(Adaptación “Rudolf Clausius y la segunda ley de la Termodinámica”, en : Guillen, Michael, Cinco ecuaciones que cambiaron el mundo)

**La muerte siempre gana**

Rudolf Clausius tenía 53 años cuando aquella tarde se acercó a la cama en la que yacía tendida su amada esposa Adie. Tenía todavía los ojos abiertos, como si estuviera viva, y la piel todavía caliente. Pero la inmovilidad de su cuerpo descartó cualquier atisbo de esperanza. Su valiente y bella esposa no había sobrevivido al parto de su sexto hijo. La habitación estaba en un silencio desgarrado por el llanto del recién nacido, una niña preciosa.

Sosteniendo la mano cada vez más fría de su esposa, en Clausius se reavivó ese sentimiento amargo y doloroso que experimentó por primera vez al descubrir, en el curso de sus estudios científicos sobre el calor, la auténtica naturaleza del *fuego*. Antes que él, los científicos habían empezado a comprender el comportamiento de la tierra, el aire y el agua, los otros tres elementos básicos de nuestro mundo, según dictaban las doctrinas antiguas de la Física. Pero había sido él, veinticinco años atrás, el que había descubierto los secretos del más misterioso de los cuatro elementos terrestres. Sus estudios sobre el calor le condujeron inevitablemente a cavilaciones sobre la lucha entre la vida y la muerte, entre la victoria y la derrota. Mira, ahora, la preciosa niña que viene a la vida en un parto en el que muere la madre, su querida Adie. Mira la historia reciente. A principios de siglo, los franceses habían forjado el gran imperio napoleónico, que parecía destinado a regir los destinos de Europa. ¡Pero había que ver lo que había ocurrido recientemente! Los franceses habían sido humillados por el formidable ejército prusiano. ¿Cuál es el resultado final de esas batallas intemporales entre la vida y la muerte, entre la creación y la destrucción, entre las victorias y las derrotas?, se preguntaba el gran científico prusiano. Era una pregunta acerca del registro administrativo sobre la vida y la muerte.

Si un administrador cósmico pudiera registrar todos los resultados de todas las luchas entre las fuerzas creativas y las destructivas (grandes y pequeñas) habidas en todo el universo durante todo el tiempo, ¿qué fórmula escondería su respuesta?

Aunque pudieran faltar detalles, él había descubierto hacía más de dos décadas lo fundamental de esta respuesta, decretando el triunfo del envejecimiento y la muerte sobre las fuerzas creadoras de la vida. Este es el destino cósmico dictado por el comportamiento naturalmente irreversible del calor. La vieja esperanza de invertir el proceso cósmico saltaba por los aires hecha añicos. Imposible un super-

refrigerador cósmico, por ejemplo, que forzaran al calor a fluir de lo frío a lo caliente.

Sus cálculos le habían revelado que en el universo morían más cosas de las que nacían, que la muerte siempre derrotaba a la vida, lo que explicaba por qué cada vida concreta llegaba siempre a un final. Siempre. Como conjunto el universo moría, había descubierto Clausius. Comprendía cómo y por qué la gran ecuación de la vida se llevaba más de lo que daba.

**Procesos irreversibles**

En el universo podemos distinguir dos tipos de procesos, los reversibles y los irreversibles. Los primeros pueden invertirse y volver (más o menos) a sus condiciones iniciales, los segundos no. Si coges bicarbonato con agua y le hechas limón, la mezcla hará burbujitas y bolas, y por mucho que lo intentes nunca podrás volver, a partir de la mezcla, al limón y bicarbonato separados. No hay reversibilidad. Si juntas, en cambio, azufre con hierro no se producirá una auténtica mezcla, y podrías volver a obtenerlos por separado simplemente pasando por encima un imán. Enrollar y estirar una tira de papel, el movimiento del péndulo, fenómenos como los de congelación o evaporación, son otros tantos ejemplos de procesos reversibles.

Una manera sencilla de entender la reversibilidad es la siguiente: imaginemos que se filma un fenómeno y se proyecta la película al revés. Si lo que se ve en la pantalla es también un fenómeno que sucede en la realidad, diremos que el fenómeno filmado es reversible. Para un fenómeno tal no es posible decidir si la película está proyectada en la dirección correcta o al revés. Un ejemplo es el siguiente: filmamos el choque entre dos bolas de billar. Si proyectamos la película al revés, veremos otro choque entre las bolas. No tendremos manera de decidir cuál fue el choque filmado y cuál es el que se obtiene debido a la proyección de la película al revés. Ahora bien, si filmamos la caída y posterior rompimiento contra el suelo de un jarrón de vidrio, y luego proyectamos la película al revés, inmediatamente sabremos que la película está al revés, pues el fenómeno en que pedazos de vidrio en el suelo se juntan espontáneamente para formar un jarrón de vidrio y luego se elevan hasta una cierta altura, no sucede en la realidad. Tales fenómenos son irreversibles.

Al menos en teoría, los procesos reversibles pueden desarrollarse siempre, primero hacia delante, luego hacia atrás, y así sucesivamente hasta el infinito. Las utópicas máquinas de movimiento perpetuo (máquinas hipotéticas que serían capaces de continuar funcionando eternamente, después de un impulso inicial, sin necesidad de energía externa adicional) están movidas por mecanismos reversibles, análogos al repetitivo pedaleo de un ciclista incansable. Por el contrario, los procesos irreversibles son mortales, resulta imposible reconstruir las condiciones originales una vez desencadenados. Cuando se producen van deteriorándose y desintegrándose inevitablemente, como un huevo que se bate o un tomate que se pudre.

En el siglo XVII Isaac Newton construyó la Física moderna sobre la base de unas ecuaciones matemáticas basadas en la reversibilidad del universo físico. La suya es una física de los fenómenos reversibles. Si se cambia en sus ecuaciones el valor de la variable temporal “t” por “-t”, las ecuaciones no cambian. Se construyó a partir de ahí una imagen del universo al modo de un "perpetuum mobile" de tamaño cósmico destinado a existir para siempre. Y era impensable (e incluso blasfemo) para los científicos del s. XVIII imaginar que el universo pudiera llegar a un fin.

