

(1983), Berkeley (1986), Kyoto (1990) y Zürich (1994). Y por ellos fueron pasando los matemáticos más importantes de este siglo.

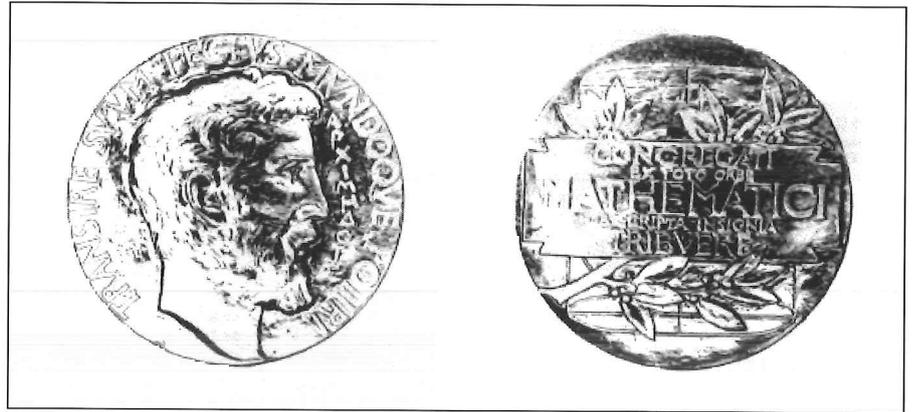
## LAS MEDALLAS FIELDS

Las Medallas Internacionales para premiar descubrimientos extraordinarios en matemáticas (conocidas como medallas Fields: J.C. Fields, Profesor de la Universidad de Toronto, organizó el Congreso de 1924 y consiguió una financiación para el Congreso que hizo que terminara con superavit siendo éste el origen de los fondos que dieron lugar a las Medallas), se entregan en los ICM a partir de 1936 (incluido). En la Constitución fundacional de dichos Premios no figura ninguna restricción sobre la edad de los candidatos, pero las Medallas se han otorgado, tradicionalmente como Premio a matemáticos con menos de cuarenta años, para así servirles de estímulo a su futuro trabajo investigador.

Las primeras se otorgaron en el ICM de Oslo (1936), constituyendo, a partir de entonces por su importancia, un equivalente en matemáticas de los Premios Nobel —la explicación muy extendida de por qué no hay Premios Nobel de Matemáticas se debe al enfrentamiento de Alfred Nobel con el matemático Mittag-Leffler.

La relación de matemáticos que han recibido las Medallas Fields es la siguiente:

- 1936: Lars V. Ahlfors, Jesse Douglas.
- 1950: Laurent Schwartz, Atle Selberg.
- 1954: Kunihiko Kodaira, Jean-Pierre Serre.
- 1958: Klaus F. Roth, René Thom.
- 1962: Lars Hörmander, John W. Milnor.
- 1966: Michael F. Atiyah, Paul J. Cohen, Alexander Grothendieck, Stephen Smale.
- 1970: Alan Baker, Heisuke Hironaka, Sergei P. Novikov, John G. Thompson.



Medallas Field

- 1974: Enrico Bombieri, David B. Mumford.
- 1978: Pierre R. Deligne, Charles F. Fefferman, Grigori A. Margulis, Daniel G. Quillen.
- 1982: Alan Connes, William P. Thurston, Shing-Tung Yau.
- 1986: Simon K. Donaldson, Gerd Faltings, Michael H. Freedman.
- 1990: Vladimir G. Drinfeld, Vaughan F. R. Jones, Shigefumi Mori, Edward Witten.
- 1994: Jean Bourgain, Pierre-Louis Lions, Jean-Christophe Yoccoz, Efim Zelmanov.

José Antonio Bujalance García  
Depto. de Matemáticas Fundamentales

## EFEMÉRIDES

**1647:** El 25 de octubre muere en Florencia Evangelista Torricelli, a la edad de 39 años. Torricelli fue discípulo directo de Galileo, al que acompañó durante los últimos meses de su vida. Más tarde le sucedió como matemático de la Academia Fiorentina. Aunque se dedicó con preferencia a las matemáticas, su nombre está vinculado para siempre a sus experimentos sobre el vacío y la presión atmosférica. Frente al supuesto «horror al vacío» de la Naturaleza, Torricelli, tras Galileo, comprendió que era la presión debida al «peso del aire» la que hacía ascender los fluidos por las tuberías de los sifones y, por la misma razón, limitaba la altura de la subida. De ahí nació el barómetro. Un año más tarde de la muerte de Torricelli, las experiencias de Périer en el Puy de Dome confirmaron el descenso de la presión con la altura.

**1747:** Georg W. Richmann (1711-1753) establece la ley que da la temperatura de equilibrio para la

mezcla de dos masas de una misma sustancia con diferentes temperaturas iniciales.

**1797:** El 17 de diciembre nace en Albany (N.Y.) Joseph Henry, uno de los primeros grandes físicos norteamericanos. Henry descubrió la autoinducción en 1832, independientemente de Faraday; en su honor, la unidad de inductancia se denomina henrio. Henry fue consejero de Lincoln durante la Guerra Civil, fundador y Presidente de la Academia Nacional de Ciencias, y sentó las bases del futuro Servicio Meteorológico de los Estados Unidos. Murió en Washington el 13 de mayo de 1878.

**1847:** Julius Plucker (1801-1868) descubre que un cristal uniaxial colocado entre los polos de un imán se orienta de modo que su eje óptico queda en posición transversal. Esto constituyó una prueba más de la relación entre fenómenos magnéticos y ópticos que había conjeturado Faraday.

