

Reflexiones sobre la energía térmica y su inferioridad con respecto a las otras formas de energía.

ES bastante extraño que, después de más de un siglo, los principios fundamentales de la termodinámica se hayan difundido tan poco en el público; más aun, son muchas las personas que por su profesión o cultura deberían conocerlos a fondo y sin embargo sólo tienen ideas vagas o erróneas al respecto: creo no sorprender a nadie al decir que hay muchos ingenieros que guardan como único recuerdo de la entropía, el de una especulación matemática sin significado objetivo alguno y que sirve solamente para dar origen a algunos teoremas que era preciso conocer para dar examen.

Este concepto, tan lamentable como injustificado, se debe, a mi juicio, en gran parte a que los textos de termodinámica insisten demasiado en las diferencias que presenta la energía térmica con respecto a las demás formas de energía llamadas superiores y no hacen resaltar bastante las semejanzas. Otro factor de importancia es el lenguaje que ha sido especialmente desgraciado en la elección de la terminología del calor.

Las líneas que siguen tienen por objeto, en primer lugar, hacer resaltar las propiedades comunes a todas las clases de energía y, en seguida, separar en las diferencias que existen entre el calor y las energías superiores la parte que corresponde a diferencias esenciales de aquellas que provienen únicamente de convenciones o del lenguaje empleado.

* * *

En muchos libros se presenta el principio de Carnot—según el cual sólo una parte de la energía térmica que una máquina perfecta recibe de una fuente térmica puede ser transformada en otra clase de energía—como una característica del calor que constituye una inferioridad con respecto a las otras energías. Vamos a ver que esto depende únicamente de la escala en que se miden las *intensidades* y que, si ésta fuera siempre una escala *racional*, el principio de Carnot sería aplicable a todas las clases de energía; para esto vamos a considerar, primero, los fenómenos rever-

sibles y, en seguida, los fenómenos naturales que son todos necesariamente irreversibles.

FENÓMENOS REVERSIBLES

Existen varias definiciones del fenómeno reversible, elegiré la de Duhem según quien «la reversibilidad consiste en una serie ideal, continua, de estados de equilibrio, que pueden considerarse como el límite común de dos series de modificaciones realizables en sentidos inverso uno del otro». Esta definición implica que la fuente de energía y el aparato receptor se encuentren en cada instante a igual intensidad de energía o, cuando menos, que la diferencia de intensidad entre ambos sea infinitamente pequeña; supondremos, además, que el receptor es una máquina perfecta, esto es que no existen pérdidas por frotamiento.

La diferencial del trabajo ejecutado por una forma cualquiera de energía puede representarse siempre por una expresión de la forma:

$$dW = y \, dx$$

o por una suma de términos análogos:

$$dW = y_1 \, dx_1 + y_2 \, dx_2 + \dots$$

en esa expresión las y representan a los llamados *factores de Intensidad*; las x , a los *factores de extensidad*.

Las propiedades características de los factores de extensidad son:

- 1.º Ser conservativas.
- 2.º Ser directamente sumables y, por lo tanto, mensurables.

Las propiedades peculiares de los factores de intensidad son:

- 1.º No ser directamente sumables, por lo tanto su medida sólo puede ser efectuada según una escala más o menos convencional.

- 2.º Para que una clase de energía se transforme en otra, es necesario disponer de dos o más cantidades de esta energía de diferentes intensidades.

Según esto, toda transformación se caracteriza por el paso de cierta cantidad de «extensidad» de cierta «intensidad» a otra diferente. Para verificar la generalidad de estas proposiciones basta con mirar el cuadro siguiente en el que se han indicado las principales clases de energías «superiores» y sus factores.

ENERGÍA	INTENSIDAD	EXTENSIDAD
Mecánica	Fuerza	Desplazamiento
Cinética	Velocidad	Cant. de movimiento
Eléctrica	Potencial	Cant. de electricidad
Gravífica	Potencial	Masa
Elástica (volumen)	Presión	Volumen
Elástica (capilar)	Tensión superficial	Superficie
Elástica (torsión)	Par de torsión	Angulo de torsión
Química	Afinidad	Masa

Pues bien, en el caso de la energía térmica sucede exactamente lo mismo; en efecto, sus factores son: el de intensidad, la temperatura; el de extensidad, la entropía. Para que el calor se transforme se necesita disponer de dos fuentes térmicas—ilimitadas o no—a temperaturas diferentes, y que una cierta cantidad de entropía—que permanece invariable (estamos considerando exclusivamente fenómenos reversibles)—pase de la una a la otra.

