

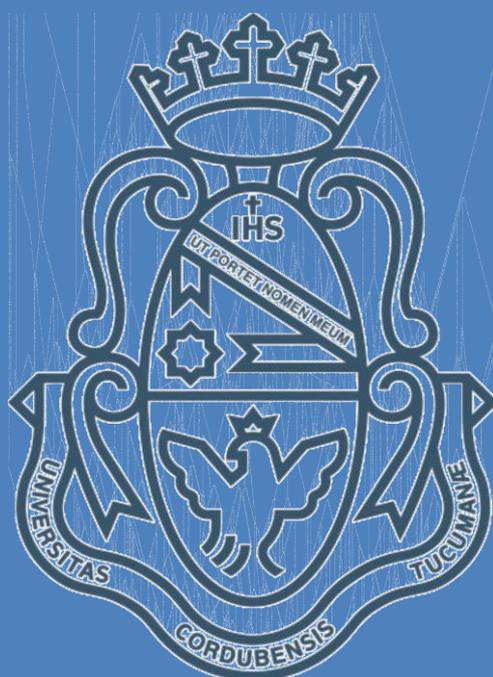
EPISTEMOLOGÍA E HISTORIA DE LA CIENCIA

SELECCIÓN DE TRABAJOS DE LAS XX JORNADAS

VOLUMEN 16 (2010)

Pío García
Alba Massolo

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



Modelos mecánicos del electromagnetismo: el “Bicykel” de L. Boltzmann

Pedro W. Lambert^{*}

Introducción

En el año 1894 se publica, de manera postuma, el libro *Los Principios de la Mecánica Presentados en una Nueva Forma*, de H. Hertz. En su prólogo se expresa: “Todos los físicos concuerdan en que el problema de la física consiste en llevar los fenómenos de la naturaleza a simples leyes de la mecánica”. Sintetiza así el pensamiento dominante en la física de fines del siglo XIX¹. Este reduccionismo mecanicista condujo, entre otras cosas, a la construcción de modelos mecánicos, tanto formales como funcionales, para representar diversos fenómenos físicos. El libro de Hertz es un claro ejemplo de los primeros. De los segundos, hubo una proliferación notable de aparatos destinados a la ilustración de diversos fenómenos físicos, principalmente aquellos asociados con el electromagnetismo.

Surge naturalmente una pregunta en este contexto de pensamiento. **¿Por qué buscar una reducción de los fenómenos físicos a la mecánica?** Como sugiere J. Lützen, una respuesta a esta pregunta acepta dos enfoques [Lützen, 2005]. El primero permite responderla en un **sentido débil**: la mecánica era un modelo perfecto para otras disciplinas. El segundo enfoque, en cambio, lo hace en un **sentido fuerte**: el objetivo último de la física era dar una explicación mecánica de todos los fenómenos naturales.

En particular Hertz basa su propuesta mecanicista, en la siguiente impronta epistemológica:

“Las ideas fundamentales de la mecánica, junto con los principios que las conectan, representan la imagen más simple que la física puede producir de las cosas en el mundo sensible y de los procesos que ocurren en él.” [Hertz, 1950]”

El plasma esta idea en la propuesta de explicar los fenómenos físicos no mecánicos, a través del movimiento de sistemas mecánicos no observables.

La visión mecanicista de la física no sólo se manifestaba por entonces, en el mundo germano. En el Reino Unido muchos de los pensadores más importantes tenían también una adhesión radical a ella. Por ejemplo, W. Thomson [Thomson, 1884], manifestó:

^{*} FaMAF – UNC – CONICET

“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...”

