

RAÍCES CIENTÍFICAS DE HVAC&R

Autor: Meckler G. 1994

Publicado por: Donaldson, B y Nagengast, B. 1994.
Dentro del libro Heat&Cold: Mastering the Great Indoors
Atlanta. ASHRAE

Traducido por: José Romanillos. Responsable del Comité de Refrigeración
del ASHRAE Spain Chapter

Hace al menos 750.000 años, nuestro antepasado *Homo erectus* se arrodilló en una cueva y aplicó su ingenio para preparar y mantener un fuego. Así comenzó la larga y lenta evolución pre-científica de la tecnología para crear confort en el hogar: primero calentando, luego enfriando y ventilando.

Antes de que surgiera la ciencia moderna a fines del siglo XVI y en los siglos XVII y XVIII, la evolución de la tecnología de calefacción y refrigeración —la acumulación de conocimiento práctico o "know-how"— era un proceso pesado, iterativo, de ensayo y error, marcado de vez en cuando por saltos de perspicacia creativa. A pesar de las limitaciones metodológicas y dado el ingenio humano, los resultados pre-científicos fueron impresionantes, como lo atestiguan los primeros capítulos de este libro. La calefacción central en los grandes baños públicos romanos de los siglos I y II d.C. es un ejemplo fascinante. Los romanos sabían mucho. Pero, como señala D. Lindberg, la palabra "saber" es engañosa: saber *cómo* hacer algo es muy distinto de saber *por qué* eso actúa así.¹

- Los dos tipos de conocimiento, saber cómo y saber por qué, implican capacidades muy diferentes. La ciencia proporciona el "porqué", los principios o leyes fundamentales de la naturaleza que nos permiten comprender las fuerzas que producen el resultado que vemos e inventar nuevas aplicaciones que no surgieron de la experiencia previa.

Sin una comprensión científica, el progreso tecnológico está ligado a la experiencia práctica y se limita a los "siguientes pasos" que están dentro del alcance mental conforme a la práctica en el pasado. Con una comprensión científica fundamental, esos límites se desvanecen y el ámbito de lo posible se expande de manera espectacular.

Esta introducción describe los principales avances científicos que permitieron a la tecnología artesanal del pasado evolucionar a la actual basada en la ciencia. Sin

esta tecnología basada en la ciencia, los sistemas modernos de calefacción, ventilación, aire acondicionado y refrigeración (HVAC&R) no serían posibles.

FUNDAMENTOS CIENTÍFICOS DE HVAC&R

Las bases científicas de los modernos sistemas HVAC&R surgieron de una brillante corriente de experimentación y descubrimiento en los trescientos años que van de 1600 a 1900. Por ejemplo, descubrimientos fundamentales sobre las leyes de los gases que rigen las interacciones de presión, volumen y temperatura, la naturaleza del calor, o las leyes de la termodinámica, es decir, las relaciones dinámicas entre el calor, el trabajo y la energía.

Una característica notable de este periodo fue la estrecha relación y el estímulo mutuo entre científicos e ingenieros-inventores. Históricamente fue un período de simbiosis sin precedentes entre ciencia y tecnología. No solo eran comunes las relaciones personales, profesionales y alumno-profesor entre figuras relevantes de la ciencia y la tecnología, sino que también entraba en juego algo bastante poderoso. Como escribe D.S.L. Cardwell en *From Watt to Clausius: The Rise of Thermodynamics in the Early Industrial Age*:

El desarrollo de máquinas como la de vapor en el siglo XVIII casi obligó al hombre a reconocer el enorme poder, la potencia, del calor, el gran agente de movimiento del universo. La visión de una primitiva máquina de vapor bombeando incansablemente toneladas tras toneladas de agua de una mina... hizo más por la ciencia que todas las especulaciones de los filósofos sobre la naturaleza del calor desde que comenzó el mundo.... De modo que tuvo lugar una gran revolución científica como resultado de las experiencias del hombre en un

desarrollo tecnológico enormemente importante: la invención del motor térmico.²

La tecnología de los motores de vapor ocupa un lugar especial en el linaje de HVAC&R. No en vano estimuló y demostró avances importantes en la comprensión del calor y la relación de éste con el trabajo, desde el uso de la presión atmosférica de Thomas Newcomen (1712) y la introducción de James Watt de un condensador separado (1777) hasta la crucial labor de Sadi Carnot en termodinámica (1824), incluida la idea del motor reversible.

Solo después de que la nueva ciencia de la termodinámica se formulara por completo a mediados y finales del siglo XIX, fue posible desarrollar una ciencia de ingeniería madura y unos sistemas HVAC&R modernos. Basado por primera vez en una comprensión fundamental de los principios que gobiernan la interacción de calor, trabajo y energía, se formularon relaciones matemáticas y se desarrollaron nuevas herramientas analíticas para hacer un uso práctico de este conocimiento. Los inventores podían, cada vez más, desarrollar equipos de menor tamaño, mucho más eficientes y prácticos, y adaptados a necesidades específicas, en tanto que los ingenieros podían predecir las prestaciones del diseño con una alta probabilidad de éxito.

La ingeniería moderna había llegado, con una contribución importante en el campo HVAC del precursor de ASHRAE, la Sociedad Americana de Ingenieros de Calefacción y Ventilación (ASHVE), y posteriormente de ASHRAE. Fundada en 1894, la idea de ASHVE era elevar los niveles en este campo incorporando la ciencia aplicada y usando los métodos experimentales de la ciencia como base para extraer conclusiones y formular reglas de diseño. En el capítulo 9 se cuenta la historia de ASHVE.

RAÍCES DEL CAMBIO: 1550-1600

Las raíces científicas de HVAC&R llegan directamente al primer científico experimental moderno, Galileo Galilei, y a las primeras ciencias y matemáticas griegas que lo influenciaron. Galileo comenzó el largo viaje hacia una ciencia del calor con su invento, en 1592, del primer dispositivo en utilizar el principio de expansión para indicar cambios en la temperatura.

A menudo llamado el primer termómetro, el termoscopio de aire y agua de aula de Galileo era rudimentario según los estándares actuales. No era portátil, no estaba sellado y, por tanto, se hallaba sujeto a cambios en la presión atmosférica, y no incorporaba marcas que indicaran gradaciones de temperatura (se cree que se utilizó una escala diferente). Sin embargo, la idea de medir y comparar la intensidad del calor en diferentes momentos o lugares supuso un importante salto conceptual.

El termoscopio despertó gran interés y condujo, en última instancia, a la capacidad de medir la

temperatura o el grado de calor con resultados coherentes y reproducibles basados en una escala común. Sin embargo, deberán pasar 170 años para que Joseph Black establezca una clara distinción entre el concepto de temperatura —intensidad o grado de calor— y el de cantidad de calor o capacidad calorífica.

Galileo había sido profundamente influido, al igual que muchos de sus contemporáneos como Kepler, por el redescubrimiento en Europa de la ciencia y las matemáticas griegas primitivas. Entre otras obras, la del primer matemático aplicado, el brillante Arquímedes, despertó gran interés. El agente del redescubrimiento fue la imprenta, que en el año 1500 puso a disposición de gran cantidad de personas una información que antes solo llegaba a una pequeña élite a través de manuscritos minuciosamente copiados a mano.

El concepto clásico de las matemáticas como medio crítico para la verdad tuvo un fuerte impacto en el ambiente intelectual de la Europa de los siglos XVI y XVII. Hubo algo más en las obras antiguas que también influyó: unas ideas tan raras que la mayoría de los estudiosos coinciden en que "a diferencia de la tecnología o la religión, la ciencia se originó solo una vez en la historia, en Grecia... ninguna otra sociedad desarrolló independientemente un modo de pensamiento científico, y todo los desarrollos posteriores en la ciencia se remontan a los griegos."³

"Implícito en las obras redescubiertas de Aristóteles y otros de los siglos III a VI a.C. fue el intento sin precedentes de comprender y explicar los fenómenos naturales en sus propios términos para satisfacer la curiosidad, en lugar de encajar en los principios de mitos o religiones particulares. También implícita en la "filosofía natural" griega era la suposición de que es posible descubrir y comprender los fenómenos naturales de la realidad física."⁴

Si bien fueron impresionantes innovaciones conceptuales, sin embargo, no eran ciencia moderna. El ingrediente clave que faltaba, y que no aparecería hasta finales del siglo XVI y el siglo XVII, fue el uso metódico de experimentos controlados, la recopilación de datos empíricos y el análisis de datos para confirmar o refutar suposiciones científicas, lo que conocemos como el método experimental.

¿Por qué, cabe preguntarse, el impresionante trabajo griego en investigaciones de biología, física, medicina y matemáticas no condujo a un mayor progreso científico y tecnológico en el mundo clásico? Después de todo, además de su trabajo teórico, los griegos hicieron una enorme cantidad de observaciones concretas.⁵ Además, aunque el inventor del primer siglo Herón de Alejandría no entendía la naturaleza del aire comprimido, los vacíos artificiales o el poder del vapor, el viento y el agua, usó todos ellos en varios dispositivos pequeños que diseñó.

La respuesta proporciona pistas sobre la dinámica del progreso posterior. Estas fueron algunas de las razones: (1) Los pensadores de la época, incluidos los "filósofos naturales", desdeñaban el trabajo manual,

dominio de esclavos y artesanos, no consideraban la ciencia aplicada como una ocupación adecuada de la clase de los filósofos. (2) Había poca comunicación entre los filósofos naturales (científicos) y los artesanos (ingenieros de la época). El área principal en la cual se fomentó el desarrollo tecnológico fue el armamento. (3) Existía poca motivación para aumentar la producción, ya que los esclavos lograban satisfacer las necesidades materiales de las autoridades.

En cuanto a los dispositivos de Herón, parece claro que estaban destinados a divertir o impresionar pero no a fines productivos. Como señala J. Lindsay, "no se intentó combinar la facultad inventiva, tan evidente en una gama de pensadores desde Ktesibios hasta Herón, con las posibilidades que estaban presentes en el nivel tecnológico existente, especialmente en metalurgia".⁶

Contrástese esta situación con las condiciones económicas y sociales cambiantes y dinámicas en Europa desde el siglo XVI hasta el siglo XIX. Al principio de este período, el nuevo medio de los libros impresos contribuyó en gran medida al fermento intelectual y a la comunicación cruzada entre científicos e ingenieros inventores. Por primera vez llegaban a un amplio público obras como *De Re Metallica* (1556) de Georgius Agricola, un estudio de tecnología avanzada en minería y metalurgia, incluida la ventilación en minas, y *The Advancement of Learning* de Francis Bacon (1605).

La influencia de Bacon era incalculable. Fue él quien articuló el método científico que revolucionaría la comprensión humana y provocaría una explosión de tecnología útil. A medida que el siglo XVI dio paso al siglo XVII, la idea de verificar las teorías científicas mediante mediciones independientes aún no formaba parte de la cultura en Gran Bretaña, en Europa ni en ningún otro lado.

Bacon fue un apasionado defensor de la experimentación racional para descubrir las leyes fundamentales de la naturaleza:

Estaba seguro de conocer el método correcto [de investigación], y de que, solo si pudiera aplicarse... a una escala lo suficientemente grande, no había límite para el posible crecimiento del conocimiento humano y del poder humano sobre la naturaleza... [Esto] no fue del todo obvio en ese momento; fue, por el contrario, un prodigio de perspicacia y un acto de fe racional frente a las apariencias actuales y la experiencia pasada. ¿Qué problema tenían los métodos en uso hasta el tiempo de Bacon?... En primer lugar [en opinión de Bacon], había un divorcio casi completo entre la teoría, la observación y el experimento, y la aplicación práctica. [Además, con demasiada frecuencia,...] Los científicos resolvían todas las cuestiones no investigando los hechos observables, sino apelando a la autoridad infalible de Aristóteles.⁷

La opinión de Bacon de que "la teoría deberá aprender de las prácticas artesanales, y viceversa" tuvo un impacto duradero, influyendo, por ejemplo, en las actividades y deliberaciones de la Royal Society of

London, establecida en 1660, así como en la Académie des Sciences francesa.⁸ Desde la década de 1640, había un grupo en la Universidad de Oxford, que incluía a Robert Boyle y que se convirtió en la Royal Society, que estaba dedicado al método experimental de Bacon.

INSTRUMENTOS INDISPENSABLES: 1600-1660

Dos instrumentos inventados en este período, el barómetro y la bomba de aire o de vacío, despertaron gran interés y estimularon avances científicos y tecnológicos de enorme importancia para el futuro de HVAC&R. S. Lilley da una idea de la importancia aún más significativa de estos y otros instrumentos científicos del siglo XVII (termómetro, telescopio, microscopio, etc.). Advirtiendo que en este periodo los instrumentos diseñados específicamente para fines científicos se empleaban a "gran escala por primera vez en toda la historia" y "abrían nuevos campos de descubrimiento", observa:

[Su uso] hizo más que simplemente conducir a nuevos descubrimientos. Representó un papel importante en el establecimiento del método experimental, el método que caracteriza a la ciencia moderna. Sin instrumentos especiales... [los experimentos] realmente no te llevan muy lejos, o no lo suficiente como para mostrar claramente que el experimento es un método mejor que el antiguo método de solo pensar en las cosas. Luego, cuando aparecieron los nuevos instrumentos, el experimento produjo resultados tan notables que solo hicieron falta unas décadas para demostrar que el método experimental es mejor que cualquier otro.⁹

En el siglo XVII, las bombas de agua (bombas de succión normales) eran bastante comunes. Al mismo tiempo, la industria minera se estaba expandiendo, las minas se estaban haciendo cada vez más profundas y los problemas con la presencia de agua en las minas habían centrado la atención en cómo podrían mejorarse las bombas y temas científicos relacionados.

