

MANUEL SILVA SUÁREZ, ed.

**TÉCNICA E INGENIERÍA
EN ESPAÑA**

VI

EL OCHOCIENTOS
De los lenguajes al patrimonio

Enrique Alarcón Álvarez	José Ignacio Muro Morales
Carles Alayo i Manubens	Javier Ortega Vidal
José Vicente Aznar García	Stefan Pohl Valero
Emilio Bautista Paz	Francesc Rodríguez Ortiz
Vicente Casals Costa	Amaya Sáenz Sanz
Juan Ignacio Cuadrado Iglesias	Jesús Sánchez Miñana
Leonardo Fernández Troyano	Manuel Silva Suárez
Alberto Fraile de Lerma	Mercedes Tatjer Mir
Cecilio Garriga Escribano	Fernando Vea Muniesa
Josefina Gómez de Mendoza	M. ^a Ángeles Velamazán Gimeno
Guillermo Lusa Monforte	Patricia Zulueta Pérez
Javier Manterola Armisén	

REAL ACADEMIA DE INGENIERÍA
INSTITUCIÓN «FERNANDO EL CATÓLICO»
PRENSAS UNIVERSITARIAS DE ZARAGOZA

Publicación número 3.111
de la
Institución «Fernando el Católico»
(Excma. Diputación de Zaragoza)
Plaza de España, 2 · 50071 Zaragoza (España)
Tels.: [34] 976 288878/79 · Fax [34] 976 288869
ifc@dpz.es
<http://ifc.dpz.es>

© Los autores, 2011.

© De la presente edición, Real Academia de Ingeniería, Institución «Fernando el Católico»,
Prensas Universitarias de Zaragoza, 2011.

Cubierta: La motorización es una característica esencial de la Revolución Industrial. Se
presentan motores de tres tipos, todos diseñados y contruidos en el siglo XIX:
Máquina de vapor semifuja vertical de Alexander Hermanos; motor horizontal de
gas de tipo Otto, protegido por patente de invención, de Joaquín Torres; y dina-
mo *Gramme* L5 construida por la Sociedad Española de Electricidad. Estos tres
tipos de motores coexistían en el cambio de siglo.

Contracubierta: Dibujos en la patente depositada por los ingenieros militares Eusebio
Molera Bros y Juan Cebrián Cervera el 20 de junio de 1880 en los Estados Unidos.
Residentes en California, trabajaron en muy diversos temas. Esta patente con-
cierne a una mejora para los microscopios.

ISBN: 978-84-7820-814-2 (obra completa)

ISBN: 978-84-9911-151-3 (volumen VI)

Depósito Legal: Z-3688-2011

Corrección ortotipográfica: Ana Bescós y Laura Ayala

Digitalización: María Regina Ramón, AHOEPM, Bibl. ETSICCP de Madrid y Fons Històric
de la ETSEI de Barcelona

Tratamiento digital: Manuel Silva Suárez

Maquetación: Littera

Impresión: INO Reproducciones, Zaragoza

IMPRESO EN ESPAÑA - UNIÓN EUROPEA

La termodinámica: las definiciones de una nueva disciplina científica desde la física matemática

Stefan Pohl Valero
Universidad del Rosario, Bogotá

A finales de la década de 1860 la nueva ciencia del calor, la termodinámica, empezó a ser difundida y posteriormente enseñada en España. Como sus propios divulgadores explicaban, la física había logrado un gran avance unificador en la medida que los diferentes fenómenos de la naturaleza se empezaban a entender como el resultado de un único hecho mecánico. Así, fenómenos como el calor, la luz o la electricidad —que anteriormente se habían considerado como fluidos imponderables independientes— ya no eran interpretados como agentes diferentes de la naturaleza, sino como distintas formas de movimiento. La teoría mecánica del calor, que explicaba la naturaleza de este en términos de materia y movimiento, así como la comprobación experimental de que el calor se transformaba en trabajo en los procesos térmicos, habían permitido esta nueva concepción de los fenómenos naturales, que entonces se interpretaron como diferentes manifestaciones de una misma energía fundamental.

De acuerdo con el principio de la conservación de la energía —o primera ley de la termodinámica—, todas las formas de energía son cualitativamente transformables y cuantitativamente indestructibles. Por otro lado, la segunda ley de la termodinámica establece que, en los procesos en los que la energía se transforma, parte de esta tiende a disiparse en forma de calor. La cantidad de energía disponible para hacer trabajo disminuye inexorablemente en los sistemas cerrados. Este incremento de desorden en un sistema termodinámico fue designado por el físico alemán Rudolf Clausius (1822-1888) con el término *entropía*, concepto que a su vez introducía en la física la noción de irreversibilidad, la llamada *flecha del tiempo*. En resumen, Clausius definió las dos leyes de la termodinámica de la siguiente forma: «La energía del universo es constante. La entropía del universo tiende a un máximo»¹.

Una conceptualización mecánica de la energía, con el trabajo como su medida esencial, dominó la física en la segunda mitad del siglo XIX, aunque el concepto de

¹ R. CLAUSIUS, 1865, p. 400. Un detallado análisis conceptual de la historia de la termodinámica lo ofrece P. M. HARMAN, 1990.

energía no asumió un significado inequívoco. Esto se vio reflejado en los numerosos textos sobre termodinámica que se escribieron antes de que se cerrara el siglo y que dieron lugar a múltiples controversias sobre la prioridad de sus descubridores y sobre el significado científico y filosófico de las diferentes formulaciones de sus leyes².

Este capítulo explora una definición particular de la disciplina de la termodinámica que los ingenieros José Echegaray, Gumersindo Vicuña y Francisco Rojas llevaron a cabo en España durante el último tercio del siglo XIX. Las características epistemológicas y ontológicas definidas por estos ingenieros en torno a la termodinámica demostraron tener particularidades locales. El concepto de energía, por ejemplo, fue presentado como el resultado exclusivo de la materia en movimiento. Una de las razones por las que estos ingenieros rechazaron la existencia ontológica de una entidad llamada *energía* y la redujeron a materia en movimiento debe buscarse en sus esfuerzos por evitar que la termodinámica fuera utilizada —o relacionada— como argumento legitimador de una visión materialista del universo³. Para ellos fue muy importante divulgar una imagen adecuada y no conflictiva de la termodinámica porque a través de ella legitimaron la institucionalización de una física teórica y unificada en la universidad española.

Estos tres ingenieros fueron protagonistas principales en la consolidación institucional de la cátedra de Física Matemática —donde se enseñó la termodinámica— en la Universidad Central de Madrid y realizaron un gran esfuerzo por definir las características de esta nueva disciplina. No obstante, es importante destacar que una disciplina no es un cuerpo unificado de conocimientos y prácticas científicas que en un momento dado hace su entrada en un contexto determinado. Como ha señalado Mary Jo Nye, el término *disciplina* no puede ser entendido solo en su aspecto conceptual e institucional. A partir de un proceso de construcción de identidades históricas, esta autora ha tratado de reunir en una matriz analítica unos conceptos claves que le permitan identificar la emergencia de una disciplina. Reunidos estos conceptos, ha propuesto una serie de elementos de identidad de una disciplina científica, que sus protagonistas suelen reivindicar en un determinado contexto histórico:

- *Genealogía*, es decir, construcción de una mitología histórica de un origen heroico. Se busca generar la imagen de unos héroes fundadores que aporten una autoridad reconocida de la cual derivar una promoción y legitimación del nuevo campo científico.
- *Un cuerpo de literatura base*. A partir de unos textos básicos se busca consolidar un lenguaje común y un patrón de imágenes compartidas por los practicantes de la disciplina.

² F. BEVILACQUA, 1993, p. 291.

³ S. POHL, 2007.

- *Prácticas y rituales*. Existe una práctica de conocimiento ritual y tácito. Las prácticas del laboratorio o de las asignaturas son rituales que dan sentimiento de pertenencia a un grupo.
- *Homeland*. Espacios de identificación, en los que se incluyen los aparatos y elementos de estudio.
- *Reconocimiento externo*. Otros grupos reconocen la disciplina como un cuerpo bien definido de conocimiento y prácticas de laboratorio.
- *Valores compartidos y problemas no resueltos*. Una forma de ver el mundo que comparte una comunidad y que ayuda a definir la forma de abordar nuevos campos de exploración de la disciplina⁴.

Sin profundizar en estos elementos, parece claro, sin embargo, que una disciplina científica es portadora de una serie de valores que están relacionados con tiempos y lugares específicos, además de con el mundo natural. Como ha mencionado Jan Golinski, una disciplina tiene que ser vista como la encarnación de técnicas concretas, aparatos específicos y formas particulares de discurso, o, usando un término de Ludwig Wittgenstein, las disciplinas científicas pueden considerarse *formas de vida*⁵. En este orden de ideas, la Disciplina, con mayúsculas, de la termodinámica no aparece en España repentinamente, y además puede tener un significado bastante diferente del que podría tener en el mismo momento en otro lugar.

Los textos aquí estudiados se insertan dentro de este proceso de construcción disciplinar en la medida que aportaron una serie de elementos que ayudaron a identificar las características de la física matemática en España. En torno a esta ciencia y a través de textos divulgativos, manuales de enseñanza y conferencias, Vicuña, Echeagaray y Rojas lograron ser considerados como las autoridades locales de la termodinámica, definieron sus campos de estudio y de aplicación, su desarrollo histórico, sus representantes legítimos, su aproximación epistemológica y sus características ontológicas. Los tres fueron catedráticos de Física Matemática en la Universidad Central y miembros de la Real Academia de Ciencias de Madrid. En sus textos se citaron mutuamente y la comunidad científica española los consideró como los representantes oficiales de la física matemática y de la termodinámica.

En el artículo sobre «Termodinámica» que recogía el *Diccionario enciclopédico hispano-americano*, la enciclopedia española más importante de finales del siglo XIX, editada por Montaner y Simón entre 1887 y 1899, se reflejaba el reconocimiento público que habían logrado estos ingenieros. El texto incluía a Echeagaray, Rojas y Vicuña dentro del selecto grupo de científicos internacionales que habían consolidado la ciencia de la termodinámica:

⁴ M. J. NYE, 1993, cap. 1.

⁵ J. GOLINSKI, 1992, p. 284. En términos kuhnianos se podría hablar de un «paradigma» disciplinar que rige la actividad científica de una comunidad determinada. T. KUHN, 1971.

