

Reflexiones sobre energía térmica

LAS conclusiones a que llegamos en el artículo anterior (1) son:

1.º Mientras se consideran exclusivamente fenómenos reversibles, el calor no difiere en nada de las formas llamadas superiores de energía. La entropía es el factor de extensidad de la energía térmica y es conservativa lo mismo que todas las demás extensidades.

2.º Si los fenómenos son irreversibles, el factor de extensidad deja de coincidir con la entropía y, por lo tanto, de ser una cantidad conservativa (diferencial exacta). Esta circunstancia y no el Teorema de Carnot es la que separa al calor de las otras clases de energía.

Como lo hemos visto, esta divergencia es consecuencia de un dilema: o se admite que el calor se conserva en los fenómenos de conducción y aparecen entonces las divergencias anotadas, o se rechaza esta hipótesis para mantener la analogía en los fenómenos reales.

En realidad, son muchos los energistas que se han esforzado en mantener este paralelismo, pero las hipótesis a que recurren varían mucho del uno al otro.

Algunos, como Ostwald, aceptan la creación de entropía en los fenómenos reales como un hecho indiscutible pero que no es exclusivo para el calor sino que las extensidades de las otras energías experimentarían también variaciones, muy pequeñas pero reales, en circunstancias análogas. Otros, como Selme, niegan la creación de entropía la que, según ellos, sería solamente una apariencia matemática y no una realidad física. Un ejemplo hará comprender mejor el origen y las consecuencias del dilema que acabo de enunciar y el objeto de las diversas hipótesis a que he aludido.

Consideremos dos fuentes que contienen una misma forma de energía pero cuyas intensidades son diferentes, sean I_1 e I_2 estas intensidades. Supongamos que estas dos reservas se ponen en comunicación por medio de un cuerpo conductor pero que presenta cierta resistencia para el paso de la energía considerada mientras que el espacio exterior se supone absolutamente impermeable para ella.

En estas circunstancias se observa, después de un período de transición generalmente corto, que se establece por el conductor un flujo de energía que tiende a nivelar la diferencia inicial de las in-

(1) Véase el número 9 del año 1928 de los Anales.

tensidades. Si esta nivelación es lo suficientemente lenta o se considera un intervalo suficientemente corto con relación a su duración total, se puede considerar el régimen establecido como permanente



y, en este caso, la intensidad igual a I_1 en A decrece regularmente a lo largo del conductor hasta hacerse igual a I_2 en B. Consideremos la cantidad elemental de energía contenida en el trozo dI de conductor inmediato al punto A, sea

$$\Delta W = I_1 \Delta E$$

esta cantidad de energía. En el instante siguiente ésta se ha desplazado a lo largo del conductor y se encuentra en una zona de intensidad $I_1 - dI$.

Ahora bien, si se trata de una forma superior de energía, se sabe que la extensidad se conserva, por lo tanto la energía primitiva ha experimentado una disminución

$$d \Delta W = \Delta E dI$$

pero, al mismo tiempo, se observa la aparición de otras energías que compensan esta pérdida

En cambio, si se trata de energía térmica, no se observa la aparición de ninguna otra forma de energía ni, tampoco, ninguna modificación del estado físico del conductor. En estas condiciones, como decía más arriba, es preciso optar entre estas dos explicaciones;

1.ª En los fenómenos de conducción térmica, lo mismo que en el caso de las

energías superiores, la extensidad se conserva y una parte del calor desaparece para transformarse en una forma «latente» desconocida.

2.ª La energía térmica se diferencia de las demás en que, en los fenómenos de conducción el calor se conserva. Para esto es preciso admitir que durante la conducción la extensidad, o sea la entropía, aumenta para compensar la disminución de la intensidad.

Ambas explicaciones colocan a la energía térmica en una situación de excepción respecto de las otras; veamos, ahora, sus consecuencias. En efecto, Poincaré ha demostrado que toda hipótesis o explicación que interpreta los hechos y no conduce a conclusiones contradictorias o absurdas puede ser considerada como «verdadera», y que la elección entre diversas interpretaciones «verdaderas» obedece sólo a razones de comodidad. Siendo clásica la segunda interpretación, me limitaré a considerar las consecuencias de la segunda.