Evangelista Torricelli, un estudiante de Galileo, compartió la curiosidad de éste acerca de por qué las bombas de elevación normales no podían subir el agua apenas 10 metros sobre su nivel externo. Torricelli sospechaba que la presión del aire exterior —presión atmosférica— tenía algo que ver.

En 1643 ideó un nuevo instrumento, el barómetro de mercurio, para probar su teoría sobre cómo el mercurio podía elevarse con el vacío. Sus predicciones, basadas en los pesos relativos del mercurio y el agua y los efectos de la presión del aire externo, demostraron ser precisas, y atribuyó correctamente las variaciones diarias a los cambios en la presión atmosférica.

Los experimentos de Torricelli, llevados a cabo con la ayuda de Viviani, otro alumno de Galileo, demostraron tanto la presión atmosférica como la existencia de un vacío, una proposición muy dudosa en ese momento. Torricelli murió poco después, y fue necesario el trabajo confirmatorio de Blaise Pascal y

otros trabajos de Otto von Guericke para convencer a los muchos escépticos de que efectivamente podría existir un vacío.

Mientras tanto, estaba a punto de aparecer otro gran invento que conduciría directamente al trabajo histórico de Robert Boyle sobre las propiedades físicas de los gases y la importancia del aire para la respiración y la combustión. El inventor fue Otto von Guericke.

[Von Guericke] destacó por su énfasis en la experimentación, que era algo nuevo en Alemania, y fue uno de los que preparó el camino para el surgimiento de la ciencia experimental en el norte de Europa.¹⁰

Las controversias sobre el vacío llevaron a von Guericke a desarrollar un nuevo tipo de bomba, una que succionara aire de un recipiente. Von Guericke completó su bomba de vacío de aire en 1645, dos años después de la invención del barómetro, y realizó experimentos relacionados principalmente con la fuerza de la presión atmosférica.

Más tarde Von Guericke dramatizó tanto el tremendo poder de la presión atmosférica como el fenómeno del vacío en una demostración muy comentada. (Encajó dos hemisferios de bronce huecos, evacuó el aire entre ellos, y luego mostró que dos equipos de ocho caballos cada uno, tirando en direcciones opuestas, no podían separar los hemisferios).

Robert Boyle tomó los conceptos básicos de la bomba de aire de von Guericke y creó un instrumento que favorecía una investigación científica mucho más amplia. Lo construyó de modo que "pudiera poner varios objetos en el receptor —como llamó al recipiente desde el que se bombeó el aire— y ver cómo les afectaría la privación de aire".¹¹

PRIMERAS LEYES DE LOS GASES

Robert Boyle es uno de los gigantes de la ciencia. Los experimentos de 1658-1659 con su nueva bomba de vacío de aire, presentados en "New Experiments Physico-Mechanicall Touching the Spring of the Air and its Effects" (1660), fueron impresionantes en sus implicaciones inmediatas y obvias. Más allá de eso, condujeron a su afirmación, dos años después, de lo que llegó a conocerse como la Ley de Boyle y después aceptado como principio fundamental de la termodinámica: a una temperatura dada, la presión y el volumen de un gas son inversamente proporcionales, es decir, el volumen disminuye cuando la presión aumenta y viceversa.

Los de Boyle fueron los primeros experimentos sobre las propiedades físicas de los gases. Más de 100 años después (1787), Jacques Charles expresó el papel de la temperatura o la expansión térmica en la relación presión-volumen-temperatura. En lo que llegó a conocerse como la Ley de Charles, descubrió que si calentaba un gas manteniendo la presión constante, el cambio en el volumen era proporcional al cambio de

temperatura. Joseph Gay-Lussac descubrió por su cuenta esta relación en 1802.

Estas dos leyes de los gases, la Ley de Boyle y la Ley de Charles, se combinaron desde entonces de la siguiente manera:

El volumen de un gas varía directamente con su temperatura e inversamente con su presión.¹²

La Ley de Boyle también es conocida, en algunas partes del mundo, como la Ley de Mariotte. Edme Mariotte realizó ejercicios con un aparato como el de Boyle¹³ y en 1676 definió la misma ley, incidiendo en que la temperatura debe mantenerse constante para que la ley sea válida.¹⁴

Tras un progreso significativo desde la década de 1750 hasta la de 1770 en la identificación de constituyentes del aire, en 1801 John Dalton formuló su teoría de las presiones parciales, conocida como Ley de Dalton: la presión total de una mezcla de gases es la suma de las presiones de sus gases constituyentes. Dicho de otra manera, "cada componente de una mezcla de gases en una región determinada produce la misma presión que si ocupara la región por sí misma"¹⁵.

OXÍGENO Y RESPIRACIÓN

Los experimentos de Robert Boyle en 1658-1659 con su bomba de vacío de aire demostraron, entre otras cosas, qué fenómenos requerían aire y cuáles no. Por ejemplo, privados de aire en su "receptor", los animales morían y los incendios se extinguían. Sin aire a su alrededor, un reloj seguía funcionando, pero ya no se podía escuchar su tictac. Boyle demostró que el calor y la luz pueden viajar a través del vacío, pero que la transmisión del sonido y la atracción magnética requieren la presencia de aire. Con estos experimentos, Boyle sembró las semillas de futuras investigaciones en muchos campos científicos.

Después de haber demostrado que tanto la respiración como la combustión requieren algo (no todo) del aire, Boyle estuvo a punto de descubrir el oxígeno. Su asistente de investigación y creador de instrumentos, Robert Hooke, que llegó a ser un respetado científico, avanzó este aspecto de la obra de Boyle al identificar el aire requerido por la respiración y la combustión como la misma parte o tipo de aire.¹⁶

En la década de 1750, Joseph Black aisló el "aire fijo" (dióxido de carbono), y en la década de 1770 Joseph Priestley demostró que el aire fijo "no favorecía la combustión y que los ratones morían pronto cuando se los colocaba en el mismo, pero que tanto la respirabilidad del gas como su capacidad para soportar la combustión mejoraron cultivando una planta en él".¹⁷

Priestley aisló el "aire desflogisticado" (más tarde reconocido como oxígeno) en 1774 y observó que "una vela ardía en este aire con una llama notablemente vigorosa..."¹⁸ Así mismo descubrió que un ratón

colocado en el aire desflogisticado podría sobrevivir "al menos el doble de tiempo que otro introducido en la misma cantidad de aire normal." ¹⁹ No se dio cuenta de que estaba tratando con un constituyente distinto del aire, y en su lugar lo consideró como aire "puro".

A Antoine Lavoisier se le atribuye el descubrimiento del oxígeno. Lavoisier también se considera el fundador de la química moderna. En dos décadas (1770-1790), su trabajo e influencia sirvió para acabar con la bien arraigada doctrina del flogisto y reemplazarla por la teoría del oxígeno de la combustión, contribuir a una reforma radical en la nomenclatura de la química, y establecer el concepto moderno de elemento. ²⁰

Lavoisier había estudiado la combustión y la calcinación y hacia 1772 había concluido, contrariamente a la teoría aceptada, que el fósforo y el azufre "se combinaban con aire cuando se quemaban y que su peso aumentaba por esta mezcla con el aire". ²¹ Su descubrimiento contradecía la creencia general de que la combustión liberaba "flogisto", considerado una especie de sutil material del fuego que escapaba de las sustancias en combustión.

Al enterarse del trabajo de Priestley en 1774, Lavoisier concluyó que los metales también se combinan con el aire en la calcinación. Basándose en otros experimentos, en 1777 estableció que el "aire desflogisticado" de Priestley es una parte del aire y que esta parte, que él llamó oxígeno, se absorbe durante la combustión, la calcinación y la respiración.

Lavoisier también demostró que la respiración convierte el oxígeno en aire fijo (dióxido de carbono). Posteriormente, él y Pierre Laplace, utilizando el calorímetro de hielo que habían desarrollado, demostraron similitudes entre la respiración y la combustión.

El capítulo 3 explora el mayor enfoque en la ventilación impulsado por Lavoisier y los hallazgos relacionados, y el capítulo 7 describe la evolución de los estándares de ventilación en el siglo XIX. El trabajo realizado por Max von Pettenkofer en 1862 desembocó en el uso del nivel de dióxido de carbono del aire como un indicador general de la adecuación de la ventilación.

DE LA CIENCIA DEL CALOR A CARNOT

En el siglo V a. C., el siciliano Empédocles formuló una teoría que involucraba el calor, la cual, tal como la amplió Aristóteles en el siglo siguiente, siguió siendo influyente durante unos dos mil años. Según Empédocles, todas las cosas estaban formadas por cuatro elementos básicos o "raíces": fuego, tierra, agua y aire. Variando sus proporciones se producían diferentes sustancias. ²²

Como reformuló Aristóteles, la teoría parecía explicar una amplia gama de fenómenos observados, lo que explica su longevidad. Aristóteles enfatizó la idea de transformación. Asociados con los cuatro elementos básicos había cuatro cualidades primarias: seco, húmedo, frío y caliente.

La tierra era seca y fría, el agua era fría y húmeda, el aire era húmedo y caliente, y el fuego era caliente y seco. Un elemento podía, en principio, convertirse en cualquier otro mediante la adición y eliminación de las cualidades apropiadas. Cada sustancia de la tierra estaba compuesta de combinaciones de los cuatro elementos, y los cambios que ahora llamamos químicos se explicaban por una alteración en las proporciones de los cuatro elementos. ²³

Aunque varios científicos de los siglos XVII y XVIII creían que el calor es una especie de movimiento en lugar de una sustancia, la teoría "calórica" o material dominaba las creencias del siglo XVIII sobre el calor y no fue superada hasta la década de 1840. "Lo calórico era concebido como una especie de fluido omnipresente, imponderable y altamente elástico cuyas partículas eran atraídas por la materia y rechazadas entre sí" ²⁴. Se pensó que lo calórico fluía de los cuerpos más calientes a los más fríos adyacentes.

Los avances en la comprensión del calor continuaron, a pesar del dominio de la teoría material, gracias a la experimentación científica y a los nuevos instrumentos. En 1701, por ejemplo, basado en una serie de experimentos termométricos, Isaac Newton estableció lo que llegó a conocerse como la ley del enfriamiento de Newton. Para extender la escala de temperatura y determinar altas temperaturas por extrapolación, Newton vio que la velocidad de enfriamiento de un sólido es proporcional a la diferencia de temperatura entre el cuerpo caliente y su entorno.

Ciencia aplicada a la tecnología de calefacción

Los principios científicos y el método científico se aplicaron a la tecnología de calefacción por primera vez de manera significativa en la obra *La Mécanique du Feu* de Nicolas Gauger de 1713. En este sentido, su libro fue un punto de inflexión en el largo viaje desde el fuego del hogar del *Homo erectus* hasta la calefacción moderna.

Basado en una serie de lecturas de termómetro "de suelo a techo", Gauger determinó que el aire caliente se eleva y es reemplazado por aire más frío. Utilizó este principio y otros, como la hipótesis de Newton de que "el calor se irradia y se refleja como la luz" ²⁵, para desarrollar numerosas innovaciones de chimenea a fin de aumentar el calor y eliminar el humo.

El trabajo de Gauger indudablemente estimuló a Benjamin Franklin y otros a intentar avanzar en el diseño científico de chimeneas y estufas, como se describe en el capítulo 4. Sin embargo, como señala I.B. Cohen, existía un límite para el éxito de estas iniciativas durante la década de 1700, ya que el fenómeno de la convección aún no se entendía del todo. "Solo después del trabajo [científico] posterior de Rumford [1797] se pudieron diseñar estufas o chimeneas verdaderamente eficientes" ²⁶.

Primera Teoría Cinética

Daniel Bernoulli cuantificó una primera versión de la teoría dinámica y cinética del calor en su famosa *Hydrodynamica*, publicada en 1738. No era una teoría cinética en el sentido moderno ²⁷, pero su trabajo estaba "muy adelantado a los tiempos". Prescindió de "partículas de fuego" y "fluidos sutiles" ²⁸ y consideró oscilaciones y colisiones de átomos o partículas constituyentes.

Bernoulli fue pionero de la teoría cinética en 1738, pero pasarían cien años antes de que se abandonara la teoría material del calor y se aceptara la teoría mecánica. Como sugiere Cardwell, "solo con el establecimiento de la doctrina de la *conservación de la energía* a mediados del siglo XIX, pudo consolidarse la teoría dinámica" ²⁹.

Calor latente y capacidad calorífica

Joseph Black es una figura clave en la ciencia del calor. Black había sido alumno de William Cullen, quien en 1755 escribió sobre la producción de hielo por evaporación bajo alto vacío. En avances que fueron indispensables para el progreso futuro en los estudios de calor, Black distinguió entre temperatura y cantidad de calor y, entre 1757 y 1762, definió los conceptos de *capacidad de calor* y *calor latente*.