O. Lodge avanza en el diseño de modelos mecánicos de un modo casi extremo, proponiendo uno para casi todos los fenómenos electromagnéticos. Se destacan su modelo de cuerdas y botones de un circuito eléctrico, su modelo de rueda dentada del éter, su modelo hidrodinámico de las botellas de Leyden y aquel en el que estudia la ilustración, por medio de un modelo mecánico, de los fenómenos termo-eléctricos [Lodge, 1885]. A su vez, G. F. FitzGerald en el año 1884 propone un modelo funcional, constituido por bandas y ruedas, para ilustrar el funcionamiento del éter electromagnético. S. Poynting propuso un modelo mecánico con el propósito de ilustrar la carga residual de un dieléctrico [Poynting, 1888].

Un caso ya estudiado por nosotros, y estrechamente relacionado con el presente trabajo, es el modelo mecánico funcional desarrollado por J.C. Maxwell para representar dos circuitos eléctricos en interacción [Lamberti et al, 2009]

En este trabajo se estudia un modelo mecánico funcional construido por L. Boltzmann, conocido como el “Bicykel”, para ilustrar los principales aspectos electrodinámicos de dos circuitos eléctricos en interacción. Este estudio se realiza sobre una réplica construida por el autor y se analizan aspectos históricos, formales y de construcción del mismo.

Boltzmann y el Bicykel:

En 1890 L. Boltzmann se incorpora a la Universidad de Múnich. Allí se le asignaron tres tareas:

- La dirección de la “colección de física-matemática”;
- Ser miembro del directorio del seminario de física matemática y
- Desarrollar un programa completo de física teórica.

Como encargado de la “colección”, agrega algunos aparatos, entre los cuales estaba el “Bicykel”, un modelo para ilustrar la inducción mutua entre dos circuitos eléctricos. En 1892, la Sociedad Matemática Alemana publicó un catálogo de la colección. Con motivo de esa publicación, Boltzmann escribe un opúsculo titulado “Sobre los métodos de la Física Teórica” [Boltzmann, 2005]. En él expresa:

“En matemáticas y geometría fue sin duda alguna el primer lugar en donde la evolución, desde los métodos puramente analíticos a los constructivos, y la ilustración o ejemplificación por medio de modelos, estuvo motivada por la economía de esfuerzos”.

Para luego agregar (en relación con la economía de esfuerzos):

“Basta de esto, existe la necesidad de aprovechar lo más posible los medios que posee nuestra capacidad de percepción. De ello se sigue la necesidad de hacer intuitivos los resultados de los cálculos, no solamente en nuestra imaginación, sino también de un modo más visible para nuestros ojos y palpable para nuestras manos. . .”

En estos dichos, Boltzmann pone de manifiesto la importancia que para él tenía la utilización de modelos concretos en la interpretación de las distintas teorías físicas. De acuerdo a su concepción, estos mecanismos debían interpretarse como “imágenes” o “analogías”, no como la realidad. Poco antes, Maxwell había tomado una postura similar, fundamentalmente en lo relacionado con las analogías. Boltzmann conocedor del pensamiento del físico escocés, dice [Boltzmann, 1905]:

“Maxwell logró, a través de su modelo, ecuaciones cuyo poder singular y casi maravilloso describió tan entusiastamente el más capacitado de los científicos, llamado H. Hertz. . . Quiero sólo añadir a las palabras de Hertz que las ecuaciones de Maxwell son mera consecuencia de sus modelos mecánicos y que su elogio entusiasta corresponde, en un primer lugar, no al análisis de Maxwell, sino a su sagacidad para descubrir analogías mecánicas.”

Es conveniente resaltar la particular atracción que Maxwell sentía por las analogías en física, por la reaparición del mismo plan a través de toda la naturaleza. Él fundamentaba estas afirmaciones en el hecho de que las mismas leyes, o ecuaciones diferenciales, se aplican tanto a la conducción del calor, a la dinámica de los vórtices como a los procesos electromagnéticos en el éter.

En Munich, Boltzmann enseñó la teoría electromagnética de Maxwell. A pedido de sus alumnos publicó esas clases en dos volúmenes, sus *Vorlesungen über Maxwell's Theorie der Electricität und des Lichtes*, uno en el año 1891 y el otro en 1893. Al igual que Hertz, Boltzmann no tiene ninguna objeción en contra el contenido de la teoría de Maxwell; sino solo con su forma de presentación, la cual, según él, permanecía oscura. Boltzmann se presenta a sí mismo como un intérprete de Maxwell.