Ciencia que se ocupa del estudio del calor como fuerza, de la energía mecánica de este agente y de su aplicación a las máquinas. [Acto seguido el artículo se dedica a discutir la naturaleza del calor y concluye:] En 1842, Joule, Mayer y Colding formularon casi al mismo tiempo la equivalencia entre el calor gastado y el trabajo producido, [...] se iba por fin a reconocer que el calor no se limita a provocar la producción de un movimiento, sino que lo produce en realidad, que no es una causa ocasional, sino generatriz del movimiento; desde entonces la Termodinámica ha venido a ser una ciencia especial, gracias a los trabajos de Clausius, Clapeyron, Hirn, Rankine, Helmholtz, Thomson, Kirchoff, Bunsen, Vicuña, Rojas y D. José Echegaray, Grove, Laboulaye, Fabre, Jaquier, etc.⁶

Este artículo fue publicado en 1897, época en la que la enseñanza institucional de la termodinámica se empezaba a consolidar en las universidades españolas⁷. No obstante, el ideal mecánico y unificado de la física matemática, que la termodinámica tan bien representaba según estos autores, tuvo que pasar por un largo debate público en el que sus leyes, en relación con cuestiones religiosas e ideológicas, fueron ampliamente discutidas. La exposición que hicieran de la termodinámica estos tres ingenieros estuvo condicionada por el debate que se generó al respecto, especialmente en la década de 1870 y por la debilidad institucional de la enseñanza científica y técnica que vivió España en ese período. En las líneas que siguen se prestará especial atención a las diferencias conceptuales, discursivas y técnicas presentes en los textos y asignaturas de estos ingenieros.

I

LA DEBILIDAD INSTITUCIONAL DE LA FÍSICA TEÓRICA Y APLICADA

Algunas de las primeras obras escritas por españoles que abordaban el tema de la termodinámica o, de forma más general, que trataban la idea de una física unificada bajo una concepción mecánica de la naturaleza vinieron de la mano de un mismo autor. Por un lado, en 1867 se publicó un libro, destinado a un público amplio, que exponía de forma sencilla las últimas teorías de la física, abarcándolas todas ellas en un marco explicativo unificado. El libro llevaba por título *Teorías modernas de la física: unidad de las fuerzas materiales*⁸. Al año siguiente, en 1868, apareció otra obra, de

⁶ *Diccionario enciclopédico...*, 1897, p. 686.

⁷ Una asignatura dedicada exclusivamente a la termodinámica solo apareció en la Facultad de Ciencias en los primeros años del siglo xx; en 1880 se reemplazó la asignatura de Fluidos Imponderables por la de Física Superior, que poco a poco fue incluyendo en su programa la teoría mecánica del calor y los ciclos termodinámicos. Esta materia sería en 1900 de nuevo modificada y dividida en diferentes secciones, entre ellas la de Termodinámica. Por su parte, en las Escuelas de Ingeniería Industrial, en la asignatura de Física Industrial, existía la sección Aplicaciones del Calor. En esta asignatura Rojas expondría a los futuros ingenieros los conceptos básicos de la termodinámica, como más adelante veremos.

⁸ He consultado la segunda edición de este texto: J. ECHEGARAY, 1873.

carácter mucho más técnico, que desarrollaba la ciencia de la termodinámica y llevaba por título *Tratado elemental de termodinámica*⁹. El autor de ambos textos fue el ingeniero de caminos y matemático José Echegaray (1832-1916).

En el primer libro, Echegaray presentaba las nuevas teorías mecánicas del calor y de la luz, y con base en estos ejemplos exponía cómo los otros fenómenos físicos de la electricidad y el magnetismo podían también ser interpretados como fenómenos mecánicos: mediante la concepción mecánica de estos fenómenos se explicaba la conversión de unos en otros. En el segundo, el autor desarrollaba las relaciones físicas que permitían el estudio teórico del ciclo de una máquina térmica para producir trabajo, a partir del equivalente mecánico del calor y de la ley de la entropía. Por el contenido del texto se podría interpretar que estaba destinado a estudiantes o a personas con un interés muy específico y profundo en la materia, y que requería un buen conocimiento del cálculo diferencial e integral.

A lo largo de los restantes años del siglo XIX, muchos de los científicos españoles que abordaron estos temas, ya fuera de forma divulgativa o en textos de enseñanza, hicieron referencia a estos dos libros como parte de sus fuentes. Precisamente, uno de los científicos españoles que citó a Echegaray en sus textos fue el ingeniero industrial y doctor en ciencias exactas Gumersindo Vicuña (1840-1890). Este publicó en 1872 *Teoría y cálculo de las máquinas de vapor y gas con arreglo a la termodinámica*¹⁰, cuyo primer capítulo dedicaba a exponer ampliamente la nueva teoría de la termodinámica, para luego pasar a sus aplicaciones técnicas. En el prólogo, Vicuña recogía las obras que había consultado y mencionaba la de Echegaray¹¹. Al final del libro dedicaba un pequeño capítulo a explicar de forma general el principio de la conservación de la energía. Igualmente, la obra *La termodinámica: su historia, sus aplicaciones y su importancia*, escrita por el ingeniero industrial Francisco de Paula Rojas (1832-1909) en 1876, consignaba que entre los diversos textos consultados para su elaboración se encontraban los trabajos de Echegaray y Vicuña¹².

Estos textos no deben ser interpretados como elementos aislados que hacían su aparición de forma casual y que hoy nos sirven para medir el lapso temporal de la «recepción» de una nueva disciplina por parte de una comunidad científica periférica: son productos que nos informan de un quehacer científico local en un contexto cultural determinado y dentro de unas estrategias específicas.

Una de estas estrategias consistió en lograr la definición y consolidación institucional de la física teórica en las universidades españolas. De hecho, la única asignatura de la Facultad de Ciencias que contemplaba en la década de 1870 la enseñanza de una física teórica era la llamada *Física Matemática*, que pertenecía a la sección de

⁹J. ECHEGARAY, 1868.

¹⁰G. VICUÑA, 1872.

¹¹Ibíd., p. 7.

¹²F. ROJAS, 1876, p. 2.

Ciencias Exactas, la cual daba una formación matemática pero no física. Desde su creación oficial, los planes de estudios de ciencias de las universidades españolas prestaban poca atención a las asignaturas que no fueran de carácter aplicado y utilitario. En este sentido, la Facultad de Ciencias tendía a convertirse en un espacio preparatorio para los futuros ingenieros y no en un espacio legítimo en sí mismo. Por lo tanto, una asignatura como la de Física Matemática era muy poco relevante. De forma significativa, esta cátedra fue retirada del programa de estudios en 1866¹³. La reforma del plan de estudios de la Facultad de Ciencias que se llevó a cabo en ese año era un reflejo del poco interés que el Estado tenía en la educación científica y técnica.

Como herramienta para consolidar la revolución burguesa e industrial en la Península, que no terminó de cuajar del todo a lo largo del siglo XIX, sus protagonistas hicieron un esfuerzo por ofrecer los conocimientos teóricos y prácticos necesarios para el florecimiento y el manejo de la nueva industria¹⁴. La década de 1850 reflejó estos esfuerzos: el estudio de la ingeniería se consolidó, las escuelas de Ingeniería de Caminos, Minas, Montes, Agrónomos e Industriales fueron clasificadas como escuelas de estudios superiores y se abrieron varias de ellas en distintas ciudades de la Península. Además, la ley de educación de 1857 (la llamada *Ley Moyano*) canalizó el ingreso a las escuelas de Ingeniería creando una Facultad de Ciencias en la que era necesario cursar dos años antes de entrar en aquellas. No obstante, en las inmediaciones de la revolución de 1868 la educación superior científica y técnica revelaba su gran debilidad. A excepción de la de Barcelona, todas las escuelas de Ingeniería Industrial fueron cerradas aduciendo falta de estudiantes, y en 1866 varias asignaturas del plan de estudios de la Facultad de Ciencias fueron retiradas por no ser de «absoluta necesidad» (incluida, como ya se ha mencionado, la de Física Matemática). La industrialización no lograba consolidarse, y con ello la educación científica y técnica en las universidades, en especial en el área de las ciencias físicas, adolecía de grandes debilidades: el Estado no invertía en su desarrollo y las salidas profesionales eran muy escasas.

Tanto Echegaray como Vicuña fueron principales protagonistas en la reaparición de la asignatura de Física Matemática en 1871. Por un lado, el primero era en ese momento ministro de Fomento, órgano que decidía la instrucción pública, y además fue el presidente del tribunal que seleccionó a su catedrático. Vicuña, por su parte, fue el elegido¹⁵. En 1890, tras la muerte de Vicuña, Rojas fue designado como nuevo catedrático, y años más tarde, en 1905, Echegaray lo reemplazó.

¹³ Esta reforma fue realizada por el entonces ministro de Fomento Manuel de Orovio. Además de eliminar la citada asignatura, también suprimió la de Fluidos Imponderables y redujo las secciones de la Facultad de Ciencias a dos. Al respecto, véase A. MORENO GONZÁLEZ, 1988.

¹⁴ Peset, Garma y Pérez Garzón ofrecen un esbozo del cultivo de las ciencias como elemento integrante del proceso revolucionario burgués español del siglo XIX. J. L. PESET *et al.*, 1978.

¹⁵ El recuento detallado de la oposición se encuentra en el expediente de Física Matemática de la Universidad Central, Archivo General de la Administración (AGA), 32/07427.

En este contexto de debilidad institucional de la física, Echegaray, Vicuña y Rojas buscaron el reconocimiento público y especializado del que derivar la autoridad necesaria para conseguir legitimar el tipo de física que a ellos les interesaba, y lograr así su consolidación en la enseñanza oficial.

Siguiendo a Max Weber, la legitimación puede ser entendida como una serie de creencias extendidas a través de las cuales las instituciones obtienen su justificación y, en caso de conflicto, una defensa contra la oposición¹⁶. En este sentido, los textos de Vicuña y Echegaray aportaron diferentes argumentos que justificaban la existencia de una carrera de física teórica. El primer argumento utilizado, y que funcionaba en el nivel político, consistió en presentar la física teórica española como una fuente de prestigio nacional. Este discurso estaba destinado a convencer a los políticos de que el Estado debía invertir en la consolidación de una Facultad de Ciencias que, entre otras cosas, formara físicos puros y aportara sólidas bases a los futuros ingenieros. La necesidad de su existencia institucional, a pesar de las dificultades, era presentada como una cuestión nacional. Vicuña y Echegaray utilizaron como estrategia para su legitimación el prestigio que tenía la asignatura. A través de las páginas de la *Revista de Obras Públicas* y de la *Revista de la Universidad Central*, respectivamente, lanzaron una proclama nacionalista para convertir la Facultad de Ciencias en una institución que representara internacionalmente a la ciencia española y se convirtiera en el lugar de España donde se enseñara la física teórica que tanto prestigio había dado a otras naciones europeas¹⁷. Como dijera Echegaray en la *Revista de Obras Públicas*, «sabrán en el extranjero que hay en España por lo menos una docena de hombres —los profesores de la facultad— que conocen y explican la ciencia moderna»¹⁸.

Pero, a pesar de representar una fuente de prestigio internacional, la cátedra de Física Matemática seguía siendo una asignatura de poco interés para los estudiantes de la Facultad de Ciencias. Esta no lograba consolidarse como espacio legítimo en sí mismo y la calidad de sus estudios no gozaba de buen prestigio. De hecho, después de 1868 ya no era obligatorio para los futuros ingenieros realizar su preparación científica en ella, sino que podían optar por una preparación privada. Pero la calidad de los estudios en la Facultad estaba tan poco valorada que se prefería esta última opción, y por lo general no se aceptaban estudiantes provenientes de la Facultad sin un previo examen de admisión.