Basándose en el trabajo de Hermann Boerhaave y Daniel Fahrenheit, Black descubrió que la capacidad de las sustancias para absorber el calor varía según la sustancia. Este trabajo eventualmente llevó al uso del concepto de *capacidad de calor específico*, es decir, la cantidad de calor requerida para elevar la temperatura de una libra de una sustancia en un grado Fahrenheit (o un gramo por grado centígrado). Black descubrió que un líquido hirviendo absorbe una gran cantidad de calor sin que su temperatura se eleve y que el calor puede recuperarse del vapor. Determinó que el calor no recuperado existía en "algún tipo de estado inactivo o *latente*" y lo llamó "*calor latente de vaporización*". ³⁰ De forma similar, el calor absorbido cuando un sólido se derrite se llamó *calor latente de fusión*.

En dos décadas, Joseph Lavoisier y Pierre de Laplace habían desarrollado su calorímetro de hielo para medir el flujo de calor. Diseñado para los experimentos de combustión de Lavoisier, el calorímetro medía la cantidad de calor determinando la cantidad de hielo que se derretiría.

El calor como movimiento

A medida que el siglo XVIII llegaba a su fin, la teoría material del calor —la creencia de que el calor es una sustancia— triunfaba prácticamente sin oposición. ¿Cómo se justifica su poder de permanencia, a pesar de que Newton, Boyle, Bernoulli y otros habían apoyado la idea de que "el calor es movimiento"? Cardwell lo explica:

Los méritos de la teoría eran considerables, ya que proporcionaba una explicación muy convincente del proceso de expansión térmica en sólidos, líquidos y gases; explicaba los calores latentes de fusión y vaporización y armonizaba muy bien con el fenómeno del calentamiento por compresión o el enfriamiento expansivo de un gas; de hecho, la imagen del calor material que se extraía de un gas era particularmente persuasiva ³¹.

En 1798, Benjamin Thompson —Conde Rumford— asestó el primer golpe a la teoría material y sentó las bases para la posterior aceptación de la teoría dinámica o cinética del calor como movimiento. Rumford, nacido en Estados Unidos, era un aventurero, científico e inventor de grandes ambiciones que ganó títulos y puestos importantes tanto en Londres como en Múnich y que terminó casándose con la prominente viuda de Antoine Lavoisier en París.

Mientras supervisaba el cañonaje de un arsenal de Múnich, Rumford se sorprendió por la tremenda cantidad de calor que generaba el proceso e ideó un experimento, famoso en los anales de los estudios de calor, en el que duplicaba el orificio de un cañón dentro de una caja llena de agua. El perforador deliberadamente lento estaba conectado a un torno movido por dos caballos.

Rumford demostró que la fricción provocada por la perforación podía hacer hervir el agua en dos horas y media y que no parecía haber un límite para la cantidad de calor que se podía generar de esta manera. El resultado fue inconsistente con la idea del calor como sustancia, sosteniendo lo siguiente:

Me parece extremadamente difícil, si no imposible, formarse una idea clara de cualquier cosa capaz de ser excitada y comunicada de la manera en que el calor fue excitado y comunicado en estos experimentos, salvo que sea MOVIMIENTO. ³²

Su hipótesis la respaldó con experimentos que demostraban que el calor no pesaba. ³³ De manera que pesó un bloque de hielo antes y después de derretirse. Rumford descubrió que, aunque una cantidad considerable de calor latente había entrado en el hielo al derretirse, prácticamente no había habido cambio de peso.

Los descubrimientos e invenciones relacionados con el calor de Rumford fueron notablemente amplios. Descubrió corrientes convectivas en líquidos y examinó su papel en los océanos. Hizo la "fructífera sugerencia de que el calor radiante se propaga por ondulaciones en un éter y, por lo tanto, es de la misma naturaleza que la luz". ³⁴ Hizo el importante descubrimiento de que cuanto más brillante era una superficie, más lentamente se enfriaba. ³⁵

Rumford era un nuevo tipo de científico-ingeniero-inventor. Su gran interés por los fenómenos del calor era tanto práctico como teórico. Sabía que una comprensión de las leyes o fuerzas naturales implicadas le ayudaría a lograr sus objetivos prácticos

de diseño. Cuando se enfrentaba con un problema de diseño o la necesidad de inventar, su punto de partida era con frecuencia la experimentación científica básica.

Por ejemplo, su estudio de las características aislantes de diversos materiales textiles, que realizó cuando era responsable de los suministros del ejército, le valió el máximo galardón otorgado por el pináculo científico de Londres, la Royal Society. También experimentó en conducción, convección y radiación para lograr mejoras importantes en el diseño de chimeneas y estufas, como se describe en el capítulo 4.

En cuanto a la teoría cinética ("el calor es movimiento"), Rumford la promovía a cada oportunidad y sus oponentes, la mayoría del *establishment* científico, la atacaban con igual vigor. Una cantidad significativa de cuantificación de apoyo había crecido en torno a la teoría calórica o material prevaleciente; por el contrario, con el cambio de siglo, la teoría cinética era demasiado embrionaria y sus datos demasiado incompletos para competir en igualdad de condiciones. La teoría cinética no sería aceptada por completo hasta la aparición del concepto de energía medio siglo después.

Papel clave del calor radiante

Los estudios de calor radiante y otras formas de transferencia de calor tuvieron importantes consecuencias durante el primer cuarto del siglo XIX. Al conocerse mucho mejor el papel del calor en los fenómenos geofísicos y meteorológicos, se tomó mayor conciencia de la extensa y omnipresente relevancia del calor en la tierra y, por ende, en el universo.

Además, cuando estos estudios culminaron en 1822 en la teoría analítica de la conducción del calor de Joseph Fourier, habían elevado la ciencia del calor, en palabras de Cardwell, a "teoría matemática avanzada: la primera rama de la física teórica establecida independientemente de la mecánica [newtoniana] clásica".³⁶

Esta historia comienza en 1800 cuando William Herschel se propuso determinar qué colores del espectro solar producen más calor. Herschel quería filtrar esos colores para poder reducir el deslumbramiento cuando estudiaba el sol. Planteó el experimento dejando entrar luz en una habitación oscura a través de una rendija y un prisma. Una mesa dispuesta en el recorrido de la luz alojaba una serie de termómetros.

Herschel descubrió que la temperatura se elevaba hacia el extremo rojo del espectro (lejos del extremo violeta). Le sorprendió descubrir que la temperatura seguía aumentando más allá del extremo rojo visible del espectro. Había descubierto la radiación infrarroja, a la que llamó "energía radiante invisible" en su artículo "An Investigation of the Powers of Prismatic Colours to Heat and Illuminate Objects."

John Leslie contribuyó al creciente interés en el calor radiante con su estudio de 1804:

[Leslie] establece que la absorptividad de una superficie es igual a su emisividad y que la reflectividad de una superficie disminuye a medida que aumenta su emisividad. También muestra que a medida que el calor se irradia desde un punto en una superficie, la intensidad de la radiación desde ese punto en una dirección no obstruida varía proporcionalmente al seno del ángulo que forma con la superficie.³⁷

En el trabajo de Herschel, Leslie, Macedonio Melloni y otros durante las primeras décadas del siglo son de destacar las muchas similitudes entre el calor y la luz. S. Brush resume los resultados de los extensos experimentos de Melloni en torno a 1830-32 de la siguiente manera:

El calor radiante comparte todas las propiedades cualitativas de la luz: reflexión, refracción, difracción, polarización, interferencia, etc. Esto significa que el calor y la luz deben ser fundamentalmente lo mismo, aunque las diferencias cuantitativas en propiedades tales como la longitud de onda pueden producir diferentes efectos en los órganos de los sentidos humanos.³⁸

El enfoque en las similitudes, junto con un renacimiento de la teoría ondulatoria de la luz, trajo una breve popularidad en la década de 1830 a una "teoría ondulatoria del calor". La teoría ondulatoria sostenía que el calor es una vibración de onda en el "éter universal". Vale la pena mencionarlo principalmente porque ayudó a debilitar la teoría calórica (el calor como sustancia) y a preparar el camino de la teoría cinética (el calor como movimiento).

Implicaciones de la formación de rocío

La obra *Essay on Dew and Several Appearances Connected with It* escrita en 1814 por William Charles Wells dio una explicación original, experimentalmente documentada e importante del origen y las causas del rocío. Su teoría adelantó la comprensión del grado de vapor de humedad en el aire, las condiciones en las cuales se condensa y el papel del calor radiante en la relación de la tierra con el espacio.

Wells demostró que la radiación de calor nocturno al espacio enfría la superficie de la Tierra y, en diversos grados, los objetos que hay sobre ella. El rocío, explicó, es la humedad condensada del aire circundante en objetos fríos de los que se ha irradiado calor. Durante el día, esta radiación al espacio está "desequilibrada por la radiación a la tierra procedente del sol"³⁹; como señala W. Middleton, "Wells tenía una visión extremadamente clara de lo que ahora se conoce como balance de radiación de la atmósfera".

Las nubes pueden bloquear gran parte de la radiación externa, según Wells, así que en las noches nubladas hay menos enfriamiento y menos rocío. Hay menos rocío en las noches ventosas que en las noches tranquilas, ya que el aire tiene menos oportunidades

de permanecer en contacto con los objetos enfriados y depositar el rocío. Wells también mostró que "una sustancia oscura, el carbón, acumulaba más rocío que un material claro, como la tiza, y que los malos conductores del calor, como las plantas, estaban cubiertos con más rocío que los buenos conductores, como los objetos metálicos".⁴⁰

Fourier, la conducción del calor y la nueva ciencia

Jean Joseph Fourier fue un matemático brillante y pionero que elevó los estudios sobre el calor a la categoría de ciencia teórica. En su artículo de 1822 titulado "The Analytic Theory of Heat", presentó una sofisticada teoría matemática de la conducción del calor y la radiación que incluía lo que se conocería como la ley de la conducción de calor de Fourier:

Descubrió que la velocidad de conducción de calor a través de un cuerpo es función de la diferencia de temperatura entre el lado caliente y el frío, con la conductividad del cuerpo como constante.⁴¹

Significativamente para la futura teoría cinética del calor, el trabajo de Fourier fue independiente de la teoría calórica. Sin rechazar explícitamente la teoría material (calórica), el trabajo de Fourier ayudó a preparar el camino para su desaparición.

Fourier había prestado poco atención a la evolución del motor térmico. Su histórico documento apareció dos años antes del de Sadi Carnot, a menudo llamado el padre de la termodinámica, cuyo trabajo permaneció prácticamente inadvertido durante un cuarto de siglo. Cardwell concluye, "[a Fourier] difícilmente se le puede culpar por no darse cuenta de que un estudio detallado de las operaciones de esta máquina [máquina de vapor a alta presión] llevaría al establecimiento de una ciencia de calor incluso más general que aquella cuyos principios había anunciado en 1822."⁴²

LOS MOTORES TÉRMICOS Y EL NACIMIENTO DE LA TERMODINÁMICA

En el primer siglo de nuestra era, Herón de Alejandría inventó un dispositivo de vapor llamado eolípila que, en realidad no pasó de ser un juguete sin adaptación a propósitos útiles. Giambattista Della Porta fue probablemente el primero en examinar científicamente el uso del vapor.

En 1601 Della Porta anunció sus observaciones experimentales de que, al condensar vapor en un recipiente, se podía crear un vacío que actuaría como una bomba de succión para atraer agua al recipiente. Hacia el final del siglo, la idea de succión de Della Porta junto con el trabajo de 1643 de Torricelli sobre vacíos, se incorporaron al primer motor térmico útil, inventado por Thomas Savery.

Savery comenzó un patrón en 1698 que se repetiría con Thomas Newcomen en 1712 y James Watt en 1765: periódicamente, un ingeniero-inventor de talento

utilizaba el último saber científico, la tecnología disponible y sus propias ideas creativas para dar un impulso significativo al diseño y practicidad del motor térmico. Estos avances requerían una automotivación tenaz ya que no había escuelas de ingeniería en aquel entonces, de forma que los ingenieros tenían que recabar, de los matemáticos y científicos físicos del momento, información que pudiera ser útil.

[A pesar de estos impresionantes esfuerzos,] durante 150 años el motor térmico se desarrolló muy lentamente porque no existía una teoría o conocimiento fundamental de la energía y las fuerzas con las que operaba.⁴³

Luego, a raíz de la tecnología del motor térmico y de la mano de un ingeniero convertido en científico que buscaba la base teórica de un motor de calor perfecto, surgió uno de los grandes avances científicos: "Reflections on the Motive Power of Heat" de Sadi Carnot (1824). Si al principio no fue reconocido, un cuarto de siglo después desencadenó una verdadera revolución científica comparable a la mecánica newtoniana. Con el trabajo de Carnot como elemento básico y catalizador,

... a mediados del siglo XIX, un grupo muy pequeño de físicos matemáticos y experimentales, en un brillante estallido de esfuerzo creativo pocas veces visto en la historia de la ciencia, formuló la teoría del calor, el trabajo y la energía, sobre la base del Primera y Segunda Leyes de la Termodinámica.⁴⁴

La interacción de la ciencia y la tecnología desde el motor de Savery hasta el nacimiento de la termodinámica ilustra la evolución durante este período, incluyendo figuras clave en la historia del HVAC como William Cullen y Joseph Black.

