



EL CAMPO ELECTROMAGNÉTICO: DE FARADAY A LAS ONDAS HERCIANAS

MANUEL G. DONCEL

*Centro de Estudios de Historia de las Ciencias (CEHIC)
Universidad Autónoma de Barcelona,*

INTRODUCCIÓN

Nuestra física nació con «la» revolución científica —como solemos llamarla— la que en el siglo XVII estableció la mecánica clásica, digamos de Galileo y Newton. Su «género-sujeto»¹ son los cuerpos o corpúsculos, puesto que estos son el tema genérico del que trata la mecánica y a la vez el sujeto lógico central del que se predicen propiedades cinemáticas o dinámicas. (La mecánica llegará a tratar también de fluidos continuos, pero los considerará como una infinidad de corpúsculos infinitesimales.) Esta mecánica newtoniana elaboró también la idea de gravitación universal, como acción a distancia contrapuesta a los vórtices cartesianos que actúan únicamente por contacto.



Hoy querría hablaros de una segunda revolución de nuestra física², la revolución que estableció a lo largo del siglo XIX el extraño concepto de «campo electromagnético». Estos campos constituyen un nuevo «género-sujeto». La nueva física no hablará ya de corpúsculos, sino de ciertas virtualidades de carácter vectorial, focalizadas en cada punto del espacio, aun del espacio vacío (lleno quizás de «éter»). Estos campos significan además un cierto retorno al principio de acción por contigüidad. Quisiera subrayar que este retorno no era en modo alguno necesario para dar cuenta de los fenómenos eléctricos y magnéticos descubiertos en aquel tiempo. Había, efectivamente, entonces en el continente europeo muchos físicos con mentalidad newtoniana, capaces de dominar la electricidad y el magnetismo como acciones a distancia. Recordemos la ley de Coulomb (1785), la ley «electro-dinámica» de Ampère (1820-27) y, como síntesis de ambas, la «ley básica universal de las acciones eléctricas» de Wilhelm Weber (1846):

$$F = \frac{e e'}{r^2} \left[1 - \frac{1}{c^2} \left(\frac{dr}{dt} \right)^2 + \frac{2r}{c^2} \frac{d^2r}{dt^2} \right]$$

Con el modelo de Weber que describía las corrientes como movimiento de ciertos corpúsculos eléctricos, y la concepción de Ampère que consideraba los imanes como constituidos por corrientes circulares, esa única expresión daba cuenta de todos los fenómenos eléctricos y magnéticos entonces conocidos. Esa ley clasificaba tales fenómenos en electrostáticos y electrodinámicos. En efecto, su primer término reproduce la fuerza electrostática de Coulomb entre dos corpúsculos cargados, que depende sólo de sus cargas y de la distancia entre ellos; mientras que los dos últimos términos resultan equivalente a la expresión de la fuerza electrodinámica de Ampère, y son además función de la velocidad y de la aceleración relativas entre los corpúsculos.

No me es posible presentaros aquí el proceso por el que elaboraron esa «electrodinámica», a partir de las experiencias de Christian Oersted, André Marie Ampère, Wilhelm Weber y Herman von Helmholtz, fundamentalmente. Ni siquiera puedo presentaros todo el proceso revolucionario que introducirá frente a ella la nueva concepción de la «teoría de campos»: Experiencias y elucubraciones de Michael Faraday (recogidas en sus *Experimental Researches in Electricity*, o *ERE*, 1839-1855), elaboración conceptual y matemática de James Clerk Maxwell (*Treatise*, 1873), contrastación experimental en las ondas de

¹ Uso este término en el sentido técnico aristotélico de «to génos to hypochéimenon».

² Sobre «las cuatro revoluciones conceptuales de la física» véase DONCEL - 1993.



Heinrich Hertz (*Untersuchungen*, 1892). Una vieja publicación mía sobre ambos procesos veo que circula ya entre vosotros.³

Lo que quisiera demostraros hoy, sobre esos físicos que acabo de mencionar como creadores de la concepción «teórico-campista», es que también ellos tuvieron que cambiar bruscamente su antigua visión «electrodinámica». Elegiré tres de esos «episodios de conversión», que he estudiado recientemente y sobre los que hoy disponemos de nuevo material de archivo, aún poco conocido. Presentaré, pues, brevemente las conversiones sucesivas: de Faraday a sus «curvas magnéticas» (diciembre de 1831)⁴, de Maxwell al «estado electrotónico» faradaico (nuestro potencial vector *A*, febrero de 1856)⁵, y de Hertz a sus «ondas hercianas» (diciembre de 1887)⁶.

1. LA CONVERSIÓN DE FARADAY A SUS «CURVAS MAGNÉTICAS»

El proceso por el que Faraday fue concibiendo el «campo electromagnético» suele presentarse como constantemente progresivo y contrapuesto a la visión electrodinámica de «Ampère». La oposición aparece ya en el «Bosquejo histórico del electromagnetismo» publicado por Faraday a partir de setiembre de 1821, y en la presentación de sus experimentos sobre las «rotaciones electromagnéticas» (descubiertas el 3 y 4 de setiembre de 1821)⁷.

El segundo de estos experimentos —el que muestra un simulacro de monopolo magnético girando en torno a la corriente— visualiza claramente unos «círculos» que se convertirán años más tarde en las «curvas magnéticas» distribuidas por todo el espacio cercano a corrientes o imanes. Experimentos adicionales persuadirán a Faraday de que ese «movimiento en sentido circular» es el fenómeno fundamental, en contraposición a las interpretaciones amperianas de los imanes como corrientes circulares⁸. El descubrimiento, diez años más tarde (en agosto de 1831), de la inducción de corrientes suele verse como un paso ulterior de Faraday en ese proceso de comprensión del concepto de campo. Las «curvas magnéticas» le aparecían entonces aún con mayor viveza, puesto que el modo cómo ellas eran cortadas por el conductor explicaba perfectamente el fenómeno de la inducción de corrientes. Con el descubrimiento, muy posterior, de los fenómenos diamagnéticos (1845-1850) esta compren-

³ DONCEL - 1987. A ella me remito como lectura previa.

