

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 concepto de modelo físico en Boltzmann

*Pedro W. Lamberti y Víctor Rodríguez**

"Al haberse dado cuenta del carácter hipotético de todo nuestro conocimiento, Boltzmann estuvo bastante adelantado a su tiempo y quizás aún al nuestro propio".

Paul Feyerabend

I. Introducción

Es bien conocida la tradición mecanicista en la historia de la ciencia y filosofía moderna por parte de los historiadores y filósofos. Sin embargo, a pesar de esta larga y erudita línea de investigación, es posible detectar todavía algunas zonas relativamente oscuras en materia de interpretación sobre ciertas ideas elaboradas por parte de destacados científicos. En nuestra opinión, esto se observa en torno de los protagonistas de referencia en la física del siglo XIX, como es el caso de Maxwell, Hertz y Boltzmann, por citar algunos. En trabajos previos hemos explorado algunas de estas facetas, consideradas de interés tanto desde un punto de vista histórico como epistemológico [Lamberti P.W., Rodríguez V. (2001)]. En esta ocasión, intentamos abordar aspectos del concepto de modelo en el pensamiento y la obra de Ludwig Boltzmann, como uno de los últimos grandes representantes del pensamiento mecanicista clásico. En nuestra motivación existe también el interés por comprender algunas de las facetas sutiles de la metamorfosis del mecanicismo tardío, habida cuenta de la importancia de la teoría electromagnética en la descripción del mundo físico en el siglo XIX. Esta teoría constituyó durante la segunda mitad de ese siglo el gran desafío a los modelos mecánicos. Es importante rescatar además el doble valor epistémico de las aproximaciones, vía modelos, a los fenómenos electromagnéticos: su valor heurístico y su valor conceptual. En particular exploraremos brevemente la incidencia de los modelos concretos elaborados por Boltzmann desde estas dos perspectivas. Comenzamos con un marco general para ubicar el tema. Luego describimos las variantes en torno de la noción de modelo en este autor. Concluimos con unas breves reflexiones motivadas por esta exploración.

II. Un contexto general para el mecanicismo del siglo XIX

Gran parte de la física del siglo XIX estuvo dominada por la suposición de que las partículas materiales en movimiento eran el elemento subyacente de toda la realidad física. Esta visión dinámica del mundo condujo a profundos debates sobre el rol que jugaban los modelos mecánicos, hipotéticos o no, para representar esa realidad. A pesar de estos debates, el mecanicismo siguió siendo la tendencia dominante en la interpretación de los fenómenos físicos. Las explicaciones mecánicas eran buscadas a través de las más variadas estrategias de indagación. Sumamente representativa al respecto, es el pensamiento de William 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...! [Thompson W. (2007)]

* Universidad Nacional de Córdoba

En términos generales, puede afirmarse que la explicación mecánica fue utilizada de dos maneras bien definidas. La primera consistía en recurrir a teorías sobre la configuración y el movimiento de partículas materiales, –como en el caso de la teoría cinética de los gases–, intentando explicar los fenómenos naturales a través de agregados de partículas y de las fuerzas actuantes entre ellas. En la segunda, la explicación involucraba la propuesta de modelos mecánicos concretos, realizados o por realizar, que involucraban objetos materiales como ruedas, resortes y otros dispositivos. Esos modelos mecánicos no eran imaginados necesariamente como representaciones de la realidad, sino que a veces servían para demostrar que los fenómenos podían, en principio, ser representados por mecanismos que hacían a los fenómenos inteligibles.