Motor de "fuego" de Savery

En 1698 el ingeniero inglés Thomas Savery inventó un motor que generó un gran entusiasmo en la industria minera. Fue el primer motor útil para drenar minas que podía "hacer lo que los equipos de caballos no podían hacer. Las minas inundadas ahora ya podían reabrirse".⁴⁵ Savery reunió ideas de Della Porta (elevación por succión), Torricelli (vacío) y otras de la siguiente manera:

En el motor de Savery... un cilindro de metal grande se llena con vapor de una caldera y luego, cortado el suministro, se empapa con agua fría para que el vapor se condense, se forme un vacío en el cilindro y se succione agua de un pozo o depósito, que no está a más de 10 metros por debajo del motor. Cuando el cilindro está lleno de agua, se reactiva el vapor y su presión hace que el agua salga del cilindro y suba por la tubería a un tanque de almacenamiento o canal de drenaje. Cuando el cilindro vuelve a llenarse de vapor, el suministro se corta y el ciclo se repite.⁴⁶

El motor de "fuego" de Savery, así se llamaba, "usaba fuego (calor) para elevar el agua (hacer un trabajo útil), pero nadie entendía realmente lo que estaba sucediendo. Por ejemplo, Savery no pudo probar su motor para medir su eficiencia".⁴⁷

El motor de Savery fue desplazado por el modelo mucho más práctico y versátil de Newcomen en poco más de una década. No obstante, supuso un progreso real al demostrar el potencial de los motores de bombeo y estimular una intensa actividad para desarrollar mejoras.

Motor de Newcomen

Thomas Newcomen, un ingeniero que contaba entre sus amigos a Robert Hooke, por entonces un físico distinguido, llegó a la conclusión de que podía diseñar un mejor motor de bombeo. Su éxito fue espectacular. Su invento de 1712 se utilizó ampliamente, sin apenas cambios, durante casi setenta años. Cardwell lo llama "la primera fuerza motriz realmente exitosa... aparte de las inmemoriales del viento, el agua y el músculo" y concluye: "Pertenece a ese pequeño... selecto grupo de inventos que han cambiado decisivamente el curso de la historia."⁴⁸

El invento de Newcomen, descrito por Ferguson como "una genial proeza en diseño de ingeniería... [para la cual] no había ninguna máquina prototipo que adaptar", reunió ideas asentadas con otras nuevas e ingeniosas. Utilizó la presión atmosférica para impulsar la carrera descendente de un pistón, una idea que extrajo del trabajo previo de Denis Papin y discutió con Robert Hooke.⁴⁹ Condensó el vapor en el cilindro para crear un vacío, igual que el motor de Savery pero con más eficacia, inyectando una corriente de agua fría dentro del cilindro en lugar de empapar el exterior.

El motor de Newcomen tenía una gran viga superior, pivotada en su centro, con pesadas cadenas suspendidas de cada extremo. De un lado colgaba el pistón, dentro de su cilindro, y del otro una varilla conectada a una bomba de agua en la mina. Cuando el pistón descendía, proporcionaba energía a través de la viga a la bomba de agua. El nuevo motor incorporaba un ingenioso mecanismo de válvula automática accionado por el movimiento de la gran viga:

En la parte inferior de la carrera del pistón, la válvula de inyección de agua se cerraba y la válvula de vapor se volvía a abrir. Así se rompía el vacío, el peso de la varilla de la bomba elevaba el pistón y el cilindro se recargaba con vapor a presión atmosférica, completando el ciclo.⁵⁰

Cullen, Black y el motor de James Watt

El gran avance de James Watt en tecnología de motores térmicos —un condensador separado, desarrollado en 1765— se basó en una comprensión mucho más profunda del calor. Watt era un hábil fabricante de instrumentos empleado por la

Universidad de Glasgow, donde William Cullen había investigado la evaporación en el vacío y donde el alumno de Cullen, Joseph Black, profesor de química y amigo de Watt, había identificado los conceptos de calor latente y capacidad de calor.

A Watt se le pidió que probara a reparar un modelo de motor de Newcomen propiedad de la universidad. Tras concluir que "solo un tercio del vapor total consumido en el motor de Newcomen se usaba para el propósito pretendido —llenar el cilindro y producir un vacío—",⁵¹ Watt se interesó profundamente en las cuestiones generales de qué sucedía con el vapor en el motor y cómo minimizar la entrada de vapor sin reducir la eficacia del motor (potencia de salida).

De modo que recogió mediciones exhaustivas del consumo de vapor durante todo el ciclo del motor y las comparó con un requisito mínimo teórico ("el volumen del cilindro multiplicado por el número de ciclos realizados"). Concluyó que el desperdicio era significativo y que el exceso o malgasto de vapor parecía igualar la cantidad requerida "simplemente para calentar el cilindro después de haberse enfriado con el agua fría de condensación".⁵²

Mientras exploraba formas de reducir el consumo de vapor, Watt hizo uso del trabajo de Cullen así como del de Black, con quien discutió sus experimentos. Watt integró sus propias percepciones y resultados experimentales sobre problemas específicos con el saber científico más profundo de Cullen y Black; la síntesis resultante fue ciencia aplicada en su máximo esplendor, dado el estado del conocimiento en ese momento.

En 1781 se produjo el primer motor Watt a gran escala, presentando el condensador separado para mantener caliente el cilindro primario y otras técnicas innovadoras para minimizar el consumo de vapor. "La potencia de salida del motor de Watt por unidad de vapor era cuatro veces la del motor de Newcomen". Hacia 1800 había aproximadamente quinientas aplicaciones exitosas.⁵³

La calefacción para edificios también dio un nuevo giro significativo como resultado directo del trabajo de Watt. En base a su comprensión del calor latente y a su trabajo con calderas de vapor, en la década de 1780 Watt construyó lo que parece ser el primer sistema central de calefacción por vapor, con tuberías y radiadores. Junto con su socio Matthew Boulton y otros, desarrollaron y aplicaron sistemas de calefacción de vapor en molinos y otros lugares, como se describe en el capítulo 5.

No obstante, el ingenio de Newcomen y Watt, ambos vivieron en una época en la que el calor era considerado una sustancia material por muchos científicos, y no existía una comprensión real de las relaciones entre el calor, el trabajo y la energía. La ciencia de la termodinámica tendría que producir motores lo bastante eficientes y versátiles para revolucionar la sociedad.

CONTRIBUCIÓN DE CARNOT

Nicolas Leonard Sadi Carnot, conocido como Sadi Carnot, publicó un solo artículo en su vida, en 1824, a la edad de 28 años. Murió ocho años después, después de un período en el ejército y antes de poder llevar a cabo experimentos planeados sobre la relación de calor y trabajo. Sin embargo, ese artículo ("Reflections on the Motive Power of Heat and on Machines Appropriate for Developing this Power") le aseguró a Carnot un lugar entre los inmortales de la ciencia.

Carnot dio "un gran paso adelante en la comprensión del proceso de calor a trabajo".⁵⁴ Por primera vez planteó un patrón de máxima eficiencia teórica del motor térmico por el cual todos los motores térmicos podían ser evaluados. Al presentar sus ideas sobre ciclo y motor térmico ideal (reversible), Carnot llegó a conclusiones que constituían el núcleo y el primer enunciado de lo que un día se conocería como la segunda ley de la termodinámica. (La segunda ley fue formulada en su totalidad y aceptada como ley fundamental un cuarto de siglo después, después del redescubrimiento del artículo de Carnot y el trabajo adicional de Clausius y Kelvin.)

Formado tanto en ingeniería como en ciencias, Carnot valoraba mucho el enorme potencial de los motores térmicos. "Parecen destinados a provocar una gran revolución en el mundo civilizado", escribió en la introducción a su artículo. Si el motor térmico pudiera desarrollarse como "un motor potente y práctico que pueda adquirirse y transportarse a cualquier lugar", continuó, podría dar lugar a "una extensión rápida en las artes en las que se aplica, y... incluso crear artes completamente nuevas".

El interés de Carnot era científico, una búsqueda de principios generales, como dejó en claro en "Reflections":

A pesar del trabajo en todo tipo de motores de vapor, su teoría es muy poco comprendida, y los intentos de mejorarlos todavía se dirigen casi por casualidad. Si el arte de producir energía motriz a partir de calor fuera elevado al rango de ciencia, el fenómeno completo deberá estudiarse desde el punto de vista más general, sin referencia a ningún motor, máquina o fluido operante en particular.⁵⁵

Para explorar el efecto de trabajo del calor, Carnot se dio cuenta de que el objeto de estudio apropiado era un ciclo completo del motor. Durante este ciclo, señaló, el calor debe ser recibido y rechazado, y el fluido de trabajo debe regresar al final de cada ciclo a su estado original, listo para comenzar un nuevo ciclo.

Ciclo reversible y principio de Carnot

El inspirado concepto de Carnot de ciclo ideal le permitió demostrar la cantidad mínima absoluta de calor requerida para un rendimiento de trabajo determinado. Su ciclo ideal (reversible) elimina la fricción y mantiene el equilibrio a través de todos los límites dentro del ciclo, excepto en cantidades

infinitesimales. Por lo tanto, elimina las pérdidas de energía no productivas al convertir el calor en trabajo y, aunque no se puede lograr en el mundo real, proporciona una base cuantificable para determinar el grado de pérdida de calor no productivo en un sistema (esto es, la desviación del ideal).

Una de las ideas clave de Carnot fue que, operando en estas condiciones ideales, el potencial de trabajo de un sistema se debe únicamente a la diferencia de temperatura entre la fuente de calor de alta temperatura y el sumidero de baja temperatura, con independencia del fluido utilizado. Cuanto mayor es la diferencia de temperatura, mayor es el potencial de trabajo.

El conocido como principio de Carnot se basa en el reconocimiento de Carnot de que no puede haber transferencia espontánea de calor de una temperatura inferior a una superior (segunda ley). Éste es el resumen de Sandfort del principio de Carnot:

De todos los motores térmicos que reciben calor de la misma fuente de temperatura constante y rechazan el calor al mismo receptor de temperatura constante, ninguno puede ser más eficiente que un motor reversible [motor funcionando en un ciclo de Carnot ideal].⁵⁶

El ciclo ideal de Carnot consta de dos procesos isotérmicos separados por dos procesos adiabáticos. Hoy el término *ciclo de Carnot* se refiere a cualquier ciclo que comprende estos cuatro procesos. El concepto de *reversibilidad* de Carnot tiene que ver con el equilibrio. En cada parte del ciclo, solo un cambio infinitesimal podría, teóricamente, invertir el proceso particular (por ejemplo, desde la compresión hasta la expansión).

El ciclo reversible y el principio de Carnot también se pueden explicar de la siguiente manera:

[En el ciclo ideal, reversible,] el trabajo mecánico W que produce se puede utilizar para hacer retroceder una máquina idéntica, devolviendo la cantidad Q del depósito frío al depósito caliente. Se deduce que cualquier motor más eficiente que el de Carnot sería una fuente de movimiento perpetuo. Descartando tal posibilidad, Carnot declaró que la máxima eficiencia teórica de un motor térmico, W / Q , depende únicamente de la temperatura de los depósitos entre los que discurre, y en absoluto de la naturaleza del gas de su interior: $W/Q = C(T) (T_1 - T_2)$.⁵⁷

La descripción de Carnot de la operación de ciclo inverso presentó, por primera vez, la base de la refrigeración mecánica. El documento de 1824 "Reflections..." contenía un defecto que no afectaba a la validez de las conclusiones de Carnot pero sí causó alguna confusión posterior. Carnot usó el concepto calórico en su análisis, inclinándose ante la visión científica dominante sobre la naturaleza del calor. La mayoría de los historiadores creen que las notas que dejó y sus experimentos planeados muestran que tenía

serias dudas sobre la teoría calórica o, quizás, ya la había rechazado antes de morir. En cualquier caso, cuando "Reflections" se redescubrió a mediados de siglo, algunos que reconocieron su brillantez lo utilizaron para apoyar el argumento calórico.

Otros, incapaces de rechazar sus conclusiones pero favoreciendo la teoría cinética del calor, siguieron preocupados hasta que el acertijo intelectual fue resuelto. Estos dos grandes avances —el trabajo de Carnot y la teoría cinética— se reconciliaron cuando los físicos William Thomson (más tarde Lord Kelvin) y Rudolph Clausius, basándose en los fundamentos de Carnot y la obra de Julius Robert Mayer y James Prescott Joule, desarrollaron las "memorias definitivas [artículos] que establecieron la termodinámica clásica".⁵⁸

TERMODINÁMICA CLÁSICA: 1840-1880

En la década de 1840, Robert Mayer y James Joule realizaron importantes trabajos preparatorios para la termodinámica clásica y la teoría cinética, fijando las siguientes piedras angulares: la conservación (indestructibilidad) de la energía, la interconversión y la equivalencia cuantitativa del calor y el trabajo mecánico, y más ampliamente, la interconversión y la equivalencia de todas las formas de energía.

Mayer era un médico que, mientras servía brevemente en un barco mercante en las Indias Orientales, se interesó en el calor de los animales y el calor externo que el uso de los músculos puede generar (por ejemplo, el calor de la percusión de un herrero). Con una visión impresionante, concluyó que "el calor generado debe ser proporcional al trabajo gastado... [y que] debe existir, por tanto, una relación fija entre el calor y el trabajo"⁵⁹.

Mayer explicó, en un artículo de 1842, que su teoría sobre el calor y el trabajo se basaba en el principio de que la *fuera* (energía) es indestructible. Su trabajo fue uno de los primeros enunciados generales del principio de conservación de energía. También incluyó su valor para el equivalente mecánico del calor.

Sin embargo, su trabajo fue prácticamente ignorado, debido sin duda a su falta de estatus en la comunidad científica, junto con la situación afianzada de la teoría calórica. Solo cerca del final de su vida fue reconocido y honrado su trabajo. En el largo interín, fueron los exhaustivos experimentos del físico Joule los que tuvieron un gran impacto en el pensamiento científico.