⁴ Véase ROMO & DONCEL - 1997, DONCEL - 1996 a.

⁵ Véase DONCEL & LORENZO - 1996.

⁶ Véase DONCEL - 1991 a, HERTZ & DONCEL - 1995 y DONCEL - 1996 b.

⁷ FARADAY - 1821 a-c, - 1822 y FARADAY - *Diary*, §§ 13-20. Sobre el experimento que comentamos a continuación, véase también FARADAY - *ERE*, vol II, fig. 1, parte izquierda.

⁸ FARADAY - *Diary*, §§ 20 y 35-37, del 4 al 6 de setiembre. Véase también FARADAY - 1822, pp. 118-119.



sión alcanzará su punto álgido. Faraday explicará entonces el diferente poder de «conducción magnética» a través de sustancias magnéticas o diamagnéticas mediante el apretamiento o separación, respectivamente, de estas «líneas de fuerza magnética» en el interior de dichas sustancias⁹.

En su realidad histórica, el proceso por el que Faraday fue elaborando su concepción de campo, no fue tan linealmente progresivo como suele presentarlo esa reconstrucción didáctica. Al menos es un hecho que en el momento de descubrir las corrientes inducidas, en agosto de 1831, Faraday mantenía una concepción claramente amperiana. Fue más de tres meses después, en diciembre de 1831, cuando tuvo que cambiar bruscamente de mentalidad e imaginar «curvas magnéticas».

Sorprendentemente, la prueba irrefutable de esta conversión ignorada de Faraday se basa en una pieza de archivo bien conocida: el manuscrito mismo de su artículo más famoso, la Serie I de sus *ERE*. Este manuscrito, al describir el descubrimiento faradaico de las corrientes inducidas, hace patente el error inicial de Faraday sobre su sentido, cuya corrección ocasionó la conversión. El manuscrito se conserva en la Royal Society desde que fue registrado para su lectura (noviembre de 1831), y contiene huellas evidentes de haber sido enviado a la imprenta (febrero de 1832)¹⁰. Lo interesante es que sus sesenticuatro folios están repletos de correcciones. Párrafos enteros aparecen añadidos en el verso del folio precedente, y hasta cuatro folios nuevos fueron más tarde insertados en él. Otros párrafos, por el contrario, están tachados, y (¡para tormento del historiador!) seis folios enteros han sido eliminados. Muchas de estas correcciones son de carácter puramente estilístico. Por ejemplo, en el folio 1 la expresión «una hélice plana» («flat helix») se ha cambiado en «una espiral plana» («flat spiral»)¹¹. Pero en el folio 37 la frase «Todos mis resultados tienden a confirmar la verdad de la proposición enunciada por el Sr. Ampère...» ha sido corregida en «Pero todos mis resultados, sin embargo, tienden a invertir el significado de la proposición enunciada por el Sr. Ampère...» Y esto constituye un cambio serio,

⁹ Véase FARADAY - *ERE*, vol. 3, Serie XXVI, pp. 200-201.

¹⁰ Una edición crítica de este manuscrito ha sido publicada como apéndice en ROMO & DONCEL - 1994. Nuestro interés por el manuscrito proviene de querer comprobar cómo habla corregido Faraday su error inicial, del que habíamos encontrado tres indicios publicados: FARADAY - *Diary*, § 9, del 29 de agosto; FARADAY - *Letters*, Nº 522 a R. Phillips del 29 de noviembre; resumen de la lectura publicado en *Proceedings of the Royal Society* del 15 de diciembre. El registro oficial del manuscrito, aún incompleto, está datado a 21 de noviembre de 1831; la lectura se hizo probablemente en tres sesiones: 24 de noviembre, 8 y 15 de diciembre. Véase ROMO & DONCEL - 1994, pp. 311-313, y especialmente la nota 75. Sobre sus huellas de la imprenta, véase *ibidem*, p. 313 y nota 77.

¹¹ El Secretario más antiguo de la *Royal Society* recomendó a Faraday esta terminología puesto que, según él decía, «una hélice nunca puede ser plana». Véase ROMO & DONCEL - 1994, p. 324, nota 112, y p. 352, nota (*).



al reprochar a Ampère el error experimental que acaba de descubrir. Para estudiar este cambio de mentalidad de Faraday hemos de apoyarnos en un análisis crítico de todo el manuscrito, que permite reconstruir su versión primera¹². A partir de esta versión, vamos a bosquejar la mentalidad inicial de Faraday y aun el modo por el que pudo llegar a ella.

En esta versión primera del manuscrito Faraday ni siquiera mencionaba las «curvas magnéticas». En cambio, expresaba con insistencia su admiración por la «bella teoría de Ampère», llegando incluso a presentar sus propios experimentos de corrientes inducidas como una continuación de algunos experimentos realizados por éste¹³. Entre ellos cita especialmente el experimento «de poner un disco de cobre junto a una hélice plana» (¡la frase del folio 1 corregida estilísticamente!). La historia de este famoso experimento amperiano de inducción ha sido bien estudiada: Tras un resultado negativo obtenido por Ampère en 1821 —y explotado por él contra las primeras críticas de Faraday—, en 1822 Ampère obtuvo un resultado positivo, al repetir el experimento en Ginebra, en colaboración con August De la Rive (el hijo), —y la reacción psicológica de Ampère fue la de «esconder bajo el tapete» ese resultado inoportuno—¹⁴. Faraday tuvo noticia, en forma lacónica y confusa, de este resultado positivo por una carta de Charles De la Rive (el padre). Pero tres años más tarde recibió del mismo Ampère un ejemplar francés del *Manual de electricidad dinámica*, publicado por su discípulo Demonferrand¹⁵. En él Faraday pudo leer una descripción detallada e ilustrada del experimento y de sus resultados inicial negativo y final positivo. Éste último concluía así¹⁶:

... Queda pues, establecido ahora que una corriente eléctrica
tiende a poner en movimiento en su mismo sentido la electricidad
de los conductores junto a los que pasa.