Siendo esto así, a qué se debe la impresión de que el calor es una energía «a parte» de las demás? A mi juicio, a dos causas:

1.º *Lenguaje*.—En las energías superiores se ha designado a la energía con el nombre de su factor de extensidad: energía cinética, cantidad de movimiento; energía eléctrica, cantidad de electricidad; energía química, masa de los reactivos, etc. En la energía térmica, en cambio, la palabra calor designa a la energía misma y no a uno de sus factores. Si se hubiese llamado calórico — como parece haber sido la intención de Carnot—al factor de extensidad térmico, o si se designara a ésta con el nombre de *energía entrópica*, la entropía, en vez de aparecer como un concepto «prodigiosamente abstracto» habría resultado tanto o más accesible que la cantidad de electricidad.

2.º *Escala de Intensidad*.—En todas las formas «superiores» de energía la escala de intensidades se ha fijado en una forma lógica, a partir de la unidad de trabajo y de la unidad de extensidad. En cambio, la temperatura no puede expresarse en unidades C. G. S. y las escalas termométricas han sido fijadas en una forma arbitraria y perfectamente irracional. En realidad, los termómetros usuales no *miden* las temperaturas sino que las *enumeran* y su utilidad se limita a per-

mitir averiguar si dos cuerpos tienen o no la misma temperatura aun cuando están distantes el uno del otro y, en el segundo caso, determinar cuál de ellos tiene la temperatura más alta; fuera de esto, el aspecto cuantitativo de sus indicaciones es pura ilusión. Aun la escala llamada «absoluta» que fija en 273,2º la temperatura de la fusión del hielo no merece el calificativo de racional por cuanto deja suponer la existencia de un cero absoluto a distancia finita.

Estas circunstancias es la única causante de la supuesta inferioridad del calor en cuanto no puede ser transformado íntegramente en otra forma de energía. En efecto, si disponemos de un litro de agua a la temperatura *absoluta* de 373º decimos que contiene una energía térmica de 373 000 cal. o sean 1 560 kilojoules. Del hecho que el teorema de Carnot nos dice que una máquina perfecta cuyo condensador tuviera una temperatura de 320º no puede extraer de ese litro sino un 14% es decir 220 Kjoules, se deduce que el calor es una forma degradada de energía.

Sin embargo, si ese mismo litro de agua se encontrara en la cumbre del Cerro Santa Lucía y se le hiciera caer a través de una turbina situada al nivel de la ciudad, a nadie se le ocurriría comparar el trabajo producido con los 700 kilogrametros de energía gravífica absoluta que representa ese litro referido al nivel del mar, y si se hiciera, se obtendría un rendimiento para la turbina «perfecta» tan malo como el anterior.

La circunstancia de que los motores eléctricos aprovechen la casi totalidad de la energía que la red pone a su disposición tampoco constituye una superioridad sobre el calor. En efecto, no se dispone de «fuentes» de energía eléctrica sino que, por medio de máquinas, se

crean diferencias de potencial que son aprovechadas en los motores. Si en lugar de disponer con facilidad de fuentes térmicas a diversas temperaturas, el hombre tuviera que crearlas a partir de otras energías naturales (p. ej. una compresora adiabática movida por un molino de viento) no se le habría presentado el calor como una energía inferior, por cuanto la energía térmica así creada puede ser convertida nuevamente en trabajo con un rendimiento análogo al que se obtiene con las energías «superiores».

Por lo tanto, el teorema de Carnot y sus consecuencias son aplicables a todas las energías sin distinción lo que, por otra parte, no debe extrañarnos puesto que Carnot lo descubrió por analogía con lo que pasa en las máquinas hidráulicas.

Escala racional de temperaturas.—Lord Kelvin, en 1854, indicó cómo el teorema de Carnot permitía establecer una escala de temperaturas absolutamente independiente de las propiedades de los diversos cuerpos. El procedimiento es, como se va a ver, enteramente análogo al que se sigue, por ejemplo en electricidad, para definir el Volt a partir del

Ampere—definido por fenómenos químicos de electrolisis—y de la unidad de trabajo.