Sin embargo, ya a finales de este siglo y durante el siguiente fue creciendo y consolidándose la idea de que la naturaleza no es, ni completamente ni fundamentalmente, reversible; había importantes procesos naturales que así lo mostraban, y dos de ellos, por lo menos, tenían que ver con el calor. En primer lugar, el calor siempre parecía fluir de lo caliente a lo frío y nunca al revés. Una cacerola de agua fría colocada en una hoguera en el campo, por ejemplo, siempre se calentaba. Es decir, el calor del fuego se transmitía al agua, más fría. Nunca se daba que el (poco) calor del agua se transmitiera al fuego más caliente y tuviera como consecuencia que el agua se enfriara todavía más y el fuego también se calentara más. En segundo lugar, la *fricción* siempre transformaba movimiento en calor y nunca al contrario. Un frenazo a un vehículo en marcha hace detener el vehículo y calentar los frenos. Pero no hay un mecanismo natural de "contrafricción" mediante el cual el calor se transforma espontáneamente en movimiento.

Sería finalmente la atención prestada a estos procesos irreversibles la que nos abrió a la idea de que, al igual que la vida misma, el universo envejecía cambiando de un día para otro de un modo que no se podía volver atrás nunca. Pero ¿de qué manera exactamente "envejecían" al universo esos dos procesos irreversibles del calor?

**La máquina de vapor: la idea y la realidad**

El interés moderno por el asunto del calor y su efecto sobre el universo estuvo ligado al estudio de la máquina de vapor que acompañó los inicios de la Revolución industrial. La distancia que media entre la manufactura y la fábrica no se hubiera franqueado sin la invención y aplicación de la máquina de vapor, cuyo uso se generalizó en las primeras décadas del XIX, sobre todo en Gran Bretaña, siendo la causa principal de su despegue industrial y de su hegemonía política y económica en el mundo. A un joven ingeniero francés, Sadi Carnot, le dolía que las máquinas de vapor inglesas fueran más eficientes que las francesas: a cantidades idénticas de combustible, las máquinas inglesas producían más trabajo. A remediar esa disparidad que le parecía humillante había dedicado Carnot su vida.

¿Qué hacía una máquina de vapor? Quemaba madera o carbón convirtiendo el agua en vapor. El vapor a alta presión llenaba los pistones de la máquina haciéndolos mover hacia abajo. Cuando se soltaba el vapor por una válvula, los pistones recobraban su posición originaria. El vapor desprendido se conducía a un radiador frío donde volvía a convertirse en agua que fluía hasta la caldera donde volvía a convertirse en vapor a alta presión. Una máquina de vapor repetía estos pasos muchas veces por segundo. Se trataba de una maquinaria compleja pero su efecto principal era bien sencillo: se le daba calor y ella devolvía trabajo. Durante esta época (primeras décadas del s. XIX) se creía de manera generalizada que el trabajo que producía una máquina estaba determinado solo por la temperatura de su caldera; es decir, que a mayor temperatura, más vapor se producía, más deprisa y con mayor fuerza se movían los pistones y más trabajo se generaba.

Esta no era una explicación suficiente para el joven ingeniero francés. Según Carnot, el trabajo que realizaba una máquina de vapor no solo dependía de la temperatura de su caldera, dependía sobre todo de la diferencia de temperatura entre la caldera y el radiador. Para poder funcionar, una máquina de vapor no solo necesitaba calor sino *flujo*  de calor, y eso solo se daba cuando había una *diferencia de temperatura* entre la caliente caldera de la máquina y el radiador, más fresco. En palabras del propio Carnot: "la producción de calor no es suficiente para dar origen a la potencia impulsora, es necesario que haya frío; de otro modo, el calor sería inútil". A esta idea se la conoce como "principio de Carnot". Carnot observó -y esto es lo que llamó la atención de Clausius unas décadas más tarde- que las máquinas de vapor eran dispositivos que se comportaban de modo antinatural. Representaban la antítesis de la fricción, capaces de hacer lo que no podía hacer la naturaleza: convertir el calor en movimiento. En realidad Carnot pensaba la máquina de vapor según la imagen de un molino de rueda o una noria. Este molino funciona aprovechando el agua que fluye naturalmente de un lugar alto a otro bajo; de manera parecida, la máquina de vapor funciona aprovechando el calor que fluye de una caldera caliente hacia un radiador relativamente frío. A mayor cantidad y mayor caída (imaginémonos las cataratas del Niágara) mayor potencia producirá el molino; de forma análoga, a mayor cantidad y mayor "salto de calor", más trabajo producirá una máquina de vapor.

Acabados sus estudios en el instituto, con dieciocho años, Clausius estaba cada vez más fascinado por las máquinas movidas por calor. Aunque todavía jadeantes y ruidosas, estas máquinas habían madurado increíblemente en la corta vida de Clausius. Dos años antes, los barcos movidos por vapor habían cruzado el inmenso océano Atlántico por primera vez en la historia, y estaban revolucionado la industria y dando origen a lucrativas carreras para ingenieros que conocieran los misterios del calor. Estimulado, por una parte, por este contexto de innovaciones tecnológicas basadas en el calor, y por otra, por la curiosidad por conocer su función en la vida natural y en la de nuestros cuerpos, Clausius, desde sus primeros años en la universidad de Berlín, decidió dedicarse a su estudio. Y quedó cautivado al conocer que Carnot, muerto hacía más de veinte años, había destacado lo que a él le parecía clave en esas máquinas, su comportamiento antinatural al convertir el calor en movimiento.

La cuestión que intrigaba al joven Clausius surgió del trabajo de los científicos y los ingenieros que habían conseguido que el calor se comportara de manera *antinatural*, en el sentido de que habían convertido en reversible un proceso irreversible. También tenía noticia de que los chinos habían inventado un dispositivo que obligaba al calor a ir de lo frío a lo caliente. Lo llamaban "refrigerador". Dejando a un lado los detalles de su funcionamiento, Clausius se interesó por el hecho de que su efecto final era obligar al calor a fluir desde una caja fresca (mantenida con hielo) hasta el relativo calor de la habitación en la que se encontraba. La consecuencia era que la caja se enfriaba todavía más y la habitación se calentaba más, cosa que nunca habría ocurrido de manera natural. Su efecto era el contrario al de la máquina de vapor, pero su principio teórico era el mismo.