Así pues, Vicuña se enfrentaba a una ardua tarea como catedrático de la asignatura de Física Matemática. Para él era evidente la necesidad tanto de aumentar el reconocimiento de la cátedra como de buscar fórmulas que volvieran viable este tipo de asignaturas en el contexto institucional español. Para este fin, a lo largo de la década

¹⁶ W. van der DAELE y W. KROHN, 1983, p. 237.

¹⁷ Véase G. VICUÑA, 1873, y J. ECHEGARAY, 1866. Aunque este último artículo no viene firmado, Sánchez Ron ha demostrado la autoría de Echegaray. Véase J. SÁNCHEZ RON, 1990a, p. 96, y 1990b, pp. 21-22.

¹⁸ J. ECHEGARAY, 1866, p. 264.

de 1870 publicó una serie de textos en los que destacaba la importancia de la asignatura y su relación con la termodinámica¹⁹. En estos textos, Vicuña proporcionaba criterios generales para el diseño de un plan de estudios que ofreciera mayores expectativas a sus alumnos. Proponía elevar el prestigio de la Facultad generando un espacio reconocido donde se pudieran preparar los futuros ingenieros y se adquiriera una sólida formación científica. Es decir, recurría a un modelo que, debido a las circunstancias económicas locales, trataba de no separar la Facultad de las escuelas especiales para no perder la mayoría de su alumnado. No obstante, aquella debía mantener «encendido el sagrado fuego de la especulación [porque, aunque] sus resultados no serán inmediatos, el país recogerá tarde o temprano los frutos, pues sin la ciencia pura las aplicaciones degeneran pronto en vil rutina, estéril para el invento»²⁰. Una vez alcanzadas estas circunstancias, sería posible una verdadera profesionalización de la física teórica.

La propuesta institucional y pedagógica de la física matemática de Vicuña se reflejó de forma notoria en su libro de texto sobre termodinámica, en el que se combinaban conocimientos prácticos para los ingenieros con un detallado desarrollo teórico de la física. *Teoría y cálculo de las máquinas de vapor y gas con arreglo a la termodinámica* (1872) desborda la noción tradicional de libro de texto y demuestra la importancia de los manuales como fuentes históricas²¹. En el prólogo se consignaba que estaba destinado a los ingenieros. Era necesario, comentaba el autor, que los ingenieros no solo supieran dirigir una máquina, sino que conocieran los fenómenos físicos que en su interior ocurrían y, por lo tanto, entendieran la teoría que explicaba estos fenómenos. Así, comentaba Vicuña, su obra no «calculaba un motor» como ordinariamente se hacía, basándose en el uso de coeficientes numéricos adquiridos en la práctica por ingenieros y constructores, sino a partir de la teoría «verdaderamente racional y satisfactoria, deducida de la termodinámica»²². Además, el libro incluía un capítulo dedicado a exponer la teoría cinética de los gases desarrollada por Rudolf Clausius. En la última parte del texto aparecía igualmente una sección dedicada a la conservación de la energía, en la que se explicaba cómo se verificaba en la naturaleza la transformación de energía eléctrica en energía calorífica a partir de las acciones químicas. También se hablaba de energía orgánica, es decir, de la transformación de energía calorífica en energía animal.

¹⁹ Véase, por ejemplo, G. VICUÑA, 1873, 1875 y 1883.

²⁰ G. VICUÑA, 1875, p. 64.

²¹ Según Thomas Kuhn, los libros de texto forman parte de un proceso pedagógico en el que se definen y perpetúan los paradigmas en los que se desarrolla la investigación científica durante la ciencia normal. T. KUHN, 1971, pp. 213-214. Actualmente se cuestiona la definición de este autor. Los libros de texto han demostrado ser una importante fuente de investigación histórica que refleja procesos locales de apropiación. Al respecto, véase J. R. BERTOMEU *et al.* (eds.), 2006.

²² G. VICUÑA, 1872, p. 5.

Pero estas secciones no parecían ser muy relevantes en un libro destinado a ingenieros dedicados a la construcción y optimización de máquinas térmicas. Por un lado, la exposición de la teoría cinética de los gases no aportaba ningún conocimiento positivo en el estudio de los ciclos de una máquina. De hecho, el desarrollo de los ciclos no necesitaba basarse en la naturaleza del calor; por el contrario, para la teoría cinética de los gases era una cuestión básica y un punto de partida. Por otro lado, los libros de texto de la época sobre termodinámica no incluían la exposición de la teoría cinética de los gases de Clausius y no se referían a la teoría mecánica del calor como verdad absoluta en la que se basaba la termodinámica. Algunos manuales sobre termodinámica que fueron utilizados en España y a los que nos referiremos más adelante eran una muestra de esa posición que evitaba relacionar la termodinámica con las hipótesis sobre la naturaleza del calor²³.

Así pues, el texto de Vicuña puede ser visto como un instrumento con el que se trataba de relacionar una ciencia experimental y de gran utilidad en la ingeniería con un tratamiento teórico de los gases, representante a su vez de una física teórica. Aunque el libro desarrollaba los principios experimentales de la termodinámica, su autor presentaba esta ciencia como una disciplina teórica que surgía a partir de la hipótesis mecánica del calor. Y, en este sentido, la obra constituía un ejemplo tangible del modelo que la Facultad de Ciencias podía adoptar en sus clases: a partir de un conocimiento teórico, compartido entre físicos e ingenieros, se desarrollaba una ciencia útil, pero este conocimiento proseguía sus especulaciones y volvía al ámbito de la física teórica, cerrando, por así decirlo, un ciclo. En otras palabras, el autor agrupaba en un solo texto el tipo de conocimientos que podían ser fructíferos tanto para ingenieros como para físicos, lo cual permitía concebir un espacio (la Facultad de Ciencias) con esas mismas características. Como se ha mencionado anteriormente, Vicuña veía en la preparación de los ingenieros una función que permitiría a la Facultad de Ciencias, en el contexto español, asegurar su existencia y fortalecerse. La creación de la sección de Ciencias Físico-Matemáticas dentro de la Facultad de Ciencias a partir de 1880 sería un paso importante en sus aspiraciones. De esta forma, los licenciados en Ciencias Físico-Matemáticas vieron ampliada la asignatura de Fluidos Imponderables en dos cursos de Física Superior con sus respectivas prácticas. Además, fue requisito cursar primero las asignaturas de Cálculo Diferencial e Integral y la de Mecánica Racional, lo que reflejaba que los temas físicos iban a tener un tratamiento más matemático²⁴. Solo dentro de este plan de estudios el manual de termodinámica de Vicuña se convertía finalmente en un libro de texto de física matemática.

²³ Véase, por ejemplo, P. SAINT-ROBERT, 1882, y J.-L. BERTRAND, 1887.

²⁴ Sobre el carácter poco matemático del estudio de la física en el plan de estudios que tuvo la Facultad durante la década de 1870 se pronunció el doctor en Ciencias Físico-Matemáticas Eduardo Lozano, catedrático de Física Superior en la Universidad de Barcelona, en el prólogo de *Elementos de termodinámica*, de 1899: «Encargado durante doce años de explicar los dos cursos de Física Superior

II

LA «CATEGORÍA» TEÓRICA DE LA TERMODINÁMICA

Vicuña se esforzaba por definir las características epistemológicas de la física matemática y demostrar que su cultivo repercutía de forma positiva en la ciencia aplicada. Una de sus principales características consistía en basarse en hipótesis mecánicas y, a partir de ellas, perseguir explicaciones unificadoras. Como comentaba en un artículo destinado precisamente a definir el «Concepto y clasificación de las ciencias físico-matemáticas», la búsqueda de generalización era esencial:

No debe cuidarse tanto en su enseñanza de hacer notar la aplicación cuantitativa de los varios fenómenos de la Óptica, Acústica, Electro-dinámica, etc., como de exponer el análisis común a la Acústica y Óptica, el que lo es de la Termostática y Electricidad, el de la Electrodinámica y Termodinámica. Antes que estudiar, por ejemplo, los fenómenos todos de la polarización de la luz, es preferible, en nuestra opinión, ocuparse de las teorías de los movimientos vibratorios, de la energía y del potencial, que son comunes a diversas partes, y que servirán aún de modo de investigación para otras²⁵.

Para esta definición, el papel de la termodinámica fue muy importante porque, desde la perspectiva de los autores estudiados, era el ejemplo más apropiado para demostrar que a partir del cultivo de la física especulativa se obtenían resultados favorables para el progreso material.

Uno de los aspectos que se percibían en la termodinámica era su carácter articulador y unificador a la hora de abordar diferentes fenómenos físicos, en la medida que demostraba lo fructífero de las teorías mecánicas. Pero ¿qué quería decir exactamente *una explicación unificada y mecánica de los fenómenos*? Esta pregunta la respondía de forma sencilla Echegaray en su libro sobre las teorías modernas de la física. Recurriendo a los ejemplos del calor y la luz, explicaba cómo estos fenómenos podían ser entendidos en términos mecánicos, es decir, en términos de partículas de materia que al chocar entre sí los originaban. El calor y la luz se podían entender simplemente como un tipo de movimiento de la materia. Para los fenómenos de la electricidad y el magnetismo, apuntaba el autor, aunque su ontología mecánica no estaba

en la Universidad de Barcelona, he tenido ocasión de apreciar la última reforma de la Facultad de Ciencias [realizada en 1880], que reemplazó por esta asignatura la antigua de Fluidos Imponderables, cuya sola denominación basta para comprender el erróneo concepto que implicaba semejante anacronismo. La necesidad de que los alumnos que pretenden adquirir un conocimiento serio de la Física moderna vengán preparados con las nociones indispensables de Cálculo Diferencial e Integral, y aun de Mecánica Racional, fue reconocida oportunamente por el Consejo de Instrucción Pública, y en consecuencia aprobada por la Superioridad, estando vigente desde el año 1880: porque salta a la vista de los menos peritos en la materia que los doctores en Ciencias Físico-Químicas, que no pasan del estudio de la Geometría Analítica, carecen de los fundamentos que en la actualidad se requieren para estudiar la Física que no sea puramente experimental». E. LOZANO, 1899, p. 1.

²⁵ G. VICUÑA, 1873, p. 139.

demostrada, la física moderna tendía a interpretarlos igualmente de forma mecánica. La física matemática se presentaba entonces como una ciencia basada en la especulación teórica que suponía que los fenómenos físicos podían ser representados mediante modelos mecánicos de materia y movimiento, lo que a su vez permitía abordarlos matemáticamente y relacionarlos entre sí.

La termodinámica aportaba las pautas para interpretar y manejar otros fenómenos, de manera análoga a como la teoría mecánica lo había hecho con el calor. Además, la termodinámica tenía otro gran mérito: su íntima relación con las máquinas térmicas, es decir, su capacidad para aportar una mejor comprensión del funcionamiento de los ciclos térmicos y, por lo tanto, la posibilidad que ofrecía para su optimización, símbolo a su vez del progreso económico. Este discurso de progreso fue desarrollado especialmente por Rojas en su libro sobre la historia de la termodinámica (1876). En efecto, la nueva ciencia del calor era presentada por Rojas como el gran logro científico del siglo XIX, resaltando que las hipótesis mecánicas debían ser adoptadas en todos campos de la física para su verdadero progreso.

