utilización del alambre móvil ha permitido poner de manifiesto el carácter definido del sistema de líneas que la representan. Penetrando en el interior del imán, lugar inaccesible para la aguja magnética, el método ha permitido establecer la continuidad de las líneas. Cada línea de fuerza es un circuito cerrado con una porción situada en el interior del imán. Con

²⁶ *Ibíd.*, §3116.

²⁷ *Ibíd.*, §3117, subrayados de Faraday.

ello los polos pierden su status de puntos privilegiados del imán donde se concentraría la fuerza que actúa a distancia sobre otros objetos. Los polos son los puntos por los que entran y salen las líneas de fuerza en su recorrido, y si hay una concentración de fuerza en dichos puntos es porque la densidad de líneas es mayor ahí que en otras regiones del exterior del imán. Asimismo, la cantidad de fuerza asociada con un imán es determinada: viene representada por cualquier sección de todas las líneas.²⁸

El método del conductor móvil permite inferir características de la fuerza a partir de la corriente inducida en un conductor que se mueve cortando las líneas de fuerza. Ahora bien, para que el método tenga sentido uno debe asegurarse de que la corriente inducida depende únicamente del número de líneas cortadas y no del material del conductor. Ciertamente, esto es lo que afirma la ley de la inducción magneto-eléctrica y la nueva formulación de ella que Faraday ha proporcionado unos párrafos antes, o sea, que la 'cantidad' de electricidad inducida depende exclusivamente del número de líneas cortadas. Sin embargo, Faraday cree necesario comprobar que la variación en las corrientes que pueden detectarse en distintos conductores depende únicamente del poder conductor de los distintos materiales. De hecho, también en este punto está retomando un análisis que ya había llevado a cabo veinte años antes. Como entonces, su conclusión es que la corriente inducida es directamente proporcional al poder conductor del material.²⁹

²⁸ Teniendo en cuenta este resultado Faraday sugiere que podrían establecerse estándares de comparación entre los imanes mediante la comparación de las corrientes inducidas en un conductor que cortara todas sus líneas de fuerza (Ibídem, § 3121).

5. 2. 2. Necesidad del estado electro-tónico

En este contexto Faraday apela de nuevo a su estado electro-tónico. Lo hace de pasada, brevemente, pero basta para evidenciar sus ideas respecto al papel que el estado debe jugar en la solución de un problema fundamental que se arrastra en la explicación de la inducción magneto-eléctrica en función del corte de líneas de fuerza. Desde su punto de vista, esta explicación no es completa:

All results described are those obtained with *moving metals*. But mere motion would no generate a relation, which had not a foundation in the existence of some previous state; and therefore the *quiescent* metals must be in some relation to the active centre of force, and that not necessarily dependent on their paramagnetic or diamagnetic condition, because a metal at zero in that respect, would have an electric current generated in it as well as the others. The relation is not as the attractions or repulsions of the metals, and therefore not magnetic in the common sense of the word; but according to some other function of the power. Iron, copper, and bismuth are very different in the former sense, but when moving across the lines of force, give the same general result, modified only by electro-conducting power.³⁰

Si la explicación de la inducción depende únicamente del corte de líneas de fuerza, debemos admitir que el movimiento es la causa de que se establezca esa relación magnética entre el conductor en movimiento y la fuente de magnetismo que vemos resolverse en una corriente eléctrica. Faraday rechaza claramente esta posibilidad: esa relación magnética debe ser previa al movimiento del conductor y se manifiesta por la

²⁹ *Ibíd.*, §3152. Faraday había ya abordado la cuestión en la Serie II, §§205-213.

³⁰ *Ibíd.*, §3172, subrayados de Faraday.

existencia de un estado que no es otro que el estado electro-tónico:

If such a condition be hereafter verified by experiment and the idea of an electrotonic state (60. 242. 1114. 1661. 1729) be revived and established, then, such bodies as water, oil, resin, &c., will probably be included in the same state; for the non-conducting condition, which prevents the formation of a current in them, does not militate against the existence of that condition which is prior to the effect of motion. A piece of copper, which cannot have the current, because it is not in a circuit (3087.), and a piece of lac, which cannot, because it is a non-conductor of electricity, may have peculiar but analogous states when moving across a field of magnetic power.³¹

La idea de que toda la materia, conductora o no, adopta el estado electro-tónico cuando está sometida a la fuerza magnética no nos resulta nueva, ya la habíamos visto sugerida en la Serie I y retomada en los párrafos que consideramos de las Series XIII y XIV.³² Responde a la convicción de Faraday de que los efectos de inducción electromagnética deben manifestarse en toda la materia. La única diferencia es que en la materia no conductora la corriente inducida no puede formarse. Lo que es relevante en esta nueva apelación al estado electro-tónico es la vinculación explícita de la noción con una problemática que hasta ahora se había mantenido latente. Lo vemos claramente expuesto en este texto: sin el estado electro-tónico la explicación de la inducción electromagnética permanece incompleta, puesto que el mero movimiento no puede explicar la corriente inducida. La importancia que esta problemática tiene para Faraday se pone de manifiesto por su irrupción en una Serie dedicada a examinar la capacidad de las líneas de fuerza

³¹ **Ibídem, §3173.**

³² **Véase Capítulo 4, sección 4. 2. 1.**

como representación de la fuerza magnética. Los experimentos descritos tan minuciosamente en esta Serie han mostrado la eficacia de la representación; estos dos textos apuntan a sus limitaciones.