¹² Esta versión puede leerse fácilmente en nuestra edición crítica: *ibidem*, pp. 336-385.

¹³ Véase DONCEL - 1996 a, section 1. Esta admiración contrasta con sus críticas de 1821. Pero, como explicamos allí, las relaciones entre Faraday y Ampère habían evolucionado muy cordialmente durante esos diez años. Ya en 1823 confesaba Faraday estar «casi avergonzado de las objeciones que hice». Faraday había sido elegido miembro de la Academia de París. Por otra parte, la teoría matemática de Ampère había sido consolidada. Ciento que resultaba demasiado intrincada para la «ignorancia de conocimientos matemáticos» de Faraday, pero era respetada por todos los que encontraba (Gay-Lussac, Herschell, Babbage...). Finalmente, la dificultad inicial de Faraday sobre la falta de fundamentación experimental, parecía quedar resuelta mediante sus propios experimentos de corrientes inducidas, que resultaban tan «confirmatorios de la teoría del Sr. Ampère». Véase FARADAY -*Letters*, N° 203, 333; FARADAY -*ERE*, § 58.

¹⁴ Véase WILLIAMS 1986, p. 310.

¹⁵ FARADAY -*Letters*, N° 181 y 232.

¹⁶ DEMONFERRAND - 1823, p. 174.



Faraday tenía esta ley por auténticamente amperiana. Y, al descubrir la inducción de corrientes por corrientes, creía comprobar su verdad, aunque resultaba ser una verdad parcial. Pues observó que la corriente inducida duraba muy poco tras el momento de conectar el circuito primario, y que al desconectarlo aparecía otra corriente breve en sentido contrario. Faraday explicaba estas observaciones suponiendo que en el conductor, junto con la inducción, se producía un «estado electrotónico». Él era el que resistía dinámicamente —como un contramuelle— el desarrollo de la corriente inducida, haciendo que fuera momentánea y que, al cesar, se produjera como reacción otra corriente momentánea en sentido contrario. De modo análogo aplicaba Faraday esta ley a los fenómenos de corrientes inducidas por imanes: la conexión y desconexión del primario correspondía en ellos al acercamiento hacia el polo del imán y al alejamiento del mismo; y la dirección y sentido de la corriente primaria venía en ellos dado por la dirección y el sentido de la parte más próxima de las corrientes circulares amperianas que constituían el polo del imán.

Para Faraday, el fenómeno normal era la inducción de una corriente permanente y paralela, tal como establecía la ley amperiana. Pero el estado electrotónico era responsable de fenómenos «extraordinarios»: la interrupción de la corriente y su reaparición en sentido contrario. Así lo formulaba solemnemente en su manuscrito tras citar, traduciéndola del francés, la mencionada ley del *Manual* de Demonferrand¹⁷:

... Todos mis resultados tienden a confirmar la verdad de la proposición enunciada por el Sr. Ampère, *«que una corriente eléctrica tiende a poner en movimiento en su mismo sentido la electricidad de los conductores junto a los que pasa»*, pero muestran que el efecto es momentáneo, y que es producido también por inducción magnética y que otros efectos extraordinarios se siguen de esto.

Así que esta ley amperiana, complementada con su estado electrotónico, explicaba todos los fenómenos de inducción de corrientes descubiertos por Faraday. Explicaba también el oscuro fenómeno del disco de Arago: un disco de cobre horizontal, que gira rápidamente sobre su eje, y sobre uno de cuyos diámetros se coloca un imán de barra, suspendido de un hilo de torsión. El disco parece volverse magnético, puesto que arrastra al imán obligándole a seguir su rotación. El experimento, que había sido presentado por François Arago en la Academia de París en marzo de 1825,

¹⁷ ROMO & DONCEL - 1994, p. 362 (las cursivas son de Faraday, traduciendo las de Demonferrand). Este es el texto que Faraday tuvo que cambiar drásticamente en el fol. 37.



fue mostrado poco después en Londres por Gay Lussac, y discutido allí por C. Babbage y J. F. W. Herschel. Éstos, desde su concepción electrodinámica amperiana, proponían una explicación: los polos del imán, consistentes en corrientes amperianas, deberían inducir en el disco de cobre otras corrientes vorticales del mismo sentido, que atraerían las corrientes del polo del imán. Para esa especie de inducción magnética, postulaban además, como «elemento esencial», un cierto retraso temporal, de forma que la atracción ya no fuera vertical sino oblicua, y pudiera explicar el arrastre horizontal de los polos magnéticos.

En 1825, pocos días después de recibir el *Manual* de Demonferrand, Faraday intentó sin éxito inducir corrientes y reproducir a su manera los «experimentos de Arago»¹⁸. Cuando en agosto de 1831 lograba por primera vez obtener corrientes inducidas, inmediatamente volvió a pensar en los «experimentos de Arago». Buscaba corrientes vorticales en placas y discos de cobre, al ser éstos desplazados lateralmente sobre el polo de un imán. Exactamente lo que intentaba detectar era un «semi-vórtice» en el borde del disco. No pudo detectar ninguno, pero en cambio descubrió «corrientes radiales» inducidas en el disco, cuando este radio pasaba lateralmente sobre un polo magnético. Obtuvo incluso una ley fenomenológica que fijaba el sentido de esas corrientes¹⁹.

