

LA COLECCIÓN DE INSTRUMENTOS CIENTÍFICOS DEL DEPARTAMENTO DE TERMODINÁMICA

Pedro Ruiz Castell

Departamento de Historia de la Ciencia y Documentación,

Universitat de València

A principios del siglo XX la universidad española introdujo los llamados cursos de Extensión Universitaria. Fue en el ámbito de estos cursos que la Facultad de Ciencias de la Universitat de València, durante el período comprendido entre los años 1919 y 1924, impartió sus primeras lecciones de Termodinámica, dirigidas a los propios estudiantes universitarios y a personas con un mínimo nivel cultural (Sánchez Santiro, 1998). Con el tiempo, esta área del conocimiento no sólo demandaría un cada vez mayor número de instrumentos con que ilustrar sus principios, sino que terminaría por convertirse en uno de los departamentos de la futura Facultad de Ciencias Físicas de la Universitat de València.

La colección de instrumentos científicos que alberga el Departamento de Termodinámica de la Universidad de Valencia está compuesta por más de un centenar de aparatos. Por lo general, se trata de aparatos de reducido tamaño, ya que la mayoría no excede el medio metro en cualquiera de sus tres dimensiones espaciales. Los materiales con los que han sido fabricados, sin embargo, varían mucho de unos a otros. Realizar una descripción completa de todos estos instrumentos, diseñados para cumplir muy diversas funciones, es una tarea que requiere un estudio exhaustivo y sistemático que se escapa de las pretensiones de este texto. Lo que en estas líneas abordaremos es tan sólo una pequeña parte de la colección, aquella vinculada en gran medida a la meteorología. La obsesión por la predicción del tiempo y el control de la temperatura, esta última especialmente importante en una sociedad cada vez más industrializada, fueron la permanente motivación para inventar y mejorar algunos de los aparatos que presentaremos a continuación. Se trata, sin lugar a dudas, de un campo en el que la aplicación de los principios de la Termodinámica ha resultado especialmente prolífica, en cuanto a la construcción de instrumentos científicos se refiere.

Higrómetros

Distintos instrumentos han servido a lo largo de la historia para medir la humedad atmosférica. Desde el siglo XV, los llamados higrómetros higroscópicos, aparatos sensibles a cambios en su peso o dimensiones como resultado de absorber humedad en forma de vapor de agua, han servido para ello. Sin embargo, el gran desarrollo de estos instrumentos se remonta a los siglos XVII y XVIII. Un ejemplo de este desarrollo es la invención, en el XVII, del llamado higrómetro de condensación. Se trataba de un recipiente relleno de hielo, cuya parte inferior terminaba en punta. La humedad era medida a partir de la cantidad de agua que, por condensación del aire exterior, se formaba en la superficie del instrumento y caía en una vasija situada bajo el recipiente.

A mediados del siglo XVIII, Charles Le Roy (1726-1779), convencido de que el agua debía disolverse en el aire, definiría el punto de rocío (temperatura a la que debe enfriarse el aire —a una presión constante— para saturarse, es decir, para observar como se condensa el agua en pequeñas gotas), concepto de gran importancia para el desarrollo de este tipo de aparatos. La aplicación técnica de este principio llegaría en 1820 con la construcción del higrómetro de punto de rocío de quien acabaría siendo catedrático de Química en 1831 del *King's College* de Londres, John Frederic Daniell (1790-1845). Tal y como puede verse en la figura, el higrómetro de Daniell está formado por dos esferas de vidrio unidas por un tubo en forma de *U*. En el interior del dispositivo se ubica, en una de las esferas, un termómetro en contacto con un líquido etéreo. El aire del interior del tubo y otro termómetro exterior completan el dispositivo. La segunda esfera se cubre con una tela, sobre la que se vierte un líquido altamente volátil. La refrigeración consiguiente produce una disminución de la temperatura en el interior del tubo que es registrada por el primero de los termómetros. Ello, a su vez, supone que el vapor de agua atmosférico se condense sobre la superficie de la esfera en donde se encuentra este termómetro. La temperatura a la que ocurre esto establece el punto de rocío. Finalmente, la diferencia de temperatura entre el termómetro interior y el exterior nos da la humedad relativa, por medio de tablas impresas (Middleton, 1966; Middleton, 1969; Turner, 1998).