Faraday volverá sobre este problema a la hora de examinar la noción de las líneas de fuerza desde una perspectiva diferente. Por el momento, al final de la Serie XXVIII Faraday advierte que la expresión 'líneas de fuerza' tiene su significado pleno cuando se entiende en el sentido representacional, o sea, cuando no se va más allá de considerar que las líneas proporcionan una descripción, entre otras posibles, de la distribución de la fuerza magnética.³³ No obstante, él no va a quedarse aquí. En los artículos restantes de la década de los cincuenta va a abordar la cuestión de la existencia de las líneas y de su naturaleza física. Es precisamente en el marco de esta reflexión donde volverá a plantearse el problema de la explicación de la inducción y su solución vendrá facilitada por la íntima relación que se establecerá entre las dos nociones, líneas de fuerza y estado electro-tónico.

5. 3. Las líneas físicas de fuerza y el estado electro-tónico (1852)

5. 3. 1. La realidad física de las líneas de fuerza

El artículo donde Faraday abordó el problema de la existencia y naturaleza física de las líneas de fuerza magnética se publicó en junio de 1852 en el *Philosophical Magazine* con el título "On the Physical Character of the Lines of Magnetic Force".³⁴ En una nota que precede al

³³ *ERE*, Serie XXVIII, §3175.

³⁴ *Philosophical Magazine*, 3 (1852), 401-428, *ERE*, III, pp. 407-437. En este artículo Faraday mantiene la costumbre de numerar los párrafos en orden

artículo, Faraday nos explica por qué ha cambiado el lugar acostumbrado de publicación. Es cierto que sus contenidos están estrechamente ligados con los de las dos Series anteriores, XXVIII y XXIX, sin embargo, explica Faraday, son de una naturaleza tan altamente hipotética y especulativa que no parecen adecuados para su publicación en las *Philosophical Transactions*. En definitiva, de lo que se trata es de preservar la dimensión representativa de las líneas de fuerza. De ahí su insistencia en que sus especulaciones podrían ser completamente erróneas y sin embargo la capacidad de la noción de las línea de fuerza para proporcionar una descripción correcta de la distribución de la fuerza magnética, tal y como se ha establecido en la Serie XXVIII, permanecería intacta.³⁵

Faraday aborda el problema de la realidad de las líneas de fuerza desde el punto de vista de la transmisión de la fuerza. Así, empieza el artículo comparando tres fuerzas: gravitatoria, radiante y eléctrica con respecto a su modo de transmisión.³⁶ Las dos primeras presentan dos casos extremos. La fuerza gravitatoria parece presentar un ejemplo paradigmático de pura acción a distancia. Ninguna evidencia respalda la existencia física independiente de un agente responsable de la transmisión de la acción. Desde su punto de vista dos características de la transmisión de esta fuerza avalan decisivamente esta consideración. En primer lugar, el hecho de que las líneas de la fuerza gravitatoria, que pueden imaginarse como vehículos de la acción, sean rectas, pone de

 correlativo con el último de la Serie precedente, la XXIX. Por consiguiente, los textos correspondientes a este artículo se citarán mediante la abreviatura PCLM seguida por el número del párrafo.

³⁵ PCLM, §3243.

³⁶ *Ibíd.*, §§3245-3250.

manifiesto que la transmisión no involucra ningún proceso físico en el medio. También apunta en la misma dirección el hecho de que la transmisión no parezca ocupar tiempo. Todo lo contrario ocurre en el caso de la radiación (luz). En este caso la línea de fuerza tiene una existencia física que es independiente de la del emisor y receptor de la acción, y además, obviamente, la acción requiere tiempo para propagarse.

El caso de la electricidad presenta interesantes similitudes y diferencias con los dos anteriores. A diferencia de la radiación, pero como en el caso de la gravedad, la fuerza eléctrica requiere para su manifestación de dos cuerpos que interactúen. Sin embargo, a diferencia de la gravitación, la fuerza eléctrica representa un poder dual y limitado. Dual porque la interacción sólo puede producirse entre cuerpos que se encuentran en condiciones antitéticas. El carácter de limitación se sigue necesariamente del carácter dual. Las dos manifestaciones de la fuerza eléctrica son opuestas en carácter pero iguales en magnitud. Y su carácter de limitación se ejemplifica en que si un cuerpo *a* está actuando sobre otro *b*, podrá actuar sobre otro *c* únicamente con parte de la fuerza con la que actuaba sobre *b*.

