

# EPISTEMOLOGÍA E HISTORIA DE LA CIENCIA

SELECCIÓN DE TRABAJOS DE LAS XIX JORNADAS

VOLUMEN 15 (2009)

Diego Letzen  
Penélope Lodeyro

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



# Notas sobre la concepción de Maxwell acerca de la física experimental

*P.W. Lamberti\*, D. Prato† y V. Rodriguez‡*

## Introducción

El Laboratorio Cavendish fue inaugurado en 1874 y James Clerk Maxwell fue su primer director. En ese momento Maxwell ocupaba el cargo de Profesor de Física Experimental en la cátedra Cavendish de la Universidad de Cambridge. La creación de este laboratorio tuvo la intención de fortalecer la física experimental en el Reino Unido. Se asocia su creación con la “necesidad de entrenamiento práctico de científicos e ingenieros” tras el éxito de la Gran Exhibición Industrial de 1851, que dejó claramente expuestos los requerimientos de una sociedad industrial<sup>1</sup>. Hasta ese momento, la física en Inglaterra significaba física teórica y se la pensaba en el ámbito de las matemáticas.

Hubo mucha especulación sobre la elección del Profesor de Física Experimental. Tanto William Thomson (de Glasgow) como John Rayleigh (de Essex) fueron candidatos con grandes posibilidades, pero ambos rechazaron la oferta. Cuando se anunció la designación de Maxwell, hubo cierto asombro (y malestar) en la comunidad científica londinense. El nuevo profesor Maxwell era, por aquel entonces, relativamente desconocido. Su nombramiento como profesor fue anunciado el 8 de marzo de 1871, y más allá de las críticas iniciales, su clase inaugural fue seguida por una gran cantidad de estudiantes e investigadores de Cambridge. Sus libros más influyentes, *Teoría Cinética* (1871) y el *Tratado de Electricidad y Magnetismo* (1873), no habían sido todavía publicados.

En esta clase, Maxwell dejó claramente expuesta la impronta que él daría unos años después al Laboratorio Cavendish, cuando fuera su Director. Una de sus primeras acciones al asumir como Director del laboratorio, fue la construcción de un conjunto de equipos de física experimental, muchos de los cuales eran producto de sus propios desarrollos y concepciones. Entre ellos se destaca un modelo mecánico que tenía por objetivo representar la interacción de dos circuitos eléctricos. El estudio de este modelo es el propósito primordial del presente trabajo. Para una mejor comprensión de los objetivos perseguidos por Maxwell con este tipo de desarrollos, haremos, por un lado una breve descripción de las ideas que Maxwell tenía sobre la física experimental y por el otro, un análisis del modelo desde la concepción mecanicista que él tenía del electromagnetismo.

## Ideas de Maxwell sobre la Física Experimental

En la clase mencionada, al asumir como profesor de física experimental, Maxwell dice:

Las lapiceras, la tinta y el papel no serán más suficientes para nosotros, y necesitaremos más espacio que el de una silla y un escritorio y un área mayor que la de una pizarra.<sup>2</sup>;

---

\* FaMAF, UNC y CONICET

† FaMAF, UNC

‡ FFyH, UNC

Para agregar luego,

Comenzaremos en el salón de clases el estudio de algunos tópicos de física, acompañados por Experimentos de Ilustración, y concluiremos, en el laboratorio, con un curso de Experimentos de Investigación<sup>3</sup> [Maxwell, 1890].

Según Maxwell,

...los experimentos de **ilustración** podrían emplearse para ilustrar los fenómenos de una rama particular de la Física. Estos podrían ser de diferentes clases. Algunos serían adaptaciones de las más comunes operaciones de la vida cotidiana, otros podrían ser exhibiciones cuidadosamente armadas de algunos fenómenos que ocurren sólo bajo condiciones peculiares. Sin embargo todos tienen en común esto, que su objetivo es presentar algún fenómeno a los sentidos del estudiante de tal modo que él pueda asociarlo con la idea científica apropiada. Cuando él ha aprehendido esta idea, el experimento que la ilustra ha cumplido su propósito.