Rojas exponía las ideas de Echegaray y Vicuña como una fuente de su propio libro en los términos siguientes: «En España hemos visto publicadas la obrita de D. Gumersindo Vicuña, y las notabilísimas especulaciones científicas del sabio Echegaray sobre puntos de la mayor importancia en la Teoría mecánica del calor»²⁶. Asimismo, una memoria de Rojas presentada en la Real Academia de Ciencias y Artes de Barcelona en 1877 y titulada *El problema físico y el químico se resolverán en el mecánico* era una clara continuación del modelo de física expuesto por Echegaray en *Teorías modernas de la Física*.

El libro de Rojas fue publicado y ampliamente difundido gracias al auspicio del Ateneo Barcelonés. Su autor resultó ganador de un concurso público del Ateneo, abierto en 1873, que tenía como objetivo premiar la mejor obra que se presentara sobre la nueva ciencia de la termodinámica. Su difusión se vio asegurada, ya que se regaló a bibliotecas públicas y particulares y a los establecimientos de instrucción del Reino²⁷.

A través de esta institución catalana aparecía, pues, un libro que exponía de forma detallada el desarrollo de la nueva ciencia de la termodinámica y que era accesible a un público amplio. Es posible pensar que la burguesía industrial catalana tuviera un especial interés por promover este tipo de publicaciones. De hecho, Cataluña fue el núcleo industrial más importante de la España del siglo XIX y, por ende, el lugar

²⁶ F. ROJAS, 1876, p. 2. A lo largo del libro, Rojas nombraba además como fuentes de su trabajo a Zeuner, *Teoría mecánica del calor con sus aplicaciones a las máquinas*; Clausius, *Colección completa de sus memorias*; Hirn, *Memoria presentada a la Academia de Ciencias de París y Consecuencias filosóficas y metafísicas de la termodinámica*; Tyndall, *Calor como un modo de movimiento*; Rankine, Helmholtz y Mayer, *Observaciones sobre las fuerzas de la naturaleza inanimada*; Thomson y Secchi, *La unidad de las fuerzas físicas*.

²⁷ Al respecto, véase el expediente de Rojas de la Universidad Central de Madrid, AGA 31/16616.

donde las máquinas térmicas en general tenían mayor presencia. La difusión de la termodinámica, que permitía un estudio teórico de estas máquinas y, por consiguiente, su optimización, puede ser interpretada como un tema de especial interés en ese contexto. La única escuela superior de Ingeniería Industrial que seguía funcionando entonces en España era la de Barcelona, auspiciada en gran parte por la demanda de formación técnica por parte del empresariado catalán²⁸.

Mediante el recurso de la historia, Rojas tenía una herramienta excelente para presentar la termodinámica como el fruto de una física basada en hipótesis mecánicas. El origen de esta ciencia, decía, se debía a un ejercicio estrictamente teórico, ejercicio que era característico del tipo de física que él quería representar y que había sido tan bien delineado en los trabajos de Echeagaray. Una vez realizada esta definición epistemológica de la termodinámica en la que se resaltaba la especulación teórica, Rojas podía construir un discurso que asociaba las hipótesis mecánicas como garantes de progreso científico y material. Al respecto, Rojas comentaba:

La Termodinámica, ciencia que estudia y formula las relaciones entre el calor y los efectos mecánicos, considerándolos respectiva y alternativamente como causa y efecto, es hija de nuestro siglo, y el mayor título de gloria científica que este podrá presentar ante las venideras generaciones. Tan grande ha sido ya su influencia en la Física general; tan vivísima luz ha arrojado sobre los más oscuros fenómenos del calor; tanto ha esclarecido otros relativos a la electricidad y magnetismo; tanto poder tienen sus principios en el campo de la Fisiología y la Química, especialmente sobre ciertos problemas antes oscurísimos de la vida animal y vegetal; tan fecundas han sido sus fórmulas aplicadas a los problemas de la expansión de los gases, de los cambios de estado, de la expansión de los vapores, del movimiento de los gases, del trabajo en todas las máquinas térmicas, que puede asegurarse que ha hecho una revolución en las ciencias físicas y fisiológicas²⁹.

Una vez desarrollada la parte histórica de la termodinámica, el autor exploraba el alcance de esta ciencia en otros campos, tales como la química, la mecánica aplicada, la fisiología y la astronomía. En todos ellos exponía la posibilidad de una concepción mecánica y, por lo tanto, más racional de sus fenómenos, gracias a la termodinámica. De todos estos ejemplos, el que recibía una mayor atención era el de las máquinas térmicas. Rojas explicaba de forma detallada las ecuaciones teóricas que expresaban la forma de optimizar el funcionamiento de estas máquinas. Mediante la exposición de estas ecuaciones, que se deducían de la ciencia de la termodinámica, promocionaba la termodinámica como herramienta primaria de trabajo para los ingenieros. Así lograba otorgar más credibilidad pública a esta ciencia a través del campo de la ingeniería, la cual tenía un mayor grado de reconocimiento debido a sus aportaciones tangibles al mundo material. Las máquinas térmicas eran percibidas, al menos por una parte del público, como el símbolo indiscutible del progreso no ya científico sino social y económico.

²⁸ Véase G. LUSA, 1997 y 2007.

²⁹ F. ROJAS, 1876, pp. 1-2.

Aunque no todo el mundo veía en las máquinas la llave del progreso, existía una percepción de prosperidad económica y social a causa de su extendido uso. El empleo relativamente grande de maquinaria industrial basada en la tecnología del vapor se reflejaba en la creación de compañías dedicadas a su construcción. Empresas como Alexander Hnos., La Maquinista Terrestre y Marítima o Nuevo Vulcano, todas en Barcelona, o Portilla & White en Sevilla eran importantes constructoras de máquinas de vapor en la segunda mitad del siglo XIX. La industria textil catalana demandó especialmente energía mecánica, acaparando en la década de 1860 más de la mitad de los caballos de vapor instalados por la industria en España³⁰. La bucólica imagen del tren humeante recortando distancias entre las poblaciones españolas o las innumerables imágenes de máquinas que llenaban las páginas de las revistas de la época eran una constatación de la asociación del progreso con las máquinas térmicas. Rojas reconocía en el significado de las máquinas un elemento esencial para legitimar institucionalmente la termodinámica. El desarrollo de las máquinas no tenía una relación directa con la teoría mecánica del calor, pero era precisamente la construcción de un escenario donde se las vinculaba con el progreso lo que aprovechaba Rojas.

En consecuencia, lo que de una u otra forma se transmitía a través de los textos y discursos de Vicuña, Echegaray y Rojas era la ecuación que igualaba progreso científico, y también económico, con una «física moderna» caracterizada por un cuerpo unificado de conocimiento y abordada matemáticamente. Su principal característica epistemológica se basaba en el recurso de hipótesis mecánicas, a través de las cuales, apuntaban estos autores, se lograban las más altas generalizaciones de la física. A partir de esta definición, la termodinámica fue presentada entonces como el resultado de una aproximación fisicomatemática al estudio del calor. Pero esta definición epistemológica y ontológica de la física matemática, así como su relación con la termodinámica, no era evidente: había que construirla. Además de los esfuerzos de Vicuña, los textos de Rojas y Echegaray desempeñaron un papel esencial en este proceso.

Para Echegaray era de capital importancia en el proceso de unificación que estaba experimentando la física el hecho de que la gran ley en la que convergían las diversas leyes empíricas se apoyara en la más racional de las ciencias físicas, la mecánica, o, como él la llamaba, *la ciencia de las cantidades*. En general, esta posición la condensaba el autor en la siguiente frase:

Es innegable que esta especie de fusión de fenómenos aislados, y al parecer radicalmente distintos, en uno solo general que los identifica, y que se expresa por una gran ley, es un importantísimo adelanto; adelanto tanto mayor, en el caso que nos ocupa, cuanto de este modo la Física viene a ser una especie de Astronomía molecular, sujeta al análisis algebraico, y recibiendo de la ciencia de la cantidad y del orden su último grado de perfección³¹.

³⁰ R. GARRABOU, 1982, p. 135.

³¹ J. ECHEGARAY, 1873, p. 50.

Así pues, Echegaray aportaba uno de los rasgos fundamentales para medir el progreso de la física: en la medida en que esta basaba su cuerpo explicativo en modelos esencialmente mecánicos, que a su vez estaban sujetos, por lo menos en teoría, a un tratamiento puramente matemático, se acercaba a una ciencia perfecta que se encarnaba en la *física matemática*. En esencia, el libro de Echegaray definía las fronteras y características de la física matemática y a su vez trataba de legitimar frente al mayor público posible la validez de esta disciplina y de su enseñanza, al presentarla como garante del progreso científico.

Tanto Echegaray en su texto como Rojas en su libro sobre la historia de la termodinámica construyeron una narración histórica en la que la física progresaba en la medida que se matematizaban y unificaban sus fenómenos. Presentar la termodinámica como el fruto de esta nueva física fue el principal argumento utilizado para caracterizar un proceso lineal de progreso en la física. La historia de la termodinámica se prestaba muy bien a este tipo de narración. Como ambos autores exponían, el estudio del calor pasaba de ser cualitativo y basado en una hipótesis falsa —la materialidad del calor, el llamado *calórico*— a ser cuantitativo, descriptible matemáticamente, gracias a que se le había adjudicado la hipótesis correcta de su naturaleza. Ambos autores utilizaban la teoría material del calor como característica de la antigua física y como freno de su avance. Esta teoría se basaba en el supuesto de que el calor era un fluido muy elástico, imponderable e indestructible, y se encontraba en todos los cuerpos. Así, cuando un cuerpo era calentado, este fluido, llamado *calórico*, fluía desde la fuente de calor hacia el cuerpo calentado, por lo que la temperatura de este dependía de la cantidad de calórico que tuviera. Si el cuerpo era enfriado perdía calórico. Las partículas de los cuerpos y las del calórico sentían entre sí fuerzas repulsivas, con lo cual, al aumentar el calórico en un cuerpo o gas, este tendía a expandirse³². La teoría material del calor, basada en una física especulativa y conjetural, fue muy popular a finales del siglo XVIII y logró explicar de forma satisfactoria los principales fenómenos de la física y la química, tales como el calor latente, la expansión térmica, el calentamiento adiabático y el calor de las reacciones químicas³³.

Así pues, la teoría mecánica del calor representaba la línea divisoria con respecto a la «física antigua»³⁴, que no obstante compartía las mismas características de la física que Echegaray y Rojas proclamaban moderna: el tratamiento matemático de los fenómenos a partir de modelos mecánicos y la búsqueda de unidad. Sin embargo, antes de recurrir a la termodinámica como principal elemento diferenciador entre la física antigua y la moderna, había que dejar en claro que la termodinámica era el resultado exclusivo de una física teórica y ontológicamente mecánica.

³² Sobre el llamado *modelo estándar de los fluidos imponderables* de finales del siglo XVIII, véase J. HEILBRON, 1993.