Dentro de esta tradición mecanicista, varios investigadores recurrieron a esta segunda forma de entender y llevar a cabo un modelo. Entre los más destacables se encuentran Maxwell y Boltzmann, ya que ambos desarrollaron sofisticados mecanismos para representar diversos fenómenos, haciendo gala en muchas ocasiones de un detallado conocimiento de técnicas mecánicas. Ver al respecto, por ejemplo [Darrigol (2000)]. Es importante mencionar que el grupo de científicos que aportó a esta tradición es bastante extenso. En particular, G. F. FitzGerald, O. Lodge, O. Heaviside y H. Hertz, –conocidos como los maxwellianos–, no estaban conformes con confinar su atención a los aspectos puramente electromagnéticos de la teoría de Maxwell. Siguiendo una tradición iniciada por notables físicos británicos que incluía a W. Thomson, G.G. Stokes y hasta el mismo Maxwell, ellos miraban a todos los fenómenos físicos como esencialmente mecánicos, buscando explicar las ecuaciones electromagnéticas en términos de la estructura y movimiento de un éter subyacente. Este “programa mecánico” logró su cenit en Inglaterra en las décadas de 1880 y 1890.

Consideramos ilustrativo reflejar aquí alguna de las expresiones consideradas clásicas de Maxwell:

Creo tener una buena evidencia para la opinión de que algún fenómeno de rotación ocurre en el campo magnético; que esta rotación es realizada por un gran número de porciones pequeñas de materia, cada una rotando sobre sus propios ejes, siendo estos ejes paralelos a la dirección de la fuerza magnética, y que las rotaciones de esos vórtices dependen una de otras por medio de algún mecanismo que las conecta. El intento que he realizado para imaginar un modelo funcional de este mecanismo no debe tomarse más allá de lo que realmente es, una demostración de que podría imaginarse un mecanismo capaz de producir una conexión mecánicamente equivalente a la verdadera conexión de las partes del campo electromagnético [Maxwell (1865)].

Atendiendo a este ambiente intelectual, se hace más comprensible el enfoque de Boltzmann, así como sus aportes tardíos originales a esta larga tradición mecanicista.

III. Los tipos de modelos en Boltzmann

Aún cuando Boltzmann puede caracterizarse como un “maxwelliano alemán”, asumió una posición crítica respecto de los conceptos de carga y corriente propuestos por Maxwell. En su opinión, la teoría electromagnética no podía ser formulada sin referencia a la mecánica. Es importante destacar que el compromiso de Boltzmann con una descripción mecánica del mundo se remonta a sus primeros trabajos de investigación. Su segundo trabajo científico conocido lleva por título “*Sobre el significado mecánico de la segunda ley de la teoría del calor*”. Más adelante,

enfrascado en sus disputas con los energeticistas y fenomenologistas, utilizó tanto en el campo de la electrodinámica como en el de la termodinámica, modelos mecánicos concretos para justificar su descripción e interpretación de los fenómenos.

Para Boltzmann el significado de la palabra modelo es múltiple, abarcando desde los modelos mentales hasta los modelos "palpables". Dentro de estos últimos, Boltzmann utilizó en sus investigaciones sobre las leyes físicas fundamentales tanto los modelos a escala, -tipo maquetas-, como modelos construidos sobre bases físicas mecánicas, para representar algún sistema físico particular. Los modelos tipo maqueta requieren de un estudio del comportamiento de las leyes físicas ante cambios de escala [Reynolds (1883)]; los otros, que anteriormente hemos identificado como modelos mecánicos concretos, eran construcciones funcionales que pretendían brindar una representación mecánica de otros sistemas físicos, tanto electromagnéticos como termodinámicos.