Faraday sospechó inmediatamente que tales corrientes radiales habrían de producirse también en el disco de Arago, inducidas por los polos del imán suspendido, y vio que ellas explicaban perfectamente el arrastre del imán. Pues, debido a sus antiguas rotaciones electromagnéticas, cada polo del imán debía tender a describir un círculo alrededor de la corriente radial por él inducida. Y el sentido de la corriente radial, fijado por su ley fenomenológica, era justamente el necesario para que la componente horizontal del movimiento circular del polo siguiera continuamente el giro del disco. Sólo le quedaba a Faraday un problema: justificar la ley fenomenológica del sentido de las corrientes radiales, basándose en la ley amperiana y su estado electrostático. A partir de la versión primera del manuscrito, podemos conjeturar tal justificación²⁰. Así que su concepción electrodinámica amperiana, en la que los imanes se reducen a corrientes eléctricas y éstas actúan sobre los conductores (ja una cierta distancia!), triunfaba completamente. Desde ella redactó Faraday la versión primera del manuscrito, la que fue leída en la Royal Society a partir del 24 de noviembre de 1831.

¹⁸ FARADAY - *Diary*, vol. 1, pp. 279-280, de 28 de noviembre y 2 de diciembre de 1825.

¹⁹ FARADAY - *Diary*, §§ 17, 77, 116, 127.

²⁰ El texto de la justificación de Faraday estaba en los folios que fueron eliminados. Pero dos «fósetas» que quedan de ese texto, y su carta (*Letter* n° 522) a R. Phillips permiten tal conjetura. Véase DONCEL - 1996 a, sección 2.



Pero dos semanas más tarde Faraday tenía sus dudas sobre el sentido de la corriente inducida, tal como lo fijaba la ley amperiana. Delicados experimentos realizados el 8 de diciembre probaban de manera indiscutible que esta ley era falsa: el sentido de las corrientes inducidas era contrario al de la corriente inductora al conectar el primario, y era el mismo al desconectarlo. Corregir tal error en el manuscrito registrado y leído en la Royal Society era posible, y Faraday hubo de hacerlo media docena de veces. La corrección más solemne es la indicada al principio: «Pero todos mis resultados tienden a invertir el significado de la proposición enunciada por el Sr. Ampère, ... pues indican el sentido contrario para la corriente producida ...».

El problema más delicado era el de las corrientes inducidas por imanes. Si, al acercar un conductor a la corriente amperiana de un imán, el sentido de la corriente inducida en él era contrario al de la corriente amperiana inductora, entonces la justificación dada por Faraday a la ley fenomenológica del sentido de las corrientes inducidas fallaba, y el fenómeno del disco de Arago quedaba sin explicar. El mismo 8 de diciembre Faraday realizó determinaciones muy cuidadosas sobre el sentido de tales corrientes inducidas por imanes. Pero resulta que este sentido no depende exclusivamente de la posición final que alcanza el conductor al acercarse al imán, sino también del modo como llega a esta posición. En especial, un conductor rectilíneo puede acercarse al borde del polo circular de un imán de barra según una dirección axial o lateral (es decir, avanzando a lo largo de un plano paralelo al eje del imán, o de uno perpendicular a él). Y los resultados en uno y otro caso son opuestos: el acercamiento axial seguía la ley amperiana corregida y el lateral la sin corregir. Parece que Faraday experimentó esta confusión al fin de la jornada del 8 de diciembre de 1831²¹.

El 9 de diciembre Faraday ensayó nuevos desplazamientos del conductor rectilíneo alrededor del polo, en especial, desplazamientos a lo largo de planos tangentes a un hemisferio centrado en el polo. Para definir el sentido de las corrientes inducidas en tales desplazamientos, parece que Faraday atendía al lado por el que el conductor cortaba la normal al plano. Y pronto advertirá que esta normal correspondía físicamente a una «curva magnética» que salía radialmente del polo²².

Así obtuvo una ley general nueva, en la que se habla necesariamente de «cortar curvas magnéticas». Debía ilustrar esta ley y aplicarla a su justificación del fenómeno de Arago. Para ello hubo de redactar nuevos folios e introducirlos en el manuscrito, eliminando de él los anticuados.

²¹ Véase DONCEL - 1996 a, section 4, y FARADAY - *Diary*, §§ 204-205.

²² Véase *ibidem*, y FARADAY - *Diary*, §§ 209-214



Faraday no identificaba todavía estas curvas magnéticas con sus antiguos círculos. Pero en la Serie II incluso la inducción de corrientes por corrientes quedaba explicada, por el modo en que el conductor secundario cortaba círculos o curvas magnéticas que, al conectar y desconectar el circuito primario, «se expandían hacia fuera» o «se contraían sobre» él, respectivamente. Por otra parte, Faraday ya no veía el corte de curvas magnéticas como un simple criterio para fijar el sentido de la corriente inducida, lo veía también como la causa de esta inducción. Realizaba así su conversión a la concepción «campista», al imaginar el espacio repleto de tales curvas magnéticas, que actuaban como verdaderos «ejes de poder»²³. Su concepto de estado electrotónico resultaba ahora fenomenológicamente innecesario. Pero quiso mantenerlo por razones filosóficas, y lo irá desarrollando en contextos muy diversos hasta 1852²⁴.