Por otra parte, más adelante expresa:

...en un experimento de **investigación**, los objetivos son otros. Es verdad que un experimento, en el cual el objetivo principal es ver lo que ocurre bajo ciertas condiciones puede ser visto como un experimento de investigación por aquellos que no están familiarizados con el resultado, pero en las investigaciones experimentales, estrictamente así llamadas, el objeto último es medir algo que ya ha sido observado, obtener una estimación numérica de alguna magnitud. Experimentos de esta clase – aquellos que involucran algún tipo de medición, son el trabajo propio de un Laboratorio de Física.

La terminología usada por Maxwell respecto al concepto de “ilustración” tuvo una fuerte influencia en muchos de sus contemporáneos, según veremos más adelante.

### **La corriente mecanicista y la construcción de modelos**

En un trabajo reciente hemos investigado algunos de los aspectos sobresalientes de la concepción de modelo mecánico (funcional) en L. Boltzmann [Lamberti-Rodriguez, 2008]. En ese estudio se enfatizó la fortaleza de las concepciones mecanicistas de los fenómenos físicos, en particular de los electromagnéticos, que primaban en la segunda mitad del siglo XIX. Como ejemplo del pensamiento dominante de la época, citamos la siguiente frase de W. Thomson:

Jamás me doy por satisfecho hasta que puedo hacer un modelo mecánico de algo. Si puedo hacer un modelo mecánico puedo entenderlo... y es por eso que no puedo entender la teoría electromagnética [Thomson, 1884].

No es ajena a Maxwell esta concepción en su forma de pensar al electromagnetismo. Él se presenta a sí mismo como un “ingeniero del medio magneto-eléctrico”, primero mirando problemas mecánicos, y sólo después notando el significado electromagnético de las soluciones de aquellos problemas. Quizás una de las contribuciones más interesantes que él realiza en esta dirección está relacionada con la interpretación que Thomson había realizado en 1856 del Efecto Faraday en término de los vórtices moleculares (ver por ejemplo [Knudsen, 1976]). De acuerdo con Thomson,

la magnetización podría ser un alineamiento de los vórtices, y su momento angular debería determinar el momento magnético (ver por ejemplo [Hunt, 2005]).

En 1857, tras leer esta novedosa interpretación que Thomson realiza del efecto Faraday, Maxwell expresa:

He encontrado gran dificultad en concebir la existencia de vórtices... Las porciones contiguas deben estar moviéndose en direcciones opuestas [Darrigol, 1999]

En la primera parte de su trabajo de 1861, "On Physical Lines of Force" propone una solución a este problema: un sistema de ruedas libres entre los vórtices, las cuales permitirían tanto un movimiento en sentido contrario de las celdas (vórtices) contiguas, como el hecho de que ellas pudieran moverse con distintas velocidades. Algunos autores ven en esta solución de Maxwell su profundo conocimiento de la cinemática de sistemas mecánicos prácticos [Darrigol, 1999].

Es de resaltar, fundamentalmente por su importancia en relación con el modelo que estudiaremos en la próxima sección, el trabajo que Maxwell publica sobre la estabilidad de los timoneles (governors) en 1868 [Maxwell, 1868]. Este trabajo deja en claro, por una lado, un acabado entendimiento por parte de Maxwell de la matemática y de la física de los sistemas dinámicos y por el otro, su claro conocimiento de la utilización de los sistemas de engranajes diferenciales. También es de destacar que uno de los timoneles analizados por Maxwell en ese trabajo de 1868 es el timonel de W. Siemens, el cual tiene un sistema de engranajes diferenciales idéntico al que usa en el modelo que analizaremos más adelante. Una connotación histórica de importancia es que este trabajo de Maxwell está asociado con la creación del término Cibernética por parte de N. Wiener, para denominar el área que se ocupa del estudio de los mecanismos de control por retroalimentación. En efecto, es el propio Wiener quien en su libro Cibernética justifica este nombre a partir de la palabra griega, y su posterior deformación latina, del término timonel: *kubernetes* [Wiener, 1985].