**1847:** Hermann von Helmholtz (1821-1894) publica su célebre ensayo «Sobre la conservación de la Fuerza» («Über die Erhaltung der Kraft»). Tras deducir el principio de conservación de la energía mecánica para sistemas de cuerpos sometidos a fuerzas centrales, Helmholtz especula con la idea de que semejante principio puede incluir también fenómenos eléctricos, térmicos, etc. Aunque la formulación matemática no era excesivamente rigurosa, las ideas contenidas en dicho ensayo ejercieron una gran influencia y constituyeron un paso decisivo hacia la formulación rigurosa de la Primera Ley de la Termodinámica.

**1847:** El industrial cervecero y físico amateur James Prescott Joule (1818-1889) pronuncia en la Capilla de St. John, en Manchester, su única conferencia pública con el título «Sobre la materia, la fuerza viva y el calor» («On the matter, living force, and heat»). Esta conferencia se publicó pocos días después en un periódico local, el *Manchester Courier*. En su artículo Joule resumía el resultado de sus experimentos sobre la equivalencia entre calor y otras formas de energía: «Siempre que se consume fuerza viva se crea una cantidad equivalente de calor». El trabajo de Joule estableció, sobre una sólida base experimental, el

principio de conservación de la energía.

**1847:** Gustav R. Kirchhoff (1824-1887) establece las leyes que hoy llevan su nombre sobre el reparto de las intensidades de corriente en una malla constituida por varios conductores.

**1847:** Hyppolite Fizeau y Léon Foucault ponen de manifiesto la interferencia del «calor radiante». Se confirmaba así que el calor radiante se transmitía en forma de ondas.

**1847:** El 11 de febrero de 1847 nace Thomas A. Edison. Edison es un personaje algo incómodo en la Historia de la Ciencia y la Tecnología. Sus inventos transformaron indudablemente la sociedad pero sus relaciones con la ciencia básica y con los físicos fueron prácticamente inexistentes, cuando no tensas. Por otra parte, mostró una absoluta carencia de escrúpulos para defender sus patentes incluso si, en bastantes ocasiones, eran de dudosa prioridad. Se dice que el Comité Nobel trató de que Edison y su gran rival Nicola Tesla compartieran un Premio Nobel, pero los intentos cesaron ante la terminante negativa de éste último.

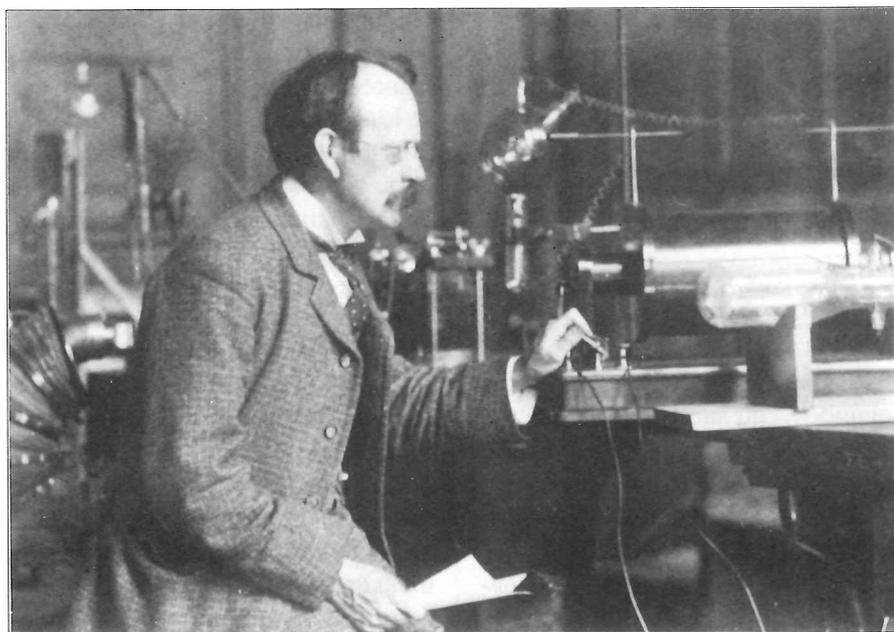
**1897:** A finales de 1896, el físico holandés Pieter Zeeman descubre el desdoblamiento de las rayas espectrales del Na debido a la presencia



*Gustav R. Kirchhoff.*

de un campo magnético. (Un experimento similar ya había sido realizado en 1862 por Faraday aunque sin éxito). Meses más tarde, Hendrik A. Lorentz (1853-1928) explica este fenómeno suponiendo que los electrones son constituyentes fundamentales de la materia. La explicación más detallada de este fenómeno, así como la del efecto Zeeman anómalo, descubierto posteriormente, jugó un papel importante en el desarrollo de la teoría cuántica.

**1897:** Joseph J. Thomson (1856-1940) mide la carga específica del electrón. Aunque su método, consistente en neutralizar las desviaciones producidas por un campo eléctrico y un campo magnético cruzados, es hoy un tema estándar en los libros de Física General, el experimento no estaba exento de dificultades. Poco antes, Hertz no había podido poner de manifiesto la acción de un campo eléctrico sobre los rayos catódicos. La razón era que el vacío creado dentro del tubo de rayos catódicos era insuficiente, de modo que los electrones ionizaban los átomos del gas residual y los iones se depositaban en los electrodos neutralizando el campo interno. Sólo con condiciones de vacío más extremas pudo hacerse una buena medición. Thomson no pudo obtener un valor completamente exacto pero sí fue capaz de demostrar que su orden de magnitud era más de mil veces mayor que los valores que se obtenían para la transferencia de



*Joseph J. Thomson realizando una experiencia de cátedra en 1897.*

carga y masa en medidas electrolíticas, que hoy sabemos son debidas a transferencia de iones  $H^+$ .