2. LA CONVERSIÓN DE MAXWELL AL «ESTADO ELECTROTÓNICO»

Es conocido que Maxwell en su *Treatise* (1873) formula la ecuación llamada de Maxwell-Faraday, la que regula las corrientes inducidas por variaciones magnéticas, mediatizada por el potencial vector A . (Esto contrasta con la formulación directa de la ecuación de Maxwell-Ampère, la que regula el magnetismo producido por corrientes de conducción o desplazamiento; Hertz y Heaviside introducirán las dos ecuaciones en forma simétrica.) Esta formulación aparece ya en la primera publicación de Maxwell sobre electromagnetismo, «Sobre las líneas de fuerza de Faraday» (1856). Por ello suele considerarse como la concepción inicial de Maxwell sobre el tema.

Pero la reciente publicación de los manuscritos de Maxwell, *Letters and Papers* cuidadosamente editados por P. M. Harman, nos permite conocer con más detalle el origen de esa formulación. Sabíamos que ese artículo inicial de Maxwell es la versión publicada de dos conferencias que pronunció en la Cambridge Philosophical Society los días 10 de diciembre de 1885 y 11 de febrero de 1856. Ahora podemos examinar con toda comodidad algunos manuscritos directamente relacionados con esas conferencias. Uno de ellos es probablemente el papel mismo que tenía ante los ojos Faraday al pronunciar su conferencia del 10 de diciembre. En él puede leerse la formulación más primitiva de esta ley dada

²³ FARADAY - ERE, §§ 232-238, 118.

²⁴ Véase ROMÓ - 1992 y DONCEL 1991 b.



por Maxwell, formulación que no está aún en simbolismo matemático y que desconoce totalmente la idea de potencial vector. Dice así²⁵:

...que la fuerza electromotriz total de un circuito originada por inducción se mide por el cambio que experimenta por unidad de tiempo el número de líneas de inducción magnética que pasan por en medio de él.

En el resumen publicado de la conferencia del 11 de febrero aparece prácticamente ese mismo enunciado de la ley. E inmediatamente después es comentado con estas palabras²⁶:

Esta ley, aunque suficientemente simple y general para hacer inteligibles todos los fenómenos de inducción en circuitos cerrados, contiene la concepción algo artificial de que el número de líneas que *pasan por en medio* del circuito, ejerza un influjo físico sobre él. Sería preferible que se pudiera evitar, en el enunciado de la ley, hacer depender la fuerza electromotriz en el conductor, de líneas externas al conductor.

Fue por consiguiente una especie de dificultad metafísica —el no admitir una acción a distancia, aunque sea a pequeña distancia— lo que obligó a Maxwell a modificar su enunciado inicial de la ley de Maxwell-Faraday. Se inspiró para ello en la semejanza que presentaba con la ecuación de Maxwell-Ampère de aquel momento (en la que aún no se habían introducido las corrientes de desplazamiento, con lo que el paralelismo entre cantidades eléctricas y magnéticas sólo podía encontrarse entre la corriente eléctrica J y la inducción magnética B). Reproduzcamos su razonamiento, modernizando con nuestro formalismo vectorial su lenguaje de componentes cartesianas²⁷:

Ahora bien, las expresiones que obtuvimos para la conexión entre magnetismo y corrientes eléctricas nos proporcionan el método de hacer que la ley de corrientes inducidas dependa del estado del conductor mismo.

²⁵ MAXWELL - *Letters*, N° 84, p. 366.

²⁶ *Ibidem*, N° 87, p. 373.

²⁷ *Ibidem*, pp. 373-374.



Supongamos, pues, una función vectorial de x y z , A , tal que la cantidad magnética B sea

$$B = \nabla \times A ;$$

se verá entonces que, si suponemos que

$$\frac{dA}{dt} = E$$

es la expresión de la fuerza electromotriz en un punto cualquiera del conductor, la fuerza electromotriz total en un circuito cualquiera será la misma que la expresada por la ley de Faraday. ... Esas expresiones ... podrían ser la representación simbólica de una ley real de la naturaleza. Tal ley fue sospechada por Faraday desde el primer momento ...

Así publicó Faraday por vez primera, como reelaboración ulterior, su formulación de la ecuación de Maxwell-Faraday, (I) y (II), mediatizada por el potencial vector A .

Según este resumen, aún introdujo en su conferencia de febrero una tercera ecuación, en la que se da la energía potencial de un circuito con densidad de corriente J en función del potencial vector dentro de él, evitando otra vez la idea de acción a distancia²⁸:

... A es por otra parte importante...; podemos expresar el potencial... de un sistema de corrientes cualquiera en una masa conductora mediante la integral

$$W = \iiint J \cdot A \, dx \, dy \, dz \quad (III)$$

En el artículo publicado «Sobre las líneas de fuerza Faraday» (que en diciembre de 1856 estaba aún en prensa) subraya esta misma motivación metafísica²⁹:

Con las funciones A logramos ahora evitar el tener que considerar la cantidad de inducción magnética que pasa por en

²⁸ *Ibidem*, p. 375.

²⁹ MAXWELL. - *Papers*, vol. 1, p. 203.



medio del circuito. En vez de este método artificial, aplicamos el más natural de considerar la corriente en relación a cantidades que existen en el mismo espacio que ella. A estas funciones les doy el nombre de *funciones electrotónicas*, o *componentes de la intensidad electrotónica*.

Pero en este artículo Faraday presenta una introducción de las ecuaciones (I), (II) y (III) mucho más sofisticada, basada en teoremas matemáticos generales y en el principio de conservación de la energía tal como lo había formulado Helmholtz en 1847²⁰.

Así que Maxwell, fiel a la mentalidad faradaica de acción por contigüidad, modificó su formulación más original de esta ley, en el momento mismo de comenzar a formular matemáticamente sus ecuaciones del campo electromagnético. De esta manera logró geometrizar el concepto filosófico de estado electrotónico elaborado por Faraday, transformándolo en nuestro familiar potencial vector.