La colección de instrumentos científicos del Departamento de Termodinámica cuenta con cuatro de estos higrómetros. Se trata de los inventariados como F-0346, F-0347, F-0348 y F-0349, todos ellos de apenas 30 cm de alto. Sus termómetros permiten medir temperaturas entre $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ con una precisión de $1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Higrómetros todos ellos semejantes al de la colección de la Escuela de Magisterio, M-0005. Los manuales de finales del siglo XIX (Ganot, 1876; Buignet, 1876) recogían en sus páginas el diseño de estos instrumentos, a la vez que advertían de los problemas relacionados con las mediciones realizadas con este tipo de aparatos, errores producidos principalmente por diferencias entre la temperatura medida por el termómetro interior y la correspondiente a la formación del rocío, así como por las perturbaciones introducidas en la humedad por el usuario.

Por otra parte, a finales del siglo XVII, John Leslie (1766-1832) diseñaba su termómetro diferencial, en el que la diferencia de temperatura entre dos termómetros, uno húmedo y otro seco, proporciona una medida indirecta de la humedad en el ambiente. El mayor problema que presentaba este instrumento era la necesidad de una apropiada ventilación para evitar las variaciones en la lectura del termómetro. Tras la introducción del término psicrómetro en 1825 por Ernst Ferdinand August (1795-1870), en referencia al instrumento que explota el enfriamiento como consecuencia de la evaporación de un líquido, Richard Assman (1845-1918) presentaría en 1892 su psicrómetro ventilado (o aspirpsicrómetro), en el que un ventilador hace llegar de forma controlada una corriente de aire a los termómetros, a la vez que se elimina el efecto producido por la radiación (Middleton, 1966; Middleton, 1969; Turner, 1998). El Departamento de Termodinámica cuenta entre su colección con uno de estos aparatos, conservado en su caja de madera y con número de inventario F-0332.

Hipsómetros

Durante el siglo XIX, el hipsómetro, instrumento diseñado para determinar el punto de ebullición del agua, se convirtió en uno de los más populares instrumentos para el cálculo de alturas. La dependencia

del punto de ebullición del agua con respecto a la presión atmosférica era un hecho bien conocido desde todo un siglo atrás. Durante el curso de sus expediciones a los Alpes suizos, Horace Bénédict De Saussure (1740-1799) había establecido la forma en que la temperatura del punto de ebullición del agua disminuye según aumenta la altura, mientras que en la década de 1760 el geólogo suizo Jean André Deluc (1727-1817) había desarrollado lo que se conoce como hipsometría barométrica, donde las tablas que relacionan dicha dependencia son utilizadas para la calibración de un termómetro corrector, para el uso apropiado de barómetros. Igualmente, el científico colombiano Francisco José de Caldas (1768-1816) realizó investigaciones en este terreno, relacionando las variaciones de la presión atmosférica con la altitud.

En 1817, William Hyde Wollaston (1766-1828) presentaba su hipsómetro termométrico (bautizado inicialmente como barómetro termométrico), un aparato en el que el termómetro dejaba de encontrarse inmerso en agua y pasaba a estar expuesto únicamente a su vapor. El trabajo y las mejoras del físico y químico francés Henri Victor Regnault (1810-1878) sobre dicho instrumento se concretaron en la presentación, en 1845, de su hipsómetro transportable, un aparato de dimensiones reducidas. Sus tablas para la presión del vapor de agua a temperaturas cercanas a los 100 °C permitieron trabajar con gran precisión sobre los puntos de ebullición. Versiones posteriores ubicaron el termómetro en el interior de una cámara telescópica de doble pared, lo que permitiría protegerlo de un enfriamiento indeseado producido por corrientes de aire, así como su casi total inmersión en vapor (Middleton, 1966; Middleton, 1969; Turner, 1998). La colección del Departamento de Termodinámica cuenta con uno de estos aparatos de Regnault, inventariado como F-0322 y utilizado en experiencias de calorimetría para medir temperaturas de ebullición.

Los distintos nombres con que ha sido conocido este tipo de aparato (aparato hipsométrico, termobarómetro o barómetro termométrico, termómetro de montaña, termómetro hipsométrico) muestran la variedad de objetivos para los que ha servido. Durante el siglo XX, su uso quedó reducido a la calibración de termómetros.

