



# Reflexiones en torno a la enseñanza de la Termodinámica

Luis Brahim N.<sup>1</sup> y Juan Espinoza G.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>luis.brahim@umce.cl - <sup>2</sup>juan.espinoza@umce.cl

Departamento de Física

Universidad Metropolitana de Ciencias de la Educación

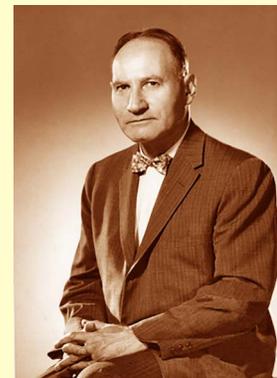
---

*Este artículo fue escrito a principios de la década de los 90, bajo el marco de un proyecto de investigación realizado por los autores, después de una exhaustiva revisión de la literatura de este tema hasta esa época. Se revisaron las controversias conceptuales respecto a la presentación de la Termodinámica y su enseñanza, las conclusiones de esa investigación se presentan en este artículo. ¿Cómo se enseña actualmente la Termodinámica a nivel universitario y de secundaria? ¿Qué debates se han originado en las revistas de Física respecto a la enseñanza de la Termodinámica desde esa fecha? ¿Cómo se presentan los principales conceptos de la Termodinámica en los textos de Física para universitarios y secundaria actualmente? Sería muy productivo para todos los profesores que quienes estén enseñando Termodinámica actualmente pudieran hacernos llegar sus reflexiones acerca de su enseñanza y que se puede abrir un debate al respecto.*

De acuerdo con la experiencia docente de los autores de este artículo, la Termodinámica es, quizás, uno de los campos de la Física que más sufre de errores de presentación, transformándola en poco atractiva para profesores y alumnos. En este artículo se sugieren algunas estrategias metodológicas para un primer curso de Termodinámica, sin pretender en lo absoluto agotar el tema, y reconociendo la existencia de una diversidad de enfoques.

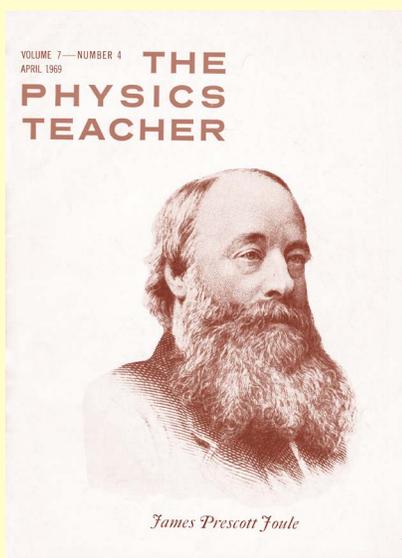
## I. INTRODUCCION

Los autores del presente artículo han tenido la oportunidad de constatar, a lo largo de su experiencia docente en el tema de la Termodinámica, un grave problema que dice relación tanto con la estructura formal de sus contenidos, como con la metodología de enseñanza de los mismos. A modo de ilustración de lo expresado, se puede señalar que los autores M. Zemansky (1) y E. A. Guggenheim (2), argumentan en el sentido de lo erróneo que resulta para una clara comprensión de