a. Bild

Desde una perspectiva epistemológica, el punto importante, que también forma parte del pensamiento de Boltzmann, es si las teorías científicas son representaciones de la realidad. A las respuestas dadas a esta cuestión se suele sumar el interrogante sobre cómo se da esto. En la literatura filosófica hay un nutrido menú de opciones frente a este ámbito temático, ya que ha sido una preocupación recurrente en la filosofía del siglo XX, y muchos acusan la influencia explícita de autores del siglo anterior, como Boltzmann o Hertz. Un recorrido por los escritos de Boltzmann que han sido editados en inglés por Brian McGuinness [Boltzmann (1974)], conocidos usualmente como los *Populäre Schriften* [(Boltzmann, (1905 y 1979)], muestra un conjunto de reflexiones un tanto dispersas en diferentes artículos sobre su particular concepción del *bild*, también conocida como su teoría del *bild*. Un diccionario de alemán nos da un conjunto de expresiones asociadas con esta palabra, -imagen, pintura-, pero parece oportuno usar contextos del propio autor, a los fines de aproximarnos mejor a su concepto. En su escrito "*Sobre el significado de las teorías*", que se encuentra en la edición citada, dice claramente que la tarea de una teoría consiste en construir una pintura del mundo externo que existe de modo puro internamente y debe ser nuestra estrella-guía en todo pensamiento y experimento. A esto habría que agregarle un complemento de su pensamiento que ha sido destacado por numerosos autores posteriores, como es el caso, por ejemplo, de E. Schrödinger:

La idea de Boltzmann consistió en formar imágenes absolutamente claras, casi inocentes y detalladas, de modo de estar totalmente seguro de evitar, principalmente, suposiciones contradictorias. [Schrödinger (1995)].

En palabras de Boltzmann [Boltzmann (1974)], en el escrito "Sobre el desarrollo de los métodos de la física teórica en tiempos recientes" el *bild* aparece asociado a un contexto de físicos del siglo XIX, como Hertz, caracterizando su pensamiento de un modo conciso y claro: ninguna teoría puede ser objetiva, coincidente realmente con la naturaleza, sino más bien cada teoría es sólo una pintura mental de los fenómenos. Pero también agrega que esta pintura debe ser tan simple como sea posible y que debe representar a los fenómenos tan precisamente como se pueda.

Como es de suponer, estas expresiones pueden dar margen a diferentes interpretaciones en materia de contenido filosófico. H. De Regt [De Regt (1996)], por ejemplo, conceptualiza a la posición de Boltzmann como una forma de realismo constructivo. Posteriormente [De Regt (1999)], brinda un panorama extenso y variado al respecto, citando y comentando a varios críticos y analistas de este pensador. Así, J. Blackmore [Blackmore (1995)] opina que las pinturas atómicas que usó Boltzmann fueron idealizaciones útiles que requieren una teoría de la verdad de no-correspondencia. [Hiebert (1981)] ofrece un enfoque diferente, asociando con Boltzmann una posición filosófica combinada de idealismo y realismo pragmatista. Quizás es importante recordar aquí que este autor recalcó tempranamente, en contra de la opinión de científicos como Kirchhoff que enfatizaban la descripción y predicción en ciencia, que el propósito de la ciencia es dar explicaciones de los fenómenos. Atendiendo a este aspecto que cruza cuestiones epistemológicas con metodológicas y ontológicas, parece convincente bifurcar la cuestión bajo análisis y aceptar que Boltzmann enfatizó diferentes matices en diferentes contextos. En esta dirección, aunque por otros motivos, D'Agostino (1990) sugiere que el *bild* representa un notable balance entre pretensiones en tensión, como entre una cruda fenomenología y un crudo atomismo ontológico. No entramos en los detalles de este tipo de argumentos porque no es el objetivo de este trabajo analizar el punto de vista de Boltzmann acerca de los átomos, que dicho sea de paso, ha estimulado una enorme actividad filosófica posterior en torno de las entidades teóricas y observacionales. Más bien, queremos remarcar algo insinuado en reiteradas ocasiones; una bifurcación entre un lenguaje fenomenalista que usó como marco expresivo en muchas oportunidades, y una lectura realista en torno de átomos y moléculas en la práctica científica.