También Clausius conocía el principal problema con el que se enfrentaban los ingenieros que diseñaban las máquinas de vapor: su *ineficiencia*. Carnot había dado expresión matemática a su principio y había calculado la energía cinética que produciría una máquina a determinadas temperaturas de caldera y radiador. Y, sin embargo, cuando medía el resultado real de máquinas diferentes, descubrió que las mejores máquinas inglesas producían solo un veinteavo de esa cantidad, y las máquinas francesas, todavía funcionaban peor. La razón era que la máquina que se deducía de los cálculos de Carnot era una máquina ideal, hipotética, pero no real. En realidad era una máquina de movimiento perpetuo, una máquina que podría funcionar eternamente porque el trabajo que produjera podría reciclarse para dar calor, que a su vez se utilizaría para mover la máquina, que daría trabajo que a su vez se reciclaría en calor, y así sucesivamente. Sin embargo, una máquina así era imposible de construir. Los ingenieros del mundo solo podían construir máquinas reales que siempre funcionaban muy por debajo del potencial teórico definido por el principio de Carnot. Todas las máquinas de vapor estaban salpicadas de ineficiencias, siendo una de las peores la provocada por el roce de unas partes de la máquina contra otras (nada sorprendente, había razonado Carnot, siendo la fricción la absoluta antagonista del funcionamiento de la máquina de vapor).

**Lo primero para entender el calor es medirlo**

"El calor es la fuente de vida y de todas sus capacidades…de la nutrición, de la sensación, del movimiento y del pensamiento", dejó escrito Aristóteles. Los grandes científicos de la antigüedad clásica creían que el calor corporal surgía de un fuego inescrutable que ardía en nuestro interior, concretamente en algún punto del ventrículo izquierdo del corazón (según los viviseccionistas, allí era donde la sangre tenía un rojo más intenso que parecía indicarles que estaba más caliente).

En 1833, cuando Clausius estaba entrando en la adolescencia, un matemático y astrónomo británico, John Herschel conjeturó que el calor hacía vivir todas las formas de vida de este planeta y no solo a los humanos. Los experimentos subsiguientes demostraron que estaba en lo cierto, además de que el vivificante calor no procedía del interior de los seres vivos sino del Sol: 17.000 billones de kilovatios-hora ¡por día!

Todo conducía a pensar en el Sol como una caldera de una gigantesca máquina de vapor que producía el calor que alimentaba a la Tierra y a todo lo que había sobre ella. Mientras la caldera siguiera caliente, todas las máquinas a las que alimentaba (desde los seres humanos a los molinos de viento) nunca se quedarían sin vapor.

Durante los más de dos mil años transcurridos entre Aristóteles y Herschel, los científicos habían concebido varias teorías sobre el calor. En un principio, el reto principal fue averiguar cómo medir el calor, y lo que tenemos más a mano para medirlo es nuestro cuerpo.

No es pues extraño que la primera teoría sobre el calor pueda expresarse así: "el calor es lo que produce la sensación de calor". Una teoría trivial. Y errónea, como fácilmente demuestra el ejemplo de colocar una mano en agua fría y otra en agua caliente, y a continuación sumergir ambas manos en agua tibia. Esta se sentirá caliente en aquella que ha estado sumergida antes en agua fría, y fría en aquella que proceda del agua caliente. Este sencillo experimento exigió modificar la teoría anterior en el siguiente sentido: no era el calor lo que producía la sensación de calor, sino el *flujo* de calor, y más concretamente al aplicarse a nuestro cuerpo: "siempre que el calor *fluye hacia* nuestros cuerpos produce sensación de calor; siempre que el calor *fluye desde* nuestros cuerpos produce sensación de frío". Esta nueva teoría, junto con la antiquísima observación de que el calor fluye naturalmente de lo caliente a lo frío bastaba para explicar el experimento. El calor del agua tibia fluía hacia la mano fría, haciéndola sentir calor; a la inversa, el calor fluía desde la mano caliente hacia el agua tibia, haciéndola sentir frío.

El problema de esta teoría es que está basada en la poco fiable e impredecible sensación humana de calor. Por eso quedó superada con la invención del termómetro, que permitió medir objetivamente el calor. Todo empezó en 1592, con el *termoscopio* de Galileo, una especie de botella invertida de cuello largo con la boca colocada en un cuenco de agua. Al calentarse la botella el aire del interior se dilataba, lo que a su vez empujaba el agua del tubo. Y al revés, en los días fríos, el aire del interior se contraía originando una leve succión que hacía subir el agua por el cuello de la botella (a menor temperatura más alta subía la columna del termoscopio, al revés de lo que ocurre con nuestro termómetros). Los científicos del s. XVII se sintieron emocionados ante el termoscopio de Galileo y enseguida se afanaron por perfeccionarlo. Lo primero era dotarlo de una escala que permitiera cuantificar con exactitud los grados de calor. Pero esto trajo consigo otro problema, y era que todo el mundo empleaba escalas diferentes para la medida de sus instrumentos. En Florencia se utilizaba una escala marcada entre los días más cálidos y más fríos del año toscano; y en Francia otra cuya marca superior correspondía a la temperatura en que se fundía la mantequilla y cuya marca inferior correspondía a la temperatura de una bodega de París. No había manera de ponerse de acuerdo.

Hasta que llegó el primer termómetro normalizado, en 1714. Farenheit inventó un instrumento que utilizaba mercurio en el interior de un bulbo diminuto de vidrio con un larguísimo cuello sellado. Al calentarse, el mercurio rebosaba del bulbo y ascendía por el capilar una distancia proporcional al calor que se le aplicaba. Al fin se dispuso de un instrumento preciso para medir el calor. Como consecuencia se fundaron en todo el mundo servicios meteorológicos regionales y nacionales, cada uno de los cuales comenzó a recopilar los registros termométricos valiosísimos para que hoy podamos diagnosticar el cambio climático y el calentamiento del globo. Y también se presentó la ocasión para que los científicos pudieran medir la intensidad del fabuloso fuego humano, nuestra fuente de vida. Para su sorpresa descubrieron que el fuego era imperturbable: en cualquier ocasión, con cualquier tiempo que hiciera, el interior del cuerpo humano parecía mantenerse firmemente en torno a los 96 grados Farenheit o los 35´5 grados Celsius (estimación revisada al alza posteriormente).