La inclinación de Maxwell hacia el uso de modelos tenía por objetivo brindar varias opciones para un mejor entendimiento del fenómeno físico que se intenta explicar. En una conferencia expuesta en 1870 ante la Asociación Británica para el Avance de la Ciencia, dice

Por el bien de las personas de diferentes tipos, la verdad científica debería ser presentada de diferentes formas. y debería verse como igualmente científica ya sea que aparezca en la forma robusta y llena de vívidos colores de una ilustración física o en la palidez y tenuidad de una expresión simbólica [Hunt, 2005]

Esta necesidad de realizar modelos (tanto pensados como funcionales) influyó en toda una generación de físicos, tanto de Inglaterra como de Europa continental. Así es como la mayoría de los "Maxwellianos" - F. FitzGerald, O. Lodge, S. Poynting, H. Ebert, L. Boltzmann - propusieron modelos mecánicos de ambos tipos, para representar diversos fenómenos electromagnéticos. A modo de ejemplos podemos mencionar el trabajo de O. Lodge de 1875 en el que estudia la ilustración<sup>4</sup>, por medio de un modelo mecánico, de los fenómenos termo-eléctricos [Lodge, 1875]; o la construcción en 1884 por parte de FitzGerald de un modelo funcional, constituido por bandas y ruedas, para ilustrar el funcionamiento del éter electromagnético. En 1888, S. Poynting propuso un modelo mecánico con el propósito de ilustrar la carga residual de un dieléctrico [Poynting, 1888]<sup>5</sup>. En todos los casos la palabra ilustrar aparece en la propia terminología de cada

uno de estos autores, quizás como un resabio de las ideas presentadas por Maxwell en su clase inaugural.

Concluimos esta sección enfatizando el hecho de que Maxwell en el art. 334 de su *Treatise* presenta una "Ilustración mecánica de las propiedades de un dieléctrico". En este caso no es más que una ilustración imaginaria, es decir, no se trata de una construcción mecánica funcional concreta [Maxwell, 1954]. De hecho, en todo su *Treatise*, él no incluye ningún modelo mecánico funcional. Sin embargo, en la tercera edición de esta obra, W.W. Thomson incluye - como nota- el modelo mecánico diseñado por Maxwell para representar dos circuitos eléctricos interactuantes. Del mismo nos ocuparemos en la próxima sección.

### **Análisis de Maxwell de dos circuitos en interacción.**

Maxwell dedica el capítulo VII de la tercera parte del *Treatise* al estudio de la teoría de los circuitos eléctricos. Él lo hace utilizando el formalismo de Lagrange. Para Maxwell, un sistema de dos corrientes eléctricas está representado por un sistema acoplado cuyo movimiento está completamente definido por dos velocidades generalizadas,  $i_1$  e  $i_2$ . Entonces la dinámica del sistema está determinada por la forma de la energía cinética electromagnética.

$$T = \frac{1}{2} L_1 i_1^2 + \frac{1}{2} L_2 i_2^2 + M i_1 i_2$$

en donde  $L_1$ ,  $L_2$  y  $M$  son las autoinductancias y la inductancia mutua, respectivamente. Las ecuaciones de Lagrange para las velocidades generalizadas  $i_1$  e  $i_2$ , son:

$$e_1' - R_1 i_1 = \frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial i_1}, \quad e_2' - R_2 i_2 = \frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial i_2},$$

en donde  $e_1'$  y  $e_2'$  son las fuerzas electromotrices impartidas sobre cada circuito y  $R_1$  y  $R_2$  sus respectivas resistencias. Aclaramos que la notación utilizada aquí difiere ligeramente de la utilizada por Maxwell. Él considera también la posibilidad de que la energía cinética dependa (a través de los coeficientes  $L$  y  $M$ ) de una coordenada que describa la posición relativa de los circuitos.

Con el propósito de ilustrar estas ecuaciones de Lagrange, Maxwell hizo construir en Cavendish un modelo mecánico funcional para representar mecánicamente los circuitos en interacción. La figura 1 reproduce el esquema que Thomson incluye en el *Treatise*, y en la Fig. 2 mostramos la réplica que uno de los autores de este trabajo (PWL) ha realizado del mismo<sup>6</sup>. Este dispositivo consta de dos discos montados sobre ejes independientes (uno atraviesa al otro), pero que resultan acoplados gracias al sistema de tres engranajes diferenciales mostrados en las figuras 1 y 2. A su vez el engranaje central es atravesado por uno de los brazos de una cruz, la cual tiene en cada uno de sus brazos una pesa móvil que puede ubicarse en distintas posiciones. Los discos son rodeados por banditas de goma que pueden ser ajustadas a conveniencia. El disco sobre el que está adherida la manija juega el rol del circuito primario, mientras que el otro disco hace de circuito secundario. Las banditas de goma que rodean los discos (no mostradas en la fotografía de la figura 2, pero si dibujadas en el disco de la derecha de la Fig. 1), son los análogos a las resistencias de los circuitos, y las masas ubicadas en los brazos de la cruz central juegan el

papel de las inductancias  $L$  y  $M$ . Es muy interesante observar aquí que en la concepción mecánica de Maxwell, el engranaje central juega el papel del éter electromagnético.