Teletermómetros y Termómetros de resistencia de platino

En 1822 Thomas Johann Seebeck (1770-1831) advertía que la diferencia de temperatura entre dos metales distintos de una junta inducía una corriente eléctrica. Quince años más tarde, Claude Servais Mathias Poulliet (1790-1868) confirmaba que el termopar bismuto-cobre produce una fuerza electromotriz sensiblemente lineal entre, aproximadamente, 0 °C y -100 °C. La firma Siemens & Halske, de la mano del que fuera su fundador, Ernst Werner von Siemens (1816-1892), fabricaría durante la década de 1860 los primeros pirómetros que empleaban sistemáticamente y con fines termométricos el hecho de que la resistencia eléctrica de los metales es una función de la temperatura. Posteriormente, el propio Siemens patrocinaría el uso de platino como resistencia para este tipo de instrumentos. A finales del siglo XIX, Hugh Longbourne Callendar (1863-1930) sugeriría la construcción de un termómetro de resistencia de platino cuyas lecturas se relacionarían con las de termómetros convencionales mediante una fórmula parabólica que proporcionaba resultados muy ajustados para temperaturas entre -40 °C y +500 °C. Por debajo de los -40 °C, lecturas igualmente precisas podrían conseguirse hasta los -200 °C mediante una fórmula cúbica, como resultado de añadir un nuevo término a la parabólica. El termómetro

de resistencia de platino pasaba a convertirse, a partir de este momento, en un instrumento de precisión para la medida de temperaturas.

El diseño de estos termómetros varía según su finalidad. Por lo general, el platino se enrolla en forma de bobina sobre una determinada montura, concebida para que el cable de platino no sufra ningún constreñimiento mecánico. El método original de Callendar para medir la resistencia, basado en el puente de Wheatstone, quedaría obsoleto frente a las medidas potenciométricas y el uso del puente de Smith, una versión modificada del de Wheatstone (Knight, 1961). En la fotografía se muestra el termómetro inventariado como F-0355, fabricado por W. G. Pye & Co. Ltd y denominado *Platinum Thermometer Bridge*. Los otros dos termómetros de la colección, F-0407 y F-0408, son de diseño mucho más moderno y están fabricados por Digitec United System Corporation.

Por otra parte, los orígenes y desarrollo de lo que hoy llamamos teletermómetros y telemeteorógrafos pueden asociarse al nombre de Charles Wheatstone (1802-1875). Sus artículos de 1843 y 1867, presentados en sendos *Report of the British Association*, describían sus “termómetros telegráficos”. Se trata de instrumentos capaces de proporcionar lecturas de las medidas realizadas por termómetros distantes. En el primero de estos trabajos, el instrumento descrito —concebido para realizar medidas en altura, dentro de un globo— consta de un reloj cuyo movimiento controla la frecuencia con que un cable de platino es introducido verticalmente en el tubo de un termómetro. Este aparato se conecta, mediante cables de cobre suficientemente largos, a un galvanómetro ubicado en la posición del observador, de forma que durante el tiempo en que el cable de platino está en contacto con el mercurio, la aguja del galvanómetro permanece desplazada con respecto a su posición original. Conociendo las características del movimiento del cable de platino y gracias a otro reloj sincronizado con el primero, en manos del observador, se puede inferir del movimiento de la aguja del galvanómetro la temperatura indicada en el termómetro remoto (Wheatstone, 1879). El segundo de sus teletermómetros, algo más complejo y descrito en un artículo de 1867, presenta un elemento termométrico en forma de espiral compuesto por dos metales. Diseñado para ser usado durante largos períodos de tiempo sin tener acceso al termómetro que realiza las medidas, su principio resulta aplicable a cualquier instrumento con un puntero que pueda girar. *Grosso modo*, los pulsos producidos por un imán permitían contactar telegráficamente con el instrumento del que se requería la medida, realizándose la lectura mediante un puntero ubicado frente al observador (Wheatstone, 1879). El uso de ambos diseños se mostraría igualmente válido para el trabajo con barómetros e higrómetros (Middleton, 1969). La colección del Departamento de Termodinámica cuenta con uno de estos teletermómetros, aunque de diseño más moderno. Fabricado por *Yellow Springs Instrument Co.* e inventariado F-0364, llama la atención la dualidad de escalas que presenta: de 25 °F a 100 °F, con una precisión de 1 °F, y de 0 °C a 35 °C, con una precisión de 1 °C.