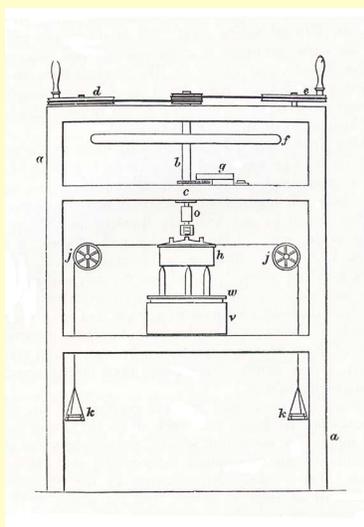


M. Zemansky

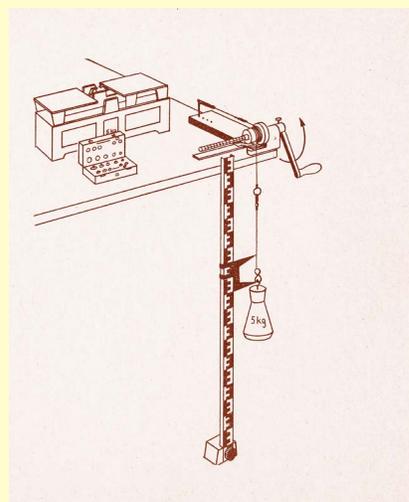
la teoría, el hecho de presentar todavía la "caloría" y el "equivalente mecánico del calor", lo que se justificó, tal vez, en tiempos pasados, pero no hoy, pues el desarrollo posterior de la ciencia ha demostrado que no se justifica. En cambio, otros textos de uso masivo internacionalmente, incluso en sus ediciones más recientes (3), siguen prestando atención a estos temas, lo que repercute negativamente en el claro formalismo de la teoría, haciendo de la Termodinámica una asignatura poco atractiva para los alumnos. La siguiente cita es elocuente: "No recuerdo haber vendido jamás un libro, pero una vez quemé uno. Era un texto de Termodinámica" (4). Incluso los catálogos de empresas que se dedican a la fabricación de equipos de laboratorio para la docencia, siguen ofreciendo aparatos para la realización del experimento "equivalente mecánico del calor" (5) – (8). Esta es solo una muestra de las consecuencias perjudiciales que acarrea la situación descrita.



Portada de abril de 1969.



Esquema de uno de los primeros aparatos de Joule para sus experimentos.



Aparato para el "equivalente mecánico del calor" de una empresa de equipamiento para la enseñanza de la Física.

---

El problema anterior se origina no solo por las confusiones que se derivan de los conceptos citados, sino de muchos otros que son también presentados en forma confusa, incompleta o desubicada, como por ejemplo temperatura, proceso cuasi-estático, energía, calor, entropía.

El hecho de desarrollar en forma no suficientemente satisfactoria y consistente los conceptos citados, daña no solo la correcta comprensión de una parte de la Física, cual es la Termodinámica, sino que también repercute, lamentablemente, en gran parte de la ciencia y sus aplicaciones tecnológicas. En efecto, como lo afirma H.G. Jones (9): "Si se encontrara que los principios no son válidos, toda la física (y sin duda todas las otras ciencias e ingeniería) tendría que reformularse; la revolución en la física originada por la teoría cuántica parecería comparativamente pequeña!". Como ilustración de la trascendencia de los conceptos de la Termodinámica, basta citar el de energía, el que ha pasado a ocupar primera prioridad en las políticas de los países preocupados por la crisis energética. El concepto de entropía es, quizás el que resulta ser el más enigmático, debido a la manera confusa y superficial como se lo presenta en muchos textos. La entropía, correctamente presentada, "... ofrece un medio de percibir la unidad de la física. Es un denominador común en la evolución de todos los procesos físicos, y así sirve como un rasgo unificador fundamental." (10)

Dedicarse a la docencia científica no significa, por cierto, traspasar a los alumnos información suelta e incoherente; muy por el contrario, el propio alumno debe empaparse del significado de una teoría científica, percibirla como un cuerpo racional, ordenado, e integrado por definiciones, conceptos, teoremas, leyes, propiedades, aplicaciones, campo de validez, etc.

Todas las reflexiones expuestas en este artículo persiguen como objetivo final, purificar la enseñanza de una asignatura que adolece de múltiples problemas de presentación tanto por el alto grado de abstracción de muchos de sus conceptos, como de errores de interpretación de los mismos, que aparece en los textos usados para su enseñanza. (11)