Según ella, la energía térmica evolucionaría en todo caso en forma enteramente análoga a la de las otras formas y esto sería, sin duda alguna, una simplificación muy ventajosa. En cambio, para conciliarla con el principio de la Conservación de la Energía, nos vemos en la necesidad de suponer la existencia de otras formas desconocidas de energía.

Esta es una hipótesis que hace inverificable el Principio de Conservación y lo convierte en una tautología; por otra parte, existe el antecedente de que todas las hipótesis de esta clase formuladas anteriormente han sido abandonadas tarde o temprano por haber sido reconocidas como falsas o para ser reemplazadas por otras más satisfactorias. Ejemplo: Cantidad de movimiento del éter supuesta por Descartes para mantener su principio de la conservación algebraica de la

Cantidad de movimiento; torbellinos del éter imaginados por Oersted para explicar los fenómenos electromagnéticos explicados después por Ampere; masas ocultas de Hertz, etc., etc.

Además de este inconveniente de orden filosófico, esta interpretación da lugar a otras dificultades que estimo insalvables. En efecto, la pérdida de energía térmica debe aumentar con el grado de irreversibilidad del fenómeno; en otras palabras, la cantidad de calor contenida en un cuerpo deja de ser función exclusiva de su temperatura para depender de su «historia térmica» anterior. Siendo esto así y a pesar de que Selme en su «Ensayo Termodinámico» declara que la hipótesis que considero no modifica en nada la Calorimetría, no acierto a comprender cómo se puede conciliar el hecho que acabo de enunciar con la regla fundamental que permite prever la temperatura de una mezcla y que la experiencia confirma diariamente. En efecto, la fracción de calor que pasa al estado latente debe depender de las diferencias de temperatura entre las partículas en contacto; por lo tanto, el calor «aparente» que queda en la mezcla debería depender de la manera en que se efectúa la mezcla, del grado de agitación, etc. Dejo el problema planteado ante mis lectores.

Voy a detenerme, ahora, en una interpretación que ha servido de argumento a algunos analogistas, tanto de los que creen que el aumento de extensidad es común a todas las energías como de los que consideran este aumento como una ficción matemática.

Se sabe que, para cualquiera clase de energía se tiene:

(1) $dW = I dE$; $W =$ Trabajo absorbido esto es, la diferencial del trabajo puede expresarse por medio del producto de dos factores de los cuales uno, I , es la intensidad de la energía, y el otro, dE , la

variación de su extensidad durante la transformación elemental.

Ahora bien, las extensidades de todas las energías superiores son medibles, ya sea directamente, o por medio de fórmulas independientes de (1); por ejemplo, la masa eléctrica puede ser medida por medio de la Ley de Coulomb. En cambio, no existe manera alguna de determinar el factor de extensidad del calor sino en función de la energía misma y por intermedio de la fórmula (1).

Supongamos por un momento que no existieran los medios directos a que acabo de aludir y que, como en el caso del calor, la extensidad pudiera solamente ser determinada por la fórmula

$$(2) \quad \Delta E = \int_A^B \frac{dW}{I}$$

es evidente que, si la transformación es reversible, esta definición, que llamaremos energética, de la extensidad coincide con la usual. Para precisar más las ideas supondremos el caso de una transformación que pone en juego energía elástica que es, tal vez, la más tangible.

Se sabe que en este caso

$$dW = -p dv; \quad I = p; \quad E = v$$

y se verificará inmediatamente que

$$\Delta E = \int_A^B - \frac{p dv}{d} = v_A - v_B$$

es decir, que la variación de extensidad es igual a la disminución del volumen.