**1897:** El 12 de septiembre nace Irene Curie, hija de Pierre y Marie Curie. Junto con su marido, Frederic Joliot-Curie, descubrió la radiactividad artificial, por lo que recibieron el Premio Nobel de Química en 1935. Al margen de su actividad investigadora, Irene Curie nunca rehuyó las causas humanitarias ni los compromisos sociales. Con su madre creó los primeros equipos radiológicos móviles con los que recorrieron los frentes de batalla durante la I Guerra Mundial. Más adelante, fue miembro del Comité de Vigilancia de Intelectuales Antifascistas y, en 1936, formó parte del gobierno del Frente Popular. Como Subsecretaria de Investigación Científica sentó las bases del futuro Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) francés. Murió de leucemia en 1956.

**1947:** Del 1 al 4 de junio se celebra en Shelter Island (USA) la Conferencia sobre Fundamentos de la Mecánica Cuántica, que ha sido calificada como la conferencia de Física más importante del siglo XX tras la Conferencia Solvay de 1930. Finalizada la Segunda Guerra Mundial, la mayoría de los físicos que habían estado trabajando en proyectos bélicos buscaban la vuelta a la física básica aunque con ayuda de las nuevas herramientas que se habían desarrollado durante los años de guerra (especialmente la tecnología de microondas). La Conferencia estuvo marcada por la reciente medida realizada por Willis Lamb y Robert Retherford de una diferencia de energía, correspondiente a aproximadamente 1000 MHz, entre los niveles  $2S_{1/2}$  y  $2P_{1/2}$  del hidrógeno, contrariamente a las predicciones de la teoría de Dirac. Días más tarde, Hans Bethe hizo una primera estimación teórica suponiendo que esta diferencia era debida a la interacción del electrón con su propio campo. En cualquier caso, esta interacción daba lugar a una energía infinita, aunque la dife-

rencia de infinitos para los niveles  $2S$  y  $2P$  daba un valor finito. El cálculo más detallado de este fenómeno y otros relacionados dio lugar al desarrollo de la teoría cuántica de campos relativista y las técnicas de renormalización asociadas.

**1947:** El 7 de junio muere Philip Lenard, descubridor en 1900 de la ley del efecto fotoeléctrico que relaciona la energía de los electrones expulsados de un metal con la frecuencia de la luz incidente. Lenard recibió el Premio Nobel en 1905, el mismo año en que Einstein daba una explicación teórica basada en la cuantificación de la radiación electromagnética. Los nombres de Lenard y Einstein aparecen también relacionados por motivos más desagradables. Aparte de sus indudables méritos como físico experimental, Lenard se hizo desgraciadamente famoso por sus posturas ultranacionalistas y antisemitas. Fue uno de los primeros en atacar la «física judía» de Einstein. Con la subida al poder de los nazis, Lenard fue asesor de Hitler y colaboró en la purga de los físicos de origen judío.

**1947:** El 4 de octubre muere Max Planck, uno de los físicos que marcó la ciencia del siglo XX. Su nombre está asociado definitivamente a la ley de radiación del cuerpo negro que abrió el camino a la teoría cuántica. Sin embargo, dicha ley era una consecuencia de sus trabajos fundamentales sobre termodinámica y, en especial, sobre la fundamentación de la segunda ley. Precisamente, su fundamental tratado sobre termodinámica se publicó por primera vez en 1897, hace ahora cien años.

### SADI CARNOT

El pasado año se cumplía el segundo centenario del nacimiento de Sadi Carnot, uno de los fundadores de la Termodinámica. Sería bastante iluso esperar que tal efemérides hubiese merecido siquiera algunas líneas en la prensa ordinaria. Más extraño, sin embargo, es la poca atención que se le ha prestado

en la mayoría de las revistas especializadas. Aunque ya con cierto retraso, en estas páginas queremos recordar la historia y la contribución, sin duda bastante singulares, de esta figura de la Ciencia.

Nicolas Leonard Sadi Carnot nació en París el 1 de junio de 1796. Su nombre, no muy habitual, es el de un poeta sufí del siglo XI que al parecer gozaba de gran popularidad en esa época en los círculos literarios parisinos. De hecho, el padre de Sadi, Lazare Carnot, era un hombre polifacético cuya afición por la poesía le había valido incluso algún premio. Cuando Sadi nació, Lazare era uno de los miembros del Directorio que dirigió la política francesa entre 1795 y 1799, tras el golpe termidoriano que acabó con el Comité de Salvación Pública. Lazare también había formado parte de dicho Comité en compañía de Robespierre y Saint Just aunque, como resulta evidente, tuvo mejor suerte que éstos. En realidad, su labor como organizador del ejército republicano le mantenía normalmente alejado de París, lo que le permitió desmarcarse de los excesos de la época del Terror. Esta labor le valdría muchos años más tarde, durante la Tercera República, el título de Organizador de la Victoria y el que sus restos fueran trasladados al Panteón de París, a lo que seguramente tampoco era ajeno el hecho de que, para entonces, su nieto, otro Sadi Carnot, fuera Presidente de la República francesa.