La fuerza eléctrica se presenta en dos estados, estático y dinámico. En el estado estático la acción se transmite mediante líneas de fuerza que comienzan y terminan en los cuerpos que interactúan y cuya existencia viene favorecida por dos hechos. En primer lugar su forma, las líneas de la fuerza eléctrica estática son curvas. En segundo lugar, por el hecho de que la transmisión de la acción depende del medio donde tiene lugar, como lo demuestra la existencia de la capacidad inductiva específica. El único requisito aún no satisfecho es el del tiempo empleado en la propagación de la acción. En el estado dinámico de la

electricidad las líneas de fuerza son limitadas, como en la descarga de un estado inductivo previo, o ilimitadas y continuas como en un circuito voltaico. En ambos casos su forma depende de la naturaleza del medio en que ocurren. A diferencia del caso estático, que la propagación de la acción requiere tiempo es un hecho establecido experimentalmente.

Después de esta discusión previa Faraday plantea directamente la cuestión que le interesa:

The question at present appears to be, whether the lines of magnetic force have or have not a physical existence; and if they have, whether such physical existence has a static or a dynamic form.³⁷

Debemos retener los términos en que se plantea el problema porque serán decisivos para comprender el papel que va a jugar el estado electro-tónico. En los párrafos siguientes Faraday argumentará a favor de la existencia de las líneas de fuerza magnética intentando establecer su curvatura, porque desde su punto de vista, como tuvimos ocasión de ver en el caso de la fuerza eléctrica, curvatura implica necesariamente existencia física.³⁸ Para establecer la curvatura de las líneas se apoyará en la similitud entre fuerza eléctrica y magnética, particularmente en el hecho de que la segunda, al igual que la primera, es un poder dual y limitado. Una vez establecida la curvatura de las líneas, en un segundo paso intentará determinar si la naturaleza de las líneas es estática, con lo cual las líneas de fuerza magnética serían el correspondiente magnético de las líneas de fuerza eléctrica estática, o si su naturaleza es dinámica, en cuyo caso las líneas de fuerza magnética serían el correspondiente

³⁷ *Ibidem*, §3251.

³⁸ Véase Capítulo 4, sección 4. 1. 3.

magnético de la corriente eléctrica.

Para Faraday, un argumento decisivo para establecer la existencia de las líneas de fuerza magnética pasa por demostrar su curvatura. Podría pensarse que la curvatura de las líneas puede establecerse recurriendo simplemente a la observación de la figura que adoptan las limaduras de hierro en la proximidad del imán. Sometidas a la fuerza magnética las limaduras se disponen según líneas curvas. Pero Faraday sabe muy bien que este procedimiento está sometido a la objeción de que las líneas sean un producto de la interacción entre las limaduras y el imán, y su curvatura pueda explicarse en términos de atracciones y repulsiones en línea recta.³⁹ La curvatura no sería pues una característica esencial de las líneas, y la existencia independiente de las líneas, previa a la presencia de las limaduras, no quedaría establecida. La misma objeción podría plantearse en el caso del alambre móvil. Ya hemos visto que en la Serie XXVIII, con ayuda de sus experimentos con circuitos e imanes rotatorios, Faraday había podido concluir que las líneas de fuerza asociadas al imán son curvas cerradas. Sin embargo, a la luz de la presente objeción, el resultado no puede considerarse establecido, porque de nuevo se puede señalar que las líneas curvas son un producto de la interacción entre el imán y el alambre. Lo que se requeriría para demostrar experimentalmente la existencia independiente de las líneas de fuerza es un método que no necesitara recurrir a ningún objeto distinto de la fuente de fuerza magnética.⁴⁰

Los argumentos de Faraday para intentar establecer la curvatura de las líneas de fuerza dependen del carácter dual y limitado que presenta la fuerza magnética. Como la fuerza eléctrica, el poder magnético se

³⁹ PCLM, §3254.

⁴⁰ NERSESIAN-1984, p. 51.

presenta en dos manifestaciones opuestas en carácter pero iguales en magnitud, y cuya existencia por separado es imposible. En el caso del imán esto lleva a admitir una relación entre los dos polos, que es lo que explica el hecho, establecido experimentalmente en la Serie XXVIII, de que la fuerza asociada con cualquier sección de las líneas del imán sea constante. Faraday se pregunta cómo se puede mantener esta necesaria relación entre los dos tipos de magnetismo en el caso de un imán situado en el vacío. Sólo es concebible admitiendo líneas curvas:

It appears to me, that the outer forces at the poles can only have relation to each other by *curved* lines of force through the surrounding space; and I cannot conceive curved lines of force without the conditions of a physical existence in that intermediate space.⁴¹

5. 3. 2. La naturaleza de las líneas físicas de fuerza

Notemos desde ahora que Faraday ha de plantear el problema de la naturaleza de las líneas magnéticas precisamente en estos términos: naturaleza estática o dinámica, porque, si bien está convencido de la unidad de las dos fuerzas, eléctrica y magnética, no cuenta con ninguna evidencia capaz de respaldar la correspondencia entre estados de la fuerza eléctrica y estados de la fuerza magnética. Ha podido distinguir entre el estado estático y el dinámico en el caso de la fuerza eléctrica, pero esta distinción resulta mucho más problemática de establecer en el caso de la fuerza magnética, en particular, sigue chocando con la ausencia de un estado estático de la fuerza magnética que se corresponda con el estado estático de la fuerza eléctrica.⁴²

⁴¹ PCLM, §3258, subrayado de Faraday.