Los compañeros alemanes de Mayer se enteraron del axioma de conservación de energía del inglés Joule, no de Mayer, aunque el trabajo de Joule no precediera al de Mayer. En realidad, el trabajo de Joule también fue objeto de desinterés durante algunos años, hasta que William Thomson (más tarde Lord Kelvin) le oyó hablar en 1847, quedó profundamente impresionado y centró la atención en su trabajo.

Impacto de Joule

Durante su vida, Joule se convirtió en un físico experimental de gran prestigio. Debido en gran medida a sus amplios y meticulosos experimentos sobre conversión de energía y equivalencia, el bloqueo de la ciencia del calor comenzó a romperse: la teoría calórica comenzó a dar paso a los conceptos de energía, conservación de la energía, y equivalencia y convertibilidad de todas las formas de energía.

Su familia poseía una gran cervecería y un taller de maquinaria en un importante centro industrial como Manchester, de modo que Joule se interesó por los problemas técnicos de los ingenieros. Así mismo influyeron en él un tutor ilustre, John Dalton, padre de la teoría atómica, y el descubrimiento por parte de Michael Faraday de la inducción electromagnética, la base de la dinamo y de la transmisión de electricidad a través del cable.

El trabajo de Joule en la década de 1840 "fue de vital importancia para rastrear la red de procesos de conversión y para proporcionar confirmación experimental de la equivalencia cuantitativa del calor y el trabajo mecánico".⁶⁰ En un importante documento anterior ("On the Caloric Effects of Magneto-Electricity, and on the Mechanical Value of Heat", 1843), Joule describió experimentos que demostraban la convertibilidad y la equivalencia de fenómenos eléctricos, químicos y térmicos.

En estos experimentos, el trabajo mecánico (caída de pesos) operaba una máquina electromagnética que generaba una corriente eléctrica que, a su vez, generaba calor. La corriente pasaba a través de una resistencia sumergida en agua, y Joule comparó el aumento de temperatura del agua con el trabajo mecánico realizado por los pesos para llegar a un valor para el equivalente mecánico del calor. Luego midió los cambios de calor con la compresión y expansión del aire en función de la presión atmosférica.

En este punto, Joule se enfrentó a la dificultad no resuelta que había hecho incierta la determinación de Mayer del valor mecánico del calor. ¿Qué prueba había de que todo el trabajo realizado en el gas se había convertido en calor o, alternativamente, que todo el calor producido se debía al trabajo realizado? ¿No sería que al comprimir el gas —al reducir su volumen— parte del calor liberado pudiera deberse a que el calor "latente" se hiciera "sensible"?⁶¹

Explicando estos experimentos en un artículo de 1845, Joule comunicó el importante descubrimiento de que "cuando se permitía que el gas comprimido se expandiera libremente sin realizar ningún trabajo, no había cambio en la temperatura".⁶² El calor no se perdía simplemente cambiando el volumen del gas si la expansión no producía ningún trabajo.

A continuación, se realizaron experimentos con calor generado por fricción, incluida la que probablemente sea su obra más conocida, la serie de ruedas de palas. Joule usó pesas para hacer girar una pala sumergida en diversos líquidos y midió el aumento de

temperatura causado por la agitación acuosa. Repitiendo con meticulosidad estos experimentos en 1850, derivó un valor de 772,5 pies-libras por unidad térmica británica como el equivalente mecánico del calor. Como escribió Fenn en 1982, esta cifra no se aleja más de un "uno por ciento del mejor valor experimental actual."⁶³

El trabajo de Joule llamó poco la atención hasta 1847, cuando dos eventos comenzaron a cambiar su posición. Hermann von Helmholtz, en un artículo clave y completo titulado "Sobre la conservación de la energía", citó los experimentos de Joule en apoyo de su propio trabajo al presentar los principios matemáticos de la conservación de la energía.

Helmholtz [citando el trabajo de Joule y el de otros] expresó la relación entre mecánica, calor, luz, electricidad y magnetismo al tratar estos fenómenos como diferentes manifestaciones de la energía. Helmholtz formuló la ley de la conservación de la energía como teorema matemático y mecánico, enfatizando el papel unificador del concepto de energía como expresión de la visión mecánica de la naturaleza.⁶⁴

También se produjo un encuentro premonitorio en 1847. Asistiendo a una presentación de Joule en una reunión de Oxford de la Asociación Británica para el Avance de la Ciencia, William Thomson (más tarde Lord Kelvin) quedó profundamente impresionado por los experimentos y la teoría de Joule, que éste resumió de la siguiente manera:

El experimento ha demostrado que cuando la fuerza viva [energía cinética] aparentemente se destruye, ya sea por percusión, fricción o cualquier otro medio similar, se restablece un equivalente exacto de calor. Lo contrario también es verdad. El calor, la fuerza viva y la atracción a través del espacio... son mutuamente convertibles. En estas conversiones, no se pierde nada nunca.⁶⁵

El gran interés de Thomson favoreció un merecido reconocimiento del trabajo de Joule. En 1850, la Royal Society publicó el último trabajo de Joule sobre la equivalencia mecánica del calor y el trabajo. Más allá de eso, la reunión de Joule y Thomson afectó el desarrollo futuro de la termodinámica.

Thomson (Kelvin), Clausius y el dilema Carnot-Joule

En esa noche de 1847, Thomson llegó sin ninguna expectativa de que las ideas de Joule tuvieran un gran impacto en su pensamiento y trabajo. Muy al contrario.

Thomson había sido educado tanto en la Universidad de Glasgow (desde los diez años) como en Cambridge, había pasado tiempo en el laboratorio experimental de Victor Regnault en París, y tenía un conocimiento profundo de los grandes matemáticos franceses como Laplace y Fourier. Su trabajo anterior se había centrado en problemas de calor y teoría eléctrica. En el

momento de su reunión con Joule, Thomson ocupaba la cátedra de filosofía natural de la Universidad de Glasgow.

Durante su estancia en Francia dos años antes, tuvo conocimiento del trabajo de Carnot a través de la reformulación matemática que hizo Emile Clapeyron en 1834 y quedó maravillado por la fuerza de su razonamiento. (Clapeyron había adaptado el diagrama indicador de presión-volumen de James Watt para representar el ciclo de Carnot tanto para un gas como para un vapor saturado, y había señalado que el área encerrada por la curva del ciclo representaba el trabajo).

Aunque Thomson no era un defensor particular de la teoría calórica (el calor como sustancia), pensó que las teorías de Carnot dependían de ello, y no estaba dispuesto a renunciar a Carnot. Tenía la impresión de que no se podía apoyar a Joule y a Carnot al mismo tiempo.

Cuando oyó a Joule por primera vez en la reunión de Oxford, Thomson halló sus cuidadosos experimentos y conclusiones convincentes... e inquietantes. Si como sostenía Joule, el calor era la "fuerza viva [energía cinética] de las partículas de los cuerpos en los que es inducido",⁶⁶ si el calor y el efecto mecánico (trabajo) eran manifestaciones de la misma cosa, si el calor y el trabajo tenían una equivalencia cuantificable e interconvertibilidad, si el calor pudiera ser generado por el trabajo o destruido en el proceso de producción del trabajo, ¿dónde dejaba eso a Carnot?

Thomson también encontró gran mérito y autoridad en el ciclo ideal del motor reversible de Carnot y en su propuesta de que el efecto mecánico depende del calor (calórico) que ingresa en el ciclo desde un depósito a alta temperatura y lo abandona a través de un sumidero a baja temperatura. Carnot, creyendo que lo calórico era un tipo de fluido sin masa, concibió que su paso por el ciclo era análogo al del agua que cae en una noria. Todo lo calórico tenía que ciclar, y el agente del cambio era su caída de temperatura.

Ambos no podían estar en lo cierto. Sin embargo, había tal fuerza en cada uno de ellos que Thomson pasó los siguientes tres años buscando los puntos de acuerdo y los medios de reconciliación. Mientras tanto, publicó un informe del trabajo de Carnot que sacó a Carnot de la oscuridad, y aclaró las disparidades del dilema Carnot-Joule.

Uno de los frutos de su búsqueda fue la *escala de temperatura absoluta (escala Kelvin)*, desarrollada en 1848. Observando la medida de eficacia de Carnot — diferencia de temperatura entre la fuente de calor y el disipador de calor, *independientemente del fluido utilizado*—, Thomson vio la necesidad de medir la temperatura de alguna manera fundamental que no estuviera relacionada con una sustancia termométrica en particular y que fuera significativa en el análisis termodinámico.

Si el calor fuera de hecho el resultado del movimiento de partículas, entonces debe haber un *cero absoluto de temperatura* en el cual no hay movimiento.

Los experimentos lo fijaron en $-273,13\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($-459,6\text{ }^{\circ}\text{F}$) y Thomson propuso que las temperaturas medidas desde este punto se denominaran *temperaturas absolutas*. Como T. Benzinger señaló, la escala de Kelvin era "indispensable" no solo para el desarrollo de la física moderna, sino "para toda la tecnología de temperatura, calor y potencia".⁶⁷

Posteriormente, las piezas del rompecabezas Carnot-Joule se unieron para Thomson. La solución que encontró fue que entraban en juego dos leyes fundamentales, no solo una ley de conservación. Pero antes de que Joule publicara su obra, el físico teórico alemán Rudolph Clausius publicó "Sobre la fuerza motriz del calor y las leyes que pueden deducirse de ella para la teoría del calor" en 1850. Por una avenida diferente, Clausius había encontrado su camino hacia la misma reconciliación fundamental.

Clausius le dio crédito a Thomson en la clarificación, y Thomson, que publicaría el año siguiente, se inclinó ante la prioridad de Clausius pero reivindicó haber descubierto la solución de manera independiente. Tanto el artículo de Clausius como el de Thomson de 1851, "Sobre la teoría dinámica del calor, con resultados numéricos derivados de la unidad térmica equivalente del señor Joule, y observaciones de M. Regnault sobre el vapor", son clásicos de la termodinámica.

La reconciliación: dos leyes y no una

Ambos vieron que efectivamente existía un principio de conservación, que llegaría a conocerse como la primera ley de la termodinámica. Pero no era la conservación del *calor* de Carnot... era la *energía* la que se conservaba. La energía nunca se creaba ni se destruía, *sino que podía ser transformada*.

Tanto Thomson como Clausius creían que se requerían dos principios fundamentales para explicar la fuerza motriz del calor. La segunda, que se conocería como la segunda ley de la termodinámica, expresaba el flujo direccional de la energía hacia la disipación en procesos físicos irreversibles (todos los procesos naturales espontáneos): caliente hacia frío y disponible o usable hacia no disponible, concentrado hacia difuso, alta calidad hacia baja calidad, ordenado hacia desordenado.

Esta ley era coherente con la primera, ya que la energía no se destruía sino que se transformaba. P.W. Atkins lo explica de esta manera:

La *Segunda Ley* reconoce que hay una disimetría fundamental en la Naturaleza: ...los objetos calientes se enfrían, pero los objetos fríos no se calientan espontáneamente; una bola que bota se detiene, pero una bola estacionaria no comienza a botar espontáneamente. Aquí está la característica de la Naturaleza que tanto Kelvin [Thomson] como Clausius desenredaron de la conservación de la energía: aunque la *cantidad* total de energía debe *conservarse* en cualquier proceso..., la *distribución* de esa energía cambia de manera irreversible. La Segunda Ley se refiere a la dirección natural de

cambio de la distribución de la energía, algo muy independiente de su cantidad total.⁶⁸

Los dos principios fundamentales —la conservación y la disipación de la energía— explicaban y reconciliaban a Joule y Carnot, siempre que cada uno abandonara algo: la "conservación del calor como calor" de Carnot (y su supuesta transferencia *in toto* de la fuente de calor al disipador de calor) tuvo que ceder el paso, y la afirmación de Joule de que el calor podía convertirse al cien por cien en efecto mecánico hubo de ser modificada.

El trabajo podía convertirse totalmente en calor, pero el calor nunca podría convertirse totalmente en trabajo en ningún proceso cíclico y continuo. Incluso en un motor reversible perfectamente eficiente, para producir trabajo una parte del calor debía fluir (a una temperatura reducida) al sumidero de baja temperatura en cada ciclo. Entraba la segunda ley en acción.

Enunciados de Thomson (Kelvin) y Clausius de la Segunda Ley

Thomson y Clausius llegaron a la segunda ley desde diferentes enfoques mentales, y sus formulaciones separadas del principio han llegado a conocerse como el *Enunciado de Kelvin de la segunda ley* y el *Enunciado de Clausius de la segunda ley*. Aunque ostensiblemente diferentes, los dos enunciados son lógicamente equivalentes conforme al razonamiento termodinámico. Ambos expresan la disimetría fundamental de la naturaleza y cada uno implica al otro.