**El calórico**

La invención del termómetro revolucionó nuestra comprensión del calor. Esta era la nueva doctrina: "el calor es lo que origina que la columna de un termómetro cambie de altura".

Hasta mediados del siglo XVIII esa creencia se mantuvo incuestionada en el firme suelo de la ciencia, pero justo en 1750 algunos experimentos del físico escocés Joseph Black empezaron a proyectar las primeras dudas sobre esa teoría. Los experimentos remiten fácilmente a experiencias comunes. Basta con escaldarnos la lengua dando un mordisco a un trozo de tarta de manzana recién cocida para convencernos de que el relleno está más caliente que la pasta, aunque los dos se han calentado en el mismo horno, durante el mismo tiempo y a la misma temperatura. Algo parecido nos ocurre en un día de playa, cuando comprobamos que la arena está demasiado caliente y el agua demasiado fría (pero quizá el aire está a la temperatura justa para tumbarse sobre una toalla). Arena, agua y aire tienen diferentes temperaturas aunque están bajo el mismo sol.

Resulta que distintos objetos tienen diferentes capacidades de absorción y de retención del fluido térmico (al igual que distintas personas tienen diferentes capacidades para beber y retener el alcohol). En este sentido, y según lo entendía Black un material que tuviera una gran "capacidad calorífica" cambiaría muy poco incluso después de absorber grandes cantidades de fluido térmico, como sería el caso de la pasta de la tarta o del aire de la playa; mientras que en los materiales con pequeña capacidad calorífica no hace falta mucho calor para que se eleve su temperatura, como sería el caso del relleno y de la arena. Black también se dio cuenta de que la aplicación de calor al hielo, no lo convertía a éste inmediatamente en líquido, sino que el hielo absorbía cierta cantidad de calor sin aumentar su temperatura. O que cuando se calentaba o incineraba algún material del interior de una botella aislada del exterior, ese material cedía todo su fluido calórico al aire del interior. E intentó medir ese incremento resultante de su temperatura en un termómetro insertado en la botella. Fueron los primeros medidores calóricos, los calorímetros.

Estas inocentes experiencias y experimentos tuvieron consecuencias desastrosas para la teoría surgida del termómetro. Si cantidades idénticas de calor podían producir lecturas de temperatura completamente diferentes en distintos materiales, entonces los termómetros ya no podían ser medidas infalibles y objetivas del calor. Con ello se sentaron las bases para establecer una diferencia clave en una idea hasta entonces confusa, la diferencia entre calor y temperatura. Esta distinción resultaría fatal para la teoría cuyo origen se remontaba al lejano año de 1592, año del invento del termoscopio por Galileo. Quedó claro que la temperatura era un simple registro, una medida del calor existente. Así de sencillo y de fastidioso era el fin de la teoría del termómetro.

Y a rey muerto, rey puesto. Black y otros científicos de su tiempo no se conformaron con quedarse a la intemperie, sin el abrigo protector que ofrece una teoría (más vale siempre una mala teoría que la ausencia completa de teoría), y en 1770 decidieron crear una teoría más. La teoría del *calórico*, así bautizado por el creador de la química moderna, el gran Antoine Lavoisier. Dice así: "El calor consiste en un fluido calórico que es invisible, sin peso e indestructible". Se trata de un fluido capaz de penetrar todo el espacio y de fluir hacia y desde todas las sustancias. Impregnaría la materia y sería el responsable de su calor. Precisamente para distinguir el efecto de la causa se impone esta nueva denominación. Digamos que el calórico es lo que produce la sensación de calor.

Los científicos se mostraron muy partidarios de esta teoría porque parecía explicar muchas cosas, incluyendo las sencillas. Por ejemplo, imaginaban que un material se expandía al calentarse porque se hinchaba al absorber este fluido calórico, como se hincha una esponja al absorber agua. O que al frotar un cuerpo, se romperían las vesículas microscópicas que contienen el calórico, liberando calor. Así al menos les parecía explicarse el viejo tema de la fricción. Y persistente, pues sería en ese campo donde de nuevo surgirían experimentos tan decisivos que acabarían provocando el abandono de esta teoría.

Es curiosa la ironía del destino de muchas teorías científicas y este es un caso ejemplar. La teoría del calórico entró en crisis conforme se iba entendiendo mejor la diferencia entre calor y temperatura que ella misma había descubierto, y con la que había derribado la teoría del termómetro.

La teoría, que había centrado correctamente el estudio del calor en los procesos de intercambio de energía, incluía al mismo tiempo una comprensión del calor como un fluido sustancial, una sustancia cuya magnitud permanecía constante (principio de conservación del calórico) durante todo proceso de transferencia del calor al frío, pues lo que perdía la materia caliente lo ganaba la fría. Y fue un caso especial de fricción, el proceso de perforación de cañones observado por Benjamín Thompson, el que empezó a poner en aprietos a la teoría, pues aparentemente el calórico creado en la fricción no iba acompañado de su correspondiente pérdida en ningún otro sitio. Observó que se producía un aumento de temperatura en la estructura del cañón, en las virutas metálicas desprendidas y en el propio taladrador, de modo que parecía generarse calor continuamente en lugar de conservarse, como predecía la teoría del fluido calórico.

La teoría fue perdiendo adeptos al no poder explicar diversos problemas, lo que hizo que los científicos se encontraran cada vez más incómodos con ella y fuera finalmente abandonada a mediados del siglo XIX. Su golpe de gracia se lo asestó Clausius, fundando sobre bases sólidas la ciencia de la termodinámica (que poco después será desarrollada matemáticamente por el escocés Maxwell y el austríaco Boltzman). Solo entonces pudo disiparse completamente la confusión entre calor y temperatura.

Y ya sabemos cómo acaba la historia. Pero eso fue más tarde.