⁴² El problema de la correspondencia entre estados de la fuerza eléctrica y

Ahora bien, admitiendo la existencia de las líneas de fuerza magnética, ¿de qué tipo de existencia física podría tratarse? La respuesta de Faraday es meramente tentativa:

It may be a vibration of the hypothetical æther, or a state or tension of that æther equivalent to either a dynamic or a static condition; or it may be some *other state*, which though difficult to conceive, may be equally distinct from the supposed non-existence of the line of gravitating force, and the independent and separate existence of the line of radiant force.⁴³

Como puede notarse Faraday no está particularmente interesado en aventurar hipótesis sobre la causa física de la existencia de las líneas. No excluye que el éter pueda jugar algún papel⁴⁴--las líneas podrían ser vibraciones en el éter-- pero tampoco está dispuesto a rechazar otras posibilidades. Su actitud en este punto no puede achacarse a simple prudencia; recordemos al respecto que la nota que precede al artículo advertía al lector que iba a encontrarse con contenidos altamente especulativos. Lo que encontramos aquí, más bien, es una clara intención de acentuar el orden de importancia de los problemas que se plantean con respecto a la noción de las líneas de fuerza. En primer lugar su existencia, en segundo lugar su naturaleza, pero 'naturaleza' no se magnética aparece claramente planteado en los párrafos finales de la Serie XIV. Véanse la sección 4. 3. 2 del Capítulo 4.

⁴³ *Ibíd.*, §3263, subrayado de Faraday.

⁴⁴ Faraday remite en una nota a la hipótesis que Euler había avanzado en sus *Lettres à une Princesse d'Allemagne sur divers sujets de physique et de philosophie*. En su carta CLXXVI (EULER-*Lettres*, III, pp. 107-111) Euler explica el imán como un torbellino de materia sutil que entra y sale continuamente por los polos. Euler, sin embargo, no identifica, como cree Faraday, la materia sutil responsable de los fenómenos magnéticos con el éter.

refiere a la causa física de la existencia de las líneas sino al modo físico de su existencia. Desde su punto de vista, la cuestión crucial es si las líneas tienen una naturaleza estática o dinámica.

Para abordar este problema Faraday comienza discutiendo la analogía entre las líneas de fuerza magnética y la corriente eléctrica. La

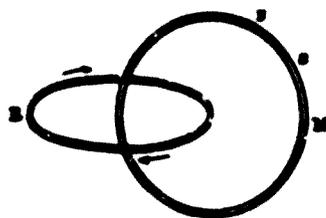


figura 25 (ERE, III, Plate IV, figura 1)

figura 25 es la que utiliza Faraday para simbolizar la relación entre la línea de fuerza eléctrica y la magnética. El anillo *E* representa una corriente eléctrica en el sentido de las flechas; el anillo *M* representa una de las líneas magnéticas asociadas con la corriente, cuya polaridad sur-norte está indicada en la figura. Según Faraday, ambas pueden ser descritas en los mismos términos:

I have elsewhere called the electric current, or the line of electro-dynamic force, "an axis of power having contrary forces exactly equal in amount in contrary directions" (517). The line of magnetic force may be described in *precisely the same terms*; and these two axes of power, considered as right lines, are perpendicular to each other; with this additional condition, which determines their mutual direction, that they are separated by a right line perpendicular to both.⁴⁵

⁴⁵ PCLM, §3265, subrayado de Faraday.

La descripción de la corriente eléctrica como eje de poder tiene su raíz en la teoría de Faraday de la descomposición electroquímica. Lo que se produce en la célula electroquímica es una transmisión de fuerza eléctrica de molécula a molécula que va acompañada por sucesivas rupturas y recombinaciones de las moléculas. Es en definitiva la misma idea que se expresará, en el caso de la inducción electrostática, indicando que la transmisión de fuerza tiene lugar mediante la polarización sucesiva de las partículas del dieléctrico. En ambos casos el carácter dual de la fuerza eléctrica impone que sus dos manifestaciones, opuestas pero iguales en magnitud, estén siempre simultáneamente presentes. Lo mismo ocurriría en el caso de la fuerza magnética que, como ya hemos visto, es también una fuerza dual.

Así expresada la analogía es oscura, y Faraday se esfuerza en aumentar su verosimilitud señalando la correspondencia que existe entre los dos ejes de poder.⁴⁶ Esta correspondencia se presenta en principio como un contraste. En lo que respecta al eje de poder eléctrico Faraday señala dos caracteres. En primer lugar, la corriente eléctrica tiene una tendencia a alargarse, un hecho cuyo descubrimiento Faraday atribuye a Ampère y Davy. En segundo lugar, dos corrientes paralelas del mismo sentido se atraen. Ahora, si imaginamos la líneas de fuerza magnética como una serie de pequeños imanes dispuestos consecutivamente, podemos ver los caracteres correspondientes del eje de poder magnético. En primer lugar, la línea de fuerza magnética tiene una tendencia a acortarse longitudinalmente y, además, las líneas tienen una tendencia a

⁴⁶ En lo que respecta a la analogía entre la corriente eléctrica y la línea de fuerza magnética sigo de cerca el brillante análisis de M. N. Wise en la p. 1312 de su WISE-1979. Creo que el suyo es el único que ha iluminado un grupo de párrafos particularmente oscuros.

repelerse.