El de Kelvin se refiere al hecho de que se necesita un sumidero frío al convertir calor en trabajo en un proceso cíclico:

[*Enunciado de Kelvin de la Segunda Ley*: No es posible ningún proceso en el que el *único resultado* sea la absorción de calor de un depósito y su *conversión completa* en trabajo.⁶⁹

El enunciado de Clausius niega que el calor pueda fluir espontáneamente de un cuerpo frío a uno más caliente:

[*Enunciado de Clausius de la Segunda Ley*: No es posible ningún proceso en el que el *único resultado* sea la transferencia de energía de un cuerpo más frío a otro más caliente.⁷⁰

Thomson (Kelvin) amplió su análisis de la segunda ley en un documento de 1852, "Sobre una tendencia universal de la naturaleza a la disipación de la energía mecánica". Y en los quince años de 1850 a 1865, Clausius hizo "un trabajo descomunal en el desarrollo de la termodinámica clásica", escribiendo una serie de documentos que "aceleraron la termodinámica como una ciencia altamente matemática y teórica".⁷¹

En este período, Clausius desarrolló la "propiedad termodinámica abstracta que luego denominó entropía", ⁷² presentándola en su forma más madura en el documento de 1865 "Sobre diferentes formas de las ecuaciones fundamentales de la teoría mecánica del calor y su conveniencia para la aplicación". Derivó el término *entropía* de la palabra griega 'transformación'.

La entropía denota el grado de desorden existente en un sistema: la medida en que la energía del sistema no está disponible para el trabajo. La segunda ley a menudo se enuncia en relación con el concepto de entropía. Este enunciado, también conocido como *principio de entropía*, implica tanto los de Kelvin como los de Clausius de la segunda ley:

Principio de entropía (y enunciado alternativo de la Segunda Ley): Los procesos naturales van acompañados de un aumento de la entropía del universo. ⁷³

Termodinámica y teoría cinética

La aceptación de las dos primeras leyes de la termodinámica trajo el rechazo de la teoría calórica y la reactivación de la teoría cinética o dinámica del calor. Clausius "estableció el primer vínculo significativo entre la termodinámica y la teoría cinética de los gases", ⁷⁴ argumentando, al igual que Joule, que

... la equivalencia de calor y trabajo respaldaba la hipótesis de que el calor consistía en un movimiento de las partículas que constituían los cuerpos. Clausius sostuvo que la fuerza viva (energía cinética) del movimiento de estas partículas podía convertirse en trabajo mecánico. ... La hipótesis... hizo conceptualmente inteligible la equivalencia del calor y el trabajo mecánico, proporcionando una base mecánica para la relación entre el calor y el trabajo. ⁷⁵

Clausius comenzó el desarrollo matemático de la teoría cinética en 1857 y fue capaz de derivar de ella todas las leyes de los gases conocidas. James Clerk Maxwell llevó este desarrollo a otro nivel. La clasificación de las relaciones entre las leyes de la termodinámica y la teoría cinética requirió, por primera vez en física, el uso de la teoría estadística:

La teoría cinética interpreta la presión, la temperatura y otras propiedades macroscópicas de un gas como funciones de los valores promedio del momento y la energía de sus partículas constituyentes. Para calcular estos promedios Maxwell... introdujo una función de distribución estadística para las velocidades de las partículas de un gas ideal (1859, 1866). ⁷⁶

Ludwig Boltzmann llevó adelante este trabajo en un documento fundamental de 1877 sobre mecánica estadística. En él, Boltzmann presentó una "explicación teórica de la segunda ley basada en una combinación de

la mecánica y las leyes de probabilidad aplicadas a un gran conjunto de moléculas en un gas". ⁷⁷

Nuevo Paradigma de Energía: Relevancia en HVAC

Desde finales del siglo XVII hasta mediados del siglo XIX, la física había sido la ciencia de la fuerza, basada en las leyes de la dinámica establecidas por Newton. En la década de 1850 tuvo lugar un profundo cambio.

Consecuencia en gran medida del trabajo de Joule, Thomson y Clausius, la energía surgió como el concepto más fundamental y unificador. En la "mayor reforma que la ciencia física ha experimentado desde los días de Newton", como el propio Thomson definió haciendo honor a Joule, ⁷⁸ la física se convirtió en el estudio de la energía y sus transformaciones.

El estado fundamental de la energía derivaba de su inmutabilidad, de su convertibilidad, y de su papel unificador en la vinculación de todos los fenómenos físicos dentro de una red de transformaciones de energía. La relación entre la indestructibilidad y la disipación de energía amplió la aplicación del concepto de energía a todos los procesos físicos. ⁷⁹

¿Cómo fue que este nuevo y profundo paradigma de energía y las leyes de la termodinámica se abrieron paso en la tecnología de calefacción, refrigeración y ventilación? Su potencial fue puesto de manifiesto casi de inmediato por Thomson.

Además de sus dotes como físico matemático, Thomson tenía una fuerte inclinación de ingeniería. Había crecido, estudiado y enseñado en la Universidad de Glasgow, donde Watt había trabajado y donde la interacción entre científicos e ingenieros era común. Su padre había sido profesor de matemáticas e ingeniería.

A los pocos meses de la publicación en 1852 de su ensayo teórico sobre la tendencia universal a la disipación de la energía, Thomson demostró lo que la teoría podría significar para la tecnología HVAC&R. Ese mismo año publicó "Sobre la economía de la calefacción o refrigeración de edificios mediante corrientes de aire", que "le valió adquirir prioridad como inventor de la bomba de calor". ⁸⁰

Thomson aplicó principios termodinámicos al describir, por primera vez, un ciclo de refrigeración que podría usarse para calentar o enfriar edificios. Comparó la energía requerida para calentar el aire directamente de la quema de combustible, como era la costumbre, con la requerida para hacer el mismo trabajo con la bomba de calor de diseño termodinámico.

Demostró, clara y directamente, que el ahorro de combustible sería significativo y, aunque pasarían ochenta y seis años antes de la primera aplicación práctica de la bomba de calor, Thomson había "enunciado claramente su principio" ⁸¹ como resultado

directo de su trabajo teórico en la segunda ley de la termodinámica.

Desde la década de 1860 hasta principios de la década de 1870, el concepto de entropía no se comprendía del todo y con frecuencia se malinterpretaba, incluso en los libros de texto. Luego, en una década, el físico matemático Josiah Willard Gibbs, que trabajaba en la Universidad de Yale, realizó un trabajo extraordinario que transmitía su enorme poder y relevancia a un público mucho más amplio.

Con claridad y elegancia matemática, Gibbs desarrolló una amplia gama de relaciones termodinámicas, haciendo mucho más accesible la teoría de la primera y la segunda leyes. En su crucial artículo de 1878 "Sobre el equilibrio de las sustancias heterogéneas",

[Gibbs] amplió enormemente el dominio abarcado por la termodinámica, incluidos los fenómenos químicos, elásticos, de superficie, electromagnéticos y electroquímicos, en un solo sistema...

El artículo de Gibbs [300 páginas] mostró cómo la teoría general del equilibrio termodinámico se podía aplicar en fenómenos tan variados como la disolución de un cristal en un líquido, la dependencia de la temperatura de la fuerza electromotriz de una celda electroquímica, y el calor absorbido cuando en la superficie de discontinuidad entre dos fluidos aumenta. Pero aún más importante que los resultados particulares que obtuvo fue su introducción del método general y los conceptos con los que se podrían manejar todas las aplicaciones de la termodinámica [énfasis añadido].⁸²

Desde su primer trabajo, "Métodos gráficos en la termodinámica de fluidos" de 1873, quedó claro que Gibbs "entendió... la entropía como uno de los conceptos esenciales para el tratamiento de un sistema termodinámico, junto con la energía, la temperatura, la presión y el volumen."⁸³ En este trabajo, él originó diagramas de temperatura-entropía y volumen-entropía, mostrando las muchas ventajas de los primeros en el estudio de procesos cíclicos y la utilidad de los segundos para fines termodinámicos generales.⁸⁴

Gibbs también hizo una contribución importante a las leyes de los gases, reformulando la ley de Dalton de presiones parciales para incluir conceptos termodinámicos. El enunciado resultante sobre las propiedades de las mezclas se conoce como ley de Gibbs-Dalton:

La energía interna, la entalpía y la entropía de una mezcla gaseosa son respectivamente iguales a las sumas de las energías internas, las entalpías y las entropías de los componentes.

Cada componente tiene la energía interna, la entalpía y la entropía, que tendría si ocupara solo ese volumen ocupado por la mezcla a la temperatura de la mezcla.⁸⁵

Gracias en gran medida al trabajo de J. Willard Gibbs, la termodinámica tardó apenas unos años en convertirse en un factor importante del análisis y desarrollo tecnológico en las siguientes áreas de la calefacción y la refrigeración: procesos de combustión que proporcionaban calor a calderas y motores, refrigerantes y máquinas de refrigeración, y después de 1900, psicrometría, la piedra angular del aire acondicionado moderno.

CIENCIA DE LA REFRIGERACIÓN Y EL AIRE ACONDICIONADO

Los antiguos fueron ingeniosos a la hora de usar el efecto evaporativo, el hielo cosechado y la nieve envasada para enfriar. En el capítulo 2 se citan ejemplos interesantes. Hubo que esperar a la década del año 1500, con el uso registrado de mezclas de refrigeración, para comenzar la transición de la refrigeración natural a la artificial.

Primero, el agua se enfriaba mediante la adición de sales como el nitrato de potasio. Luego se descubrió — como señaló Della Porta en 1589— que se podían obtener temperaturas muy bajas cuando se mezclaba nieve en lugar de agua con sales. Francis Bacon y otros dieron fórmulas para las mezclas, y "fueron utilizadas en la investigación científica ya en el siglo XVII... por la Accademia del Cimento de Florencia (1657), por Robert Boyle (1662) y por Philippe Lahire... quien produjo hielo en una redoma sumergida en nitrato de amonio (1685)".⁸⁶

Evaporación al vacío

William Cullen fue el primero en demostrar el potencial de producir refrigeración mecánicamente, si bien no se identificaron las aplicaciones prácticas planteadas para el futuro. En su trabajo de 1755 "Ensayo sobre el frío producido por la evaporación de fluidos", Cullen describió experimentos en los que producía hielo al evaporar un líquido volátil (éter nitroso) en condiciones de alto vacío, con independencia de las circunstancias ambientales.

En este punto, podemos preguntarnos por qué el Dr. Cullen no procedió inmediatamente a explotar su descubrimiento y construir máquinas para fabricar hielo. ¿No tenía todos los elementos esenciales a mano? Estaba el éter nitroso refrigerante, que en alto vacío herviría a una temperatura lo suficientemente baja como para congelar el hielo. Además, tenía una bomba de vacío que podía producir un vacío continuo. Estos elementos parecen ser básicamente bastante similares a las partes componentes utilizadas en nuestras modernas máquinas de refrigeración por compresión de vapor.

Pero todo esto parece obvio solo a la luz de nuestra tecnología actual y del conocimiento de la termodinámica. [Esto fue] sesenta y nueve años antes de que se publicara el trabajo de Carnot sobre la verdadera naturaleza de la fuerza motriz del calor, y casi cien años antes de que Kelvin y Clausius

resolvieran por fin el gran enigma del calor, el trabajo y la energía a través de los conceptos de la Primera y Segunda Leyes de la Termodinámica.⁸⁷

El capítulo 5 ofrece más ejemplos de investigaciones del siglo XVIII en métodos para producir frío.

Compresión y Absorción

En el primer año del siglo XIX, John Dalton estudió la compresibilidad de las mezclas gaseosas y la relación de su temperatura y volumen. Así determinó, independientemente de Jacques Charles y Joseph Gay-Lussac, que cuando se calienta un gas, su volumen aumenta proporcionalmente a su temperatura. Como se señaló en el capítulo 8, su trabajo contribuyó al desarrollo de los primeros sistemas de refrigeración por ciclo de aire unos cuarenta años más tarde.

En el mismo año, Dalton formuló su ley de las presiones parciales, descrita anteriormente, para explicar las características de las mezclas de gases atmosféricos. En 1802 identificó el vapor de agua como un gas, "refutando concepciones anteriores de burbujas de agua llenas de fuego", y afirmó que "el vapor de agua se mezcla no químicamente con los otros gases atmosféricos para formar aire".⁸⁸

Una década después del cambio de siglo, John Leslie —continuando el trabajo de William Cullen— sentó la base científica de la refrigeración por absorción. Leslie alcanzó temperaturas muy bajas y produjo hielo al evaporar el agua al vacío, utilizando un desecante (ácido sulfúrico) para absorber el vapor de agua. El desarrollo comercial de las primeras máquinas básicas de absorción, a partir de este principio, se produjo casi sesenta años después, como se describe en el capítulo 8.

En la década de 1770, Joseph Priestley aisló amoníaco y dióxido de carbono, entre otros gases. Después, a partir de 1823, Michael Faraday realizó una serie de experimentos en los que pudo licuar cloro, amoníaco y dióxido de carbono —los primeros refrigerantes—, así como otros gases. La licuefacción era un requisito previo para el desarrollo de máquinas de compresión y absorción.

Termodinámica y refrigeración eficiente

Desde el momento en que William Cullen produjo hielo por primera vez en su laboratorio en 1755 hasta el último cuarto del siglo XIX, la ciencia y la tecnología de la refrigeración evolucionaron en corrientes esencialmente separadas con una interacción mínima. Los componentes científicos requeridos por los modernos sistemas de refrigeración aún no estaban bien implantados.

Como deja claro el capítulo 8, los ingeniosos inventores no obstante avanzaron desde principios de 1800 en el desarrollo de máquinas de refrigeración de varios tipos. Sin embargo, como en el caso del desarrollo de motores térmicos antes de Newcomen, el progreso fue lento. Sandfort alumbró la razón en su comentario sobre Jacob Perkins, quien en 1834 inventó el primer

sistema de compresión de vapor: "Perkins tenía poco o ningún conocimiento real de la naturaleza fundamental de su ciclo"⁸⁹.