Las vicisitudes de la Francia post-revolucionaria marcarían en parte la vida de los Carnot. En 1895 Lazare había sido uno de los fundadores de la famosa École Polytechnique que, en 1804, con las reformas napoleónicas, pasó a depender del Ejército. Allí enseñaron nombres ilustres de la ciencia francesa como Ampère, Poisson o Arago. Sadi ingresó en la École en 1812 y, en 1815, terminados sus estudios, fue destinado como teniente a Metz. Sin embargo, ahora comenzaba una mala época para los Carnot. Lazare, en otro tiempo opuesto a dar poderes absolutos a Napoleón, había

acabado siendo Ministro del Interior durante los Cien Días, por lo que, tras la derrota de Waterloo, tuvo que exilarse a Magdeburgo. Las nuevas autoridades de la monarquía restaurada no parecían ver con buenos ojos la carrera de un hijo suyo en el Ejército. Ya fuera por esto o por una falta de interés real por la vida militar, el caso es que Sadi Carnot pidió el traslado a un puesto no muy importante en París que le dejaba tiempo para dedicarse a sus intereses intelectuales hasta que, en 1828, abandonó definitivamente el Ejército. Parece ser que en 1830, tras la Revolución de julio, se le ofreció un puesto en el Senado pero lo rechazó. En cualquier caso, poco hubiese podido hacer ya que el cólera acabó con su vida el 24 de agosto de 1832, cuando Sadi apenas tenía 36 años.

Además de poeta diletante y político, Lazare Carnot había sido un prestigioso ingeniero cuyos trabajos sobre mecánica tuvieron gran repercusión en el desarrollo de la física francesa. A diferencia de la tradición puramente racionalista de d'Alembert, Lazare creía que la mecánica debía basarse en la experiencia. La base fundamental de su mecánica era la transmisión del movimiento de unos cuerpos a otros. Lazare Carnot introdujo la noción de «momento de actividad», que corresponde a lo que hoy día llamamos, siguiendo a Coriolis, trabajo mecánico. Esto le sirvió para estudiar la mejora de las máquinas que trataban de aprovechar, o mejor transmitir, la potencia motriz de agentes mecánicos como el aire, el agua, etc. Según él, el mayor rendimiento se conseguiría cuanto menor fuera el trabajo mecánico realizado por las partes de la máquina sobre el agente motriz.

Sadi Carnot heredó parte de los intereses científicos de su padre. Sin embargo, en su época otro tipo de máquinas estaba revolucionando la industria y el transporte: se trataba de las máquinas de vapor nacidas en Inglaterra. Con visión fácilmente profética, Sadi afirmaba que tales máquinas «estaban destinadas a producir una revolución en el



*Sadi Carnot.*

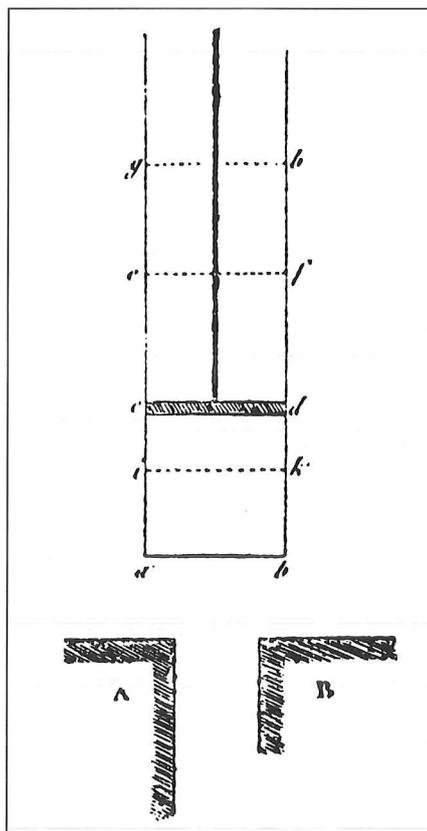
mundo civilizado... Si algún día se llega a perfeccionar tanto la máquina de fuego que resulte poco costosa en su instalación y combustible, reunirá todas las cualidades deseables y hará tomar a las artes industriales una pujanza cuya amplitud sería imposible prever». Además, «la navegación debida a las máquinas de fuego aproxima las naciones más lejanas. Tiende a reunir los pueblos de la Tierra, como si todos habitaran en una misma comarca». (Como se ve, la aldea global ya estaba en marcha.)

Estas consideraciones abrían un pequeño opúsculo de poco más de cien páginas publicado en 1824 con el título de «Reflexiones sobre la potencia motriz del fuego y sobre las máquinas adecuadas para desarrollar esta potencia». A esto se reduce la obra publicada en vida de Carnot. Pese a todo, estas breves páginas, con ideas equívocas, cuando no claramente erróneas, pero también con intuiciones geniales, iban a asegurarle un lugar en la Historia de la Física.

Sin embargo, el camino de la memoria de Carnot hasta el lugar que hoy ocupa en los libros de Historia fue bastante azaroso. Aparte de un breve elogio en el momento de su publicación, su trabajo pasó prácticamente desapercibido durante el periodo comprendido entre la publicación y la muerte de su

autor. Quizá el propio Carnot tuvo parte de la culpa. Si a los soldados el valor se le supone, más debe suponersele a Carnot un conocimiento profundo de las matemáticas siendo además alumno de la École Polytechnique. Por eso, resulta bastante extraño que Carnot decidiese escribir su libro en lenguaje llano. (Tan sólo en una nota a pie de página utiliza Carnot algo de matemáticas que, por otra parte, sólo requieren algunas nociones de cálculo infinitesimal elemental.) Se dice que Sadi dio a leer el manuscrito a su hermano Hippolyte, lego en estas cuestiones, y que sólo lo dio a la imprenta cuando éste le aseguró que era perfectamente comprensible. No hay por qué dudar de la sinceridad de Hippolyte. Probablemente quería decir que las palabras se entendían pero su propio desconocimiento del tema le impedía ver la enorme cantidad de equívocos a que estas palabras se prestaban. Pese a todo, la comparación que hizo Truesdell de Carnot con Heráclito el Oscuro parece algo exagerada.