Tenemos pues que las líneas de fuerza eléctrica dinámica tienen una tendencia a alargarse longitudinalmente y a atraerse lateralmente, mientras que las líneas de fuerza magnética tiene una tendencia a acortarse longitudinalmente y a repelerse lateralmente. Ahora bien, afirma Faraday, estos contrastes coinciden cuando se toma en consideración la relación de perpendicularidad entre los dos ejes de poder. Como ilustración utiliza el ejemplo de la corriente eléctrica y los anillos de fuerza magnética que la rodean. La tendencia a alargarse longitudinalmente de la corriente coincide en dirección con la repulsión lateral entre los anillos de fuerza magnética.⁴⁷ La figura 26 nos permitirá

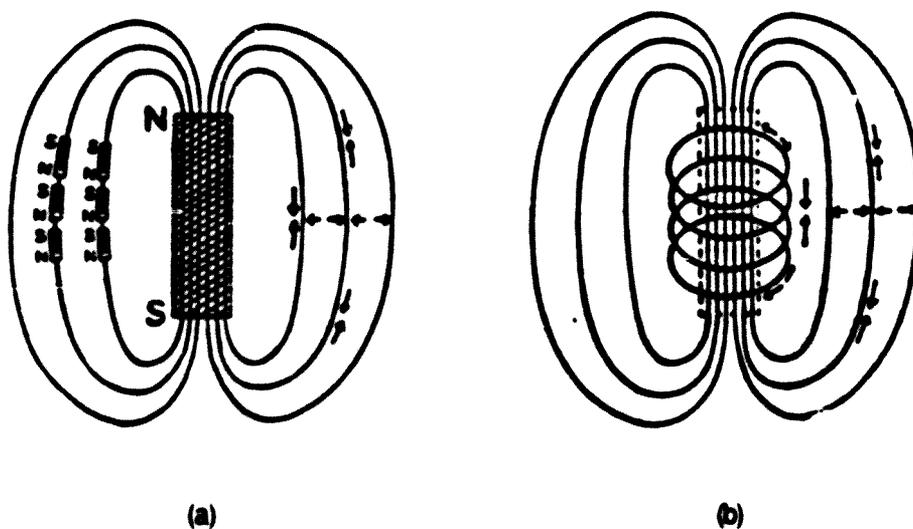


figura 26 (WISE-1979, figura 4 a y b)

comprender globalmente la coincidencia que afirma Faraday de los efectos producidos por las tendencias de los dos ejes de poder. La figura 26a representa un imán con algunas líneas de fuerza y las flechas indican la tendencia a acortarse longitudinalmente y repelerse

⁴⁷ PCLM, §3268.

lateralmente de las líneas. En la figura 26b el imán se ha reemplazado por espiras por las que circulan corrientes del mismo sentido (Cf., figura 25). La tendencia de las líneas magnéticas a contraerse longitudinalmente tiene el mismo efecto que la tendencia de las corrientes a atraerse, y la tendencia de las líneas magnéticas a repelerse lateralmente tiene el mismo efecto que la tendencia de las corrientes a alargarse longitudinalmente.

5. 3. 3. El estado electro-tónico. fundamento estático de las líneas de fuerza magnética

Llegados a este punto uno pensaría que Faraday considera suficientemente establecida la analogía entre los dos ejes de poder y que, por consiguiente, se ha decidido en favor de la naturaleza dinámica de las líneas de fuerza. Sin embargo, necesita hacer una decisiva matización ulterior. Vale la pena reproducir el texto íntegramente, a pesar de su longitud, porque en él reaparece de nuevo decisivamente la noción de estado electro-tónico:

The mutual relation of the magnetic lines of force and the electric axis of power has been known ever since the time of Ørsted and Ampère. This, with such considerations as I have endeavoured to advance, enables us to form a guess or judgement, with a certain degree of probability, respecting the nature of the lines of magnetic force. I incline to the opinion that they have a physical existence corresponding to that of their analogue, the electric lines; and having that notion, am further carried on to consider whether they have a probable dynamic condition, analogous to that of the electric axis to which they are so closely and, perhaps, inevitably related, in which case the idea of magnetic currents would arise; or whether they consist in a state of

tension (of the æther?) round the electric axis, and may therefore be considered as static in their nature. Again and again the idea of an *electro-ionic* state (60. 1114. 1661. 1729. 1733.) has been forced on my mind; such a state would coincide and become identified with that which would then constitute the physical lines of magnetic force. Another consideration tends in the same direction. I formerly remarked that the magnetic equivalent to *static* electricity was not known; for if the undeveloped state of electric force correspond to the like undeveloped condition of magnetic force, and if the electric current or axis of electric power correspond to the lines of magnetic force or axis of magnetic power, then there is no known magnetic condition which corresponds to the static state of the electric power (1734.). Now assuming that the physical lines of magnetic force are currents, it is very unlikely that such a link should be naturally absent; more unlikely, I think, than that the magnetic condition should depend upon a state of tension; the more especially as under the latter supposition, the lines of magnetic power would have a physical existence as positively as in the former case, and the curved condition of the lines, which seems to me such a necessary admission, according to the natural facts, would become a possibility.⁴⁸

