

EPISTEMOLOGÍA E HISTORIA DE LA CIENCIA

SELECCIÓN DE TRABAJOS DE LAS XVIII JORNADAS

VOLUMEN 14 (2008)

Horacio Faas
Hernán Severgnini

Editores



ÁREA LOGICO-EPISTEMOLÓGICA DE LA ESCUELA DE FILOSOFÍA
CENTRO DE INVESTIGACIONES DE LA FACULTAD DE FILOSOFÍA Y HUMANIDADES
UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons atribución NoComercial-SinDerivadas 2.5 Argentina



El estatus de los modelos y las analogías en el trabajo de Maxwell

Penélope Lodeyro*

El concepto de “campo” físico, que presupone que las fuerzas eléctricas y magnéticas se distribuyen en el espacio y son transmitidas en forma progresiva y continua, llegó a consolidarse en la física británica en la década de 1860 con el trabajo de J. C. Maxwell. Una de las innovaciones más significativas de su teoría fue el desplazamiento de corriente en tanto posibilitó su teoría electromagnética de la luz y la predicción de las ondas electromagnéticas. Esta noción fundamental aparece por primera vez en los escritos de Maxwell durante la construcción de su modelo mecánico del electromagnetismo en su trabajo de 1861-1862 “*On physical lines of force*”¹. Tan sólo dos años más tarde presenta su teoría explicando las ondas de luz como un fenómeno electromagnético. Por ello, no es de extrañar que en diversos tratamientos acerca de la teoría de Maxwell se concluya que su modelo mecánico tuvo un papel crucial en la evolución de su pensamiento.² El presente trabajo analiza el estatus de su modelo electromagnético bajo la hipótesis de que el mismo constituye una ilustración del potencial del método de las “analogías físicas” para explorar fenómenos desconocidos. Por ello resulta de interés establecer una primera aproximación a este método.

La influencia de W. Thomson

Maxwell partió de la concepción de Faraday de que las acciones eléctricas y magnéticas implicaban una transmisión continua de la fuerza en lugar de acción a distancia. Se focalizó en la idea de que las líneas de fuerza podían ser algún estado de un medio imponderable en virtud de su intento de incorporar la teoría electrodinámica en el marco de la mecánica newtoniana: considerando las líneas de fuerza como estados de un éter mecánico. La asunción de Maxwell de un éter newtoniano y su actitud hacia el trabajo de Faraday fueron influencias de William Thomson (Lord Kelvin).³ En 1842, Thomson había indicado la analogía formal entre las ecuaciones que representaban la ley de atracción del inverso al cuadrado y las que representaban el flujo uniforme del calor en un medio continuo.⁴ Su método de las “analogías físicas” permitía transferir la solución de un problema matemático de un lado de la física al otro; del lado “establecido” de la ciencia a otro lado aún en desarrollo. La “ semejanza en la forma ” implicaba un isomorfismo entre las leyes de diferentes fenómenos que permitía obtener “ideas físicas sin adoptar una teoría física”.

Siguiendo el método de Thomson, Maxwell ilustra en su “*On Faraday's Lines of Force*”⁵ los fenómenos electrostáticos, magnéticos y de corriente desarrollando analogías entre ellos y los movimientos de un fluido incompresible. En el mismo artículo, explica el papel desempeñado por estas analogías mecánicas. Primero, establece que la noción de acción a distancia es un presupuesto especulativo y que, por ende, puede ser criticada y confrontada con una explicación alternativa. A su entender, los “teóricos de los fluidos” quedaban atrapados por su propia hipótesis física, en una manera particular de ver el fenómeno.⁶ Por ello, el método procura no confinarse a una falsa hipótesis física. Sin embargo, no debemos limitarnos tampoco a la mera

* UNC FONCyT

formulación matemática. Pues, en ese caso, suele suceder que “perdemos por completo la dimensión del fenómeno a explicar; y aunque podemos seguir las consecuencias de las leyes dadas, nunca podemos obtener perspectivas extendidas de las conexiones del tema”⁷⁷.