³³ Al respecto, véase R. FOX, 1971, caps. 1 y 2.

³⁴ F. ROJAS, 1876, p. 14.

Tanto Echegaray como Rojas acudían a ejemplos cotidianos para explicar la naturaleza del calor y su capacidad de convertirse en trabajo. La teoría mecánica del calor y la idea de unidad eran fácilmente explicables a partir de unos ejemplos, aparentemente sencillos, corroborados experimentalmente. En primer lugar, era un hecho que el trabajo mecánico se podía convertir en calor, como mostraban, por ejemplo, los experimentos que el físico inglés James Prescott Joule (1818-1889) había realizado en la década de 1840 y que le habían valido ser considerado posteriormente como uno de los descubridores de la ley de la conservación de la energía³⁵. De igual forma, era evidente que el choque inelástico de dos cuerpos, por ejemplo cuando una bala se estrella contra una pared, producía calor. Precisamente con estos dos ejemplos Echegaray empezaba la exposición de la nueva ciencia del calor en su obra de divulgación:

El calor es un movimiento que los ojos no ven, pero que los sentidos, bajo una forma especial, perciben: por eso el calor se transforma en fuerza y movimiento, como sucede en las máquinas de vapor; y al contrario el movimiento y la fuerza desaparecen y se anulan, brotando en cambio cierta cantidad de calor que antes no existía, como sucede en los choques³⁶.

Por un lado, Joule había logrado medir con precisión la cantidad de calor que se convertía en trabajo en ciertos procesos mecánicos. Así, la unidad del calor, que en ese tiempo se denominaba *caloría* y expresaba la cantidad de calor requerida para elevar una determinada cantidad de materia a una temperatura concreta³⁷, era, según estos experimentos, equivalente a la unidad de trabajo, comúnmente llamada *kilográmetro*³⁸. El trabajo se definía como la cantidad de fuerza aplicada a un cuerpo multiplicada por la distancia que recorría el cuerpo debido a esta fuerza. El experimento de Joule demostraba que una caloría, multiplicada por un determinado factor, era equivalente a un kilográmetro. En otras palabras, era posible derivar de esta experiencia que la esencia del trabajo y la del calor eran la misma. Por extrapolación se podía entonces esclarecer y comprender la esencia o naturaleza del calor —ya que sería la misma que la del trabajo: materia en movimiento—, cuantificado bajo el concepto mecánico de *fuerza viva*. Así, el calor podía ser comprendido como un tipo de fuerza viva.

³⁵ Véase C. SMITH, 1998, pp. 70-73 y 79-81.

³⁶ J. ECHEGARAY, 1873, p. 23.

³⁷ En ese momento, una caloría se definía como la cantidad de calor necesaria para elevar la temperatura de un kilogramo de agua un grado centígrado, suponiendo que la cantidad de calor necesaria para aumentar un grado de temperatura era constante a lo largo de la escala de temperaturas para el agua en estado líquido.

³⁸ El término *kilográmetro* o *kilogramometro*, aunque erróneo en sentido estricto, era y sigue siendo utilizado, especialmente en el ámbito de la ingeniería, como unidad de trabajo. El error estriba en que el kilogramo no es una unidad de fuerza, sino de masa; lo correcto sería entonces denominarlo *newtonmetro*, lo que no es otra cosa que la actual *unidad de Joule o julio*.

Así pues, a partir de ejemplos concretos se lograba un discurso coherente y fácilmente asimilable de conceptos tan complejos y abstractos como la conservación de las fuerzas en la naturaleza a partir de su transformación, que se reducía a un cambio de movimiento de la materia. La capacidad explicativa del modelo mecánico aplicado al calor residía en su cercanía a fenómenos cotidianos y su inteligibilidad visual, a diferencia de lo que ocurría con el estudio mecánico de la luz. La suposición de que la fuerza viva de las partículas del éter se conservaba en el momento de reflejarse y refractarse era el punto de partida para el desarrollo matemático de la óptica mecánica, pero para demostrar la validez de esta hipótesis se tenía que realizar un complejo desarrollo matemático. La teoría mecánica de la luz no abarcaba procesos de conversión ni aportaba experimentos mecánicamente inteligibles que demostraran su conversión de un tipo de fuerza viva en otro.

Aunque la termodinámica cumplía un papel fundamental en la exposición de la física moderna en los discursos de Echegaray y Rojas, su verdadera posición dentro del campo de la física matemática no estaba tan clara. Dicho de otra forma, considerar la termodinámica como fruto exclusivo de la física matemática no era tan evidente. Estas cuestiones, que Echegaray evitaba sacar a la luz en su libro de divulgación, eran discutidas, no obstante, en escritos presentados ante la Real Academia de Ciencias de Madrid, o, posteriormente, a sus alumnos de la cátedra de Física Matemática³⁹. Parte del problema lo resumía el propio Echegaray frente a la Academia de Ciencias de Madrid, en 1894, de la siguiente manera:

En la hipótesis mecánica se funda toda la termo-dinámica, por más que se empeñen algunos autores ilustres en hacer de esta ciencia una ciencia puramente experimental. Lo es, a no dudarlo; pero si se prescinde de aquella hipótesis sencillísima que considera al calor como un movimiento vibratorio de la materia ponderable y del éter, haciendo que entre de este modo en la gran síntesis de la Física matemática, todas las fórmulas empleadas en dicha ciencia, por mucho que sea el talento de los autores, y los hay tan ilustres como Mr. Bertrand, serán fórmulas áridas y secas, traducción fría de resultados experimentales, sin luz que las ilumine, sin belleza científica, sin una imagen material, sea o no simbólica, en que la inteligencia repose y se recree. [...] Sin la experimentación, la ciencia carece de cimiento sólido. [...] Pero sin las grandes hipótesis mecánicas y sin la aplicación del análisis matemático, la ciencia no tendría más que cimientos y muros: ni columnatas, ni torres atrevidas, ni cresterías prodigiosas, ni todo lo que representa la aspiración a ganar alturas y horizontes y a cuajar de bellezas el espacio⁴⁰.

Este hecho era evidente: si no se partía de la base de que el calor era una forma de movimiento, como proponían algunos autores al decir que el desarrollo de la ter-

³⁹ Véase, en especial, J. ECHEGARAY, 1883, 1894 y 1905.

⁴⁰ J. ECHEGARAY, 1894, pp. 38-39. El personaje al que Echegaray hacía referencia era el matemático francés Joseph-Louis Bertrand (1822-1900).

modinámica era independiente de la naturaleza del calor⁴¹, el discurso de Echegaray se veía gravemente perjudicado en sus cimientos. En primer lugar, al eliminar el carácter mecánico del calor y dejar como pregunta abierta su naturaleza, la exposición de la termodinámica perdía las características que le permitían ser un excelente representante de la física matemática, y con ello se perdía una gran herramienta en el proceso de consolidar y promover esa rama de la física en España. Si la primera ley de la termodinámica se interpretaba como una constatación experimental que relacionaba el trabajo con el calor y la segunda como una ley axiomática que enunciaba un comportamiento irreversible de la naturaleza, ya no sería posible mostrar que sus grandes triunfos se derivaban de una ciencia teórica y todo el crédito se lo llevaría la ciencia experimental, y con ella los que se oponían a un tratamiento del estudio de la naturaleza basado en teorías generales o los que estaban a favor de aproximaciones fenomenológicas.

Además, presentar a la termodinámica como fruto de la física matemática implicaba asociar dos aproximaciones divergentes a los fenómenos físicos. Por un lado, se estaba recurriendo a la utilidad de la termodinámica como método para optimizar las máquinas térmicas; por otro, se ponía énfasis en su fundamento mecánico-hipotético. Esto era bastante peculiar porque la termodinámica, como herramienta conceptual de los ingenieros, se presentaba generalmente como una ciencia basada estrictamente en la experimentación, que no dependía en absoluto de hipótesis mecánicas y cuyas leyes se derivaban de hechos empíricos. La termodinámica no lograba penetrar en la intimidad de los fenómenos que estudiaba, se quedaba en relaciones globales de sistemas macroscópicos, siendo imposible la deducción teórica de sus principios y, por consiguiente, la predicción analítica de sus fenómenos.

Así pues, la única forma de vincular la física matemática con la termodinámica se basaba en su concepción mecánica, que le permitía vislumbrar un momento en que fuera posible conocer las velocidades y las masas de las partículas que componían los cuerpos y así aplicar las leyes de la mecánica a estos sistemas cuando recibían o perdían calor, es decir, cuando sus velocidades aumentaban o disminuían. En este sentido, Echegaray veía en la obra del físico alemán Rudolf Clausius los mayores avances, en lo que se llamaba *teoría cinética de los gases* y que calculaba la presión de un gas a partir de la velocidad media de sus partículas, pero esta teoría no era fructífera para dar cuenta de los fenómenos térmicos en los que se producía trabajo u otros efectos.

⁴¹ Macquorn Rankine (1820-1872), uno de los fundadores de la termodinámica, al referirse a ella en un artículo para la primera edición de la *Cyclopedia of the physical sciences*, editada por J. P. Nichol y publicada en 1857, afirmaba: «A pesar de que las hipótesis mecánicas [...] pueden ser útiles e interesantes como medio para anticipar leyes y para conectar la ciencia de la termodinámica con la de mecánica ordinaria, se debe recordar que la ciencia de la termodinámica no depende de ningún modo, para su certeza, de esa hipótesis o de ninguna otra, habiendo sido reducida esta ciencia a un sistema de principios o hechos generales que expresan estrictamente el resultado experimental de la relación entre el calor y la fuerza motriz». Citado en C. SMITH, 1998, p. 165 (la traducción es mía).

En un discurso presentado en la Real Academia de Ciencias de Madrid en 1883, el propio Echegaray reconocía una serie de obstáculos con que se había encontrado la ciencia del calor al tratar de recibir un tratamiento físico-matemático⁴². A partir de las leyes del movimiento vibratorio desarrolladas por Cauchy, argumentaba Echegaray, se podía dar un tratamiento físico-matemático a los fenómenos de la óptica, la acústica y la elasticidad, prediciendo analíticamente el comportamiento de estos, pero, al tratar de hacer lo mismo con fenómenos relacionados con el calor, por ejemplo con la dilatación de los cuerpos, el resultado era evidentemente contrario a la experimentación⁴³.

No obstante, el énfasis en que la termodinámica era una ciencia que emergía a partir de una especulación teórica caracterizada por hipótesis mecánicas se reflejaba claramente en el libro de texto escrito en 1868 por Echegaray. Este, en sus memorias, calificaba el texto de «obra de alta ciencia» que tenía como objeto «ir despertando estas aficiones matemáticas en España»:

La obra a que me refiero estaba inspirada en los trabajos más modernos, por entonces, del extranjero, y era materia desconocida en España y que no se enseñaba en ninguna parte, ni en Escuelas especiales, ni en Institutos; por de contado, ni en los libros de Física de entonces, ni en las Universidades tampoco aparecía⁴⁴.