Maxwell completará sus ecuaciones, introduciendo las corrientes de desplazamiento y la concepción electromagnética de la luz. Ambas cosas las introducirá en unas intuiciones geniales, durante el verano de 1861. Pero el contexto de éter mecánico-elástico, inspirado por William Thomson (Lord Kelvin), en el que pudo realizar estas intuiciones nos llevaría muy lejos²¹.

3. LA CONVERSIÓN DE HERZ A LAS «ONDAS HERCIANAS»

La detección experimental de «ondas hercianas» en 1888 constituyó de hecho una brillante contrastación de la teoría maxwelliana del campo electromagnético. Esta contrastación con frecuencia se proyecta sobre la intención de Hertz al realizar sus experimentos, presentándolos didácticamente como linealmente dirigidos hacia ella. Por otra parte, si miramos superficialmente al orden de los capítulos y a la Introducción sinóptica (capítulo N° 1) de las *Untersuchungen* (1892) de Hertz²², podríamos imaginar tal proceso lineal en su trabajo: desde el descubrimiento del oscilador y el resonador (N° 2) y la aclaración de sus perturbaciones fotoeléctricas (N° 4), hasta la demostración de campos ondulatorios cerca del oscilador (N° 5), de efectos electrodinámicos producidos por ciertas ondas de polarización en aislantes (N° 6), de la velocidad finita de las ondas electrodinámicas en el aire (N° 7), y de la formación de

²⁰ Véase DONCEL & LORENZO - 1996 § 4.

²¹ Véase DONCEL & PLA - 1996.

²² Véase la traducción comentada DONCEL - ROQUÉ - 1990.



ondas estacionarias en el aire (Nº 8). Trabajo ulterior de Hertz será calcular teóricamente, a partir de las ecuaciones de Maxwell, la formación de estas ondas junto al oscilador (Nº 9), y proponer aparatos y experiencias simple, con los que los físicos de cualquier laboratorio pudiesen convencerse de la existencia y propiedades de estas ondas (Nº 11).

Pero hoy disponemos de material de archivo, que excluye la realidad histórica de tal presentación didáctica, de un proceso lineal de pensamiento hacia las ondas hercianas³². Muestra más bien que Hertz con sus experimentos de Karlsruhe no buscaba en modo alguno ondas maxwellianas, sino que intentaba resolver problemas originados por las peculiares teorías de su maestro Helmholtz, y planteados dentro de su cuadro conceptual electrodinámico. Y muestra que, en el proceso de pensamiento de Hertz, la idea misma de ondas electromagnéticas en el aire no aparece hasta su última etapa.

Una primera pieza de archivo hoy publicada son las cartas al editor de *Annalen de Physik und Chemie*, Gustav Wiedemann, en las que Hertz propone enviar y envía tres artículos (Nº 5, Nº 6, Nº 7), que constituyen la «Trilogía» de la conversión de Hertz³⁴. De esas cartas resulta clara la posteridad del artículo Nº 5, en el que se representan campos ondulatorios en el aire, y se desarrolla una sencilla teoría sobre su detección mediante el resonador. Esta posteridad no es evidente en la presentación sinóptica del propio Hertz (Nº 1), pero puede mostrarse también, comparando las versiones publicadas de los tres artículos. En efecto, los artículos Nº 6 y Nº 7 fueron presentados a la Academia de Berlín en noviembre de 1887 y enero de 1888, e inmediatamente publicados en una versión preliminar en las Actas de la Academia. En cambio, del artículo Nº 5 no existe tal versión preliminar, sino sólo la de la Trilogía (febrero de 1888). En esta iba seguido por los artículos Nº 6 y Nº 7 en una nueva versión, en la que Hertz introdujo diversas alusiones a las concepciones faradaicas y a la teoría maxwelliana de la luz. Su versión preliminar, en cambio, no contenía absolutamente nada sobre ondas o campos en el aire, sino que estaba redactada desde una mentalidad electrodinámica.

Una segunda pieza de archivo, también recientemente descubierta, es importante por conectar los experimentos de Hertz en Karlsruhe con su mentalidad helmholtziana. Sabíamos que en 1879 la Academia de Ciencias de Berlín ofreció un premio al investigador que lograra demostrar experimentalmente efectos electrodinámicos de corrientes de polarización eléctrica producidas en sustancias aislantes. Sabíamos también que este problema lo había propuesto Helmholtz pensando en Hertz, su bri-

³² Véase DONCEL - 1991 a, y BUCHWALD - 1994.

³⁴ Véanse estas cartas en DONCEL - 1991 a, pp. 4-6.



llante alumno de doctorado, y que le animaba a tomarlo como tema de su tesis doctoral, ofreciéndole su dirección personal y los magníficos recursos de laboratorio de su Instituto de Física recién estrenado. Pero Hertz, tras estudiar durante todo el verano las posibilidades de resolverlo, presentó a Helmholtz un informe muy pesimista y abandonó este tema experimental.³⁵ Pues bien, el documento encontrado hace pocos años en el Science Museum de Londres resulta ser el manuscrito autógrafo de este informe³⁶. Su carácter conceptual helmholtziano es evidente y, por otra parte, algunos de los experimentos en él propuestos por Hertz son de tipo muy similar a los de los primeros experimentos, intentados por él ocho años más tarde en Karlsruhe. Este documento, comparado con los antiguos recuerdos de Hertz, proporciona, pues, una prueba muy fuerte sobre las raíces helmholtzianas de la investigación de Hertz en 1887³⁷.

Una tercera pieza de archivo, sin duda la más importante, son los *Protokolle* o Notas de laboratorio de Hertz, correspondientes a los meses de mayo a diciembre de 1887, especialmente detalladas en lo relativo a noviembre y diciembre. Son veintitrés páginas autógrafas en escritura gótica antigua con muchas tablas y esquemas de figuras, que han sido preservadas en una rama de la familia Hertz. Una copia fotográfica de las mismas se conserva en los archivos de la actual Universidad Técnica de Karlsruhe. Estas Notas constituyen una fuente preciosa para seguir paso a paso el proceso de conversión de Hertz a las ondas hercianas³⁸.