He observado que el texto constituía una matización, porque una lectura apresurada podría inducir a pensar que en él Faraday replanteaba de nuevo la cuestión de la naturaleza de las líneas, decidiéndose en este caso por una naturaleza estática. En efecto, en las primeras líneas Faraday señala que, favoreciendo la opinión de que las líneas magnéticas tienen una existencia física tan bien establecida como las líneas de fuerza electrodinámica, se trata de saber si su naturaleza es estática o dinámica. Ahora bien, si el resto del párrafo se lee como un intento de Faraday de argumentar en favor de una de estas dos alternativas, la naturaleza estática, el texto pronto se torna

⁴⁸ *Ibidem*, §3269, subrayados de Faraday.

incomprensible. Según esta lectura, Faraday introduciría el tema de la correspondencia entre los estados de la fuerza eléctrica y magnética, en la segunda mitad del párrafo, para llamar la atención sobre la inexistencia de un estado estático de la fuerza magnética. El hueco se llenaría admitiendo la naturaleza estática de las líneas de fuerza magnética. Pero entonces la parte final del párrafo es ininteligible, porque allí Faraday parece culminar su argumentación en favor de la naturaleza estática, y lo hace suponiendo que la naturaleza de las líneas es dinámica ("assuming that the physical lines of magnetic force are currents").

Partamos, por el contrario, de que el texto no supone un replanteamiento de la cuestión de la naturaleza de las líneas de fuerza magnética sino que continúa esta reflexión ya iniciada en los párrafos anteriores. Lo que se ha visto al argumentar en favor de la analogía entre la corriente eléctrica y la línea de fuerza magnética es que dicha analogía estaba lo suficientemente bien fundada como para admitir la naturaleza dinámica de las líneas. Ahora bien, lo que pretende Faraday en este texto no es explorar la alternativa de que la naturaleza de las líneas sea estática sino, continuando con la reflexión anterior, plantear, y responder, la pregunta ¿es esta naturaleza *puramente* dinámica? Su respuesta es negativa. La naturaleza de las líneas es compleja porque en ella se articulan dos estados de la fuerza magnética: las líneas son un estado dinámico de la fuerza magnética que tiene su base o fundamento en un estado estático.

Este es precisamente el papel crucial que Faraday concede a su estado electro-tónico: servir de base o fundamento a las líneas de fuerza magnética, aunque sin identificarse con ellas. Así se entiende la

compleja frase que lo introduce en el texto: "Again and again the idea of an *electro-tonic* state has been forced on my mind; such a state would coincide and become identified with that which would then constitute the physical lines of magnetic force." Si hubiera pretendido simplemente identificar estado electro-tónico y líneas de fuerza, esto es, si hubiera pretendido afirmar que la naturaleza de las líneas de fuerza es estática no hubiera recurrido, presumiblemente, a una frase tan oscura para alcanzar el objetivo. Si escribe "such a state would coincide and become identified with that which would then constitute the physical lines of magnetic force" es porque el estado no se identifica con las líneas, sino con ese "that which" que las constituye, es decir, les proporciona su fundamento.

No se trata simplemente de una cuestión de expresión literaria, se trata de que aceptando esta interpretación el resto del párrafo se hace inteligible, y la problemática de Faraday se hace más transparente. Después de la frase que he discutido, el texto introduce un tema que ya hemos visto planteado en los párrafos finales de la Serie XIV: la necesaria correspondencia entre estados de la fuerza eléctrica y magnética parece incompleta, puesto que está ausente un estado estático magnético correspondiente al estado estático de la electricidad. El problema para Faraday es crucial porque la unidad de las dos fuerzas, eléctrica y magnética, es un punto capital en su marco teórico. Al respecto, en el párrafo anterior, cuando remataba su argumento a favor de la analogía entre la línea de fuerza magnética y la corriente eléctrica, escribía que este argumento

probably points to the intimate physical relation, and it may be, to the oneness of condition of that which is apparently two powers or forms of

power, electric and magnetic.⁴⁹

Naturalmente, la unidad se irá por tierra si no consigue resolver el problema de la falta de correspondencia entre los estados de las dos fuerzas. Esta es precisamente la motivación profunda de la idea que acaba de sugerir, esto es, que la naturaleza de las líneas de fuerza no es puramente dinámica, que tiene una base estática en un estado de tensión, el estado electro-tónico.