Es posible que Carnot eligiese esta forma de presentación para que su trabajo llegara a los constructores de máquinas (el mismo aparece mencionado como «constructor de máquinas» en un libro posterior sobre la historia de la École). De hecho, en las últimas páginas de su ensayo se contienen varias recomendaciones valiosas para mejorar en la práctica el rendimiento de las máquinas de vapor. Esto se conseguiría aumentando la diferencia de temperaturas entre la caldera y el condensador; con los combustibles disponibles podía llegarse a 1000 grados de diferencia frente a los 140 grados que se aprovechaban en las máquinas habituales. Por la misma razón, eran preferibles las máquinas que trabajaban a alta presión y las máquinas de dos cilindros que permitían una mayor expansión. También eran preferibles las máquinas que trabajasen con fluidos gaseosos, que son muy compresibles, a las que operaban con líquidos. Pese a todo, durante los 10



Ilustraciones de la edición original (1824) del libro de Sadi Carnot.

años siguientes a la publicación del libro tan sólo Franchot y algún otro ingeniero lo leyó, aunque sin muchas consecuencias.

Afortunadamente, en 1834, el libro cayó en manos de Emile Clapeyron, un ingeniero que durante diez años había sido profesor de matemáticas en San Petersburgo. Clapeyron encontró muy interesantes las ideas de Carnot aunque deploró la pobreza matemática de la exposición y decidió remediarla. Si bien Clapeyron no aportó ninguna idea original, su terminología y su introducción de los diagramas P-V (aunque ya Watt había utilizado una versión rudimentaria) han marcado el estilo habitual de los textos de termodinámica. Sin embargo, el artículo de Clapeyron tampoco tuvo su público en Francia. Una traducción inglesa fue publicada en 1837 en las *Scientific Memoirs* de Taylor, y fue aquí donde lo leyó William Thompson (el futuro Lord Kelvin) quien, en 1848, propuso una definición de temperatura absoluta basada en estas ideas. Un año más tarde, Thompson logró hacerse con la obra

original de Carnot e hizo una exposición detallada de la misma, ampliada con nuevos cálculos. Asimismo, Carl Holtzmann y Rudolf Clausius conocieron la obra de Carnot a través de la traducción alemana, de 1843, de la obra de Clapeyron. A partir de las ideas de Carnot, Thompson y Clausius pusieron las bases de la Termodinámica Clásica. En Francia, sólo Ferdinand Reech, un ingeniero naval, estudió en profundidad la obra de Carnot en 1853 y elaboró también una teoría general que anticipaba (con algunos errores) muchos desarrollos posteriores. Desgraciadamente, el trabajo denso y prolijo de Reech tampoco fue muy leído.

Con todo, las ideas de Carnot aún necesitaban una buena depuración. Carnot partía de la teoría del calórico que explicaba los fenómenos térmicos a partir de la existencia de una sustancia imponderable que podía pasar de unos cuerpos a otros pero que se conservaba globalmente. (La idea del calórico había sido introducida 50 años antes por Lavoisier como parte de su programa para eliminar el flogisto de la química. Lavoisier, contemporáneo de Lazare, también había ocupado cargos públicos antes y después de la Revolución, pero tuvo la mala fortuna de hacerlo como miembro de la Ferme General, la «agencia tributaria» de la época. En estas condiciones era un buen candidato para «perder la cabeza», como así sucedió, durante el Terror, sin que Lazare pudiera hacer nada por evitarlo.) El calórico absorbido en un cuerpo se manifestaría por un cambio de temperatura y/o por un cambio de volumen. Evidentemente un cuerpo que cambia de volumen puede utilizarse como agente motriz, pero hacía falta algo más. Para Carnot, el funcionamiento de las máquinas de vapor se debía a la «restauración del equilibrio del calórico», lo que, en palabras llanas, viene a decir que el calor tiende a pasar de los cuerpos más calientes a los más fríos. La potencia motriz de la máquina de vapor «se debe no a un consumo real del calórico, sino a su transpor-

te de un cuerpo caliente a un cuerpo frío... Según este principio no basta con producir calor: además hay que procurarse frío, el calor sin el frío sería inútil». Carnot plantea el siguiente símil:

«... podemos comparar la potencia motriz del calor a la de un salto de agua... La potencia motriz de un salto de agua depende de su altura y de la cantidad de líquido; análogamente, la potencia motriz del calor depende de la cantidad de calórico empleado y de lo que podríamos llamar la altura de su caída, es decir, la diferencia de temperaturas entre los cuerpos entre los que tiene lugar el intercambio de calórico.»

De modo que hay que tomar calórico de cuerpos a alta temperatura y ceder la misma cantidad de calórico a cuerpos a temperatura inferior. Ahora bien, ¿hay alguna forma de aprovechar al máximo esta diferencia de temperaturas?

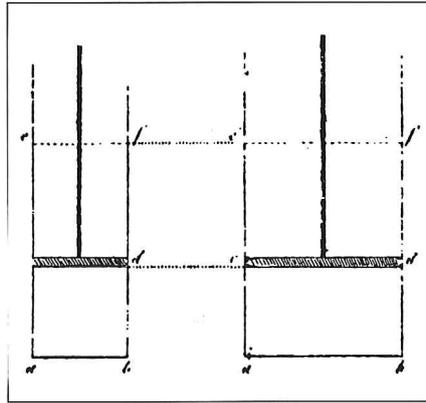
«Puesto que cualquier restablecimiento del equilibrio en el calórico puede ser causa de potencia motriz, cualquier restablecimiento que ocurra sin producir esta potencia debería considerarse una pérdida... Así pues, la condición necesaria para la máxima potencia es que en los cuerpos empleados para realizar la potencia motriz del calor no haya ningún cambio de temperatura que no sea debido a un cambio de volumen».