Dado que varios autores se han ocupado en esta época del *bild*, parece conveniente destacar que para Boltzmann el rasgo de ser visualizable era muy importante. Su diferencia con Hertz en esto es relevante. Para Boltzmann las representaciones físicamente visualizables venían primero y luego seguía el formalismo matemático; para Hertz la prioridad era casi opuesta. Boltzmann no tuvo una posición filosófica filo-kantiana como Hertz. A esto se sumaba en Boltzmann un respeto por una concepción que diera cabida a una forma de pensamiento darwiniano en su concepción de las leyes del pensamiento. D'Agostino ha estudiado este aspecto de su pensamiento y a partir de ello se puede considerar que, aún cuando pudieran existir para Boltzmann leyes de pensamiento en algunos casos innatas y en este sentido, a priori, esas categorizaciones eran producto de la evolución. Lateralmente, en su opinión, por ejemplo, las teorías científicas deben luchar para sobrevivir, como sucede con las especies en la concepción darwiniana de la evolución. En relación con Hertz, como suele presentárselo como el generador del enfoque sobre el *bild* en Boltzmann, debe hacerse notar que autores como Wilson (1989, 1993) brindan elementos como para suponer que la deuda al respecto es más bien con Maxwell. Éste es un terreno de investigación activo entre historiadores de la ciencia. Para nuestros fines, aceptando que el concepto de *bild* estaba en el clima intelectual europeo y particularmente alemán de esa época, no es suficiente con señalar que él jugó un importante papel como guía heurística, como metodología y como caracterización parcial de la ciencia por parte de Boltzmann. Su estrategia de intentar dar cuenta de los fenómenos complejos en términos de otros mucho más simples, abarca tanto su concepción de las teorías, como de los modelos. En su

artículo de la Enciclopedia Británica sobre modelos [Boltzmann (1974)] define un modelo como una “representación tangible [...] de un objeto la cual es, o verdadera en su existencia, o tiene que ser construida en los hechos o en el pensamiento”. Los modelos, agrega “siempre involucran una analogía espacial concreta en tres dimensiones”. En este sentido, el próximo apartado de este trabajo acusa la influencia de este punto de vista.

b. Modelos concretos

En esta sección, y a modo de ilustración, discutiremos brevemente dos propuestas de modelos mecánicos realizadas por Boltzmann como representantes de ciertos fenómenos físicos. Finalmente haremos una breve alusión a su concepción de los modelos a escala.

El primero trata sobre la visualización de un principio termodinámico; el segundo sobre el problema de interacción entre circuitos eléctricos. Es importante recalcar que este segundo modelo mecánico fue construido bajo la supervisión del mismo Boltzmann.