Admitiendo la existencia del estado electro-tónico puede resolverse el problema de la falta de correspondencia entre los estados de las dos fuerzas. La solución es similar a la que había sugerido en la Serie XIV, pero la discusión que ha desarrollado en este artículo la hace más convincente. Dicha solución se expresa en la última parte del párrafo que nos ocupa. Si se acepta que la corriente eléctrica, el estado dinámico de la fuerza eléctrica, se corresponde con la línea de fuerza magnética, el estado dinámico de la fuerza magnética, entonces, así como toda corriente eléctrica depende de un estado inductivo previo, del mismo modo la condición dinámica de la fuerza magnética depende de ("depend upon") un estado de tensión previo, el estado electro-tónico.

Recapitemos el intrincado argumento que Faraday ha desarrollado hasta aquí. Una vez establecida la curvatura de las líneas de fuerza magnética, y por consiguiente, desde su punto de vista, su existencia física, se plantea el problema de su naturaleza física. El marco teórico en el que va a intentar resolver el problema tiene un elemento fundamental: su firme creencia en la unidad de las dos fuerzas, eléctrica y magnética. Ya que en su análisis de la fuerza eléctrica había distinguido dos estados, estático y dinámico, la creencia en la unidad de las fuerzas le

⁴⁹ *Ibidem*, §3268.

impulsa a distinguir también en la fuerza magnética dos estados correspondientes. Hay una fuerte analogía entre la línea de fuerza magnética y la corriente eléctrica que hablaría en favor de la naturaleza dinámica de la primera, pero con una matización crucial: no se trata de una naturaleza puramente dinámica. La línea de fuerza magnética tiene un fundamento estático en un estado de tensión, el estado electro-tónico.

El estado ha adquirido una importancia decisiva en las reflexiones de la última etapa de la carrera de Faraday. El estado electro-tónico ocupa el "hueco" en la serie de estados de la fuerza magnética detectado desde sus investigaciones sobre la fuerza eléctrica. El estado se identifica con el estado estático de la fuerza magnética y por tanto permite preservar la necesaria unidad entre las dos fuerzas.

Para poder cumplir este papel Faraday ha introducido una última transformación en su noción de estado electro-tónico. Hasta aquí el estado había sido únicamente una condición de la materia. Al principio había sido introducido como un estado que adquiriría la materia conductora o no en el seno de una fuerza magnética. Aquí, dando un paso más, el estado se independiza de la materia, al menos de la materia ponderable.⁵⁰ Cuando se le describe como estado de tensión, se sugiere de pasada que podría ser un estado de tensión del éter, pero es claro que la existencia del estado no requiere de un soporte material. Hay una buena razón para ello: las líneas de fuerza magnética a las que el estado está íntimamente asociado no requieren de materia ponderable para su existencia. Faraday lo ha afirmado claramente cuando, refiriéndose a las líneas de fuerza magnética, escribe:

If they exist, it is not by a succession of particles, as in the case of static

⁵⁰ Este punto lo ha observado Nersessian en su NERSESIAN-1984, p. 60.

electric induction (1215. 1231.), but by the condition of space free from such material particles. A magnet placed in the middle of the best vacuum we can produce, and whether that vacuum be formed in a space previously occupied by paramagnetic or diamagnetic bodies, acts as well upon a needle as if it were surrounded by air, water or glass; and therefore these lines exist in such a vacuum as well as where there is matter.⁵¹

Hay otro argumento que confluye en la necesidad de admitir la existencia del estado electro-tónico y precisar su naturaleza. Más arriba hemos visto, al discutir la Serie XXVIII, cómo irrumpía el problema de la explicación de la inducción magneto-eléctrica. Faraday manifestaba allí su insatisfacción con una explicación que recurre simplemente al corte de líneas de fuerza por un conductor en movimiento. Aquí el problema se plantea de nuevo. Imaginemos un alambre de cobre en reposo en la proximidad de un imán. Aparentemente no hay ninguna relación magnética entre el alambre y el conductor. Cuando el alambre se mueve cortando las líneas de fuerza se genera una corriente en él.

But, as I have elsewhere observed (3172.), this current, having its full and equivalent relation to the magnetic force, can hardly be conceived of as having its entire foundation in the mere fact of motion. The motion of an external body, otherwise physically indifferent, and having no relation to the magnet, could not beget a physical relation such as that which the moving wire presents. There must, I think, be a previous state, a state of tension or a static state, as regards the wire, which when motion is superadded, produces the dynamic state or current of electricity. This state is sufficient to constitute and give a physical existence to the lines of magnetic force, and permit the occurrence of curvature or its equivalent external relation of poles, and also the various other conditions, which I conceive are incompatible with mere action at a distance, and which yet do exist amongst magnetic

⁵¹ *Ibidem*, §3258.

phenomena.⁵²

Si no se admite ninguna relación magnética previa al movimiento entre el alambre y el imán, tendrá que concluirse, piensa Faraday, que dicha relación aparece súbitamente con el movimiento. En otras palabras, con el movimiento se produciría una creación de fuerza magnética que se transformaría en el conductor en una corriente eléctrica. Esta conclusión es tan inaceptable para Faraday como cualquiera que implique una violación del principio de conservación de la fuerza.