En resumen, para conseguir el máximo rendimiento el «cuerpo que realiza la potencia motriz» debe absorber una cierta cantidad de calórico de un foco térmico a una temperatura alta uniforme; luego, debe enfriarse hasta alcanzar la temperatura del foco frío, y ceder a éste la misma cantidad de calórico. Para cerrar el ciclo, y volver al agente a su situación inicial, hay que calentarlo de nuevo hasta alcanzar la temperatura del foco caliente. Pero el enfriamiento (y el calentamiento) no debe realizarse a volumen constante. Hay que dejar que el cuerpo se expanda (o contraiga) sin contacto con ningún foco

térmico; es decir, sin ninguna pérdida o ganancia de calórico. Esto es lo que hoy llamamos expansión adiabática. Carnot toma este tipo de transformaciones como un hecho experimental. Cita a Laplace quien, para explicar la discrepancia entre la velocidad real del sonido y la calculada por Newton en los *Principia*, había supuesto que el aire se contrae y se expande sin intercambio de calor. Laplace y Poisson también habían dado una expresión analítica para describir estas transformaciones, pero la relación sólo era válida si se admitía que el cociente entre los calores específicos a presión y a volumen constante tenía siempre el mismo valor. Esto parecía por entonces difícil de admitir: todavía no se sabía medir exactamente los calores a volumen constante pero, en cualquier caso, las medidas de Delaroche y Bérard parecían mostrar (equivocadamente) que los calores específicos de los gases variaban con la temperatura. Aunque Carnot hubiera conocido la expresión matemática de Laplace y Poisson, no hubiera podido asegurar con certeza que exista siempre un proceso adiabático que conecta dos isothermas cualesquiera ni, mucho menos, hubiera podido calcular el trabajo realizado en una expansión (o compresión) adiabática.

Por otra parte, la expresión de Laplace describe las que hoy llamamos transformaciones adiabáticas reversibles. Hoy sabemos también que existen transformaciones adiabáticas irreversibles: por ejemplo, la expansión súbita de un gas perfecto, en las que no hay descenso de temperatura. Carnot hablaba de expansiones rápidas pero con toda seguridad no se refería a estas últimas. Además, hoy sabemos que una expansión puede considerarse reversible con tal de que la velocidad del pistón sea pequeña comparada con la velocidad del sonido en dicho gas.

Pese a no conocer estas diferencias entre procesos adiabáticos reversibles e irreversibles, Carnot asegura que el ciclo propuesto es reversible. Lo que quiere decir con



Ilustraciones de la edición original (1824) del libro de Sadi Carnot.

esto es sencillamente que nunca hay contacto entre dos cuerpos a temperaturas diferentes. El cuerpo que absorbe (o cede) calórico siempre está a la misma temperatura que el cuerpo del que lo toma (o al que lo da). En resumen, el agente se comporta como una especie de ascensor que baja el calórico de un piso a otro (de una temperatura a otra) sin que tenga que ir por ninguna rampa. Por ello, en las transformaciones isothermas del ciclo el calórico puede circular en ambas direcciones.

De este modo se puede invertir el orden de las operaciones y tomar calórico del foco a baja temperatura y «subirlo» al foco a alta temperatura, consumiendo, claro está, una cantidad de potencia motriz igual a la que se había obtenido en la operación directa. Esto sería imposible si en algún momento del ciclo hubiese cuerpos en contacto a diferente temperatura.

Con esta idea de reversibilidad, Carnot pasa a probar que, de todos los ciclos que operan entre las mismas temperaturas extremas y con un mismo agente, el ciclo reversible es el que alcanza el máximo rendimiento posible. En efecto, supongamos que hay un ciclo irreversible tal que, para una caída de una cantidad de calórico dada,  $Q$ , se obtiene una potencia motriz  $W_{\text{irrev}}$  mayor que la que se obtendría con un ciclo reversible  $W_{\text{rev}}$  con la misma caída de calórico. Entonces podríamos acoplar el ciclo irreversible al ciclo reversible pero con éste último operando al revés. De este modo, después de «bajar» calórico con el ciclo irreversible obte-

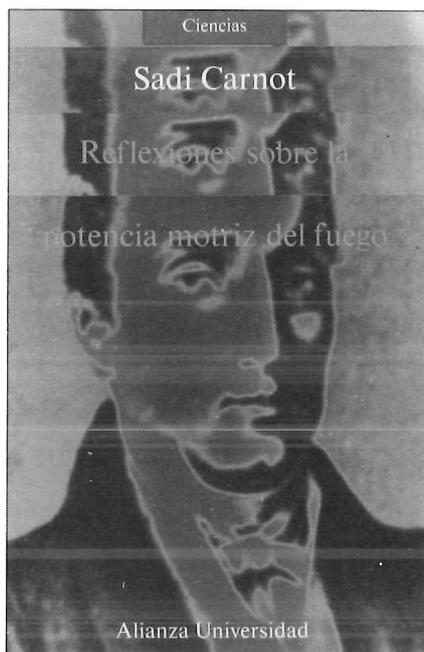
niendo una potencia motriz  $W_{\text{irrev}}$ , podríamos volver a «subirlo» con el ciclo reversible gastando una potencia motriz  $W_{\text{rev}}$ , y aún nos quedaría una potencia motriz sobrante  $W_{\text{irrev}} - W_{\text{rev}} > 0$ ; es decir, habríamos dejado el calórico donde estaba pero en el proceso habríamos obtenido potencia motriz gratis. Esto, dice Carnot, es «contrario a la sana física» pues equivaldría a la posibilidad de un móvil perpetuo. Aquí aparece un argumento que ha marcado el desarrollo de la termodinámica por más que les pese, y probablemente con razón, a algunos teóricos. Nótese, sin embargo, que aquí no se hace la distinción entre los móviles perpetuos de primera y segunda especie que hoy son tan familiares. Y no puede hacerse precisamente porque la potencia motriz no se obtiene a expensas de un consumo de calórico y, por consiguiente, no se puede distinguir entre consumo y aprovechabilidad.