Precisamente, Maxwell consideraba las analogías como un término medio entre el mero análisis matemático y el exceso de hipótesis especulativas; proveían una exploración gráfica de las posibles implicaciones físicas de un isomorfismo entre las leyes de diferentes fenómenos físicos sin hacer ninguna hipótesis física real (una imagen visual para aplicar a nuevos fenómenos). Esta exploración conducía a nuevas hipótesis físicas que podían testarse experimentalmente. Las analogías eran lo suficientemente precisas e inteligibles para guiar la búsqueda permitiendo a la mente: “aplazar en cada paso una concepción física definida... lo cual tampoco implica apartarse del tema en pos de sutilezas analíticas, ni ser llevados más allá de la verdad por una hipótesis favorita”⁷⁸.

El modelo electromagnético

Maxwell presentó su modelo electromagnético en su escrito “On the physical lines of force”. En las diferentes secciones de este trabajo, el modelo es transformado para que se adapte a los requisitos impuestos por los nuevos fenómenos, produciendo constricciones en la solución así como en las posibles caras futuras del modelo. En este sentido, diremos que sirvió como una guía heurística para formular su teoría electromagnética.

En las secciones I y II de su escrito, el modelo suponía que el medio electromagnético era un medio cuasi-material elástico y estaba dividido en células o vórtices cuyo movimiento causaba una tensión en el mismo que se identificaba con la fuerza magnética. Los ejes de rotación correspondían a la dirección del campo y su velocidad de rotación era proporcional a la intensidad de la fuerza magnética mientras que la densidad del medio electromagnético era entendida como proporcional a la permeabilidad magnética (capacidad inductiva específica). El movimiento de los vórtices era posible gracias a partículas redondas concebidas como ruedas descolocadas situadas entre los vórtices (fig. 1); el flujo de estas partículas en un conductor representaba la corriente eléctrica y su desplazamiento en un medio aislado producía efectos dieléctricos. Con su modelo, Maxwell podía dar cuenta de la formación de campos magnéticos por corrientes cerradas, la interacción de dichas corrientes con imanes, y la inducción electromagnética. En esta etapa, el modelo cumplía una función explicativa de fenómenos ya conocidos.

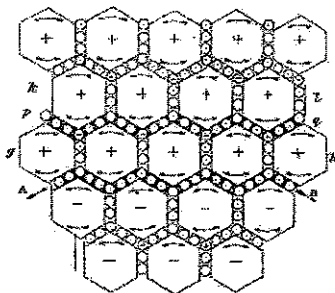


Figura 1

En la tercera parte de su escrito, Maxwell enfrenta el problema de extender el modelo para incorporar la electrostática y para explicar qué significa la carga en su teoría. Una respuesta que parece natural es considerar la carga como una acumulación de las pequeñas partículas que representaban la electricidad en el modelo. Sin embargo, dado que la corriente fluye siempre en circuitos cerrados, no es concebible la acumulación en el modelo tal cual estaba. Maxwell debió alterarlo haciendo que todo el medio fuese elástico; adujo que un cuerpo conductor podía compararse con una membrana porosa que opusiera mayor o menor resistencia al pasaje de un fluido, mientras que un dieléctrico era como una membrana elástica que podía ser impermeable al fluido, pero que transmitía la presión del fluido de un lado al otro. Así, en el dieléctrico, no se producía una corriente sino una polarización que creaba una tensión. La carga era considerada entonces como un exceso de polarización en el medio.

Consideramos que esta extensión del modelo mecánico a la electrostática y a las cargas ilustra el valor heurístico del método de las analogías físicas. El intento de aplicar el modelo más allá de los casos iniciales (representar el magnetismo, las corrientes y la inducción electromagnética) le llevó a resultados que él mismo consideró sorprendentes, en particular, la coincidencia de la velocidad de propagación de las ondas transversales en el medio electromagnético con la velocidad de la luz. Maxwell no había intentado siquiera escribir la parte III cuando comenzó su análisis y sólo contempló este elemento crucial cuando el desarrollo de la parte II ya estaba en la imprenta.⁹