El ingrediente clave que faltaba era la interpretación termodinámica. Con el trabajo de Joule, Thomson (Kelvin) y Clausius en el desarrollo de la primera y segunda leyes y el concepto de entropía, más el de Gibbs y otros generalizando esta interdisciplinariedad y mostrando la forma de aplicarla, se preparó el escenario para un progreso rápido.

Carl von Linde fue la "persona adecuada en el momento preciso" para unir la ciencia y la tecnología existentes de manera fundamental para lograr un progreso práctico. Linde había estudiado ciencias e ingeniería, incluida la construcción de máquinas, en el Zurich Polytechnicum, con Clausius entre sus maestros y donde "había desarrollado una pasión por la termodinámica".⁹⁰ Posteriormente, destacaría como ingeniero, científico aplicado, inventor, profesor, y, más tarde, emprendedor.

Linde usó la termodinámica, particularmente la segunda ley, en su estudio y comparación de "métodos mecánicos de extracción de calor a bajas temperaturas". En sus artículos de 1870 y 1871, "comparó la eficiencia de las máquinas de refrigeración por ciclo de aire, las máquinas de absorción y los compresores de vapores licuables"⁹¹, concluyendo que el sistema de compresión era superior.

Utilizando la ciencia y la tecnología disponibles, Linde demostró que ya era posible aumentar considerablemente la eficiencia de la refrigeración. El refrigerador de compresión de vapor que desarrolló mediada la década de 1870 se convirtió, como se señala en el capítulo 8, en uno de los más utilizados en el mundo. Seleccionó el amoníaco como refrigerante de preferencia por sus propiedades termodinámicas. Como apunta F. Klemm, "Los refrigeradores existían antes de los de Linde, pero el suyo era especialmente fiable, económico y eficiente"⁹².

La ciencia cambió la situación. Linde entraba en escena justo cuando todos los elementos científicos básicos para la refrigeración práctica ya estaban disponibles, y él fue entrenado y motivado para usarlos eficazmente. Su trabajo y su impacto se detallan en el capítulo 8, al igual que otros desarrollos de máquinas y refrigerantes del último cuarto del siglo XIX.

La humedad y el nacimiento de la psicrometría

A finales de la década de 1800, los pocos sistemas de refrigeración de confort instalados (descritos en el capítulo 11) eran intentos *ad hoc* de ensayo y error con resultados desiguales. Otro elemento científico tuvo que entrar en escena antes de que fuera viable un desempeño ambiental coherente, predecible y reproducible, particularmente el control de la humedad.

Ese elemento científico fue la aplicación de principios termodinámicos, concretamente la ley

Gibbs-Dalton, a los datos meteorológicos. El resultado fue una clarificación de las relaciones entre presión barométrica, presión parcial del vapor de agua, temperaturas de bulbo húmedo y seco, humedad absoluta, humedad relativa, punto de rocío, entalpía y calor latente, es decir, el nacimiento de la psicrometría.

El desarrollo de una base de datos climáticos utilizable requiere dos cosas: instrumentos precisos y registros sistemáticos de observaciones meteorológicas estandarizadas. Ambos estaban disponibles a fines del siglo diecinueve, al igual que la ley Gibbs-Dalton, que permitió aplicar el análisis psicrométrico al aire acondicionado.

El primer instrumento de medición de la humedad bruta apareció en 1450, más de cien años antes del primer termómetro. El matemático alemán Nicholas de Cusa suspendió una masa de lana a un lado de una balanza y unas pequeñas piedras al otro, teniendo las dos el mismo peso en aire seco. A medida que la humedad aumentaba, también lo hacía el peso de la lana, y si la humedad disminuía, la lana se aligeraba.

No fue sino hasta el siglo XVII, sin embargo, cuando "los científicos influenciados por Descartes comenzaron a aceptar la teoría de que el vapor de agua era una sustancia distinta".⁹³ A medida que crecía el interés en los estudios de la humedad, se desarrollaron higrómetros mejorados por parte de Robert Hooke (1657), Johann Heinrich Lambert (1768), Jean De Luc (1773), Horace Benedict De Saussure (1783) y otros.

Tanto Lambert como De Saussure publicaron informes de amplios estudios de humedad, y hacia 1800 John Leslie había ideado y explicado el primer higrómetro de bulbo húmedo y seco. Durante los siguientes ochenta años, el psicrómetro (un instrumento que mide las humedades relativas por medio de temperaturas de bulbo húmedo y seco) fue desarrollado completamente como instrumento científico por E.F. August, J.A. Mason, y otros.⁹⁴

Lambert parece haber sido el primero, en 1774, en presentar datos meteorológicos gráficamente en lugar de en tablas. Por ejemplo, comparó las lecturas diarias de temperatura e higrómetro de tres ciudades alemanas y observó una correlación interesante: las humedades más altas se daban en junio y las más bajas en diciembre y enero, y "la curva de temperatura tiende a ir por detrás de la de humedad en un mes y medio".⁹⁵

Las observaciones meteorológicas se venían registrando desde la antigüedad, pero no fue hasta bien entrado el siglo XVII cuando aparecieron la temperatura, la presión y la humedad en los registros meteorológicos sistemáticos.⁹⁶

Está claro a tenor de dos actividades notorias de la década de 1660 que los científicos contemporáneos reconocían el valor de la estandarización en la toma de datos y de las observaciones simultáneas en diferentes localizaciones. Un ejemplo fue la histórica red de observación meteorológica, precursora de las modernas redes internacionales, instalada por la Academia del Cimento bajo el patrocinio de Fernando II de Toscana.

Fernando mandó construir instrumentos y enviarlos a observadores de siete ciudades italianas y más tarde de París, Innsbruck, Varsovia y Osnabrück. Los instrumentos incluían termómetros, barómetros e higrómetros, y el gran duque Fernando también proporcionó formularios estándar para registrar observaciones. Aunque la Academia se disolvió en 1667 por presiones eclesiásticas tras solo una década de actividad, su ejemplo influyó en el desarrollo de redes similares en los siglos XVIII y XIX.⁹⁷

Casi al mismo tiempo, Robert Hooke elaboró un modelo de formulario para informes meteorológicos. En un artículo de 1663, propuso un "Método para elaborar un historial del tiempo atmosférico" que resaltaba la importancia de normalizar los instrumentos y las observaciones. "La propuesta de Hooke es considerada por varios historiadores como el punto de inflexión en el desarrollo meteorológico... Para muchos, Robert Hooke es el padre de la meteorología moderna".⁹⁸

Las redes internacionales para registrar y estudiar observaciones meteorológicas estandarizadas avanzaron en el siglo XVIII y maduraron en el siglo XIX. Mientras tanto, en 1751, Charles Le Roy formulaba el concepto de punto de rocío y sugería que "la humedad se registre como 'humedad relativa', comparando la cantidad real de vapor de agua en el aire con el máximo posible a la temperatura dada".⁹⁹

Le Roy observó que, al bajar la temperatura del agua de un contenedor introduciendo hielo, a cierta temperatura se condensaba agua en el exterior del contenedor.

Esto le permitió a Le Roy determinar la cantidad de humedad invisible en el aire circundante: "En todo momento hay un cierto grado de frío en el que el aire está listo para liberar parte del agua que contiene en la solución. Yo llamo a esta temperatura "degre de saturation" del aire".¹⁰⁰

En el último cuarto del siglo XIX ya existía una base de datos meteorológicos de calidad científica. Los científicos habían aplicado la teoría del calor y la primera ley de la termodinámica —la conservación de la energía— para desarrollar el asombroso modelo de tierra, atmósfera, lluvias, viento, océanos, etc., como una máquina termodinámica dinámica alimentada por calor radiante solar.

Cuando Gibbs formuló la ley de Gibbs-Dalton en la década de 1870, integrando los conceptos de energía, entalpía y entropía con la ley de Dalton de las presiones parciales, se hizo posible comprender y cuantificar las características psicrométricas de un elemento clave del "motor térmico" dinámico tierra-atmósfera-sol: el aire atmosférico húmedo. Usando la base de datos meteorológicos existente, los científicos pudieron perfeccionar las relaciones psicrométricas que habrían de desempeñar un papel crucial en el desarrollo del aire acondicionado a principios del siglo XX.

La psicrometría y su impacto en el aire acondicionado

Apreciar el impacto que tuvo la psicrometría en el aire acondicionado a principios del siglo XX requiere cierta conciencia del contexto en el que llegó. A continuación, se ofrece un esbozo rápido del diseño existente tanto teórico como práctico.

Ya en 1893, John S. Billings resumió el panorama de la refrigeración de locales en los Estados Unidos de la siguiente manera, en dos párrafos al final de la nueva edición de su libro *Ventilation and Heating*. (El Dr. Billings, un ex cirujano del ejército de EE.UU., fue una figura destacada de su país. Educado en Edimburgo y Harvard y miembro de la Academia Nacional de Ciencias, así como escritor de renombre en áreas técnicas, suyo es el diseño arquitectónico conceptual de la aclamada Biblioteca Pública de Nueva York, de la que fue primer director y bibliotecario.)

Ocasionalmente hay una demanda de algún medio para enfriar el suministro de aire fresco en climas cálidos, por ejemplo, en cámaras legislativas, cines de verano o habitaciones de enfermos, y en la descripción de los aparatos de ventilación de algunos edificios se indica que está previsto proveerlo aplicando aire sobre hielo colocado en bastidores, etc. El uso de hielo para este propósito es un método muy caro. [Sigue una descripción del uso de 436 libras de hielo por hora para enfriar la habitación de la Casa Blanca del presidente Garfield en 1881.]

Si se deseara una planta permanente para este propósito, alguna forma de aparato de aire comprimido en el que el calor generado por la compresión del aire se eliminara mediante tuberías de agua fría, y el frío deseado fuera producido por la expansión del aire, probablemente se consideraría el más satisfactorio y económico. Sin embargo, debe recordarse que cuando el aire de una sala de juntas está cargado de humedad, la introducción de aire frío puede precipitar esta humedad y producir niebla o nubes si hay polvo en el aire. Fue de hecho el resultado de un experimento de introducir aire frío en una de las salas de reuniones del Capitolio de Washington... El suministro abundante de aire suele ser el mejor método para aliviar con garantías una sensación de calor excesivo. ¹⁰¹

El capítulo 11 de este libro describe la Guía de 1894 del profesor alemán Hermann Rietschel para el *Cálculo y diseño de instalaciones de ventilación y calefacción*, con un capítulo sobre refrigeración de locales. Basado en ciencia fundamental como la ley de Newton de enfriamiento y la ley de Fourier de conducción del calor, Rietschel desarrolló lo que parece ser la primera metodología de diseño racional para tales sistemas.

Lo que Rietschel hizo, en efecto, fue utilizar su conocimiento científico para definir el problema en términos de ingeniería, es decir, identificar las variables y presentar un proceso de diseño paso a paso. Poniendo la ciencia en un marco técnico, y haciéndola por tanto más accesible para los ingenieros, Rietschel

fue un pionero de la ciencia de la ingeniería del aire acondicionado.

Aunque Rietschel había desarrollado una guía general de diseño, en la práctica la refrigeración era mucho más problemática que la calefacción en la década de 1890 y principios de 1900. Rietschel advirtió la importancia del control de la humedad y fue quizás el primero en identificar enfoques generales para manejarlo. Sin embargo, había grandes obstáculos para una implementación precisa y predecible.

En primer lugar, los sistemas de calefacción se habían desarrollado primero y la tecnología existente, como los serpentines, estaban pensados para calentar. Un método bastante común era soplar aire sobre serpentines calentados con vapor o agua caliente.

Cuando los sistemas de refrigeración comenzaron a ser considerados durante este período, la mayoría de los ingenieros supusieron que el enfriamiento por aire era análogo al calentamiento por aire y se podría realizar con la misma facilidad. Había poca conciencia de que lo que le sucede al aire en un serpentín de refrigeración, cuando hay condensación y enfriamiento simultáneos de la humedad, es mucho más complejo que el proceso de calentamiento. Como consecuencia, no se dieron cuenta de lo difícil que sería obtener un resultado específico y predecible.

El destacado ingeniero consultor Alfred Wolff fue uno de los profesionales más sofisticados de su tiempo. Wolff era experto en combinar las últimas tecnologías para diseñar sistemas avanzados de calefacción, ventilación y refrigeración. Su trabajo en refrigeración evolucionó desde el uso de bastidores de hielo en el Carnegie Hall en 1893 hasta el diseño de la Bolsa de Valores de Nueva York en 1901, que incorporó enfriadores de cogeneración y absorción e introdujo salmuera en los serpentines.

Wolff había llegado a reconocer la importancia de controlar la humedad relativa. Pero Wolff no era científico, y como pronto descubriría Willis Carrier, el control preciso y predecible de la temperatura y la humedad en un proceso de enfriamiento utilizando serpentines no era posible con el conocimiento existente. Se sabía muy poco sobre las interacciones del fluido circulante (aire fuera de la bobina y salmuera en el interior), la transferencia de masa (condensación de la humedad) y la transferencia simultánea de calor con materiales de serpentín específicos. Se llevarían a cabo una larga serie de experimentos y trabajos de desarrollo antes de que el enfriamiento y la deshumidificación a través de serpentines se tornaran prácticos para una amplia aplicación.