Por un razonamiento similar al anterior, Carnot demuestra que la potencia motriz que se obtiene en un ciclo reversible es independiente de la naturaleza del cuerpo que la realiza (que transporta el calórico) y sólo depende de la cantidad de calórico transportado y de las temperaturas entre las que trabaja. El siguiente paso, entonces, es determinar esta dependencia:

«En la caída de agua la máxima potencia motriz es rigurosamente proporcional a la diferencia de niveles de los dos depósitos. En la caída de calórico, la potencia motriz incrementa sin duda con la diferencia de temperaturas entre el cuerpo caliente y el cuerpo frío, pero no sabemos si es proporcional a esta diferencia. Ignoramos por ejemplo, si la caída de calórico de 100 a 50 proporciona más potencia motriz que la caída del mismo calórico de 50 a 0. Es una cuestión que nos proponemos examinar más adelante.»

Puesto que ya se ha demostrado que en todos los ciclos reversibles se obtiene la misma potencia independientemente de la sustancia agente, basta con que se utilice para el cálculo la sustancia más simple: el gas ideal. Pero aquí aparece otra dificultad. Puesto que Carnot no conoce la forma real de las adiabáticas y no puede calcular el trabajo realizado en estos procesos, en muchos de sus cálculos se limita a trabajar con ciclos que operan entre temperaturas muy próximas. Esto permite prescindir de la contribución de los procesos adiabáticos pero, a cambio, reduce también el alcance de los resultados. Carnot llega finalmente, a la conclusión de que la caída de calórico produce más potencia motriz en los grados inferiores de temperatura que en los superiores. Hoy sabemos que esta conclusión es correcta pero, paradójicamente, Carnot la obtiene una vez más a partir de las medidas incorrectas de Delaroche y Berard (que, como ya se ha dicho, parecían mostrar que el calor específico variaba con la temperatura). Es la combinación de estas medidas incorrectas con la teoría del calórico la que da lugar a un resultado correcto. Por el contrario, Carnot dice incorrectamente que «si la capacidad del aire para el calor permaneciera constante (cosa que hoy sabemos que es cierta), la potencia motriz sería la misma».

Éstas son básicamente las ideas que desarrolla explícitamente el propio Carnot. Aunque a primera vista puedan parecer poco relevantes, son suficientes para establecer una teoría que trascienda el simple funcionamiento de las máquinas de vapor. La temperatura a la que se refiere Carnot explícitamente en la mayor parte de su trabajo es la temperatura empírica medida por un termómetro de gas. No obstante, hemos visto que los resultados deben ser completamente generales. Esto es lo que llevó a William Thompson a proponer una definición de temperatura absoluta de modo que el trabajo extraído en un ciclo fuera estrictamente proporcio-



Portada del libro "Reflexiones sobre la potencia motriz del fuego", de Sadi Carnot.

nal a la diferencia de temperaturas. Las primeras estimaciones de Thompson parecían mostrar que la temperatura así definida coincidía con la temperatura empírica de los gases. Sin embargo, esta aparente coincidencia se debía únicamente a que estaba trabajando en un intervalo estrecho de temperaturas. Para intervalos más amplios, la temperatura absoluta así definida se apartaba de la que medían los termómetros de gas.

Al proponer esta definición en 1848, Thompson seguía aceptando la teoría del calórico. Sin embargo, un año antes, en 1847, los trabajos de Helmholtz, Joule y otros habían culminado en la idea de que había una equivalencia entre calor y trabajo. No existía ninguna sustancia tal como el calórico que se conservaba en estos procesos; simplemente había una conversión de calor en trabajo. La teoría de Carnot necesitaba por lo tanto una reformulación. Evidentemente, si calor y trabajo son equivalentes no hay ningún misterio en obtener trabajo a partir del calor. El misterio sigue estando, sin embargo, en el hecho de que se necesitan dos focos a temperaturas diferentes para que pueda operar una máquina de vapor. No se puede tomar calor de un foco y transformarlo íntegramente en trabajo; es

necesario ceder parte de este calor a un foco a temperatura inferior. En otras palabras, parte del calor absorbido no puede ser aprovechado y se desperdicia, por así decirlo. La diferencia entre el calor absorbido y el calor cedido (desperdiciado) es la potencia motriz producida. El ciclo de Carnot es precisamente el que hace que este inevitable desperdicio sea menor.

Al reformular el problema de Carnot, Clausius definió una función de la temperatura de los gases de tal modo que el cociente entre calor tomado del foco caliente y el valor de dicha función para el foco caliente fuera igual al cociente entre el calor cedido al foco frío y el valor de la función característica del foco frío. Finalmente, es a esta función característica a la que se le llamó temperatura absoluta. (En realidad, la temperatura absoluta resultó ser idéntica a la temperatura de los gases ideales, aunque esto no podía asegurarse a priori.) Al cociente entre calor transferido y temperatura absoluta se le denominó entropía. De este modo, lo que ocurría en un ciclo de Carnot era que el aumento de entropía del agente motriz al absorber calor se compensaba exactamente con la pérdida de entropía al cederlo al foco frío. Había nacido la termodinámica clásica.