Supongamos, ahora, que la transformación es irreversible; el trabajo que hay que suministrar al sistema tiene que ser mayor para compensar las causas de la irreversibilidad (frotamientos, etc.). En

cambio, la presión, p , es independiente del mayor o menor grado de irreversibilidad del fenómeno de suerte, que, en todo momento,

$$dW = -p \, dv$$

Se deduce de lo anterior que la extensidad, o sea el volumen, definido por

$$\Delta E = \int_A^B \frac{dW}{p}$$

decrece siempre más rápidamente y crece menos rápidamente que v . En otras palabras, para todo circuito cerrado se tiene la condición

$$(3) \quad \int \frac{dW}{T} \leq 0$$

que es enteramente análoga al Teorema de Clausius. En consecuencia, para toda forma de energía, se tendría que el aumento de extensidad calculado según la (2) es siempre *menor* o, a lo sumo, igual a su aumento real.

Esta manera de exponer los hechos parece haber seducido a varios energistas como un argumento favorable a la analogía total; sin embargo, es fácil evidenciar su insuficiencia. En efecto, el razonamiento anterior prescinde del hecho que, en toda transformación irreversible de una energía superior aparece calor (u otras energías, generalmente inaprovechables y que acaban por transformarse en calor) mientras que si es calor el que evoluciona, no aparece nada. Si se toma en cuenta este hecho, se debe substituir

$$dW \text{ por } dW - dq$$

en la fórmula (2); entonces la extensidad determinada a partir de la fórmula (2)

coincide siempre con la real si se trata de una energía superior y la relación (3) subsiste únicamente en el caso del calor. Por lo tanto, lo único que establece este razonamiento es que

En toda transformación con pérdida de trabajo (irreversible), el no tomar en cuenta las otras formas de energía que aparecen implica un aumento de la extensidad de la energía que se transforma.

A mi juicio, todos los esfuerzos de los «analogistas» tendrán que estrellarse contra los hechos que he señalado, que bastan para que el calor tenga que ser considerado como una energía aparte de las demás.

Además, no debemos olvidar que, si bien sabemos transformar las energías unas en otras, la única extensidad que somos capaces de hacer aparecer a expensas de otra energía, es la extensidad térmica. En efecto, sabemos desde Lavoisier, que es imposible crear masa material; del mismo modo nos es imposible aumentar el área o el volumen de un sistema sin disminuir en una cantidad igual al área o el volumen del sistema exterior. Tampoco podemos crear masa eléctrica sin que, en alguna parte, aparezca una masa igual y de signo contrario; igual cosa sucede con la masa magnética. Parece que la cantidad de movimiento fuese una excepción, pero esto es una simple apariencia: cuando vemos la energía potencial gravítica transformarse en cinética, parece que hubiera allí creación de cantidad de movimiento, pero basta con recordar que el centro de gravedad de la Tierra no puede apartarse de su órbita para desengañarse: cuando un cuerpo suspendido cae, la tierra sube a su encuentro con una velocidad inapreciable pero que basta para compensar la cantidad de movimiento del cuerpo que cae. Del mismo modo, y siempre en virtud del principio

de la Conservación de la Cantidad de Movimiento, la energía química (armas de fuego) es incapaz de hacer aparecer cantidad de movimiento. En cambio, podemos y con suma facilidad, crear entropía; esto sucede en todos los casos en que el trabajo mecánico u otra energía se transforma en calor en forma irreversible.

Ahora bien, esta peculiaridad de la extensidad térmica no tiene por qué extrañarnos; en efecto, basta con un poco de reflexión para ver que todas las energías de que disponemos, sin excepción alguna, son de origen solar, es decir, térmico. Si, como se desprende de lo anterior, todas las energías «superiores» no son sino energía térmica acumulada y diferenciada, no tiene nada de sorprendente que ellas tengan una tendencia natural a volver a su forma primitiva

En cuanto al aumento de la entropía en los fenómenos irreversibles, ya hemos visto que es una consecuencia de la necesidad de conciliar a la experiencia con el Principio de la Conservación y no el resultado del Teorema de Clausius ni de otras deducciones matemáticas más o menos abstractas y complicadas, como lo presentan la totalidad de los textos.