Sin embargo, algunos autores han desestimado el valor del modelo en el razonamiento de Maxwell. Duhem, por ejemplo, lo acusa de "falsificar" uno de sus resultados y de construir el modelo *luego* de haber derivado las ecuaciones.¹⁰ Esta clase de críticas se basan en general en el hecho de que Maxwell cometió algunos errores en su formulación (en el signo y la ecuación para la transmisión de efectos transversales en el medio) y de que no derivó las conclusiones, aparentemente obvias, que se seguían del uso del modelo sino hasta su próximo escrito. En lo que sigue, mostraremos por una parte, que el principal error de formulación en las ecuaciones parece seguirse directamente del modelo y de su trabajo previo en elasticidad.¹¹ Por otra parte, argüiremos que la omisión de las conclusiones pudo deberse justamente a la concepción de Maxwell de las analogías físicas como provisorias.

Considerando el modelo, la polarización del dieléctrico podría representarse por las celdas y las partículas permaneciendo estacionarias pero susceptibles de una distorsión elástica o "desplazamiento". Maxwell asoció el desplazamiento a una corriente y llamó al efecto "desplazamiento de corriente". Este concepto significaba que las partículas eléctricas en el estado de polarización se encontraban en posición alterada, y que cualquier *cambio de desplazamiento* producía una fuerza tangencial en las células esféricas que se comunicaba a las partículas y demás células a través del medio, produciendo un movimiento como el que produciría una corriente. Maxwell derivó la ecuación matemática representando la relación entre la fuerza electromotriz inducida y el desplazamiento mediante una analogía con el desplazamiento en los sólidos elásticos.¹²

Los signos de la ecuación no son los convencionales hoy en día. Maxwell parece tomar el desplazamiento en dirección opuesta de la intensidad del campo y no, como se hace ahora y como él mismo sostuvo más tarde, en la misma dirección que la intensidad del campo. Sólo a

partir del modelo, podemos comprender que esto tenía sentido: si la fuerza electromotriz es representada por la "fuerza re-establecedora" en un sólido elástico, entonces el signo es correcto, dado que la fuerza y el desplazamiento tendrían orientaciones opuestas. Sin el modelo, no hay justificativo para signos diferentes.¹³

Luego, Maxwell formuló la ecuación para la "corriente total": la corriente ordinaria *más* el desplazamiento de corriente. A diferencia de las corrientes consideradas hasta aquí, esta era una corriente abierta, no un circuito. Lo sorprendente en este caso es que Maxwell no discutió el importante resultado que se derivaba: dada esta ecuación, la circulación del campo magnético está relacionada con la corriente total y no sólo con la corriente de conducción. Esta nueva formulación implica que la electricidad estática produce efectos magnéticos.¹⁴ Maxwell especificaría esta conclusión recién en su próximo trabajo y es difícil pensar que no lo notó a esta altura. Sólo cavemos especulaciones acerca de por qué no hizo mención alguna en este punto, señalaremos dos cuestiones a modo de hipótesis razonables. Primero, a partir del modelo, no queda claro si la distorsión de los vórtices debe ser considerada como una rotación despreciable cuando se inicia y cuando cesa. Segundo, como hemos mencionado, para Maxwell el método de las analogías a lo sumo podía sugerir una hipótesis física, pero no podía constituir la base para sostener nada. No había evidencia empírica de que las acciones electrostáticas produjeran efectos magnéticos, y no había modo en el pensamiento de Maxwell a esta altura de derivar la relación independientemente del modelo.

Hubo una segunda conclusión omitida. Maxwell interpretó el factor constante en la ecuación relacionando la fuerza electromotriz y el desplazamiento como la velocidad de las vibraciones transversales en el medio. Aunque un medio elástico ordinario transmitiría tanto ondas transversales como longitudinales, que por lo general tendrían diferentes velocidades, Maxwell consideró sólo el caso de las ondas transversales. N. Nersessian sostiene que esto pudo deberse a que se conocía que la luz consistía en vibraciones transversales del medio y que Maxwell deseaba comparar ambas velocidades.¹⁵ Calculó el valor de la constante utilizando las medidas electromagnéticas de Weber y Kohlrausch que en su análisis determinaban la velocidad de las ondas transversales en el medio electromagnético. De algún modo, para su sorpresa, el resultado fue que la velocidad se acercaba mucho al valor de la velocidad de la luz, así le escribía a Thomson:

Realicé las ecuaciones en la ciudad antes de tener cualquier sospecha acerca de la cercanía de los dos valores de velocidad de propagación de los efectos magnéticos y de la luz, así pienso que tengo razones para creer que el medio luminífero y el magnético son idénticos...¹⁶

Una vez más, Maxwell comete un error fortuito en sus cálculos para la velocidad. Dada su analogía, la velocidad es igual a la raíz cuadrada del coeficiente de rigidez del medio dividido por el *doble* de densidad, en lugar de simplemente la densidad como utilizó Maxwell en esta oportunidad. Como señala oportunamente N. Nersessian, este error puede ser rastreado hasta su trabajo anterior en elasticidad, donde realiza la misma formulación para la velocidad.¹⁷ Lo más probable es que Maxwell haya tomado la ecuación de su trabajo previo aplicándola directamente al modelo, más que como interpretó Duhem haya falsificado los resultados.

Recién en su próximo trabajo "*A dynamical theory of the electromagnetic field*"¹⁸ derivaría la ecuación de onda para el fenómeno electromagnético y reconocería que la luz consiste en las vibraciones transversales del mismo medio que es la causa de los fenómenos eléctricos y magnéticos. Nuevamente, puede pensarse que su reticencia a explicitar aquí estos resultados se debía a su insistencia en aplicar estrictamente el método de la analogía física. Su valor heurístico para arribar a la ecuación de la velocidad no debe desestimarse, sin embargo, el modelo no constituía una hipótesis física. Maxwell no estaba implicando que el medio electromagnético fuese un medio elástico, lleno con vórtices y ruedas. Simplemente sostenía que el estiramiento y contracción que produce el fenómeno electromagnético podía ser representado por tal medio. El modelo no expresaba una conexión existente en la naturaleza, por lo tanto, Maxwell no podía afirmar que su cálculo de la velocidad de las vibraciones transversales en tal medio daba la velocidad correcta para las acciones electromagnéticas.

A modo de conclusión

En el presente trabajo, hemos analizado el modelo electromagnético de Maxwell como ilustración de la potencialidad del método de las analogías físicas. Visto desde esta perspectiva, el desarrollo del modelo nos permite las reflexiones siguientes. Algunos fenómenos, se presentan en una primera aproximación de modo suficientemente complejo como para ser tratados en una representación exhaustiva y precisa. En estos casos, generar un modelo que describa el fenómeno resulta útil desde el punto de vista heurístico tanto para la comprensión del fenómeno como para el avance hacia una solución analítica. El tratamiento filo – histórico del desarrollo del modelo electromagnético que hemos llevado a cabo en la sección anterior, ilustra precisamente este rostro pragmático.

Como hemos mencionado, para Maxwell, el método de las analogías funciona como vía media entre el mero análisis matemático y el exceso de especulaciones físicas. Constituye una exploración gráfica de las posibles implicaciones de las analogías entre diferentes fenómenos sin hacer una hipótesis física. Este es el rostro icónico del modelo: brinda una imagen visual para aplicar a fenómenos nuevos cuando no se dispone de una solución analítica.

El modelo electromagnético de Maxwell brindó los medios para explorar la posibilidad conceptual de que las acciones eléctricas y magnéticas fueran acciones continuas llevadas a cabo en un éter mecánico. Las ecuaciones de campo derivadas del mismo permitieron que el campo pudiese interpretarse a partir de varios mecanismos subyacentes; Maxwell diría incluso que por *infinitos* mecanismos. Por lo tanto, como hemos destacado, el modelo mecánico no predice una conexión existente en la naturaleza. Las soluciones provistas son sólo parciales, y van siendo modificadas para adecuarlas a los problemas específicos que surgen y para completar la solución. El modelo electromagnético no nos dice cómo se transmiten de hecho las acciones eléctricas y magnéticas, funciona simplemente como herramienta heurística cuando nos enfrentamos con fenómenos desconocidos.

Notas

¹ "*On physical lines of force*", reimpresso en *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell*, New York. Dover, 1952.