Carrier ocupa una posición única en la historia del aire acondicionado. Antes de Carrier, no había ningún sistema práctico de enfriamiento que lograra un control constante de la temperatura y la humedad bajo cargas variables, de modo que no había oportunidad de que el aire acondicionado se extendiera a un uso general. Valiéndose ampliamente de la ciencia, Carrier dio un vuelco total a la situación.

En su afán por diseñar un sistema de este tipo, Carrier estudió los datos meteorológicos de los Estados Unidos para adquirir unas nociones fundamentales de la psicrometría del aire atmosférico húmedo. Además, llevó a cabo experimentos para descubrir cómo, utilizando lo que había disponible en equipos y conocimientos, diseñar un sistema que produjera niveles constantes de temperatura y humedad en aplicaciones prácticas.

El éxito que tuvo fue tal que su solución dominaría los sistemas de aire acondicionado durante unos veinticinco años y sería muy copiada por otros. Utilizó la ciencia de la psicrometría (basada en la ley de Gibbs-Dalton) y un enfoque experimental racional de resolución de problemas para encontrar la quizás única forma de lograr condiciones ambientales coherentes con la ciencia y la tecnología existentes.

Cuando Carrier finalmente encontró su solución y se hizo evidente en la industria que su sistema funcionaba, el potencial de aplicar psicrometría al proceso de refrigeración también se hizo palpable, ya que había sido su guía. Incluso se puso más de manifiesto cuando se necesitaban más trabajos científicos o de desarrollo para fomentar la nueva industria del aire acondicionado.

Trabajando para Buffalo Forge, Carrier experimentó con tres configuraciones de sistema. En el primero, intentó usar un desecante absorbente de la humedad para lograr la humedad absoluta deseada. Los desecantes son materiales con una gran capacidad de humedad que se deshumidifican al atraer moléculas de agua del aire circundante. Esto ocurre porque la superficie del material desecante, cuando está relativamente seca y fría, tiene una presión de vapor más baja que la del vapor de agua en el aire.

Carrier se encontró con varios problemas y pronto se dio cuenta de que se sabía muy poco sobre las complejas interacciones de los desecantes y el vapor de agua. Aunque los principios termodinámicos aplicables habían sido formulados por Gibbs, Carrier determinó que se necesitaría experimentar mucho para aclarar la termodinámica del proceso de deshumidificación del desecante antes de que pudiera evolucionar la tecnología de ingeniería apropiada.

La segunda configuración de sistema que intentó Carrier, que en teoría parecía resolver el problema de control de temperatura/humedad, utilizó un serpentín de refrigeración en un intento de enfriar el aire al punto de rocío deseado. Sin embargo, este sistema se topó con las limitaciones citadas anteriormente (muy poco conocimiento del flujo de líquido que interactúa, transferencia de calor y características de transferencia de masa en relación con materiales de serpentín específicos). En la práctica, no le brindó el control que buscaba.

Carrier no creía que pudiera lograr su objetivo en el futuro cercano con ninguno de los dos primeros enfoques. Quedaba demasiado por aprender y desarrollar.

El tercer intento resultó ser su éxito histórico. Encontró una forma práctica y reproducible de lograr el proceso psicrométrico y la condición de aire de salida que buscaba. Guiado por el conocimiento psicrométrico, se dio cuenta —en lo que era una idea sorprendente en ese momento, aunque Rietschel había mencionado el concepto— de que en realidad podía eliminar la humedad del aire rociando agua helada en él.

Carrier se dio cuenta de que, al controlar la temperatura del pulverizado frío en un purificador de aire o cámara de pulverización a través de la cual pasaba el aire, podía producir aire saturado a una temperatura específica y una humedad absoluta; y cuando calentaba ese aire a la temperatura de suministro requerida, podía obtener la humedad relativa que él quería. Advirtió que, cuando pulverizaba directamente en el aire, las temperaturas del aire y el agua alcanzaban un equilibrio relacionado con las propiedades psicrométricas del aire: en saturación, el punto de rocío del aire y las temperaturas de bulbo seco y húmedo eran la misma.

Carrier llamó a su método de aire acondicionado 'control de punto de rocío' y se convirtió en la técnica estándar de refrigeración de confort en el primer cuarto del siglo XX. El capítulo 11 ofrece detalles interesantes sobre Carrier, el problema que se propuso resolver, sus ciclos de observación-experimentación y su posterior labor de desarrollo, tanto de él como de otros.

Carrier hizo otras dos contribuciones que sobrevivieron a su solución de sistema específica. Mientras llevaba a cabo su investigación, se dio cuenta de que las relaciones derivadas directamente de la teoría de Gibbs-Dalton discrepaban algo de los resultados que obtenía utilizando lecturas de psicrómetro de honda. Por eso elaboró fórmulas racionales que modificaban ligeramente las relaciones psicrométricas teóricas para obtener resultados precisos y utilizables con datos observados, resultados en los que se podía confiar para fines de diseño.

Publicó las fórmulas en 1911 junto con su otra contribución conocida, la tabla psicrométrica. La gráfica, que desarrolló basado en las relaciones modificadas de Gibbs-Dalton (y publicada por primera vez en forma embrionaria en 1908), se convirtió en una herramienta de diseño estándar. Willis Carrier ocupa un lugar destacado en el olimpo del aire acondicionado. Ayudó a sentar las bases para esta nueva ciencia de la ingeniería y su trabajo, que hizo posible el aire acondicionado de confianza, dio a la industria un enorme impulso. Una vez más, la "persona adecuada en el momento preciso" combinaba una ciencia nueva con los componentes adecuados de su tiempo para crear una nueva tecnología.

Física moderna y refrigeración termoeléctrica

En las décadas de 1820 y 1830, los descubrimientos científicos relacionados con la electricidad produjeron

dos corrientes de desarrollo separadas y bastante diferentes. Una condujo al uso generalizado de la electricidad como fuente de energía práctica; el otro con el tiempo condujo a la refrigeración electrónica o termoeléctrica en la que la electricidad se convierte directamente en refrigeración o calefacción sin partes mecánicamente móviles.

En el primer caso, Michael Faraday —basándose en el trabajo de Hans Oersted y otros que se remontan hasta William Gilbert en 1600— demostró la *inducción electromagnética*, induciendo un flujo de corriente en un cable. Faraday procedió a desarrollar una dinamo o generador eléctrico "muy superior a los anteriores, creando un flujo continuo de electricidad a partir de calor y energía mecánica".¹⁰²

El trabajo posterior de muchos otros, como se describe en el capítulo 10, desembocó en los motores eléctricos y en una red de instalaciones generadoras de energía. Ambos se extendieron rápidamente en la primera década del siglo XX para, a la postre, reemplazar a las máquinas de vapor y a las de combustión interna por gas como fuente principal de energía en ventiladores y máquinas frigoríficas.

La refrigeración termoeléctrica fue la segunda corriente de desarrollo iniciada en las décadas de 1820 y 1830, corriente que tomaría un camino muy diferente y más lento que el iniciado por Faraday. Tendría que producirse un gran cambio en la física, el desarrollo de la física cuántica, para que la teoría del estado sólido pudiera hacer su aparición y proporcionar los materiales semiconductores que dotaran de practicidad a la refrigeración termoeléctrica. Jean Peltier, pionero de los efectos termoeléctricos, no pudo saber de la "importancia que habría de tener [su descubrimiento] más de un siglo después como base de un nuevo método de refrigeración...".¹⁰³

En 1821, el físico alemán Thomas J. Seebeck, el primero de los pioneros en efectos termoeléctricos, descubrió lo que se conocería como el "efecto Seebeck": una diferencia de temperatura entre las uniones de dos conductores hechos de diferentes metales puede crear una corriente eléctrica que circula continuamente; o dicho de otra manera, "una fuerza electromotriz [puede] ser producida por calentamiento de una unión entre dos metales".¹⁰⁴ El descubrimiento de Seebeck es la base de la medición por termopares.

Poco más de una década después, en un descubrimiento relacionado, el físico francés Jean Peltier concluyó a partir de experimentos que "una unión entre dos metales diferentes tiende a absorber calor cuando una corriente eléctrica la atraviesa en una dirección, pero pierde calor cuando la corriente pasa en dirección opuesta."¹⁰⁵ Esta extracción termoeléctrica o producción de calor, base de la refrigeración termoeléctrica, se conoce ahora como efecto Peltier.

A diferencia del descubrimiento de Faraday, con efectos termoeléctricos había una limitación sobre cuánta corriente eléctrica se podía obtener con los materiales existentes. El desarrollo se tambaleaba. Uno de los viajes de descubrimiento científicos más impresionantes

tuvo que ocurrir antes de que las aplicaciones termoeléctricas de hoy en día se hicieran posibles.

Tras el descubrimiento en la década de 1890 de los rayos X, la radioactividad y los electrones, los científicos quedaron desconcertados ante la vasta y nueva serie de preguntas sin respuesta. Se hizo evidente que las respuestas requerían una comprensión más profunda de la naturaleza de la materia, de la estructura atómica. Se enfocaron esfuerzos intensos en esta área, y las ideas históricas llegaron después del cambio de siglo: dos artículos clásicos, uno en 1901 por Max Planck y otro en 1905 por Albert Einstein, "establecieron la teoría cuántica... piedra angular de la física moderna".¹⁰⁶

En 1910 "los únicos conductores técnicamente conocidos... eran los metales, [y estos] resultaban antieconómicos" para la refrigeración y calefacción termoeléctrica.¹⁰⁷ No obstante, la teoría cuántica dio origen a la física del estado sólido y, hacia finales de la década de 1940, los avances en física de estado sólido "contribuyeron al descubrimiento de semiconductores que pueden producir el efecto Peltier con eficiencias más altas de lo que se creía posible".¹⁰⁸

Como resultado, comenzaron a evolucionar aplicaciones especializadas para este nuevo tipo de refrigeración y calefacción, que aunque todavía es comparativamente costoso en la actualidad, tiene ventajas especiales. Las unidades termoeléctricas "son de pequeño tamaño, silenciosas, no tienen partes móviles, deberán tener una vida muy larga y no contienen líquidos ni gases. Además, es muy sencillo controlar la velocidad de enfriamiento mediante el ajuste de la corriente, siendo la respuesta a los cambios en el suministro muy rápida...".¹⁰⁹

Por estas razones, se han utilizado unidades termoeléctricas, por ejemplo, para refrigerar vehículos espaciales y equipos electrónicos. A medida que se desarrolle la tecnología y aumenten las eficiencias o disminuyan los costos, es probable que la refrigeración termoeléctrica se aplique de manera más amplia a la refrigeración y la calefacción en los edificios.

La historia facilitada al lector en los siguientes capítulos refleja la interacción de la ciencia, la tecnología y las necesidades públicas de científicos, inventores, ingenieros y el público en general. Es más que probable que esta historia contenga las raíces de futuros cambios que aún no podemos prever.

Una cosa es cierta. Como en el pasado, la tecnología de calefacción, ventilación, aire acondicionado y refrigeración del futuro estará determinada por la interacción de descubrimientos científicos, inventos y requisitos ambientales o sociales. Lo que no se sabe es cuál será el principal catalizador en un período particular. Cada uno de ellos será, en ocasiones, el factor dominante que determine la dirección o el ritmo del cambio.

REFERENCIAS

1. Lindberg, D.C. 1992. *The beginnings of western science*, p. 5. Chicago: The University of Chicago Press.
2. Cardwell, D.S.L. 1971. *From Watt to Clausius: The rise of thermodynamics in the early industrial age*, p. 292. Ithaca, NY: Cornell University Press.
3. Wolpert, L. 1993. *The unnatural nature of science*, p. 35. Cambridge: Harvard University Press.
4. Wolpert, p. 36.
5. Wolpert, p. 39.
6. Lindsay, J. 1974. *Blast-power and ballistics: Concepts of force and energy in the ancient world*, p. 338. Nueva York: Harper & Row Publishers, Inc.
7. Broad, C.D. 1959. Bacon and the experimental method. In *A Short History of Science: Origins and Results of the Scientific Revolution* (Symposium), p. 30. Garden City, NY: Doubleday & Company, Inc. (Publicado por primera vez en 1951 por Free Press, Glencoe, IL, como *The History of Science: Origins and Results of the Scientific Revolution*.)
8. *Dictionary of the history of science*. 1981. Editado por W.F. Bynum, E.J. Browne, R. Porter, p. 413. Princeton, NJ: Princeton University Press.
9. Lilley, S. 1959. The development of scientific instruments in the seventeenth century. En *A Short History of Science: Origins and Results of the Scientific Revolution* (Symposium), p. 49. Garden City, NY: Doubleday & Company, Inc.
10. Wolf, A. 1935. *A history of science, technology, and philosophy in the 16th and 17th centuries*, p. 99. Londres: George Allen & Unwin Ltd.
11. Lilley, p. 45.
12. Sandfort, J.F. 1962. *Heat engines: Thermodynamics in theory and practice*, p. 112. Garden City, NY: Doubleday & Company, Inc.
13. Wolf, 1935, p. 243.
14. Parkinson, C.L. 1985. *Breakthroughs: A chronology of great achievements in science and mathematics, 1200-1930*, p. 116. Boston: G.K. Hall & Co.
15. Hellemans, A., and B. Bunch. 1988. *The timetables of science*, p. 250. Nueva York: Simon and Schuster.
16. Wolf, 1935, p. 342.
17. Hudson, J. 1992. *The history of chemistry*, p. 53. Londres: The Macmillan Press Ltd.; y Nueva York: Chapman & Hall.