A primera vista es un poco sorprendente que un ingeniero de caminos dedicado en ese momento a dar clases de Matemáticas en la Escuela Especial de Caminos de Madrid publicara un libro de texto sobre termodinámica. Y más aún que lo hiciera en un momento en que su enseñanza no estaba contemplada ni en las universidades ni en las escuelas especiales. En ese sentido, el *Tratado elemental de termodinámica*, más que aportar una herramienta de enseñanza para una materia inexistente en ese momento en España, otorgaba a Echegaray una prueba concreta para demostrar que era el poseedor fidedigno del conocimiento que divulgaba.

Para realizar su obra, Echegaray se había basado principalmente en los *Principios de termodinámica* (1865) del italiano Paolo Ballada, conde de Saint-Robert (1815-1888). Según el español, este texto era el que mejor aportaba «la claridad y el método que tan necesarios son en las obras didácticas»⁴⁵. En el libro de Saint-Robert se evitaba discutir la naturaleza del calor y se resaltaba que las leyes de la termodinámica eran el resultado exclusivo de observaciones experimentales⁴⁶.

⁴² Véase, en especial, J. ECHEGARAY, 1883, pp. 81-90.

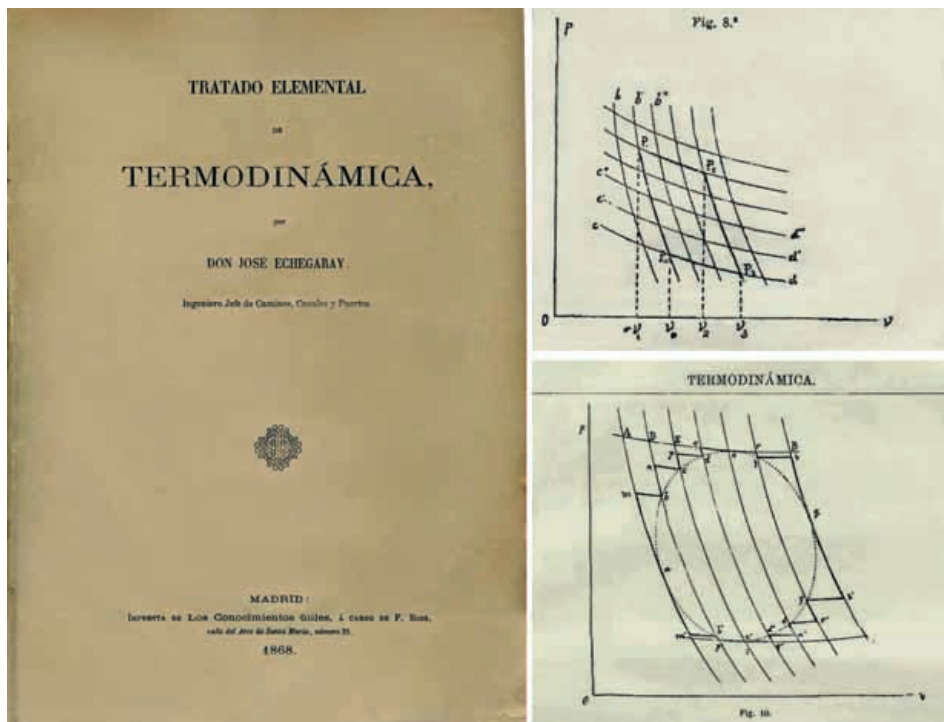
⁴³ En concreto, Echegaray se refería a un artículo publicado en *Comptes-Rendus* de la Academia de Ciencias francesa por el matemático Saint-Venant, que, al aplicar «la hipótesis ordinaria respecto a las fuerzas elásticas entre dos puntos, a saber: la de la proporcionalidad de aquella a las deformaciones, y la integral de los movimientos elementales en forma de seno o coseno, dan resultados, al aplicarlas a las vibraciones caloríficas, verdaderamente absurdos: aumento de temperatura sin aumento de volumen». *Ibíd.*, p. 83.

⁴⁴ J. ECHEGARAY, 1917, p. 289.

⁴⁵ J. ECHEGARAY, 1868, p. 13.

⁴⁶ He consultado la traducción al castellano: SAINT-ROBERT, 1882, p. 2.

No obstante, la posición de Echegaray era bastante diferente. Aunque al principio del libro no aseveraba la realidad de la naturaleza mecánica del calor, después de exponer en qué consistía el equivalente mecánico del calor describía esta ley (la rela-



13.1. José de Echegaray: Tratado elemental de Termodinámica, Madrid, 1868:

1) Usando diagramas presión-volumen define las «curvas térmicas de primera y de segunda clase», relativas a Q (adiabáticas) y relativas a t (isotermas). Apoyado en la fig. 8.a (p. 28), intenta demostrar el principio de la segunda ley de la termodinámica, basándose en los trabajos de William Thomson. Se representa una sustancia que realiza «un cuadrilátero» (ciclo): durante (P₀-P₁) sufre un aumento de presión, pero sin intercambio de calor (adiabático); (P₁-P₂) es una isoterma a temperatura t₁ (recibe calor); (P₂-P₃) representa una disminución de presión adiabática; y (P₃-P₀) es isoterma a temperatura t₀<t₁ (cede calor). Para este tipo de ciclo se puede demostrar que entre las cantidades de calor que recibe (Q₁) y entrega (Q₀) el cuerpo, existe una relación que solo depende de las temperaturas de las dos isotermas: $\frac{Q_1}{Q_0} = F(t_0, t_1)$;

2) En la fig. 10 (p. 33), a partir de lo anterior, Echegaray demuestra que la forma de la función de la temperatura es «independiente del agente físico que se emplee», pudiéndose expresar como:

$\frac{Q_1}{Q_0} = \frac{f(t_1)}{f(t_0)}$. Con el ciclo reversible de esta figura, Echegaray deduce el siguiente teorema: «Cuando

un cuerpo se pone en contacto con una serie de focos de calor a temperaturas diversas y de ellos recibe, o bien cede, cantidades de calor, si el cuerpo vuelve a su estado inicial, la suma de los cocientes que resultan de dividir cada cantidad de calor por una función constante, f, de la temperatura correspondiente, es igual a cero»: $\sum \frac{Q}{f(t)} = 0$.

ción constante entre calor y trabajo) como consecuencia de dos principios fundamentales y racionales: «la fuerza viva del universo es constante [y] el calor es una forma del movimiento; es el movimiento interno y molecular de la materia»⁴⁷.

Por lo anterior, puede decirse que este libro no era tan solo una obra didáctica destinada a enseñar el método para determinar el estado de equilibrio de un gas en las diferentes etapas de una máquina térmica y con ello predecir su capacidad de producir trabajo, sino también una definición personal de cómo Echegaray interpretaba la termodinámica: sus axiomas fundamentales *eran* dependientes de las hipótesis que explicaban la naturaleza del calor⁴⁸. En este sentido, su «libro de texto» era un apoyo, arropado matemáticamente, de su libro de divulgación de 1867; ambos se volvían inseparables. Cada uno se sustentaba en el otro y de forma conjunta construyeron un significado particular de la termodinámica y de la física matemática, y permitieron a su autor ser percibido en España como el representante legítimo de ellas. Como comentaba Echegaray en 1883, la termodinámica había conseguido ser una ciencia «de igual categoría y dignidad que la ciencia astronómica, que la Óptica o que la Acústica»⁴⁹, y, por lo tanto, era una fiel representante de la física matemática. A partir de esta definición epistemológica, la termodinámica adquiría la validez necesaria para ser utilizada como herramienta legitimadora de la física matemática y superaba para este fin, por la sencillez de su exposición —en la que se comprendían fácilmente los muy abstractos conceptos de conversión y conservación de los agentes naturales—, los ejemplos de la óptica y la acústica.

III

LA ENSEÑANZA DE LA TERMODINÁMICA

Los ingenieros Rojas, Vicuña y Echegaray abogaban por la creación de un espacio dentro de la enseñanza de la física en España que diera importancia a las teorías mecánicas en las que se basaba la explicación del mundo físico. Conocer la naturaleza del calor tenía que ser tan importante como el uso adecuado del termómetro. La base conceptual de estos ingenieros para poder describir y matematizar los fenóme-

⁴⁷ J. ECHEGARAY, 1868, p. 26.

⁴⁸ Es interesante ver cómo Peter M. Harman describe la posición que adoptó Clausius al respecto: «Cuando en 1850 Clausius estableció los fundamentos conceptuales de la termodinámica, advirtió que, si bien el principio de equivalencia del calor y el trabajo podía ser visto como conceptualmente inteligible si se suponía que el calor consistía en el movimiento de las partículas que constituían los cuerpos, él eludía considerar la naturaleza de los movimientos moleculares que daban lugar al fenómeno del calor y podían convertirse en trabajo mecánico. En vez de ello, formuló los axiomas de la termodinámica de manera independiente de las hipótesis acerca de la naturaleza de la materia». P. M. HARMAN, 1990, p. 156.

⁴⁹ J. ECHEGARAY, 1883, p. 89.

nos físicos se desprendía de un ejercicio especulativo en el que conceptos como los átomos o el éter eran fundamentales para articular las teorías mecánicas y a la vez eran presentados como entidades reales de la naturaleza.

En los libros de física de la época (segunda mitad del siglo XIX), que eran utilizados tanto en las universidades como en las escuelas especiales, la sección dedicada al calor hacía poca referencia a la naturaleza de este, y solo a modo de información. Lo importante de su estudio era la observación de las modificaciones que el calor ejercía sobre los cuerpos. En este sentido se estudiaba el uso del termómetro, la dilatación de los sólidos, los cambios de estado y la calorimetría; es decir, lo mismo que se venía estudiando desde inicios del siglo XIX. Libros como *Programa de un curso elemental de física*, de Venancio González y Juan Chávarri⁵⁰, se referían al calor como un fluido imponderable, y otros, como *Curso elemental de física experimental y aplicada*, de Bartolomé Feliú⁵¹, exponían las dos hipótesis sobre el calor —como fluido imponderable y como movimiento— haciendo notar que considerar el calor como movimiento vibratorio era la más aceptada por la mayoría de los sabios de aquel entonces. El contenido de las lecciones de estos libros de texto permitía que fuera indiferente en la práctica la forma de considerar la naturaleza del calor, ya que no se desprendía de ella ninguna modificación en el estudio de su contenido. Entre 1850 y 1870 la única diferencia al abordar la sección sobre el calor era la adición de un párrafo que reconocía a este agente como un tipo de movimiento vibratorio. Estos libros no tenían espacio para una explicación detallada de las hipótesis que sustentaban la comprensión de los fenómenos que describían: su labor culminaba justamente ahí, en la descripción de los efectos de los fenómenos. Los nuevos conocimientos y métodos que aportaba la ciencia de la termodinámica no formaban parte legítima de su contenido.