En un artículo posterior ofrece la siguiente formulación del principio:

Force may be opposed by force, may be diverted, directed partially or exclusively, may even be converted, as far as we understand the matter, disappearing in one form to reappear in another; but it cannot be created or annihilated, or truly suspended, *i. e.* rendered existent without action or without its equivalent action.⁵³

La ilustración que propone de las consecuencias de este principio resulta iluminadora. Supongamos una masa de materia, por ejemplo, el sol, y otra, por ejemplo, la tierra que, o bien se crea o bien se traslada hasta situarse cerca del sol, de modo que se ejerza atracción gravitatoria mutua entre ambas. Ahora bien, piensa Faraday, si el sol atrae a la tierra, sólo caben dos posibilidades: o bien esta fuerza de atracción surge debido a la presencia de la tierra, o bien ha preexistido en el sol cuando la tierra no estaba cerca de él.

La primera posibilidad está excluida de entrada puesto que implica

⁵² *Ibíd.*, §3270.

⁵³ "On Some Points of Magnetic Philosophy, and on the Nature of Force", *Proceedings of the Royal Institution*, 2 (1855), 6-13, *ERE*, III, pp. 566-574, p. 572. *Ct.*, *FARADAY-Conservation*, pp. 443-463.

precisamente lo que el principio de conservación de la fuerza prohíbe: la creación de fuerza. Respecto de la segunda, sin embargo, pueden distinguirse asimismo tres posibilidades, todas ellas consistentes con el principio. Podría ser que la fuerza gravitatoria con que el sol atrae a la tierra haya dejado de actuar en un grado equivalente sobre otros cuerpos. O bien podría pensarse, en segundo lugar, que su aparición como fuerza gravitatoria procede de una conversión de otra forma de poder. Por último, cabría admitir que la fuerza de atracción existe siempre alrededor del sol en el espacio.

La primera posibilidad es poco verosímil puesto que tendría consecuencias nunca detectadas respecto de la trayectoria de los planetas. Una consideración similar puede hacerse respecto de la segunda posibilidad, la relación entre la gravedad y las demás fuerzas no ha sido respaldada experimentalmente. Sólo queda en pie la tercera posibilidad: la fuerza gravitatoria existe siempre en todo el espacio que rodea al sol independientemente de que la tierra esté o no presente.

Si volvemos ahora al texto donde Faraday examina el caso del alambre conductor que se mueve en la proximidad de un imán, comprenderemos mejor la conclusión que nos pide que aceptemos: existe siempre en el espacio que rodea al imán un estado de tensión, el fundamento estático de la fuerza magnética. El estado afecta también al conductor y cuando se mueve cortando las líneas de fuerza el estado se descarga en forma de corriente eléctrica.

Así pues la noción de estado electro-tónico permite una explicación más completa del fenómeno de inducción magneto-eléctrica. La corriente se induce cuando el conductor se mueve cortando las líneas de fuerza, pero es la descarga de un estado de tensión existente en el espacio. Esta

explicación, además, es consistente con el principio de conservación de la fuerza.

En resumen, la elaboración de la noción de estado electro-tónico contenida en "On the Physical Character of the Lines of Magnetic Force" presenta dos caracteres fundamentales. En primer lugar, el estado aparece como uno de los elementos esenciales de la naturaleza física de las líneas de fuerza magnética. Aún siendo una condición dinámica, las líneas tienen un fundamento estático que Faraday identifica con el estado. De esta forma se preserva la necesaria correspondencia entre los estados de las fuerzas eléctrica y magnética y, por consiguiente, la unidad de ambas fuerzas. Con ello se recoge un tema presente ya en las Series XIII y XIV. En segundo lugar, el estado electro-tónico, en tanto que estado de tensión que existe en el espacio que rodea al imán permite proporcionar una explicación de la inducción magneto-eléctrica consistente con el principio de la conservación de la fuerza. Con ello se consigue una conexión de las dos nociones, estado electro-tónico y líneas de fuerza, buscada desde la época del descubrimiento de la inducción.

La historia de la noción de estado electro-tónico en la obra de Faraday llega a su fin con el artículo "On the Physical Character of the Lines of Magnetic Force". En los artículos posteriores Faraday seguirá explicando su concepción de las líneas de fuerza magnética, pero sin ir más allá de las ideas expuestas aquí.⁵⁴ En su formulación final el estado

⁵⁴ Los artículos relevantes posteriores son: "On Magnetic Hypotheses", *Proceedings of the Royal Institution*, 1 (1854), 457-459, *ERE*, III, pp. 524-527; "On Some Points of Magnetic Philosophy", *Philosophical Magazine*, 9 (1855), 81-113, *ERE*, III, 528-565; "On Some Points of Magnetic Philosophy, and on the Nature of Force", *Proceedings of the Royal Institution*, 2 (1855), 6-13, *ERE*, III,

electro-tónico aparece como un componente esencial de la naturaleza física de las líneas: sin confundirse con ellas constituye su fundamento. Estado electro-tónico y líneas de fuerza han llegado a ser nociones profundamente relacionadas.