Fig.1 Esquema del modelo de Maxwell tomado del "Treatise".

Como se menciona en la nota de pie de esta página, en la reproducción de este modelo se contó con muy poca información, tanto en lo que respecta a los aspectos constructivos, como al uso que Maxwell realizó del mismo. De todos modos, una vez armado, pudimos estudiar su comportamiento ante distintas situaciones. Por ejemplo, nos fué posible observar:

El movimiento en sentido contrario del disco que representa al circuito secundario cuando se modifica la velocidad de rotación del disco correspondiente al circuito primario. Esto está asociado, desde el punto de vista electromagnético, a una corriente inducida en el secundario y de sentido opuesto a la corriente variable que circula por el primario.

El rol que tienen las masas y sus posiciones sobre los brazos de la cruz central. En efecto, esta cruz o volante tiene la función de portar un momento rotacional grande, con el propósito de conservar el movimiento rotacional estacionario. Es muy notable la sensibilidad respecto de la ubicación de las masas en lo que respecta al acoplamiento entre el circuito primario y el circuito secundario.

La representación cinemática del efecto de la "chispa de corte" (es decir la interrupción abrupta de la circulación de la corriente), cuando el disco que representa al circuito primario es frenado súbitamente .

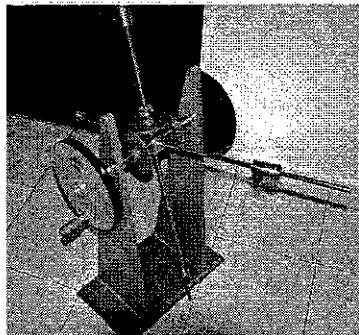


Fig. 2. Réplica del modelo de Maxwell presentado durante las Jornadas de Epistemología e Historia de las Ciencias (2008).

En cierta forma, Maxwell arribó a conclusiones similares tras el uso de este modelo. Al respecto, en una carta dirigida a L. Campbell en la Navidad de 1876, el físico escocés le expresa,

He realizado un modelo mecánico de una bobina de inducción, en el cual las corrientes primaria y secundaria son representadas por el movimiento de las ruedas, y con el cual puedo representar todos los efectos de poner más o menos núcleo de hierro o más o menos resistencia y botellas de Leyden en uno u otro circuito [Campbell, 1969]

### Conclusiones

La tradición de construir modelos mecánicos, tanto concretos como pensados permaneció en la física hasta los primeros años del siglo XX. El paulatino abandono de este recurso de representación de los conceptos físicos tuvo, seguramente, como una de sus principales razones, el ocaso del mecanicismo como postura epistemológica y ontológica dentro de la física. Pero también debe haber contribuido a este ocaso la actitud que las nuevas generaciones tenían frente a la utilidad de estos modelos como objetos de ilustración de los fenómenos físicos. En este sentido es interesante rescatar un comentario que Sommerfeld realiza en su libro de Mecánica, sobre un modelo mecánico realizado por su profesor Boltzmann, para representar la interacción de dos circuitos [Sommerfeld, 1952]:

Boltzmann dedicó sus primeras clases a describir un sistema mecánico doblemente cíclico para ilustrar el efecto inductivo mutuo entre dos circuitos eléctricos"... "Para nosotros parecía mucho más complicado que la teoría de Maxwell que intentaba ilustrar

No obstante entendemos que la realización de este tipo de modelos mecánicos funcionales ha jugado un rol de gran importancia en el posterior desarrollo del concepto de modelo en ciencias [Rosenblueth, 1945].