En el libro *Elementos de física experimental* (1882) del catedrático de Física de la Universidad de Cádiz Vicente Rubio y Díaz⁵² encontramos una posición interesante sobre la adopción de nuevas teorías, tales como la del calor. Al referirse a las dificultades de escribir un libro de física dedicado a la enseñanza, Rubio apuntaba:

Modernas teorías indican nuevo rumbo y preparan modificación radical: si se toman como base para la enseñanza, se rompe con el pasado, se produce una revolución (que ya se inicia pero que corresponde a otros de más vuelo) y se establece cierta solución de continuidad, pues quedan no pocos vacíos imposibles todavía de llenar. Si se

⁵⁰ V. GONZÁLEZ VALLEDOR y J. CHÁVARRI, 1851. Ambos eran catedráticos de Física de la Universidad Central de Madrid. Este libro fue catalogado como obligatorio en la enseñanza de la física en la universidad a partir de la Ley Moyano, en 1857. Al respecto, véase A. MORENO GONZÁLEZ, 1988, pp. 356-357.

⁵¹ B. FELIÚ, 1878. La primera edición es de 1870. Este libro fue utilizado como libro de texto en la asignatura de Ampliación de Física en las universidades de Madrid y Barcelona en la década de 1890. Véase al respecto A. MORENO GONZÁLEZ, 1988, pp. 504 y 510.

⁵² Este autor basaba el contenido de su texto en la experiencia que había adquirido como profesor de la cátedra de Ampliación de Física a lo largo de veintidós años en la Facultad de Ciencias de la Universidad de Cádiz. V. RUBIO, 1882, p. v.

prosigue la corriente ordinaria de la mayor parte de las obras que hoy se dedican a la instrucción de la juventud, se la priva de los adelantos modernos, se estanca en cierto modo la ciencia, y se expone el autor a la censura de esos espíritus inquietos (ilustrados, pero idólatras incondicionales de todo lo nuevo) que quieren introducir en los libros, aunque sean de tan poco valer como el presente, las novedades y excursiones teóricas, no siempre ciertas, y difíciles de modelar a veces, en un curso claro, concreto, reducido, sencillo y ordenado; es decir, en un libro propiamente didáctico⁵³.

La solución que ofrecía Rubio a la hora de realizar la labor docente era adoptar un «término medio prudencial», es decir, presentar los modos de ver comunes e indicar cuando fuera posible las nuevas teorías. De este modo, presentaba un libro de texto muy similar a los que hemos mencionado anteriormente pero con algunas adiciones que dejaba al criterio de los profesores incluir o no en sus clases. Los apartados opcionales los diferenciaba mediante un asterisco en el índice de la obra. En la sección dedicada al calor, las nociones de la teoría mecánica del calor se presentaban como uno de estos apartados, y al final del libro se adicionaba un apéndice que hablaba sobre la unidad de las fuerzas físicas. En esta sección, de carácter opcional, y de forma muy resumida, se presentaban las teorías que Rojas había dado a conocer en la RACAB, es decir, se hablaba de la conversión de las diferentes fuerzas y de si estas fuerzas eran reales o eran una expresión de la materia y el movimiento. Entre las obras que recomendaba el autor para una mayor comprensión del tema se encontraban los textos de Echegaray⁵⁴.

A diferencia de Rubio, los ingenieros Rojas, Vicuña y Echegaray ejercían un papel muy activo en la enseñanza de las nuevas teorías. En sus cátedras trataban de inculcar en sus alumnos la importancia de las hipótesis mecánicas, y en especial la idea de la unidad de las fuerzas físicas articuladas a través de los conceptos de átomos y éter, al contrario de lo que ocurría en los libros de texto que hemos mencionado. Por ejemplo, en la cátedra de Física Industrial en la Escuela de Barcelona, Rojas impartió los cursos de Aplicaciones del Calor y Aplicaciones de la Luz y la Electricidad entre 1880 y 1886. En el primero se explicaba a los futuros ingenieros cuestiones como la dilatación de los cuerpos, la combustión, etc., y su contenido era de carácter muy práctico. No obstante, Rojas prestaba especial atención a exponer la naturaleza del calor, presentándola como el movimiento vibratorio de los átomos de la materia y cuyo medio de propagación era el éter, resaltando que el calor era un fenómeno completamente análogo al de la luz o el sonido⁵⁵. En este texto, Rojas demostraba que la fuerza viva era una forma de trabajo y, por lo tanto, se lograba que el calor fuera considerado como una expresión de la fuerza viva en la medida que se convertía en trabajo. Rojas

⁵³ *Ibíd.*, p. vi.

⁵⁴ Rubio mencionaba el texto de divulgación de Echegaray *Teorías modernas de la física*.

⁵⁵ El contenido del curso de Aplicaciones del Calor impartido por Rojas en la Escuela de Barcelona se conoce gracias a que uno de sus alumnos, A. Sandaran, publicó los apuntes de clase de esta materia en 1885. F. ROJAS, 1885.

recurría al famoso experimento de Joule para demostrar que una determinada cantidad de trabajo se convertía en calor y hacía hincapié en que el movimiento de los cuerpos no aumentaba o disminuía sin que esto afectara al movimiento de otro cuerpo, explicando así lo que en otros contextos se denominaba *conservación de la energía*. Así pues, Rojas no solo se dedicaba a una exposición de los fenómenos que ocurrían con el calor, sino que basaba la acción de este en una hipótesis mecánica, dando gran importancia a la exposición de esta y aportando las ecuaciones necesarias para su manejo matemático.

Del mismo modo, Rojas aprovechó las páginas de la revista *La Electricidad*, de la cual era fundador y director, para difundir sus hipótesis mecánicas⁵⁶. En ella aparecieron una serie de artículos que luego se reunirían en el libro *Tratado de electrodinámica industrial* (1890), en el que el autor exponía los nuevos adelantos de la ciencia del electromagnetismo. De nuevo, Rojas resaltaba la importancia del éter como elemento fundamental en la «física moderna» y explicaba la energía magnética apoyándose en la conversión de la energía mecánica o fuerza viva en calor y extendiéndola a las múltiples transformaciones de los diferentes tipos de energía. En este punto se preguntaba: «Y en último análisis, ¿qué es la transformación de una energía a otra? Pues sencillamente un cambio de movimiento. Y he aquí cómo todo fenómeno físico o químico queda reducido a un fenómeno mecánico»⁵⁷. De este modo, Rojas promovía la visión de un mundo físico comprensible y explicable solo mediante los conceptos de materia y movimiento, evitando dar al concepto de energía el estatus de realidad objetiva.

Al igual que Echegaray, Rojas había apostado por una concepción del mundo físico que no necesitaba recurrir al concepto de energía, sino que basaba su inteligibilidad en la materia y el movimiento, y esto lo aplicaba decididamente en la docencia. La enseñanza de esta teoría era para Rojas parte esencial en el plan de estudios de la física en general y del calor en particular.

De modo sugerente, el énfasis en que la termodinámica había surgido a partir de la hipótesis mecánica del calor se reflejaba a la hora de explicar los ciclos termodinámicos que permitían analizar de forma matemática el desempeño de las máquinas térmicas. Aunque el libro de Rojas sobre la historia de la termodinámica podría ser catalogado en primera instancia como una obra de divulgación científica, buena parte de su contenido estaba dedicado a explicar en detalle los principios fundamentales que permitían aplicar las leyes de la termodinámica al estudio de los fenómenos térmicos y en particular al análisis de las máquinas térmicas. Esto hace suponer que, en sus cursos sobre Aplicaciones del Calor, Rojas recurría a su texto como complemento para la enseñanza de esta materia.

⁵⁶ Fue director de la revista, la primera en España sobre este tema, durante los ocho años de vida que tuvo, entre 1882 y 1889.

⁵⁷ *La Electricidad*, año III, n.º 2, 1885, p. 19.

El texto explicaba de forma general las cuestiones necesarias para poder analizar matemáticamente un ciclo térmico. El estado termodinámico de los cuerpos, la definición de líneas adiabáticas e isotérmicas y la ley de los gases perfectos eran los elementos fundamentales para poder entender el ciclo de Carnot, tal como Émile Clapeyron (1799-1864) había representado en una gráfica presión-volumen en 1834⁵⁸. Tanto Rojas como Echegaray partían del análisis del estudio analítico que había realizado el físico alemán Rudolf Clausius sobre los ciclos reversibles y que había permitido generalizar el principio de Sadi Carnot (1796-1832). Este ingeniero francés había publicado en 1824 el texto *Réflexions sur la puissance motrice du feu*, donde exponía una teoría que servía para establecer la eficiencia máxima de las máquinas térmicas en general⁵⁹. El argumento principal que daba Carnot para que se pudiera generar trabajo a partir de una máquina térmica era la necesidad de un flujo de calor que pasara de una temperatura alta a una inferior. Dada una misma cantidad de calor, cuanto mayor fuera la diferencia de temperaturas, mayor sería la cantidad de trabajo producido. Para que las máquinas no fueran ilimitadamente eficientes, Carnot situaba como límite el que fijaba una máquina perfectamente reversible en la que la capacidad motriz producida por una cantidad de calor cayendo de una temperatura a otra era exactamente la misma que se necesitaba para elevar la misma cantidad de calor a su temperatura inicial. Una mayor producción de trabajo significaría sacarlo de la nada.

La supuesta conservación del calor en los procesos descritos por Carnot era el gran problema con el que los nuevos científicos de la termodinámica se debían enfrentar al considerar los experimentos de Joule, que parecían demostrar que el calor no se *conservaba* sino que se *transformaba*. Cuando el calor produce trabajo, ¿se comporta como agua en un molino o como carbón que se consume? La solución la aportó Rudolf Clausius en su memoria *Über die bewegende Kraft der Wärme* (1850), al hacer notar que lo esencial en el principio de Carnot era la necesidad que tenía el calor de pasar de una temperatura mayor a una menor en la producción de trabajo en un proceso cíclico, y no el hecho de que este se conservara.

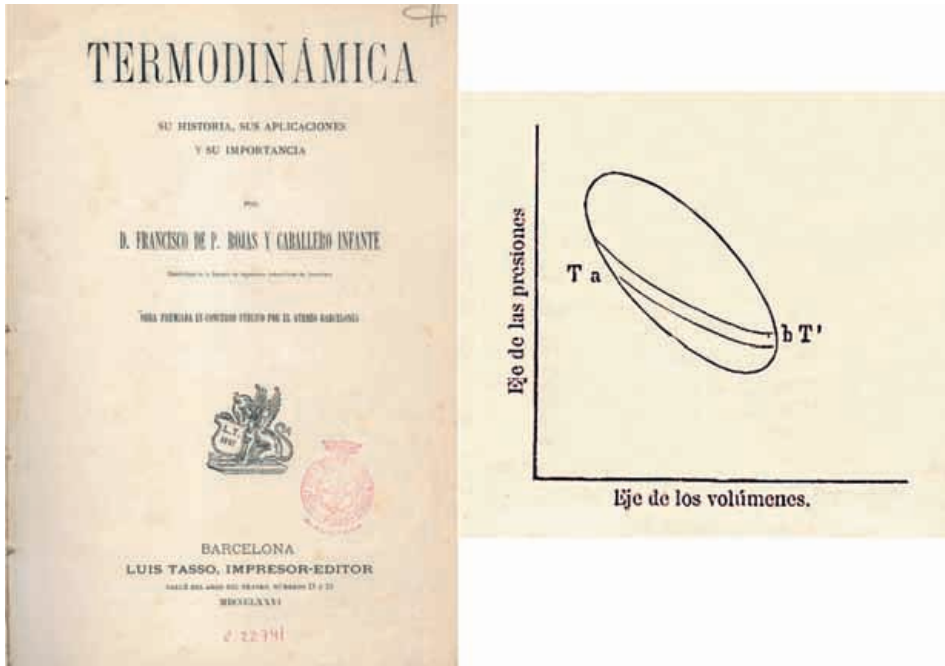
El ciclo de Carnot, que aparecía en los textos de Rojas, Echegaray y Vicuña, era explicado verbalmente por el primero de la siguiente manera:

El cuerpo sale de su estado inicial a para recorrer una línea isotérmica a la temperatura constante T , y durante ella recibe una cantidad de calor Q . Después recorre una línea adiabática en la cual ni recibe ni cede calor alguno. Después recorre una línea isotérmica a la temperatura constante T' , inferior a T , y durante ella el cuerpo cede una cantidad de calor Q' . Después recorre una línea adiabática durante la cual ni recibe ni cede el cuerpo calor alguno, y vuelve al estado inicial a . La evolución es pues un ciclo⁶⁰.