## **II. UNA RESEÑA DE TERMODINAMICA BASICA**

### **A. Lo que distingue a la Termodinámica.**

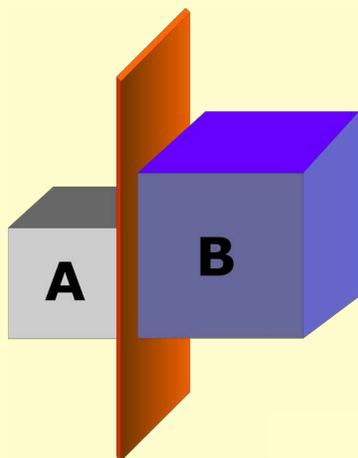
El primer punto que merece comentarse en un intento de clarificar la estructura de la Termodinámica, es acerca de los rasgos distintivos que la diferencian de otras ramas de la Física. La Termodinámica, a diferencia de la Mecánica Estadística, no se pronuncia acerca de la estructura íntima de la materia ni es su intención averiguarlo; en cambio, la Mecánica Estadística postula uno u otro modelo de la estructura de la materia, según si es clásica o cuántica, y sobre esta base construye teorías de las cuales intenta deducir e interpretar las leyes que por vía experimental conoce la Termodinámica, entre otro de sus objetivos. La Termodinámica utiliza, entre otras magnitudes, la presión para describir el estado de un fluido, y su definición es, como es sabido, fuerza normal a una superficie por unidad de área; escapa del marco de la Termodinámica estudiar o formular hipótesis acerca del origen de esta fuerza. Dicho en forma muy breve, la Termodinámica intenta describir desde un punto de vista macroscópico cualquier sistema y los cambios que en él se producen cuando interactúa con el medio exterior.

Sin pretender defender dogmáticamente la Termodinámica, cierto rasgo particular la hace segura y confiable en sus conclusiones: ella opera con leyes que han sido inferidas a partir de experimentos, y no deducidas de ecuaciones o teorías más generales.

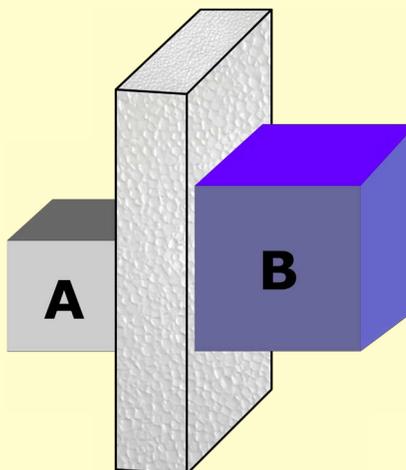
## B. Temperatura

La temperatura es una de las magnitudes que escapa del dominio exclusivo de la Física, ya que se mide en los diferentes campos de las ciencias naturales y de la técnica. Ya sea por dar excesiva importancia a las escalas históricas de temperatura, o por presentaciones axiomáticas de la Termodinámica, cuando falta un primer curso básico fenomenológico, sucede a veces que si bien el alumno maneja las ecuaciones en las que interviene la temperatura, se echa de menos una comprensión clara de su interpretación.

Reconociendo que se trata de un concepto complejo, ¿cómo iniciar su presentación? Quizás lo recomendable es recurrir a sensaciones fisiológicas familiares al alumno, como aquella que permite afirmar "Este cuerpo está más caliente que aquél". Partiendo con estas nociones intuitivas básicas, el desarrollo lógico prosigue con las denominadas escalas empíricas (por ejemplo, gas a volumen constante, gas a presión constante, etc.), la escala termodinámica (cuya unidad es el Kelvin) y la Escala Internacional Práctica de Temperatura. Todas estas escalas cuantitativas se fundamentan en el Principio Cero.



Sistema A y B separados por una pared diatérmica (metálica).