Consideremos una serie de fuentes térmicas A, A', A''... y hagamos funcionar una máquina de Carnot entre la primera y cada una de las otras; si designamos por Q la cantidad de calor que recibe (o entrega) la máquina durante su contacto con A, las cantidades que recibirán (o entregarán) las fuentes A', A'' etc. quedan determinadas, y las relaciones

$$\frac{Q'}{Q} \quad \frac{Q''}{Q} \quad \frac{Q'''}{Q} \quad \text{etc.}$$

definen las relaciones entre las temperaturas de las fuentes A, A', A'' etc. con respecto a la de la fuente A. Se verifica, además, que el intervalo Q''|Q' así definido para las fuentes A'' y A' es independiente de la fuente A elegida como referencia.

Si, entonces, fijamos arbitrariamente en una caloría el calor intercambiado por la máquina de Carnot con una fuente cuya temperatura sea la del hielo fundente, se llega a la siguiente tabla de temperaturas:

Transformación isotérmica	Temp. Kelvin	Temp. Abs.
Fusión del hidrógeno	0.075	20.5
Fusión del mercurio	0.86	234.
Fusión del hielo	1.00	273.2
Ebullición del agua	1.37	373.2
Fusión del estaño	1.85	504
Fusión del aluminio	3.4	930
Fusión del platino	7.45	2028
Ebullición del cobre	9.48	2585
Ebullición del platino	16.3	4450
Ebullición del tungsteno	19.8	5400

Lippmann ha indicado como pueden deducirse estas temperaturas de Kelvin de las indicaciones de un termómetro cualquiera y ha demostrado que son proporcionales a las que indicaría un termómetro lleno con un gas perfecto. Se deduce de lo anterior que las indicaciones del Termómetro Normal de Hidrógeno son temperaturas absolutas mientras las propiedades del hidrógeno no difieran en forma apreciable de las de un gas perfecto; por lo tanto a temperaturas muy bajas es necesario corregir sus indicaciones.

Lo importante de esta escala racional es que define los intervalos por relaciones y no por diferencias, lo que aleja al infinito el cero: es una escala logarítmica y no aritmética. Si la temperatura de fusión del helio es de 1° absoluto, la diferencia térmica entre estas temperatura y el cero absoluto no es de un grado sino de

$$1/0 = \infty$$

Si se definieran las intensidades de todas las energías en una escala análoga se vería que el máximo de energía transformable es solamente la fracción

$$\frac{I_1 - I_2}{I_1}$$

de la energía movilizada en la fuente de mayor intensidad I_1 .

Lippmann, en 1876, ideó el siguiente dispositivo eléctrico estrictamente equivalente a una máquina de Carnot, que me va a servir de prueba a la aseveración anterior. Sean dos esferas conductoras de capacidad muy grande, cargadas a los potenciales V_1 y V_2 (con electricidad del mismo signo) y una esfera conductora *dilatada a voluntad*. Se sabe que la capacidad de una esfera es igual

a su radio en cm. en el sistema C. G. S. E. S. y que la repulsión entre las cargas de un mismo conductor originan una presión llamada electrostática p que tiende a dilatar la esfera; si llamamos q la carga y r el radio de la esfera, se tiene:

$$V = q/r \quad p = 2\pi\sigma^2 = q^2 / (8\pi r^4)$$

Se supone que, en las condiciones iniciales la esfera tiene el radio r_1 y el potencial V_1 , entonces:

1.° Se la pone en comunicación con la esfera de potencial V_1 y se la dilata—a potencial constante—hasta que su carga sea q_2 y su radio r_2 .

2.° Se interrumpe la comunicación y se sigue dilatando la esfera—a carga constante—hasta que su potencial baje a V_2 , sea r_3 el radio correspondiente.

3.° Poniéndola en comunicación con el segundo conductor se la contrae—a potencial constante, V_2 —hasta que su carga haya vuelto a ser q_1 lo que se consigue cuando el radio es r_4 .