En sus “Vorlesungen”, al tratar el problema de dos circuitos eléctricos en interacción, Boltzmann adopta al igual que Maxwell, el formalismo Lagrangeano. En este formalismo 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:

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

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:

$$e_1 - R_1 i_1 = \frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial i_1}, \quad e_2 - R_2 i_2 = \frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial i_2},$$

cón e_1 y e_2 las fuerzas electromotrices impartidas sobre cada circuito y R_1 y R_2 sus respectivas resistencias. Es interesante destacar que el Lagrangeano dado por la expresión (1), es el mismo (formalmente) al asociado con varios sistemas mecánicos. Por ejemplo al sistema de engranajes diferenciales de un automovil, en donde las velocidades generalizadas corresponden a las velocidades angulares de los dos ejes que se acoplan a través del sistema de engranajes [Sommerfeld, 1952]. También al sistema de masas acopladas mostrado en la figura 1. Lo mismo sucede con el modelo de circuitos interactuantes desarrollado por Maxwell y otros desarrollados por Lord Rayleigh [Rayleigh, 1890] y H. Ebert [Ebert, 1893].

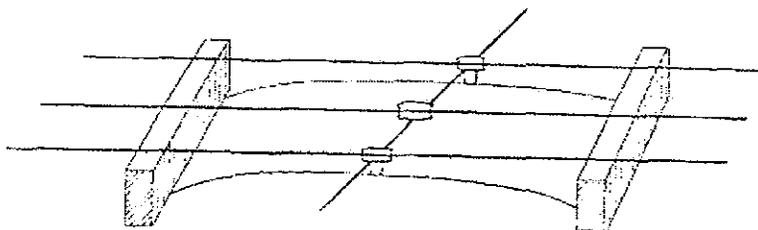


FIG. 38.

Fig. 1 Sistema de masas acopladas. El Lagrangeano asociado con este sistema es idéntico al dado por la expresión (1)

La crítica de Boltzmann al sistema de masas representado en la figura 1, era que no podían modificarse los parámetros (los valores de las masas), que en el contexto de un circuito eléctrico, representan a las inductancias [Curry, 1897]. Para resolver esto el diseñó su "Bicykel", el cual es descrito con todo detalle en el capítulo sexto de la primera parte, de sus "Vorlesungen"2. Su Bicykel es esencialmente un sistema de engranajes diferenciales, pero dispuestos de tal forma que se puede variar la posición relativa de las masas conectadas a los engranajes. Así los momentos de inercia asociados con estas masas, pueden modificarse, lo cual corresponde a la modificación de las inductancias de los circuitos en interacción que se propone representar. En la figura 2 se muestra una fotografía de la réplica realizada por el autor. Los datos de construcción se tomaron del libro de Charles E. Curry [Curry, 1897]. Curry fue alumno de uno de los cursos que Boltzmann dictara en Munich. En la figura 2b, se puede ver un diagrama de los detalles del acoplamiento de los dos engranajes y un dibujo del Bicykel tomado del libro de Curry.

Es interesante mencionar que Boltzmann llega al “Bicykel” como una extensión de los monociclos, que habían sido estudiados por von Helmholtz, unos años antes, en su búsqueda de los fundamentos mecánicos de la termodinámica. En efecto, Helmholtz al buscar una relación entre la temperatura y la energía cinética, usa la energía cinética de un sistema de monociclos. Un ejemplo de un movimiento monocíclico (para Helmholtz) lo da el movimiento de un trompo o el movimiento de un líquido encerrado dentro de un tubo (ver G. Bierhalter en [Cahan, 1993]). La idea de Boltzmann, en el diseño de su Bicykel, fue acoplar dos de tales monociclos como se muestra en la figura 3.