Planteado de esta forma, lo que hace un ciclo de Carnot es disminuir la entropía del foco caliente y aumentar la entropía del foco frío en la misma cantidad. Evidentemente, la entropía no es una sustancia, pero podemos decir figuradamente que se ha transportado entropía del foco a alta temperatura al foco a baja temperatura.

Resulta así que muchos de los resultados de Carnot son válidos si se sustituye la palabra calórico por la palabra entropía. Engañados por esto, que es algo más que una simple casualidad, algunos físicos posteriores (especialmente H. Callendar en su artículo para la Enciclopedia Británica) afirmaron que Carnot hacía una sutil distinción entre calor y calórico, y que cuando hablaba de calórico se refería en realidad a lo que hoy llama-

mos entropía. Esto supone contradecir lisa y llanamente al propio Carnot que dedica la primera nota a pie de página de su libro precisamente a aclarar que utiliza las palabras calor y calórico exactamente en el mismo sentido. Además, Truesdell ha demostrado de forma bastante concluyente que muchos resultados que obtiene Carnot hacen uso implícito de la teoría del calórico.

Pese a todo, no se puede cerrar este punto diciendo simplemente que Carnot escribía derecho con renglones torcidos. La historia aún guardaba una sorpresa. En 1872, y con el nombre de Carnot ya reivindicado gracias a físicos británicos y alemanes fundamentalmente, la Academia Francesa de Ciencias decidió reeditar su obra. Unos años después, su hermano Hippolyte, entonces Senador de la República, remitió a la Academia una pequeña biografía y unas notas manuscritas e inéditas de Sadi. En estas notas, escritas probablemente entre 1824 y 1826, queda de manifiesto que Carnot tenía sus dudas sobre la corrección de la teoría del calórico. Estas dudas se basaban, entre otros, en los experimentos de Rumford que parecían mostrar la posibilidad de una producción ilimitada de

calórico. (No deja de ser curioso que Rumford se hubiera casado con la viuda de Lavoisier.) Pero si el calórico no es una sustancia ¿cómo hay que interpretarlo? Carnot baraja la idea del calórico radiante, es decir, que el calor sea un movimiento ondulatorio semejante a la luz. También baraja la idea de que el calor sea en realidad una forma de movimiento molecular macroscópicamente inobservable. En tal caso, cuando se convierte en movimiento macroscópico debería haber una pérdida de calor. Pero entonces surge la pregunta clave: si la potencia motriz surge de un consumo de calor, ¿por qué son necesarios dos focos a diferentes temperaturas? ¿Por qué no basta con tomar calor de un foco a una temperatura constante y transformarlo íntegramente en potencia motriz? Más aún: ¿sigue siendo independiente la potencia motriz del cuerpo utilizado para realizarla? ¿Sigue habiendo un rendimiento óptimo?

Parece claro, entonces, que Carnot era consciente de que su teoría necesitaba una reformulación completa. Sus conjeturas sobre el calor como forma de movimiento se adelantan en más de veinte años a los

trabajos de Joule, Koenig y Clausius que establecieron definitivamente la teoría dinámica del calor. Además hemos visto que, una vez formulada correctamente la Primera Ley, las ideas de Carnot pueden constituir un camino hacia a la Segunda. Si añadimos a esto una admiración fraternal es fácil comprender que, al presentar estas notas póstumas, Hippolyte llegara a afirmar categóricamente que ellas demostraban que su hermano conocía perfectamente tanto la Primera como la Segunda Ley de la Termodinámica. Pero siendo más objetivos, todavía hay una buena distancia entre la equivalencia calor-trabajo y la Primera Ley de la Termodinámica; y tampoco es cierto, como a veces se dice, que Carnot descubriera la Segunda Ley sin conocer la Primera. Esto no disminuye su figura. Como ha dicho el hipercrítico Truesdell «pocos hombres han hecho tanto para fundar una ciencia como hizo Carnot en el caso de la Termodinámica». Sólo nos queda lamentar que Carnot no hubiera llegado a compartir una mesa con Kelvin, Clausius y tantos otros.

J. Javier García Sanz  
Depto. de Física Fundamental

---

## INTERACCIÓN DE LA CIENCIA CON OTRAS RAMAS DEL SABER

---

### Una experiencia interdisciplinar

La Prehistoria, disciplina a la que dedicamos nuestra vida profesional, se encuentra entre aquellas disciplinas humanísticas que se imparten en las carreras de Historia. Sin embargo, los métodos que utiliza y, a menudo los axiomas de los que parte para formular una teoría, descansan sobre las ciencias básicas. Su método científico fundamental es el arqueológico con el que forma una sola entidad para conocer el desarrollo histórico de la humanidad, desde sus orígenes hasta el comienzo de la escritura.

La Prehistoria, en sí, constituye la bisagra entre las ciencias históricas, como la Geología o la Paleontología y las ciencias históricas del hombre plenamente humanísticas. Por esta razón, a veces sus principios descansan sobre pilares característicos de estas ciencias y, sin embargo, revierte en síntesis que se desarrollan en el terreno de las humanidades. Al mismo tiempo tiene que recurrir a la colaboración de campos científicos como la Física y la Química, que colaboran fundamentalmente en lo que denominamos Arqueometría, es decir, a proporcionar marcos cronológicos más fiables a la inter-

pretación histórica de los datos. Por estas razones, en algunos países el estudio de la Prehistoria se desarrolla en Facultades de Ciencias, especialmente el sector cronológicamente más antiguo que se corresponde con el desarrollo de las sociedades cazadoras-recolectoras.

La interdisciplinabilidad en nuestro campo es frecuente, especialmente en el periodo aludido, y constituye un hecho habitual las publicaciones conjuntas de resultados e interpretaciones sobre los datos obtenidos, como los que hemos venido realizando con diversos especialistas en casos diferentes