² Por ejemplo, Thomson en su ensayo *James Clerk Maxwell* (1831) p 33 - 34, refiere el "Physical lines" como "el más fascinante tratamiento del nacimiento de una teoría" y "una ilustración muy precisa de las ventajas de la utilización de modelos" Citado por N. Nersessian (1984) p 71 Más recientemente, D Siegel en su *Conceptions of ether: studies in the*

history of ether theories, Cambridge, 1981, p 259, nos dice: "la teoría de los vórtices moleculares ha resultado extremadamente exitosa a nivel heurístico". N Nersessian presenta una exploración del tema en su libro "Faraday to Einstein: constructing meaning in scientific theories", Dordrecht, 1984, p 68-93.

³ Cf N Nersessian (1984) p 165, n 73

⁴ W Thomson, "On the Uniform Motion of Heat in Homogeneous Solid Bodies and its Connection with the Mathematical Theory of Electricity", Cambridge Mathematical Journal (1842), reimpresso en Papers on Electrostatics and Magnetism, Londres, 1884. Citado por Chalmers (2006) p 416.

⁵ Maxwell 1855-1856. Reimpresso en *Scientific Papers*, Vol. I

⁶ *Ibid.* p 155-156.

⁷ *Ibid.* p 156.

⁸ *Ibid.* La interpretación aquí realizada de las intenciones de Maxwell coincide con la expresada por N Nersessian en su "Faraday to Einstein" p 70-74 y es similar a la de Feyerabend en su "Realism, Rationalism and Scientific Method", Cambridge, 1981, p 11-13

⁹ Cf. N Nersessian (1984), p 76. "Claramente, la analogía condujo a Maxwell más allá de su motivación inicial y le proveyó las bases para el deseado vínculo entre el electromagnetismo y la luz" De hecho, en sus notas introductorias del escrito, Maxwell nunca menciona la electricidad estática, sólo dice que se ocupará de conectar el magnetismo con el electromagnetismo y las corrientes inducidas.

¹⁰ Duhem (1962), p 98. Véase también Chalmers (1973) y (1985).

¹¹ Cf. N Nersessian (1984), p 82 - 83

¹² Tanto la ecuación, como el concepto mismo de "displacement current" crearon y generan confusión aún hoy respecto a lo que quiso decir Maxwell. Ver N Nersessian (1984) p 82.

¹³ Cf. *Ibid* P 83

¹⁴ Esta tesis es defendida por M. Hesse (1961) y también por N. Nersessian (1984).

¹⁵ Esto es, que el ensanchamiento de las partículas causaría algún movimiento de los vórtices magnéticos.

¹⁶ Cf. N Nersessian (1984) p 83

¹⁷ *Ibid.*

¹⁸ *Ibid.*

¹⁹ Maxwell (1864).

Bibliografía

Berkson, W (1974) *Las teorías de los campos de fuerza, desde Faraday hasta Einstein*. Ed. Alianza, 1981.

Chalmers, A. F (1973) *Maxwell's methodology and his application of it to electromagnetism*. Studies in The History and Philosophy of Science 4(2): 107-164.

Chalmers, A. F. (1985) *The heuristic role of Maxwell's mechanical model of electromagnetic phenomena*. Studies in The History and Philosophy of Science 17(4): 415-427, 1986.

Duhem, P (1962) *The Aim and Structure of Physical Theory*. Nueva York.

Doran, B. G. *Origins and consolidation of field theory in nineteenth century Britain. from the mechanical to the electromagnetic view*. Historical Studies in the Physical science 6 (1975), 133 - 260

Everitt, C W *James Clerck Maxwell: physicist and natural philosopher* Nueva York, 1975.

Hannan, P M., (1982), *Energía, fuerza y materia. El desarrollo conceptual de la física del siglo XIX*. Alianza Editorial, 1990.

Hesse, M *Forces and fields. the concept of action at a distance in the history of physics* Londres, 1961.

Hesse, M (1970) *Historical and Philosophical Perspectives*; en Historical and Philosophical Perspectives in Science ed. Roger Stuewer, University of Minnesota Press, 1970.

Nersessian, Nancy, (1984), *Faraday to Einstein. Constructing Meaning in Scientific Theories*, Kluwer Academic Publishers, 1984.