Durante octubre y hasta el 5 de noviembre de 1887, Hertz logró solventar el problema propuesto por la Academia de Berlín ocho años antes. Con su oscilador de una frecuencia entonces inimaginable (hoy decimos de centenares de megahertz), y con una balanza electrodinámica muy ingeniosa, pudo probar la producción de corrientes de esa altísima frecuencia dentro de dieléctricos masivos. Lo comprobaba por sus efectos de inducción de corrientes, comparables a los que presentaban corrientes similares producidos en conductores delgados (artículo N° 6). Hertz pagaba así sus antiguas deudas con Helmholtz y la Academia, y daba un primer paso importante en su proceso de pensamiento: concebir electricidad de alta frecuencia oscilando en un bloque tridimensional de dieléctrico. Pero esto podía pensarlo, y en realidad lo pensó, desde un punto de vista electrodinámico.

Apenas acabado este trabajo, durante unos días de intensa emoción creativa,

³⁵ Véase HERTZ - *Untersuchungen*, pp. 1-2, y HERTZ - *Erinnerungen*, pp. 114-117.

³⁶ Una publicación parcial puede verse en O'HARA & FRICA - 1987, y un estudio crítico de BUCHWALD y O'HARA está en preparación.

³⁷ Véase HERTZ - *Untersuchungen*, pp. 4-5, y DONCEL - 1991 a, p. 9 y nota 2).

³⁸ Véase DONCEL - 1991 a, § 3. BUCHWALD - 1994 la utiliza ampliamente, especialmente en los capítulos 15-17. Su edición crítica es: HERTZ & DONCEL - 1995.



Hertz realizó experimentos sobre ondas eléctricas en alambres. Lo sabíamos por su carta a Helmholtz del 8 de diciembre. En ella hablaba de «ondas estacionarias en alambres rectilíneamente extendidos», cuyos nodos, decía, «puedo hacer visible casi con tanta claridad como los nodos de una cuerda vibrante»³⁹. Pero actualmente conocemos los detalles de este experimento, realizado el 7 y 8 de noviembre, e ilustrado en las Notas de laboratorio con un precioso esquema del montaje⁴⁰. El triunfo de visualizar estas ondas en alambres y de medir con precisión su longitud, le dio la idea de usar esos rápidos movimientos para medir la velocidad de propagación de la acción inductiva de su oscilador. De este modo Hertz concibió el montaje de su nuevo experimento (Nº 7). Las ondas en alambres eran ahora progresivas, y el alambre las dirigía en una cierta dirección del plano meridiano del oscilador, en el que la acción inductiva de éste era más fuerte. Un elaborado resonador comparará, a diferentes distancias del oscilador, la acción de las ondas en el alambre próximo con la «acción directa» del distante oscilador. Es interesante notar que en la descripción de Hertz (la versión preliminar del Nº 7), se habla exclusivamente de ondas en alambres, no en la «acción directa». Pero aún es más interesante notar, con el detalle ofrecido por las Notas de laboratorio, que hasta la tarde del 23 de diciembre sus experimentos parecían atribuir velocidad infinita a la propagación de esa acción directa. Sólo cuando llegue a probar que esta velocidad es finita, y la estime en relación a la velocidad de las ondas en alambres mediante una especial de medida de interferencia —lo que realizó el 27 de diciembre—, captará Hertz un cierto carácter ondulatorio de la acción directa, y acuñará para ella los términos de «onda inductiva» y «onda aérea»⁴¹.

Así que, la primera idea de ondas hercianas ha de datarse como algo posterior a este segundo paso de probar la velocidad finita de la acción inductiva. Hertz, sin embargo, todavía no había pensado que tales ondas pudiesen ser apantalladas o reflejadas. Además, hasta entonces había considerado esas ondas en el aire únicamente en una dimensión, en la dirección del alambre. Fue por primera vez el 29 de diciembre que Hertz obtuvo experimentalmente una cierta imagen bidimensional de estas ondas «en todas direcciones a través del aula entera». Era un dibujo estacionario que daba la forma media de estas ondas (el dibujo incluido más tarde en la publicación introductoria Nº 5). Pero Hertz comenzó muy pronto a imaginar en este mismo dibujo un cierto dinamismo de «fuerzas que

³⁹ Véase HERTZ - *Erinnerungen*, pp. 235-239.

⁴⁰ HERTZ - *Protokolle*, folio 2 a, en HERTZ & DONCEL - 1995, pp. 205 y 234-235.

⁴¹ *Ibidem*, folio 6 a, en pp. 218 y 260-261 (véase DONCEL - 1991 a, pp. 18-21).



giran»⁴². Era su primera intuición de la propagación del campo electromagnético.

Su convicción sobre la realidad de esas ondas en el aire no se establecerá hasta marzo de 1888. Sólo entonces, durante las vacaciones de Pascua, realizará Hertz un experimento épico para detectar en el aire ondas estacionarias de unos diez metros de longitud. Como escribía a Helmholtz el 19 de marzo: «Creo que la naturaleza ondulatoria del sonido en el espacio libre no puede demostrarse con tanta claridad como el carácter ondulatorio de la propagación electrodinámica». Hertz había traspasado la distancia que separa al «electrodinámico» del «teórico-campista»: de ver vibrar cuerdas de violín, había llegado a oír en el aire su música. Ahora estaba dispuesto a estudiar la teoría de Maxwell de estas ondas «electromagnéticas», y aun a convencer de su existencia a la comunidad física.