Este trabajo ha tenido un doble propósito. Por un lado rescatar el aporte epistemológico de Maxwell con su enunciación de los dos tipos de experimentos: los de ilustración y los de investigación. Hemos intentado mostrar la fuerte influencia que el concepto de ilustración tuvo sobre sus contemporáneos. Por otro lado, al reproducir en nuestro medio el modelo mecánico concreto construido por Maxwell, pudimos poner de manifiesto de una manera vivencial los distintos aspectos fenomenológicos que iban emergiendo con la utilización de este tipo de dispositivos. También nos ha permitido explorar, a través de un caso particular, la riqueza metodológica para la investigación en historia de la ciencia teórico-experimental que tiene la reproducción de sus artefactos y sus funciones. Estimamos que, al menos en casos como el presentado en este trabajo, el campo de análisis se enriquece de un modo superlativo, comparado con la alternativa de continuar con la representación e interpretación de lo que aparece sólo expresado en los textos y documentos escritos. Sin desmerecer otros enfoques usuales de investigación en historia de la ciencia, reivindicamos de este modo el valor de la aproximación experimental a la historia de la ciencia experimental.

---

### Notas

<sup>1</sup> Según puede leerse en la página web del laboratorio Cavendish.

<sup>2</sup> Las traducciones del inglés de los párrafos citados son nuestras.

<sup>3</sup> El remarcado de los conceptos de "Ilustración" e "Investigación" es nuestro.

---

<sup>4</sup> El subrayado es nuestro.

<sup>5</sup> Sin lugar a dudas de todos estos autores el más prolífico en la creación de modelos mecánicos fue O. Lodge. Se destacan su modelo de cuerdas y botones de un circuito eléctrico, su modelo de rueda dentada del éter y su modelo hidrodinámico de las botellas de Leyden [Hunt, 2005].

<sup>6</sup> Como fuente de información de los detalles constructivos de esta réplica sólo tuvimos acceso a la descripción que W. Thomson realiza en su nota del *Treatise* y a la descripción que L. Campbell y W. Garret realizan en su biografía de Maxwell [Campbell, 1969]. De hecho este dispositivo se menciona en varios textos y artículos; sin embargo su descripción siempre es sumamente escueta (ver por ejemplo [Simpson, 1997], [Mayr, 1971] y [Harman, 1990]). Es digno de destacar lo difícil que resulta acceder a la eventual información pertinente que existe sobre estos artefactos y sus funciones. Valga como ejemplo, los infructuosos intentos de acceder a ella a través de los responsables del Museo Cavendish, que intentamos por vía del correo electrónico. Estas dificultades obligaron a realizar diversas pruebas hasta lograr una versión que funcionara correctamente del modelo propuesto por Maxwell.

## **Bibliografía**

- Campbell, L y Garrett, W (1969) *The Life of J C. Maxwell*, Johnson Reprint Corporation.
- Darrigol, O. (1999), *Electrodynamics from Ampere to Einstein*, Oxford University Press.
- Harman, P.M. (1990), *Energía, fuerza y material*, Alianza Universidad, Madrid
- Hunt, B.J. (2005) *The Maxwellians*, Cornell University Press.
- Knudsen, O. (1985), *Wranglers and Physicists*, Manchesters, pag. 149-179.
- Lamberti P.W. y Rodríguez V, (2008). *Epistemología e Historia de las Ciencias Vol. 14*.
- Lodge O. (1875) *Proc. Phys. Soc. London 2*, pag. 118-140.
- Maxwell J.C. (1868), *Proceedings of the Royal Society*, #100, pag. 1.
- Maxwell J.C., (1890). *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell*, Vol. 1, Cambridge University Press.
- Maxwell, J.C. (1954), *A Treatise on Electricity and Magnetism*, Vol. 1 y 2, Dover, New York.
- Mayr, O. (1971) *Isis*, Vol. 62, #4, pag. 425-444.
- Poynting S. (1888). *Birmingham Phil. Proc. Soc.* 6, pag. 314-317.
- Rosenblueth, A. y Wiener, N. *Philosophy of science*, Vol. 12, #4, pag. 316-321.
- Simpson, T.K. (1997), *Maxwell on the Electromagnetic Field. A Guided Study*, Rutgers University Press.
- Sommerfeld, A. (1952), *Mechanics*, Academic Press, New York.
- Thomson, W. (1884). *Notes of Lectures on Molecular Dynamics and the Wave Theory of Light*. Johns Hopkins University, Baltimore.
- Wiener, N (1985). *Cibernética*, Tusquets Editores, Barcelona.