La importancia del control de temperaturas en lugares inaccesibles hizo que durante todo el siglo XX se sucedieran mejoras de estos aparatos, lo que conduciría a la enorme variedad de teletermómetros empleados hoy en día. Si bien es cierto que en campos como la meteorología su uso ha resultado bastante restringido, los termómetros eléctricos pueden encontrarse en gran cantidad y diferentes modelos en la industria termométrica, dadas sus enormes aplicaciones técnicas. Un ejemplo de ello es el uso de teletermómetros para el control de la temperatura en la industria alimenticia. El caso de los termómetros de resistencia de platino es diferente, puesto que al proporcionar unas lecturas extremadamente precisas

resultan de gran utilidad tanto en el campo de la industria como en el de la investigación científica. Termómetros de resistencia de platino han sido reconocidos internacionalmente como el método de interpolación entre puntos fijos definidos y en la actualidad materializan la Escala Internacional de Temperatura hasta temperaturas cercanas a los 1200 K.

Termistores

A finales del XIX, los llamados bolómetros eran construidos con el fin de medir el total de radiación que, en forma de calor, incide sobre un cuerpo (Bud y Warner, 1998). El principio en que se basan es bien sencillo: la resistencia de un detector metálico es proporcional a la cantidad de calor aplicada sobre él. Cuando el detector es calentado, esto es, al cambiar su resistencia, la corriente eléctrica resultante puede medirse gracias a un puente de Wheatstone. Pese a que los detectores pueden elegirse de entre una amplia variedad de metales, el platino resultó el más adecuado. Para su uso, generalmente se emplea un par de detectores, cada uno en un extremo del puente de Wheatstone. Uno de ellos se expone a la radiación mientras al otro se protege de ella, con el fin de reducir los efectos de la radiación térmica ambiental. A pesar de su rápida respuesta temporal, ciertas desventajas prácticas lo relegaron a un discreto lugar en investigaciones para la detección de energía radiante, donde radiómetros y termopilas fueron mucho más utilizados.

Mediado el siglo XX, con el platino como material preferido en la construcción de bolómetros, nuevas ideas aparecieron ante la necesidad de mejorar la respuesta de estos aparatos. Finalmente, los laboratorios estadounidenses *Bell Telephone Laboratories* concibieron lo que bautizarían con el nombre de termistor (acrónimo procedente del inglés *thermistor: thermally sensitive resistor*), formado por aleaciones de óxidos de níquel, manganeso y cobalto. A continuación trataremos de presentar esquemáticamente los principios en que se basa su funcionamiento. Profundizando algo más en lo que ya hemos comentado, un conductor metálico reduce su conductividad al aumentar su temperatura, puesto que aumenta el desorden de los electrones libres, mientras que un semiconductor la aumenta, ya que el aumento de la energía térmica equivale a un aumento del número de electrones o huecos positivos en la red. Por consiguiente, según sea el tipo de conductores de que estemos hablando, estaremos ante los llamados PTC (*positive temperature coefficient*, aquellos que aumentan su resistividad al aumentar la temperatura) o NTC. (*negative temperature coefficient*, aquellos que disminuyen su resistividad al aumentar la temperatura), respectivamente. Los primeros, desarrollados en la década de 1950 (una década más tarde que los primeros estudios sobre termistores NTC) se clasifican según su estructura sea similar a la del titanato de bario (BaTiO_3) o a la del diamante, caso este último del silicio. Su uso se extendería al campo de la meteorología con su incorporación a radiosondas, a la par que serían empleados en la industria y en proyectos militares y espaciales, estrechamente vinculados al trabajo en radiofrecuencias. La principal dificultad en la manufactura de estos aparatos resultó del necesario control de las impurezas, premisa obligatoria para garantizar su reproducibilidad. Además de su gran utilidad para controlar la temperatura, los termistores han destacado como un versátil aparato con innumerables aplicaciones en la ingeniería (Macklen, 1979; Thomson, 1955).

En la actualidad el término termistor se refiere a todo un conjunto de componentes electrónicos, habiéndose incorporado nuevas aleaciones a las originales y pudiendo llegar a trabajar en un rango de

temperaturas entre los $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ y los $+1.000\text{ }^{\circ}\text{C}$. Los termistores presentan muy diversas formas, desde pequeñas “gotas” de apenas 0,2 mm de diámetro, pasando por discos y arandelas de diámetro entre los 3 y 25 mm, hasta varas de 12 mm de diámetro y 40 mm de largo (Hyde, 1971).