**El gran Lavoisier**

Porque mientras tanto, en el contexto intelectual del calórico que él mismo fijó y al que dio esplendor, ahí estaba el gran Lavoisier al enfilarse el último cuarto del siglo XVIII. El fundador de la química moderna comparó el calor producido al quemar carbón vegetal pulverizado con el calor del cuerpo producido naturalmente por pájaros y cobayas. Menos mal que no incineró a las pobres criaturas: se limitó a encerrarlas en un calorímetro. También controló la cantidad de aire consumida por cada una de ellas y observó los gases exhalados. Gramo a gramo, Lavoisier descubrió que tanto los animales como el carbón quemado consumían cantidades idénticas de calor. ¿Era una mera coincidencia? No, concluyó, debía significar que los seres animados producían su calor del mismo modo que los objetos inanimados cuando se quemaban: es decir, mediante una sencilla *combustión* química. Un médico escocés de la época, que había conjeturado la misma idea de que el calor del cuerpo era el resultado de que nuestro cuerpo descompusiera la comida que ingeríamos, había llegado a la conclusión de que "el cuerpo del hombre, del que se muestra tan orgulloso, es poco más que un estercolero humeante".

Lavoisier había reavivado la antigua intuición de Aristóteles: la fuente de la vida era, ciertamente, una especie de fuego. Y si se tratara del resultado de una combustión corriente, razonó Lavoisier, entonces este fuego, como cualquier hoguera, necesitaría *alimentarse* constantemente, siendo el combustible los alimentos que ingerimos. Y también necesitaría aire, cuyo suministro constante proporciona nuestra respiración. En eso, podría decirse, sí discrepaba del gran filósofo griego, que creía que era el corazón quien contenía ese fuego primordial. Para el científico francés, la cámara de combustión del cuerpo debía estar situada en los pulmones.

**Joule y Mayer**

En la movida década de los 40 del siglo XIX, dos destacados físicos, Julius Robert Mayer en Alemania y James Prescott Joule en Inglaterra, estaban llegando a las mismas conclusiones, si bien desde presupuestos muy distintos y con muy distinta suerte. De manera independiente, los dos decidieron liberarse de pensar en el calor como un fluido sustancial y decidieron adentrarse por un camino más prometedor: pensarlo como movimiento. Pensarlo en términos mecánicos y de desplazamiento, pensarlo como trabajo. Y así nació la moderna teoría del calor que arrumbaría definitivamente la teoría del calórico al desván de las teorías inservibles. Así lo expresaba Joule en 1847:

«Debo mencionar, en conclusión, unas pocas palabras en relación con la verdadera naturaleza

del calor. La opinión más común hasta hace muy poco ha sido que éste es una sustancia poseyendo, como toda la materia restante, impenetrabilidad y extensión. Hemos mostrado sin embargo que el calor puede ser convertido en fuerza viva y en atracción a través del espacio. Resulta perfectamente claro que (…) la hipótesis del calor como sustancia debe ser descartada»

Ambos, Joule y Mayer, alumbraron la idea de la equivalencia entre calor y trabajo y especificaron un valor numérico para el trabajo necesario para aumentar una unidad la temperatura. Y ambos establecieron sólidamente el principio de conservación de la energía. Pero casi todo el mérito y reconocimiento se lo llevó Joule. Y tal vez con justicia, porque desde Carnot, nadie dio un empuje tan definitivo al estudio del calor y a la fundación de esa rama de la Física que estudia las leyes generales que rigen las conversiones mutuas entre calor y trabajo y que hoy conocemos como “Termodinámica”. Joule era un gigante como científico y su grandeza estaba en sus impecables experimentos, destinado a cuantificar cuanto observaba su extraordinaria mente inquisitiva.

Si Carnot está vinculado con la máquina de vapor, Joule quedará ligado a otra innovación tecnológica (de escasa importancia en su época pero de gran trascendencia posterior): la electricidad. Imaginaos a Joule ante un motor eléctrico y preguntándose dos cosas: una, si esa incipiente tecnología podría superar a la ya establecida por el vapor, y otra sobre cuál es la fuente primaria de la potencia motriz del motor eléctrico. Deduce que debe ser la oxidación del zinc en la batería, puesto que es el único material que se consume en el proceso. Esto le lleva a un meticuloso proceso de medición en el que trata de relacionar la cantidad de zinc consumido con la potencia motriz producida (¿y cómo se cuantifica ésta? Pues por la altura a la que es capaz de elevar un peso durante un determinado periodo de tiempo, por ejemplo). Curiosamente, sobre la base de estas observaciones, y comparando el rendimiento motriz del carbón del que se alimentaban las máquinas de vapor con el zinc de las pilas eléctricas, auguró un futuro sin gloria para la tecnología eléctrica. Sus experimentos eran meticulosos, sus razonamientos irrefutables y, sin embargo, su pronóstico resultó un fracaso.

El propio Joule había efectuado un notable descubrimiento: la electricidad corriente siempre calentaba el alambre por el que fluía y, en ese proceso, perdía parte de su fuerza. Un siglo después todo el mundo se acostumbraría a que se le calentaran sus aparatos domésticos, pero a mediados del siglo XIX nadie sabía muy bien qué quería decir aquello. Y repara en el calentamiento de la pila que alimenta el motor, y se pregunta si hay una relación entre éste y la potencia motriz producida. Lo importante, claro, son las preguntas, pero las preguntas solo llegan a ser importantes si puede encontrarse alguna manera de ponerlas a prueba para encontrar una respuesta. Y Joule la encontró, y su botín fue una relación entre la [corriente eléctrica](http://es.wikipedia.org/wiki/Corriente_el%C3%A9ctrica) que atraviesa una resistencia y el calor disipado, llamada actualmente “[ley de Joule](http://es.wikipedia.org/wiki/Ley_de_Joule)” (el calor desprendido es directamente proporcional a la resistencia del conductor, al tiempo durante el que está circulando la corriente y al cuadrado de la intensidad que lo atravies). Comprueba que esa es una ley universal, que vale para todos los procesos donde exista conversión mutua de trabajo y calor, comparando por ejemplo el motor eléctrico, que produce movimiento a partir de la electricidad, con la dinamo, que es un ingenio que produce electricidad a través del movimiento. Su ley del calor no depende de cómo este se genere, es más universal, tiene un alcance más universal.