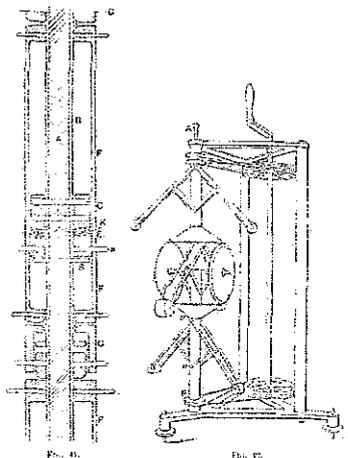
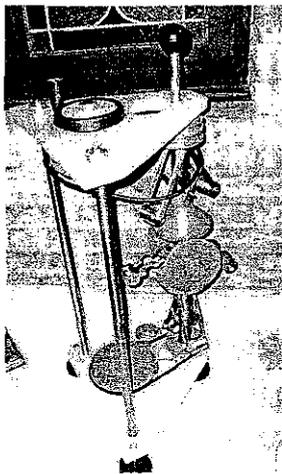


Fig. 2. Izquierda: Fotografía de la replica del Bicykel realizada por el autor; derecha: Diagramas con los detalles y dibujo del Bicykel tomado del libro de Curry.

Comentarios finales

Boltzmann propone varios experimentos que se pueden realizar con su Bicykel. Con ellos logra reproducir prácticamente todos los fenómenos asociados con dos circuitos eléctricos en interacción. A través de los movimientos de los reguladores centrífugos (ver figura 2), se puede representar las corrientes principal e inducida, como así también la modificación de ellas por cambios en las autoinductancias y de la inductancia mutua, representadas mecánicamente, por variaciones en los momentos de inercia de las masas de los reguladores centrífugos.

En la época de Boltzmann se realizaron dos especímenes del Bicykel: uno en Munich y el otro en Graz. Ambos fueron destruidos durante la II guerra mundial. En el inventario del departamento de física de la Universidad de Graz (año 1914) se puede leer [Cercignani, 1998]:

“ . 0 776. aparato inexplicable con engranajes dentados dejado por Boltzmann . ”

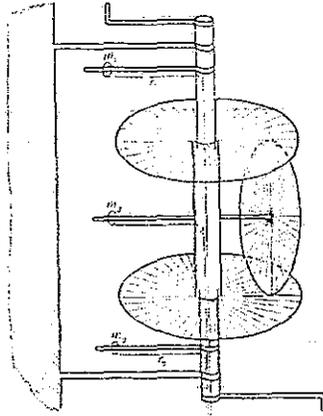


Fig. 3 Bicykel ideal, tomado del libro de Boltzmann [Boltzmann, 1891]

Una réplica del Bicykel de Boltzmann fue construido en 1985 por un maestro mecánico de Graz en ocasión de una exhibición dedicada a Boltzmann. Este modelo está actualmente expuesto en el museo de Física de la Universidad de esa ciudad austríaca.

P. Ehrenfest, alumno de doctorado de Boltzmann, al escribir un obituario dedicado a su profesor (1906), dice [Klein, 1959]:

“La claridad de los movimientos y fuerzas debe haber sido de gran placer estético para él”.

Otro viejo alumno de Boltzmann en Munich, Sommerfeld, recuerda en 1944 (ver pag. 24 en [Cercignani, 1998]) :

“Este modelo, el cual aún funcionaba correctamente, fue hecho a pedido de Boltzmann, estaba conservado en el Departamento de Física en Munich con toda la debida reverencia. Sin embargo, se usaba menos para Electrodinámica que para mecánica, es decir para hacer entendible como el engranaje diferencial de un automóvil funciona, el cual es completamente análogo al Bicykel de Boltzmann”. 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