⁵⁸ La versión gráfica del ciclo de Carnot elaborada por Clapeyron fue la fuente por la que físicos como William Thomson y Rudolf Clausius conocieron las ideas de Carnot y a partir de las cuales desarrollaron la ciencia de la termodinámica. Al respecto, véase P. M. HARMAN, 1990, cap. 3.

⁵⁹ S. CARNOT, 1824.

⁶⁰ F. ROJAS, 1876, p. 53.



13.2. Francisco de Paula Rojas: Termodinámica. Su historia, sus aplicaciones y su importancia, Barcelona, Luis Tasso, 1876: Junto con los textos de Echegaray (1868) y el de Gumerindo de Vicuña (1872) forma parte del trío fundamental en la introducción de la termodinámica en España. Con el ciclo en la figura (pág. 68), Rojas explica la generalización del principio de Carnot (segunda ley de la termodinámica) debida a Clausius. Se representa un ciclo reversible en el que se han señalado dos líneas adiabáticas infinitamente próximas (**a** y **b**). T es la temperatura absoluta del cuerpo que corresponde al trayecto **a**, y T' es la temperatura absoluta del cuerpo que corresponde al trayecto **b**. Si dQ es la cantidad infinitesimal de calor que recibe el cuerpo en el trayecto **a**, y dQ' es la cantidad infinitesimal de calor que el cuerpo cede en el trayecto **b**, Clausius demuestra que $\int \frac{dQ}{T} = 0$.

Tal como lo expresaba Rojas, por una feliz coincidencia, Carnot había logrado sentar un principio verdadero aunque pensara que Q era igual a Q' , esto es, que la cantidad de calor transportada durante el ciclo no disminuía. Esta diferencia de calor ($Q - Q'$) era equivalente al trabajo externo hecho por el cuerpo, y suponerla igual significaba admitir la creación de energía (en forma de trabajo) a partir de la nada. Rojas y Echegaray destacaban que la hipótesis mecánica del calor era un hecho científico que había permitido el desarrollo matemático del ciclo de Carnot.

BIBLIOGRAFÍA

- BERTOMEU SÁNCHEZ, José Ramón, *et al.* (eds.): «Textbooks in the scientific periphery», *Science & Education*, n.º especial, 15 (7-8) (2006), pp. 657-880.
- BERTRAND, Joseph-Louis: *Thermodynamique*, París, Gauthier-Villars, 1887.
- BEVILACQUA, Fabio: «Helmholtz's Über die Erhaltung der Kraft», en D. Cahan (ed.): *Hermann von Helmholtz and the foundations of nineteenth-century science*, Berkeley, University of California Press, 1993, pp. 291-333.
- CARNOT, Sadi: *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance*, París, Chez Bachelier, 1824.
- CLAUSIUS, Rudolf: «Über verschiedene für die Anwendung bequeme Formen der Hauptgleichungen der mechanischen Wärmetheorie», *Annalen der Physik und Chemie*, 125 (1865), pp. 353-400.
- DAELE, Wolfgang van der, y Wolfgang KROHN: «Science in a crisis of legitimation», en W. Schäfer (ed.): *Finalization in science: the social orientation of scientific progress*, Dordrecht, D. Reidel, 1983.
- Diccionario enciclopédico hispano-americano de literatura, ciencias y artes*, Barcelona, Montaner y Simón, 1897, t. xx.
- ECHEGARAY, José: «Sobre la reforma de la Facultad de Ciencias y de las Escuelas Especiales», *Revista de Obras Públicas*, t. xiv (1866), pp. 261-265.
- *Tratado elemental de termodinámica*, Madrid, Imprenta de los Conocimientos Útiles, 1868.
- *Teorías modernas de la física: unidad de las fuerzas materiales*, Madrid, Imprenta y Estereotipia de M. Rivadeneyra, 1873.
- «Contestación al discurso “Relaciones principales entre las teorías matemáticas de la física” de Gumersindo Vicuña», en *Discursos leídos ante la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, Madrid, Imprenta de la Viuda e Hijo de D. Eusebio Aguado, 1883.
- «Contestación al discurso “Algunas reflexiones sobre la unidad de las fuerzas físicas” de Francisco de Paula Rojas», en *Discursos leídos ante la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, Madrid, Imprenta de Luis Aguado, 1894.
- «Discurso leído en la Universidad Central en la solemne inauguración del curso académico de 1905 a 1906. La ciencia y la crítica», 1905, reprod. en J. Sánchez Ron, 1990a, pp. 275-346.
- *Recuerdos*, Madrid, s. n., 1917.
- FELIÚ, Bartolomé: *Curso elemental de física experimental y aplicada*, Madrid, Imprenta de la Viuda e Hijo de D. Eusebio Aguado, 1878, 4.ª ed.
- FOX, Robert: *The caloric theory of gases: from Lavoisier to Regnault*, Londres, Oxford UP, 1971.
- GARRABOU, Ramon: *Engyners industrials, modernització econòmica i burgesia a Catalunya (1850 – inicis del segle xx)*, Barcelona, L'Avenç, 1982.

- GOLINSKI, Jan: *Science as public culture: chemistry and enlightenment in Britain, 1760-1820*, Cambridge UP, 1992.
- GONZÁLEZ VALLEDOR, Venancio, y Juan CHÁVARRI: *Programa de un curso elemental de física y nociones de química*, Madrid, Imprenta del Colegio de Sordomudos y de Ciegos, 1851, 2.^a ed.
- HARMAN, P. M.: *Energía, fuerza y materia. El desarrollo conceptual de la física del siglo XIX*, Madrid, Alianza, 1990.
- HEILBRON, John: *Weighing imponderables and other quantitative science around 1800*, Berkeley, University of California Press, 1993.
- KUHN, Thomas: *La estructura de las revoluciones científicas*, México, FCE, 1971.
- LOZANO Y PONCE DE LEÓN, Eduardo: *Elementos de termodinámica*, Barcelona, J. Roma, 1899.
- LUSA, Guillermo: «Alarma en Barcelona: el traslado a Madrid de la Escuela de Ingenieros Industriales (1881)», *Quaderns d'Història de l'Enginyeria*, vol. 2 (1997), pp. 119-190.
- «La Escuela de Ingenieros Industriales de Barcelona», en M. Silva Suárez (ed.): *Técnica e ingeniería en España*, vol. v: *El Ochocientos. Profesiones e instituciones civiles*, Zaragoza, Real Academia de Ingeniería / Institución «Fernando el Católico» / Prensas Universitarias de Zaragoza, 2007, cap. 6, pp. 351-394.
- MORENO GONZÁLEZ, Antonio: *Una ciencia en cuarentena. Sobre la física en la universidad y otras instituciones académicas desde la Ilustración hasta la crisis finisecular del XIX*, Madrid, CSIC, 1988.
- MOYA CÁRCCEL, Teodoro: *La enseñanza de las ciencias: los orígenes de las facultades de ciencias en la universidad española*, tesis doctoral, Universidad de Valencia, 1992.
- NYE, Mary Jo: *From chemical philosophy to theoretical chemistry: dynamics of matter and dynamics of disciplines, 1800-1950*, Berkeley, University of California Press, 1993.
- PESET, José Luis, et al.: *Ciencias y enseñanza en la revolución burguesa*, Madrid, Siglo XXI, 1978.
- POHL, Stefan: *La «circulación» de la energía. Una historia cultural de la termodinámica en la España de la segunda mitad del siglo XIX*, tesis doctoral, Universidad Autónoma de Barcelona, 2007.
- ROJAS, Francisco: *Termodinámica: su historia, sus aplicaciones y su importancia*, Barcelona, Establecimiento Tipográfico de Luis Tasso, 1876.
- *El problema físico y el problema químico se resolverán en el mecánico. Memoria presentada ante la Real Academia de Ciencias de Barcelona*, 1877, ms., RACAB, 82.2 (CF. 28).
- *Aplicaciones del calor: lecciones explicadas en la Escuela de Ingenieros Industriales de Barcelona*, Barcelona, Tip. La Academia de Evaristo Ullastres, 1885.
- «Algunas reflexiones sobre la unidad de las fuerzas físicas», en *Discursos leídos ante la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, Madrid, Imprenta de Luis Aguado, 1894, pp. 1-24.

- RUBIO Y DÍAZ, Vicente: *Elementos de física experimental*, Cádiz, Imprenta de la Revista Médica, 1882.
- SAINT-ROBERT, Paul: *Principios de termodinámica*, Madrid, Imprenta de Pedro Abienzo, 1882.
- SÁNCHEZ RON, José Manuel: *José Echegaray: matemático y físico-matemático*, Madrid, Biblioteca de la Ciencia Española, 1990a.
- «La física matemática en España: de Echegaray a Rey Pastor», *Arbor*, 135 (532) (1990b), pp. 9-59.
- «Las ciencias físico-matemáticas en la España del siglo XIX», en J. M.^a López Piñero (ed.): *La ciencia en la España del siglo XIX*, Madrid, Ayer, 1992, pp. 51-84.
- SMITH, Crosbie: *The science of energy: a cultural history of energy physics in Victorian Britain*, The University of Chicago Press, 1998.
- VICUÑA, Gumersindo: *Teoría y cálculo de las máquinas de vapor y gas con arreglo a la termodinámica*, Madrid, Manuel Tello, 1872.
- «Concepto y clasificación de las ciencias físico-matemáticas», *Revista de la Universidad de Madrid*, 2.^a ép., II (1873), pp. 125-146.
- *Discurso leído en la Universidad Central en el acto de la apertura del curso académico de 1875 a 1876*, Madrid, Imprenta de José M. Ducazcal, 1875.
- «Relaciones principales entre las teorías matemáticas de la física», en *Discursos leídos ante la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, Madrid, Imprenta de la Viuda e Hijo de D. Eusebio Aguado, 1883.