Pero no fue Joule, sino el médico y físico alemán Julius Robert Mayer quien más poderosamente influyó en Clausius. Inclinado a la especulación filosófica, los méritos científicos de Mayer no fueron apreciados por sus contemporáneos. Sus ideas provocaban resistencia porque en ellas se trenzaban teorías teológicas sobre el origen del mundo con precisas teorías físicas, y muchos de sus trabajos fueron rechazados por las más prestigiosas instituciones científicas de la época. Esta atmósfera hostil que rodeaba su persona le condujo a una tentativa de suicidio y a una larga depresión mental que lo mantuvo ingresado en un hospital cerca de un año. Pero eso sería a principios de la década de los 50, porque en el invierno de 1840 nos lo encontramos de médico a bordo de un mercante holandés que iba desde Rotterdam a Surabaya, en la isla de Java.

Al igual que la mayoría de los médicos de esta época Mayer trataba a sus pacientes haciéndoles sangrías, y lo que observó fue que a medida que el barco se iba acercando a los trópicos, la sangre se volvía más roja. Lo interpretó como una inesperada confirmación de las ideas de Lavoisier sobre la combustión biológica. Razonó que en Holanda el tiempo frío obligaba a los cuerpos a generar mucho calor para mantenerlos calientes; sin embargo, en aquel clima cálido de los trópicos, el mecanismo de combustión corporal se ralentizaba, y por ello quemaban menos cantidad del aire inhalado y había más aire que sencillamente entraba en la sangre dándole un color más rojo.

Esta brillante explicación apenas encontró acogida entre los científicos de aquel momento, y la cosa empeoró más cuando a Mayer se le ocurrió incorporar esta explicación sobre el enrojecimiento de la sangre a su muy oscura teoría filosófica de la *Ursache*, que en alemán significa "causa", y con la que él designaba la fuerza única e inexpresablemente enorme que generó el universo. Se trata de una inmensa fuerza seminal que se había escindido en muchas fuerzas menores y que seguía troceándose en la época actual. Por ejemplo, la fuerza del sol se bifurcaba en una fuerza luminosa (la luz) y otra térmica (el calor), siendo ambas transformadas por las plantas en una fuerza química (el alimento), que a su vez era multiplicada de muchísimas formas por los seres vivos que la consumían. Así, esa fuerza química se convertía en fuerza térmica (calor corporal) mediante las cámaras de combustión interna de las criaturas, y otra parte en fuerza mecánica (movimiento corporal) por medio de los músculos. También había una parte de la fuerza química que se convertía –por las cajas acústicas de las criaturas- en fuerza acústica (sonidos) y en fuerza eléctrica (impulsos neurales). La conclusión final y grandiosa de Mayer es que las cantidades de todas esas fuerzas subordinadas de hoy (luminosas, térmicas, químicas...) equivalían exactamente a la original *Ursache* de la cual habían surgido todas. Dicho de otro modo: aunque las cosas parecían cambiar incesantemente, la cantidad total de fuerza en el universo era una de las grandes constantes. Nunca había cambiado y nunca cambiaría. Esa visión cosmológica estableció el objeto y los límites de la ciencia de la Física. Cuán lejos miraba Mayer, se ve, por ejemplo, en estas líneas suyas:

"Estudiar la fuerza en sus distintas formas, investigar las condiciones de su transformación (metamorfosis), ésta es la única tarea de los físicos, puesto que el engendro de la fuerza o su supresión se encuentra fuera de la esfera del razonamiento y de la acción del hombre".

Ese planteamiento fue el que sedujo a Clausius, más todavía que el trabajo experimental de Joule, que también admiraba. Además, Clausius apoyó a Mayer en la carta que éste envió a Joule acusándole de llevarse todo el crédito por haber acabado con la teoría del calórico, y la cosa se convirtió en una disputa nacionalista con todas las de la ley entre científicos británicos y alemanes. Era el apoyo de un prusiano a un bávaro en un tiempo en que se daban los primeros pasos para constituir una asamblea nacional alemana de corte liberal, con un parlamento en Frankfurt elegido democráticamente y con un proceso constituyente en marcha. Desbaratado finalmente por Federico Guillermo de Prusia al rechazar en 1849 la corona ofrecida por el parlamento y acabando con las esperanzas una Alemania constitucional y unificada.

**La entropía**

Clausius reunió los rigurosos experimentos de Joule y las extravagantes conjeturas de Mayer y pensó que solo hacía falta entretejerlas para alumbrar un nuevo modo de pensar en el calor. Desde la misma perspectiva que lo habían hechos los dos anteriores, desde el Principio de conservación de la energía que ambos habían establecido, pero dirigiendo la mirada en la misma dirección de Mayer. Clausius planteaba que el calor y el trabajo no eran sino dos variantes del mismo fenómeno que luego se llamó *energía*. Eran fundamentalmente lo mismo, pudiendo intercambiarse una unidad de trabajo por una unidad de calor sin que esto afectara al total de energía del universo. Era como si sugiriera que pensáramos en términos de materia o peso: desde este punto de vista, las piedras y las personas son esencialmente lo mismo y se puede intercambiar un peso de carne por otro igual de piedras sin que ello afecte al peso total del universo. Y así como hay muchas variantes de materia, como cuero, madera, metal y demás, así también hay muchas variantes de ese fenómeno esencial llamado energía. Además del calor (energía térmica) y del trabajo (energía mecánica), había energía solar, eléctrica y energía acústica, por mencionar solo unas pocas. En el experimento de Joule la energía eléctrica se transformaba en energía térmica, es decir, mientras el cable se calentaba, la electricidad que fluía se reducía con una reciprocidad exacta. De modo más general, una unidad de cualquier tipo de energía se podía transformar en otra unidad de cualquier otro tipo…sin afectar a la energía total del universo. Otros antes que él habían pensado y establecido el principio de conservación de la energía (o primer principio de la termodinámica), pero fue con Clausius cuando vimos más lejos y comprendimos más profundamente. La Ley de Conservación de la Energía se reduce a esta ecuación matemática:

∆Euniverso= 0

Es decir, el cambio neto de la energía total del universo siempre es cero porque la energía total del universo es una constante eterna. Es ahí donde Clausius ancla la nueva teoría del calor que arrumbó al desván de los recuerdos la vieja teoría del calórico. Podemos formular esa nueva teoría: "El calor no es sino una de las muchas diferentes manifestaciones de la energía, todas las cuales pueden intercambiarse en cualquier momento sin que afecte al total neto de energía del universo".