4.° Se vuelve a aislar la esfera y se la contrae hasta que su potencial vuelva al valor V_1 , la carga es entonces q_1 y el radio r_1 y se ha vuelto a las condiciones iniciales: el ciclo es cerrado.

Durante estas evoluciones, el trabajo realizado durante una transformación infinitamente pequeña es $p dv$, en que dv es el aumento de volumen de la esfera. En efecto, para que el ciclo sea reversible, debemos suponer que, en cada momento, se equilibra la presión electrostática con una presión igual y opuesta. Se obtiene así:

$$dw = \frac{1}{2} V^2 dr = \frac{1}{2} (q/r)^2 dr$$

Por consiguiente, si se designan por W_1, W_2, W_3, W_4 los trabajos correspondientes a las operaciones enumeradas más arriba, se tiene:

$$W_1 = \frac{1}{2} V_1^2 (r_2 - r_1)$$

$$W_2 = \frac{1}{2} q_2^2 (1/r_2 - 1/r_3)$$

$$W_3 = \frac{1}{2} V_2^2 (r_4 - r_3)$$

$$W_4 = \frac{1}{2} q_1^2 (1/r_4 - 1/r_1)$$

Por otra parte se tiene las relaciones:

$$q_1 = V_1 r_1 = V_2 r_4 \quad q_2 = V_1 r_2 = V_2 r_3$$

que permiten espresar q_1 , q_2 , r_3 , r_4 en función de V_1 , V_2 , r_1 y r_2 . Se obtiene así para el trabajo correspondiente al ciclo:

$$\begin{aligned} W &= \frac{1}{2} (r_2 - r_1) (V_1^2 - V_1 V_2 - V_1 V_2 + V_2^2) \\ &= (V_1^2 - V_1 V_2) (r_2 - r_1) \end{aligned}$$

Si se observa ahora que la energía cedida por la esfera de potencial V_1 durante la primera operación es

$$V_1 (q_2 - q_1) = V_1^2 (r_2 - r_1)$$

se verifica que el trabajo efectuado es solamente la fracción

$$(V_1 - V_2)/V_1$$

de esa energía, lo que prueba que el teorema de Carnot es aplicable a los fenómenos eléctricos y a todas las transformaciones de energía.

Con lo anterior, queda claramente demostrado que, en las transformaciones reversibles, el calor es absolutamente análogo a las demás formas de energía, y se puede considerar a su factor de extensidad, la entropía, como un fluido

indestructible análogo al fluido eléctrico. Por lo tanto, así como se caracteriza un motor eléctrico por su consumo que es de tantos amperes con tal diferencia de potencial, se podría caracterizar las máquinas térmicas por el número de unidades de entropía que escurren a través de ellas en la unidad de tiempo, de cierta temperatura a otra.

Me inclino a creer que Carnot, cuando enunció su Principio, tuvo presente esta idea de la conservación de la entropía, llamada por él «calórico» y no la conservación del calor. Esta aseveración se confirma con los hechos siguientes:

1.º Si en la memoria original de Carnot se sustituye la palabra ENTROPÍA a CALÓRICO y ENERGÍA TÉRMICA a CALOR se obtiene una exposición enteramente correcta (salvo en la página 21).

2.º Se sabe que en un estudio posterior (que data de 1828 pero no fué descubierto sino en 1871 mientras que Mayer publicó su principio en 1842) Carnot enuncia en forma clara y precisa el principio de la equivalencia del calor y del trabajo. Siendo esto así, si hubiera partido de la base errada que se cree para enunciar su principio en 1824 ¿es creíble que no lo haya corregido al enunciar una proposición que destruía su base?

Siempre he juzgado muy sospechoso este ejemplo (?) dado en la clase de lógica de la posibilidad de enunciar una verdad a partir de proposiciones falsas y creo mucho más verosímil pensar que Carnot—así como Rankine y el propio Mayer—fué víctima de la falta de precisión o adaptación del lenguaje científico de su época.

FENÓMENOS IRREVERSIBLES

La definición misma de los fenómenos reversibles, según la cual se exige que las

diferencias de intensidad entre la fuente y el receptor sean constantemente infinitamente pequeñas, implica que las transformaciones de esta clase sean realizadas con una lentitud infinita.