La degradación de la energía en que se traduce *para nosotros* este aumento de la entropía, es solamente una consecuencia de nuestra «escala» dentro del Universo, y carecería de significado para seres muy grande o muy pequeños comparados con nosotros. Como decía en el artículo anterior, la mecánica estadística da una interpretación muy satisfactoria de la entropía que, según ella, es el logaritmo de la probabilidad del estado en que se encuentra el sistema considerado. Sin necesidad de entrar en detalles que requerirían un desarrollo matemático considerable, se comprende que la probabilidad de un sistema crece con su

Homogeneidad y que, a la inversa, esta mayor homogeneidad tiene que significar una menor aprovechabilidad de la energía que contiene el sistema.

Así, por el ejemplo, la energía cinética del agua que escurre por una cañería es considerada como «superior»; en cambio, cuando estas mismas moléculas han entrado en el estanque terminal, a pesar de que su fuerza viva subsiste por algún tiempo antes de transformarse en calor, ya es inaprovechable para nosotros porque las velocidades se han distribuido en todas las direcciones, en una forma más homogénea, más probable. En cambio, para un individuo de dimensiones casi moleculares, la energía sería tan aprovechable en este estado como en el anterior.

CONCLUSIONES

1.º El calor, que no difiere en nada de las otras formas de energía cuando las evoluciones consideradas son reversibles, se aparta netamente de ellas en toda transformación irreversible, es decir, real. Las diferencias observadas conducen a considerar el calor como una energía aparte pero no inferior a las otras. Esta separación se explica por ser el calor el origen de todas las otras formas conocidas de energía.

2.º El Teorema de Carnot rige para todas las energías (siempre que se utilice una escala racional para las intensidades) pues este teorema se aplica únicamente a ciclos reversibles.

3.º La aparente inferioridad de la energía térmica y que se suele presentar como una consecuencia de este teorema, se debe a que el calor es la única energía cuya extensidad podemos crear. Debido a esta circunstancia y a que la Naturaleza pone a nuestra disposición calor al estado fósil y en abundancia, la

energía térmica que podemos aprovechar es la que escurre entre una fuente y otra de menor intensidad. Las otras energías, en cambio, se nos presentan como diferencias de intensidades creadas a partir de otra energía, generalmente térmica, no al estado de «fuente natural».

4.º Creo que sería de una positiva ventaja pedagógica que en los cursos de termodinámica se modificase en la siguiente forma la exposición de los primeros capítulos:

a) Así como en mecánica racional se empieza por estudiar exclusivamente los mecanismos sin frotamientos, debe insistirse más en la absoluta analogía que presenta el calor con las otras energías en los fenómenos reversibles y hacer ver de este modo el significado o equivalencia de la entropía, que es la extensidad del calor.

b) Al abordar los fenómenos irreversibles mostrar, como lo he hecho en estas reflexiones, como la mantención del Principio de la Conservación implica la creación de extensidad a expensas de la intensidad, y que el teorema de Clausius no es sino la expresión matemática de este hecho. Con esto se evitaría el inconveniente del sistema usual de exposición que deja en la mente del estudiante la impresión de que la entropía

es únicamente una ficción matemática sin significado físico claro.

c) Insistir en que la Entropía es una función definida únicamente en el caso de fenómenos reversibles y que, por lo tanto, la integral

$$\int_A^B \frac{dQ}{T}$$

deja de representar a la variación de la entropía si se la aplica a una evolución irreversible. En este caso la variación de la entropía tiene que calcularse por diferencia entre la del estado final y la del estado inicial obtenidos ambos por vía reversible. Señalo este punto que figura en todos los tratados, pero no con la importancia que merece, porque he observado que son muchos los alumnos que lo entienden mal, lo que contribuye no poco en hacerles ininteligible el resto de la termodinámica.

Termino aquí estas «reflexiones» en la esperanza de que, ya sea directamente o por intermedio de mis colegas que tienen a su cargo la enseñanza de la Termodinámica, contribuyan a despertar en los futuros ingenieros el deseo de comprender mejor esta ciencia tan vasta y tan fecunda.