Con esta teoría Clausius establecerá un nuevo marco en el que se reinterpretarán todos los estudios y resultados anteriores, integrándolos en una nueva comprensión del fenómeno. En la época, a algunos científicos les incomodaba la aparente contradicción entre los experimentos de Joule (que parecían demostrar que el calor es generado mediante la fricción de fluidos en movimiento) y los razonamientos de Carnot (que invitaban a pensar que el calor "no puede ser generado sino solo producido desde una fuente donde haya existido previamente"). Clausius no duda en zanjar la cuestión apostando sin ninguna duda por la teoría mecánica del calor de Joule y Mayer. "Debemos mirar directamente en esta teoría que considera el calor como un movimiento». El problema de Carnot reside en el presupuesto mismo que le ha permitido construir su teoría de la máquina de vapor, el presupuesto de la máquina perfecta (máximamente eficiente). Según Clausius, Carnot estaba en lo cierto al decir que la producción ideal de una máquina solo estaba determinada por la *diferencia* de temperaturas entre la caldera y el radiador. Pero no estaba en lo cierto al comparar las máquinas de calor con las norias. Carnot había imaginado que el fluido calórico que movía una máquina de vapor *sobrevivía* al proceso, fluyendo desde la caldera, entrando y saliendo en los pistones para terminar en el radiador: desde ahí, el fluido calórico se reabsorbía en el agua y volvía a la caldera. En otras palabras, el fluido calórico nunca se *consumía* auténticamente en el proceso de transformarse en potencia. Éste era el punto clave. Según Clausius, "en todos los casos en los que se produce trabajo por medio del calor, se consume una cantidad de calor que es proporcional al trabajo realizado". Por ello, todo el calor que llegara hasta el radiador era calor que no se había transformado en trabajo en los pistones…calor que se había colado por las paredes de la máquina y que se había irradiado, inútilmente, al aire circundante. Podría decirse que era calor malgastado, explicaba Clausius, calor que no había producido trabajo alguno, como agua que se derramara de la noria sin servir para nada. Semejante prodigalidad parecía existir en todas las máquinas reales, según observó Clausius, desde los molinos de viento hasta los cuerpos humanos. Por ejemplo, del total de energía eólica que hacía girar un molino de viento, solo se transformaba una parte productivamente en energía mecánica que se utilizaba para bombear agua o para moler grano. La parte restante se transformaba en energía térmica en el roce de los álabes con el aire o del eje con su soporte, calor que terminaba por disiparse inútilmente en el aire.

De forma parecida, del total de energía química (alimento) que servía de combustible al cuerpo humano, solo una parte se convertía en beneficiosa energía mecánica utilizada por la persona para subir escaleras o para levantar objetos pesados; inevitablemente, otra parte se malgastaba en subproductos inútiles, excretados por los imperfectos sistemas metabólicos y digestivos del cuerpo. Conclusión: No había máquina aparentemente capaz de funcionar sin fallos, de convertir el cien por cien de su combustible en trabajo útil. Sin embargo Clausius insistía en que, incluso con aquel derroche de energía inherente a su funcionamiento, las máquinas (y las personas) obedecían a la Ley de la Conservación de la Energía. Es decir, en el caso de una máquina de vapor corriente la energía térmica total que entraba en la caldera caliente era exactamente igual al trabajo (energía mecánica) producido por los pistones más la energía disipada (energía térmica). Y lo mismo para los molinos de viento y los seres humanos: la energía entrante total equivalía a la saliente, la útil más la malgastada.

Los argumentos físicos y matemáticos de Clausius a favor de la nueva teoría del calor lo encumbraron rápidamente a la elite científica de la época y le permitieron encauzar su vida personal. Celebrado y requerido por los mejores centros de investigación europeos, tras enseñar en la Universidad de Berlín, llega con treinta y dos años a la prestigiosa universidad de Zurich. Será en esa ciudad donde encontrará el amor de su vida, Adelheid Rimpau, con la que se casará en 1859. Clausius nunca había sido tan feliz en su vida. Pronto llegaron los hijos y su posición desahogada le permitió mudarse a una zona residencial donde pudo comprarse una casa grande y un lugar “con aire puro”, declaraba entusiasmado Clausius, “y una bonita vista del lago y de las montañas”. Clausius estaba en la cúspide de su carrera, y desde allí era capaz de discernir las consecuencias últimas de sus ideas, que no tenían nada que ver con las agradables sensaciones que le producía el paisaje alpino de Zurich. Sus conclusiones resultarían no ser en absoluto tranquilizadoras…

Su pensamiento comenzaba recordando los dos familiares ejemplos del comportamiento irreversible del calor. En primer lugar, el calor parecía fluir desde lo caliente a lo frío y nunca de lo frío a lo caliente. En segundo lugar, la fricción cambiaba el movimiento mecánico en calor y no parecía haber en la naturaleza un proceso comparable que trocara el calor en movimiento. Clausius observaba que, en esencia, este comportamiento asimétrico del calor representaba dos tipos diferentes de cambio. Uno representaba un cambio de *temperatura* (energía térmica fluyendo de lo caliente a lo frío). El otro representaba un cambio de *energía* (energía mecánica que se transforma en energía térmica por medio de la fricción). La pregunta que se planteaba Clausius era si el cambio de energía era básicamente distinto del cambio de temperatura. Le recordaba una pregunta que se había hecho años atrás cuando analizaba las máquinas de vapor, a saber: “¿un incremento de calor es básicamente distinto de un incremento de trabajo?” Entonces había propuesto con atrevimiento que eran dos variantes de la misma cosa: incrementos de energía. Por analogía, ahora Clausius decidió proponer algo en el mismo sentido: los cambios de energía y de temperatura, como los que se daban en el comportamiento irreversible del calor, no eran sino variantes de una misma cosa: cambios de *entropía*.