Agradecimientos: Quisiera expresar mi gratitud por la invitación y la cordial acogida en el Seminario de la Orotava y en la Universidad de La Laguna. Agradezco también la subvención parcial del DGICYT, dentro del proyecto de investigación PS92-0048.

⁴² *Ibidem*, folio 6 c y 7 a-b, en pp. 220-223 y 264-269 (véase DONCEL - 1991 a, pp. 22-24).



BIBLIOGRAFÍA

BUCHWALD, JED Z.:

- 1985 – *From Maxwell to Microphysics*. The University of Chicago Press, Chicago/London 1985.
- 1994 – *The Creation of Scientific Effects: Heinrich Hertz and Electric Waves*. The University of Chicago Press, Chicago/London 1994.

DEMONFERRAND, J. B. F.:

- 1823 – *Manuel d'électricité dynamique, ou traité sur l'action mutuelle des conducteurs électriques et des aimants, et sur la nouvelle théorie du magnétisme...* Paris 1823.

DONCEL, MANUEL G.:

- 1987 – «El campo electromagnético» en *Historia de la física en el siglo XIX*, Real Academia de Ciencias exactas, físicas y naturales, Madrid 1987, pp. 59-125.
- 1991 a – «On the Process of Hertz's Conversion to Hertzian Waves», *Archive for History of Exact Sciences*, 41 (1991), 1-27.
- 1991 b – «En el bicentenario de Michael Faraday: Sus especulaciones sobre el 'estado electrónico', origen de nuestra teoría clásica de campos», *Revista Española de Física*, 5, n. 4 (1991), 44-57.
- 1993 – «Las cuatro revoluciones de la física» (en ruso), en: FLORENSKY INTERNATIONAL FUND, *Of Origins of the World in Science and Theology*, Petropolis, St.-Petersburg 1993, pp. 41-58.
- 1996 a – «Reconsidering Faraday: The process of conversion to his magnetic curves», en: J. Z. BUCHAWALD, *Aspects of Mid to Late 19th Century Electromagnetics*, cuaderno especial de *Physis*, en prensa.
- 1996 b – «On Hertz's conceptual conversion: From wire waves to air waves», en: «Heinrich Hertz: Classical Physicist, Modern Philosopher», *Boston Studies*, en prensa.

DONCEL, MANUEL G. & XAVIER ROQUÉ:

- 1990 – *Heinrich Hertz: Las ondas electromagnéticas*, Clásicos de las Ciencias 2, Universidad Autónoma de Barcelona, Bellaterra 1990.



DONCEL, MANUEL G. & JOSÉ ANTONIO DE LORENZO:

1996 - «The electrotonic state, a metaphysical device for Maxwell too?»,
European Journal of Physics, en prensa.

DONCEL, MANUEL G. & JOAQUIM PLA:

1996 - «Maxwell's way to the displacement currents and to the electromagnetic theory of light», en preparación.

FARADAY, MICHAEL:

1821a-b 1822 «Historical Sketch of Electro-magnetism», *Annals of Philosophy*,
18 (1821), 195-200 and 274-290, 19 (1822), 107-121.

1821 c - «On some new Electro-Magnetical Motions, and on the Theory of
Magnetism», *Quarterly Journal of Science*, 12 (1821), 74-96;
ERE, vol. 2, p. 127-147.

Diary - T. MARTIN (de.), *Faraday's Diary... during the years 1820-1862*,
7 vols., G. Bell and Sons, London 1932-1936.

ERE - *Experimental Researches in Electricity*, 3 vols., Taylor and Francis,
London 1839-1855.

Letters - J.L. FRANK (ed.), *The Correspondence of Michael Faraday*, vols. 1-2
(1811-1840), Institution of Electrical Engineers, London 1991-1993.

HERTZ, HEINRICH:

Untersuchungen über die Ausbreitung der Elektrischen Kraft, Johann Ambrosius
Barth, Leipzig 1892. Traducción inglesa: *Electric Waves*, Dover,
New York 1962. Traducción castellana seleccionada y anotada:
DONCEL & ROQUÉ - 1982.

Erinnerungen M. HERTZ & C. SUSSKIND (ed.), *Erinnerungen, Briefe,
Tagebücher (Memoirs, Letters, Diaries)*, Edición bilingüe, San Francisco
Press & Physik Verlag, Weinheim / San Francisco 1977.

Protokolle (Laboratory Notes), see HERTZ & DONCEL - 1995.

HERTZ, H.G. & MANUEL G. DONCEL

1995 - «Heinrich Hertz's Laboratory Notes of 1887», *Archive for History of
Exact Sciences*, in press.



MAXWELL, JAMES CLERK:

- Letters* – P. M. HARMANN (ed.), *The Scientific Letters and Papers of James Clerk Maxwell*, vol. 1 (1846-1862), Cambridge University Press, 1990.
Papers – W. D. NIVEN (ed.), *The Scientific Letters and Papers of James Clerk Maxwell*, 2 vols., Cambridge 1890; Dover, New York 1925.

O'HARA, J. G. & W. PRICA:

- 1987 – *Hertz and the Maxwellians*, Peter Peregrinus Ltd., London 1987.

ROMO, JOSÉ:

- 1992 – *El concepto de estado electrostático en Faraday*,
 Universidad de Barcelona, Tesis Doctoral 1992, microficha num. 1665.

ROMO, JOSÉ & MANUEL G. DONCEL:

- 1994 – «Faraday's Initial Mistake Concerning the Direction of Induced Currents, and the Manuscript of Series I of his Researches, *Archive for History of Exact Sciences*, 47 (1994), 291-386.

WILLIAMS, LESLIE P.:

- 1986 – «Why Ampère did not discover electromagnetic induction»,
American Journal of Physics, 54 (1986), 306-311.