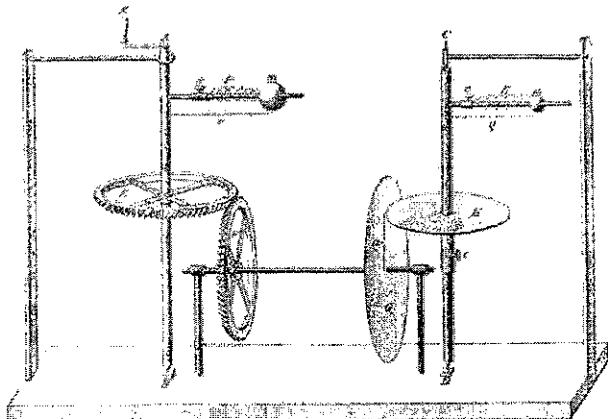


Figura 1: Modelo mecánico sobre la Segunda Ley de la Termodinámica

La segunda ley de la termodinámica impone limitaciones para los procesos de conversión de calor en trabajo. En particular, esta ley indica que un proceso cíclico en un sistema no puede tener por único resultado llevar calor de una fuente fría a una más caliente. Esta es una ley con profundas implicancias sobre los fundamentos mismos de la física. Al analizarla desde una perspectiva netamente mecanicista, H. Von Helmholtz supuso que los movimientos moleculares en un gas eran análogos a los de rotación de una rueda alrededor de un eje y que su energía sólo dependía de su velocidad angular. Al acoplar un sistema mecánico a esta rueda, la energía del sistema debería depender de otras coordenadas (grados de libertad) las cuales podrían variarse a una tasa lenta comparada con la velocidad de la rueda. Helmholtz estableció que la energía entregada al sistema como calor, representada por un cambio en la energía cinética de la rueda, podría no convertirse completamente en trabajo, representado por un cambio lento en los otros grados de libertad del sistema mecánico. El modelo mostrado en la Figura 1 fue sugerido por Boltzmann para ilustrar el argumento desarrollado por H. Von Helmholtz por el cual demostraba la limitación que existe en la conversión de calor en trabajo [Boltzmann, (1909)].

En la figura 2 se muestra un modelo mecánico funcional desarrollado por Boltzmann para describir la inducción entre circuitos eléctricos. Quizás, para ponerlo en un contexto adecuado, es necesario mencionar que en aquel momento la interacción electromagnética se pensaba mediada por un éter. El flujo de corriente eléctrica y las interacciones entre circuitos eléctricos están representados en este modelo por la rotación de los discos con engranajes, y la energía de una corriente eléctrica se podía interpretar como dependiente de la velocidad del disco rotante. Boltzmann estableció la equivalencia de las ecuaciones correspondientes a este modelo mecánico con las de la inducción entre circuitos [Boltzmann (1891-3)]. Argumentó que las analogías mecánicas poseían un gran valor heurístico para aclarar el significado de la teoría de Maxwell. Cabe destacar que el mismo Maxwell oportunamente construyó un modelo mecánico para describir la inducción de corrientes entre dos circuitos. Una descripción detallada del mismo puede encontrarse en el segundo volumen de su *Treatise*. [Maxwell, (1954)]

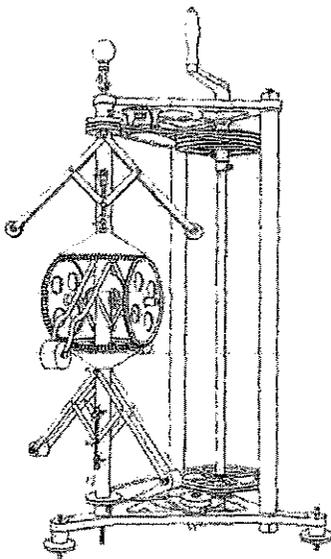


FIG. 6.15. Boltzmann's model for two coupled RLC circuits (Boltzmann 1891-1893).
Vid. 1. plate)

Figura 2: Modelo mecánico para representar la inducción entre circuitos eléctricos

Como complemento de estos modelos es necesario señalar que Boltzmann atendió también especialmente a una variante de los mismos: los modelos a escala. Deseamos remarcar que estos modelos-maqueta no presuponen necesariamente un cambio en las bases físicas del diseño. Sólo un cambio de escala. Mientras que en los modelos concretos anteriores se intenta claramente representar fenómenos electromagnéticos y termodinámicos desde un punto de vista mecánico. Con respecto a los modelos a escala, Boltzmann señala en "Modelos", [Boltzmann (1974)]:

Debe observarse una distinción entre los modelos que han sido descriptos (modelos mentales) y aquellos modelos experimentales que presentan una máquina en pequeña escala,

que debe ser completada consecuentemente sobre una escala mayor, de modo de poner a prueba sus capacidades. Debe notarse aquí que una mera alteración en las dimensiones es a menudo suficiente para causar una alteración material en la acción, puesto que las diferentes capacidades dependen de distintos modos sobre las dimensiones lineales.