En todo ciclo real será, por lo tanto, necesario realizar diferencias finitas entre las intensidades de la fuente y del receptor lo que dará origen a una pérdida de energía útil independiente de la mayor o menor perfección del aparato transformador; por esta razón, designaré estas pérdidas con el calificativo de *externas* para diferenciarlas de las *pérdidas internas* atribuibles a las imperfecciones del cuerpo que evoluciona y del receptor mismo.

Las pérdidas internas son debidas a frotamientos y escapes de extensidad y se reducen cuando aumenta la perfección de la máquina mientras que las pérdidas externas no pueden disminuirse sino por medio de una reducción de la potencia unitaria de la máquina; en otras palabras, una máquina de potencia finita necesita ser infinitamente grande para poder transformar energía sin pérdidas externas. Así por ejemplo, en una turbina hidráulica, estas pérdidas externas se originan a la entrada de la cañería forzada o al entrar en el distribuidor y, sobre todo, por la velocidad que el agua conserva al salir por el canal de descarga. Para anular estas pérdidas sería preciso reducir a cero la velocidad de salida lo que obligaría a aumentar indefinidamente las secciones de escurrimiento para mantener un gasto hidráulico finito.

Estas pérdidas, causa de la irreversibilidad de los fenómenos naturales, son evidentemente comunes a todas las energías, pero vamos a ver ahora que ellas, especialmente las externas, tienen consecuencias diferentes cuando se producen con energía térmica. Antes de

seguir adelante vamos a recordar que, al empezar a hablar de los fenómenos reversibles se dijo que se tenía, para todas las formas de energía:

$$dW = I \, dE$$

expresión en que E y I son respectivamente los factores de extensidad y de intensidad de la energía considerada. Es preciso advertir que esta generalidad de la expresión de la diferencial del trabajo no implica una relación común para todas las formas de energía entre las variables W , I y E . Supondremos, en general, que

$$W = f(I, E)$$

en que $f()$ es una función característica de la energía considerada, y que depende de la relación que liga entre sí las variables E y I en una transformación reversible. Por ejemplo, se tiene

Energía gravítica: $W = EI$

Energía electrostática: $W = \frac{1}{2} EI$

Calor (calor esp. constante): $W = cT$
 $E = c \log T$.

Consideremos, ahora, dos fuentes de energía cuyas intensidades sean I_1 e I_2 , respectivamente, aislemos una cantidad W_1 de energía de la fuente de mayor intensidad y pongámosla en contacto con la otra fuente sin interponer una «máquina» transformadora.

Si la energía W_1 , es de una forma superior se observa que la extensidad E_1 de W_1 se conserva y que, por lo tanto, la energía de esta forma que queda después que se ha producido la igualación de intensidad es

$$W_1 = f(E_1, I_2) < W_1$$

en cambio, se observa la aparición de otras formas de energía que compensan exactamente la disminución, es decir:

$$W_1 = W_2 + P$$

Es preciso tener presente que esta ecuación se escribe en virtud del principio de la conservación de la energía pues es imposible verificarla experimentalmente con exactitud, salvo casos especiales muy sencillos. Por ejemplo, si se descarga una esfera cargada de electricidad a través de un conductor que la ponga en contacto con el suelo, si se toman las precauciones necesarias, se podrá conseguir que casi toda la energía electro estática aparezca en forma de calor; en cambio, si esta descarga se hace por intermedio de una chispa, aparecerán, además de calor, ondas electromagnéticas de todas frecuencias, ruido, evaporación y proyección del metal de los electrodos, etc. que harán ilusoria toda verificación de equivalencia.

En cambio, si W_1 es energía térmica cuya temperatura disminuye por conducción, no se observa la aparición de ninguna otra forma de energía; por lo tanto, o se supone que el calor se conserva en los fenómenos de conducción, o se hace necesario admitir que una parte del calor desaparece para tomar una forma latente. La primera hipótesis es la universalmente adoptada, su consecuencia es

$$W_1 = W_2 = f(E_1, I_1) = f(E_2, I_2)$$

Como $f()$ es una función que crece con ambas variables, la condición $I_1 > I_2$ implica $E_2 > E_1$, por consiguiente, el factor de extensidad de la energía térmica *no es una cantidad conservativa* cuando intervienen fenómenos de conducción, esto es, di-

ferencias de temperaturas entre los cuerpos en contacto o entre las diversas partes de un mismo cuerpo. Más aun, la entropía deja de representar al factor de extensidad de un cuerpo si este ha sufrido alguna transformación irreversible y el valor de este factor, para un estado determinado, depende de las transformaciones mediante las cuales el cuerpo ha llegado al estado considerado.