Del mismo modo, presentación final de los termistores varía mucho de unos casos a otros. En general se suelen proteger con distintos tipos de materiales y se ubican en el interior de una caja de plástico o metal. Sirva de ejemplo el termistor inventariado como F-0365, fabricado por *Yokogawa Electric Works*, que permite medidas de hasta $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ y está acabado en plástico y vidrio. La colección de instrumentos científicos del Departamento de Termodinámica cuenta además con varios equipos de termistores seriados. El F-0399, en aluminio, madera y plástico, es el de dimensiones más reducidas. Los aparatos inventariados como F-0397 y F-0398, ambos fabricados por *Transistek*, están acabados en aluminio y plástico, mientras los F-0401 y F-0402, en acero y aluminio.

Pirómetros

La manufactura de pirómetros —término acuñado originalmente a aquellos instrumentos que miden la expansión o contracción de sólidos causada por variaciones de temperatura— se remonta al siglo XVIII. No sería hasta 1782 en que Josiah Wedgwood (1730-1795) construiría un pirómetro con el sentido que le damos hoy en día, es decir, un instrumento para la medida de altas temperaturas. Este primer aparato, diseñado para el control de hornos, se basaba en la progresiva contracción de la arcilla al cocerse a cada vez mayores temperaturas. Cuarenta años más tarde, Daniell presentaría un pirómetro capaz de leer directamente temperaturas sobre una escala, mediante un indicador que se desplazaba por la elongación de una barra de platino. Este llamado “pirómetro de expansión” era el primero de estos aparatos que era capaz de proporcionar una lectura continua y que no requería atención personal. Fue el mismo año en que Seebeck, tal y como hemos indicado, abría las puertas al desarrollo de la termoelectricidad, tras descubrir que cuando se calentaba y se aumentaba la temperatura de una unión de dos metales se generaba una corriente eléctrica. En 1826, Antonie César Becquerel (1788-1878) construiría un pirómetro basado en este principio: si, tal y como había demostrado Seebeck, al calentar una junta de dos metales distintos se generaba una diferencia de potencial, un indicador de señal que cerrase el circuito debería sufrir una desviación. La magnitud de esta desviación depende de la naturaleza de los metales, de la resistencia del circuito y de la sensibilidad del indicador. Pero los problemas relacionados con el uso apropiado de uniones y galvanómetros no propiciaron resultados satisfactorios. De hecho, no sería hasta la llegada del milivoltímetro que se produciría una auténtica revolución en las técnicas de medida de altas temperaturas. La idea sería recuperada entonces, sesenta años más tarde, por Henri Louis Le Châtelier (1850-1936).

El pirómetro de la colección del Departamento de Termodinámica, inventariado como F-0326, permite realizar medidas de hasta $1.200\text{ }^{\circ}\text{C}$ y utiliza un termopar “chromel-alumel”, nombre con el que se conoce al termopar formado por aleaciones de níquel-cromo y de níquel-aluminio. La combinación de estas dos aleaciones permite emplear el termopar hasta temperaturas de $1.100\text{ }^{\circ}\text{C}$ de forma continua, pudiendo trabajar durante cortos períodos hasta los $1.300\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Distintos tipos de pirómetros fueron concebidos y desarrollados a lo largo de todo el siglo XIX. Buena muestra de ello son el pirómetro de gas, introducido en la primera mitad del siglo y utilizado

fundamentalmente para calibrar otros pirómetros, los pirómetros calorimétricos, simplificados por Siemens para su uso diario en las industrias, el pirómetro de resistencia del propio Siemens, para ser utilizado en hornos, y el pirómetro óptico de Le Châtelier introducido a finales de siglo, externo a la fuente calorífica y que, por tanto, permitía lecturas de temperaturas mucho mas elevadas. El siglo XX todavía contemplaría un nuevo avance: los pirómetros de radiación total, basados en la ley de Stefan-Boltzmann. Totalmente externos, su uso para altas temperaturas se revelaría, con el paso de los años, enormemente útil para la industria (Darling, 1911; Griffiths, 1926).