“He acuñado intencionadamente la palabra *entropía* para que sea lo más parecida posible a la palabra *energía* –explicaba Clausius-, porque las dos magnitudes están tan imbricadas en su significado físico que parece deseable cierta similitud en su denominación”.

Años atrás había demostrado que a pesar de su procedencia de distintas fuentes y de sus diferentes comportamientos, todas las variedades de energía eran fundamentalmente una misma cosa. Y podía contabilizarse con la misma regla. Así, fuera energía solar, o eléctrica, o acústica, cualquier tipo de energía podía medirse en calorías, por ejemplo. Era como decir que todo objeto sólido, fuera bastón, piedra o persona, podía ordenarse por su peso en kilos o cualquier otra unidad. Clausius proponía entonces que existía un fenómeno aún mayor y más amplio que la energía. Imaginaba que la entropía abarcaba no solo todas las variantes de energía sino también la temperatura (definiendo ésta, como siempre, por la lectura de un temómetro corriente). Fue el hombre que vio más lejos, era como si hubiera sido el primero en descubrir que Estados Unidos, por grande que fuera, no era sino parte de un continente mucho mayor. La entropía representaba un horizonte nuevo y misterioso en el pensamiento científico, y el científico prusiano estaba ávido de explorarlo. Y aventuró la hipótesis de que los cambios de energía y de temperatura podían medirse con una medida única, es decir, al igual que ocurría con las diferentes formas de energía, estas diferentes formas de entropía podían sumarse y restarse. ¿Cuál sería entonces la suma total de los cambios de entropía que se daban en el universo? ¿Fluctuaba ese total inmenso o era una constante? ¿Existía una Ley de Conservación de la Entropía equiparable a la Ley de Conservación de la Energía? ¿Cómo averiguar la entropía total del universo? Para averiguarlo, ¡tendría que tener en cuenta todos los cambios de energía y de temperatura en cualquier momento dado! Sin desalentarse, Clausius decidió intentarlo, creando primero un sistema de registro: para ello todos los cambios naturales (cambios de energía y de temperatura que se producen espontáneamente en la naturaleza) se considerarían *cambios positivos* de la entropía. Así, cuando por ejemplo el calor de una casa caliente se escapa hacia el exterior frío, o el de una taza de café caliente que se fuera enfriando progresivamente, Clausius diría que la entropía de esos lugares se incrementa.

A la inversa, todos los cambios *antinaturales* (que ocurrían solamente cuando se obligaba a la naturaleza mediante algún tipo de máquina) serían considerados como *cambios negativos* de entropía. Por ejemplo, siempre que una máquina de vapor trocara el calor en trabajo o que un refrigerador forzara al calor a ir de un sitio frío a otro más o menos caliente, Clausius diría que en estos casos la entropía disminuía. A partir de ahí empezó a calcular balances de entropía y a especular sobre una supuesta ley de conservación de la entropía, en analogía con la de conservación de la energía. En las máquinas ideales (aquellas que funcionan según la eficiencia ideal definida por el principio de Carnot) habría tantos cambios positivos como negativos de entropía y, por tanto, no habría cambios netos en la entropía del universo. Pero para todas las máquinas de vapor reales los cálculos de Clausius revelaron algo completamente distinto. Los cambios naturales que se daban en estas máquinas (calor desperdiciado al pasar de la caldera al radiador y trabajo convertido en calor por la fricción) siempre sobrepasaban al único cambio *antinatural* (calor convertido en trabajo por medio de los pistones). Los cambios positivos de entropía superaban siempre a los cambios negativos, por lo que siempre daba como resultado un incremento neto de la entropía en el universo. Clausius se decía a sí mismo que estos resultados eran generalizables, que podían aplicarse a todo tipo de máquina en la vida real, incluyendo molinos de viento o seres humanos. Su descubrimiento sobre la entropía era universal. Y si estos resultados se aplicaran al universo en su conjunto, la teoría mecánica del calor podría resumirse en dos máximas fundamentales:

- La energía del universo es constante

- La entropía del universo tiende hacia un valor máximo.

Si el primer principio dice que la cantidad de energía siempre se conserva, el segundo afirma que la calidad de la energía siempre se degrada. Aunque la energía no disminuye, cada vez es de peor calidad. Puesto que la entropía siempre aumenta en los procesos irreversibles, la energía libre (la parte de la energía total que está disponible para hacer cosas con ella) siempre disminuye.

La entropía es una [magnitud física](http://es.wikipedia.org/wiki/Magnitud_f%C3%ADsica) que, mediante cálculo, permite determinar la parte de [energía](http://es.wikipedia.org/wiki/Energ%C3%ADa)que no puede utilizarse para producir [trabajo](http://es.wikipedia.org/wiki/Trabajo_(f%C3%ADsica)). Es una medida física del desorden de un sistema aislado, y Clausius descubrió que no para de crecer. Es una tendencia irreversible. Como el universo es un sistema aislado, su entropía se incrementa continuamente; de hecho, aumenta con cada cambio que se produce en el mundo. Ello explica la tendencia natural de los sistemas a la desorganización y al frío (al equilibrio termodinámico). El agua caliente se enfría (hasta la temperatura ambiente) espontáneamente, pero el agua fría no se calienta por sí sola. El café y la leche se mezclan con naturalidad, pero no se separan de por sí. Las máquinas se estropean, la ropa se ensucia y la habitación se desrodena, casi sin darnos cuenta; pero hace falta una esforzada intervención nuestra para arreglar la máquina, lavar la ropa y ordenar la habitación. Es como si el universo tendiera a distribuir su energía uniformemente, a maximizar la entropía. Dentro de esta tendencia general del universo hacia el desorden, la desorganización y el frío, los seres vivos representan excepciones locales. Todo organismo es una excepción cósmica, nada a contracorriente, en él se incrementan (o se mantienen) el orden, la organización y la temperatura, y se reduce la entropía. Lo mismo que ocurre con las máquinas de vapor y los frigoríficos. Esto no contradice en modo alguno el principio descubierto por Clausius, pues estos no son sistemas aislados, sino sistemas abiertos a su entorno, con el que intercambian constantemente materia y energía, y el orden y organización que representan estos sistemas se consigue a costa de aumentar (y en mayor cantidad que la invertida para construir orden) el desorden y la desorganización de su entorno.

.