Deseamos concluir este trabajo, mencionando la importancia que el conocimiento de los aspectos mecánicos de los sistemas cíclicos, por parte de Boltzmann, tuvo para el desarrollo de

sus ideas sobre termodinámica estadística. A modo de reseña podemos decir que en el año 1866, él hace un intento puramente mecánico para explicar la segunda ley de la termodinámica, en el año 1877 cansado de las críticas abandona lo puramente mecánico e incorpora lo estadístico; en el año 1884 vuelve a lo puramente mecánico; y lo hace con los monociclos. Finalmente, en su libro sobre Teoría de Gases, insiste sobre lo mecánico y el rol de las analogías. Creemos que en esto hay aspectos que merecen ser investigados en mayor detalles, fundamentalmente realizando un análisis sobre el rol que los modelos mecánicos de finales del siglo XIX, tuvieron en el desarrollo de la mecánica estadística, un área de la física que tuvo su mayor desarrollo cuando el mecanicismo decimonónico ya había menguando.

Notas

1 Es interesante notar que en el manuscrito del libro de Hertz esta afirmación fue cambiando hasta lograr su forma definitiva. En efecto, acompañan a esta afirmación las siguientes (que fueron posteriormente tachadas). “La mayoría de los físicos” (Die Meisten Physiker), “Probablemente todos los físicos” (Wohl alle Physiker), “Los físicos” (Die Physiker). Al lado de “conducen” incluyó inicialmente la palabra “completamente” (vollständig), ver pag. 38 [Lützen, 2005]. Seguramente con esto Hertz no pudo abstraerse del pensamiento de algunos pensadores sumamente influyentes, como E. Mach, quien en 1883 expresa de manera contundente. *“Pensamos que es un prejuicio suponer que la mecánica debe ser considerada el fundamento de todas las otras ramas de la física, y que todos los procesos físicos deben ser explicados mecánicamente”* [Mach 1901, pag. 467].

2 Por el tipo de diagramas allí incluidos, el libro de Boltzmann fue descrito por algunos de sus contemporáneos, más como un libro de ingeniería que como un libro de física.

Referencias

- Boltzmann, L. (1891) Vorlesungen über Maxwell's Theorie der Electricität und des Lichtes. Leipzig.
- Boltzmann, L. (2005) Escritos de Mecánica y Termodinámica, Alianza.
- Boltzmann, L. (1905) Populäre Schriften, Verlag von Johann Ambrosius Barth, Leipzig.
- Cahan, D. H. (1993) von Helmholtz and the Foundation of Nineteenth-Century Science, University of California Press.
- Cercignani, C. (1998) L. Boltzmann The man who trusted atoms, Oxford University Press.
- Curry, Ch. E., (1897) Theory of Electricity and Magnetism, Macmillan and Co.
- Ebert, H. (1893) Annalen der Physik, Volume 285, Issue 8, Pages 642 - 650.
- Hertz, H. (1950) The Principles of Mechanics Presented in a New Form, Dover.
- Klein, M. (1959) Paul Ehrenfest Collected Scientific Papers, North Holland, Amsterdam.
- Lamberti, P.W., Prato, D. y Rodríguez, V. (2009), Epistemología e Historia de la Ciencia, Vol. 14, pag. 288-294, ISBN 978-950-33-0756-4.
- Lodge O. (1875) Proc. Phys. Soc. London 2, pag. 118-140.
- Lützen, J. (2005) Mechanistic Images in Geometric Form, Oxford University Press.
- Mach, E. (1901) Die Mechanik in Ihrer Entwicklung. Historisch-kritisch dargestellt. Brokhaus, Leipzig. Cuarta edición.
- Poynting S. (1888) Birmingham Phil. Proc. Soc. 6, pag. 314-317.

Thomson, W. (1884) Notes of Lectures on Molecular Dynamics and the Wave Theory of Light. Johns Hopkins University, Baltimore.

Rayleigh, S. (1890) Philosophical Magazine, XXX, pag. 30-32.

Sommerfeld, A. (1952), Mechanics, Academic Press, New York.