V Conclusiones

La exploración realizada en torno de los escritos del propio Boltzmann, como de algunos de sus analistas, nos permite inferir que su conceptualización de los modelos fue producto de diferentes tradiciones que convivían durante la segunda mitad del siglo XIX. En particular, hemos intentado destacar el rol dual del concepto, tanto en su faceta representacionista como en aquella vinculada a prácticas concretas más próximas al dominio de la ingeniería y de la técnica. Se sostiene aquí que ambos aspectos han jugado un rol equiparable en importancia epistémica, y que este equilibrio ubica a Boltzmann como un pensador original en relación con el concepto de modelo, a pesar de la larga tradición existente en torno del mismo en la cultura europea de esa época. Si sumamos a estos aspectos de su pensamiento su contribución notable a la física, es comprensible su influencia sobre destacados intelectuales de la ciencia y la filosofía en la primera mitad del siglo XX. Queda pendiente una elucidación mayor de las implicancias de los modelos mecánicos para otros ámbitos de las ciencias físicas contemporáneas y en especial el valor heurístico que pueden tener como analogías al momento de la explicación y predicción de nuevos fenómenos. Las lecturas realizadas sobre este autor nos insinúan que sigue siendo una fuente rica en sugerencias.

Notas

¹ Las traducciones de los párrafos citados han sido realizadas por los autores del presente trabajo.

Bibliografía

- Blackmore J (1995) (Ed.). Ludwig Boltzmann, His Later Life and Philosophy, 1900-1906. Book One, Book Two. Kluwer, Dordrecht. Dos volúmenes.
- Boltzmann, L. (1974). Theoretical Physics and Philosophical Problems. Edited by B. McGuinness. D.Reidel P. Co. Dordrecht-Holland.
- Boltzmann L. (1905). Populäre Schriften. Ambrosius Barth, Leipzig. Reprinted in part by Vieweg, Braunschweig, 1979
- Boltzmann L. (1909) Wissenschaftliche Abhandlungen, ed. F. Hasenöhr, Leipzig.
- Boltzmann L. (1891-3) Vorlesungen über Maxwells Theorie der Elektrizität und des Lichtes, Leipzig.
- D'Agostino (1990): Boltzmann and Hertz on the Bild-conception of Physical Theory *History of Science* 28, 380-398
- Darrigol O (2000): *Electrodynamics from Ampere to Einstein*, Oxford University Press.
- De Regt H. (1999): Ludwig Boltzmann's Bildtheorie and scientific understanding. *Synthese* 119: 113-134.
- De Regt H. (1996): Philosophy and the Kinetic Theory of Gases. *British Journal for the Philosophy of Science* 47, 31-62.
- Hiebert E. (1981): *Boltzmann's Conception of Theory Construction: The Promotion of Pluralism, Provisionalism, and Pragmatic Realism*. En Hintikka J., Gruender D., Agazzi E. (Eds.): *Proceedings of the 1978 Pisa Conference on the History and Philosophy of Science*. Vol. II. D.Reidel, Dordrecht, pp. 175-198.
- Lamberti, P.W y Rodriguez, V (2001), *Epistemología e Historia de la Ciencia*, Vol 7, 250-254.
- Maxwell, J.C (1954). *A Treatise on Electricity and Magnetism*, Dover Publications Inc.
- Maxwell, J.C (1865) *A Dynamical Theory of Electromagnetic Field*, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 155, 459-512.
- Reynolds, O. (1883). *Philos Trans R Soc London* 174: 935- 982.
- Schrödinger E (1995). *The Interpretation on Quantum Mechanics*, pag. 121-122, Ox Bow Press, Woodbridge.
- Thomson, W (2007). *Baltimore Lectures on Molecular Dynamics and the Wave Theory of Light*, Lightning Source Inc.

-
- Wilson A. (1989). Hertz, Boltzmann and Wittgenstein Reconsidered. *Studies in History and Philosophy of Science* 20, 245-263
- Wilson A. (1993). *Boltzmann's Philosophical Education and its Bearing on His Mature Scientific Epistemology* En Battimelli G., Iannello M., Kresten O. (Eds.): *Proceedings of the International Symposium on Ludwig Boltzmann*. Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien, pp. 57-69.