Se hace, por lo tanto, absolutamente imposible utilizar a este factor de extensidad en los razonamientos sobre energía térmica, y esta circunstancia y no el Principio de Carnot, es la que separa al Calor de las otras formas de energía.

Para salvar esta dificultad y mantener la semejanza se puede—como lo ha hecho L. Selme—rechazar el principio de la conservación del calor en los fenómenos de conducción y mantener el de la conservación de la Entropía; en una segunda parte de este trabajo me propongo estudiar las consecuencias y hacer la crítica de esta hipótesis revolucionaria.

Para terminar diré que no creo que tenga probabilidad alguna de renovar a la termodinámica clásica; en efecto, ésta mediante la introducción de la Mecánica estadística reduce el principio de Carnot—Clausius y el concepto de entropía a cuestiones de probabilidades. Según estos nuevos conceptos, la entropía es proporcional al logaritmo de la probabilidad de la configuración más probable del sistema, compatible con las condiciones impuestas. Esto, además de dar una interpretación física de la entropía, tiene la ventaja de extender este concepto a las configuraciones imposibles de obtener por procesos reversibles cuya entropía no puede determinarse según la teoría clásica.

Las interpretaciones estadísticas permiten, también, entender por qué el Principio de Carnot que no sufre excepciones a nuestra escala, deja de ser aplicable a la escala molecular y no tendría significado alguno para seres cuyas dimensiones fueran comparables con las de las moléculas, los demonios de Maxwell, por ejemplo. También permiten desvirtuar las conclusiones de Clausius sobre la muerte térmica del Universo por aumento indefinido de la entropía, las que habían llegado a ser una grave objeción a la termodinámica clásica.

A pesar de que, a nuestros ojos, la densidad de un gas es perfectamente uniforme en todos sus puntos, se comprende que la agitación de las moléculas sea causa de que en un instante dado éstas sean más numerosas en una parte que en otra; en otras palabras, se producen fluctuaciones alrededor de la densidad media. El teorema de Bernoulli sobre los números muy grandes demuestra la probabilidad de una fluctuación relativa dada decrece muy rápidamente con el número de moléculas consideradas. Por esta razón un ser de dimensiones muy pequeñas con respecto a nosotros vería constantemente que trozos de materia son levantados en contra de la gravedad por la agitación Browniana; en cambio, el cálculo de probabilidades indica que para tener una probabilidad sobre dos para ver levantarse un ladrillo por efecto del movimiento de Brown sería preciso esperar un número de años que consta de más de 1000 millones de cifras!

Consideremos, ahora, un «modelo» del universo a una escala tan reducida que los astros queden representados por partículas de dimensiones comparables con las moléculas de «nuestros» cuerpos. Si consideramos este sistema, podemos aplicarle los principios de la termodinámica clásica y, si llega al estado de equilibrio termodinámico, nos parecerá que, efectivamente, ha alcanzado el estado de «Wärmetod» de Clausius.

Pero, a la escala microscópica, un sistema no puede mantener sino por un instante su estado de probabilidad máxima (equilibrio), es decir, de entropía máxima: esta tiene que sufrir fluctuaciones. Ahora bien, para seres reducidos en las proporciones supuestas para la realización del modelo de Universo considerado, estas fluctuaciones de la entropía serían enormes y, cualquiera que sea el sentido de estas variaciones que, para ellos serían sumamente lentas, existirá para ellos posibilidad de realizar trabajo mecánico.

Nuestra situación con respecto al universo es igual a la de estos seres infinitamente pequeños con respecto al modelo anterior. La teoría estadística no sólo permite la realización de fluctuaciones sino que exige la producción de una fluctuación cualquiera *por grande que sea, siempre que se disponga de un plazo suficientemente largo*. Para verlo basta con observar que la probabilidad de esta fluctuación es sumamente pequeña pero no nula.

Valdivia, Agosto de 1928.