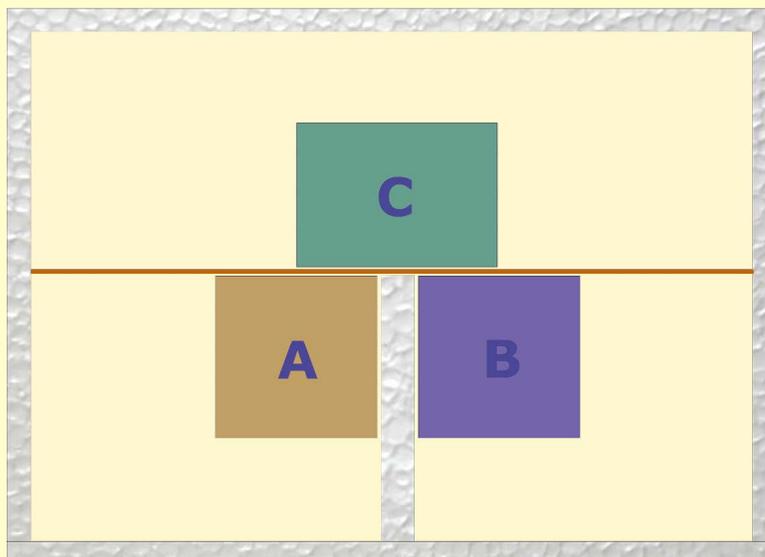


Sistema A y B separados por una pared adiabática (poliestireno).

La percepción sensorial es el instrumento que permite, en una primera etapa, distinguir "estados térmicos", y asignar adjetivos a los sistemas tales como "frio", "tibio", "caliente", "muy caliente", etc. A cada estado térmico se le asocia un adjetivo diferente, dentro del límite que impone la seguridad y sensibilidad propias del sentido térmico. Si bien esta escala natural carece de mayor interés termométrico, proporciona una base intuitiva, indispensable en un primer curso sobre el tema, a importantes conceptos tales como "estado térmico", "equilibrio térmico", "paredes diatérmica y adiabática", "contacto térmico".

### Principio Cero de la Termodinámica:

**Dos sistemas en equilibrio térmico con un tercero, están en equilibrio térmico entre sí.**



La temperatura es una magnitud que se asocia a un estado térmico; no confundir con el valor numérico de la temperatura, el que depende del termómetro y escala utilizados. Un sistema dado puede tener diferentes valores numéricos de temperatura, aun cuando su estado térmico sea el mismo. A diferencia de las escalas empíricas, la escala termodinámica asocia un y sólo un valor de temperatura a cada estado térmico.

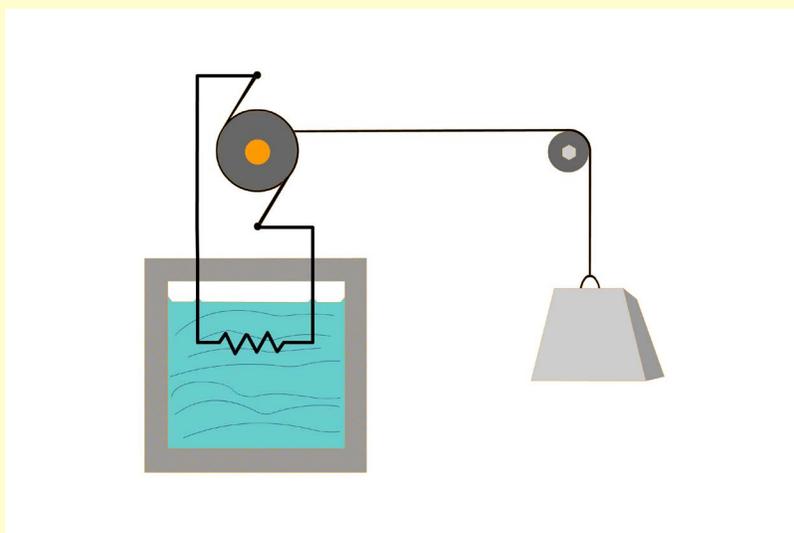
Considerando las complejas dificultades experimentales que se presentan en la termometría de gases ideales, la Conferencia General de Pesas y Medidas ha adoptado un sistema de medida de la temperatura termodinámica que evita los gases ideales. Concretamente, proporciona normas, ecuaciones y temperaturas de puntos fijos, con el fin de calibrar y verificar instrumentos seleccionados que permitan medir temperaturas tan próximas como sea posible a la temperatura termodinámica.

A todo esto, ¿qué interpretación tiene la temperatura, medida en cualquiera de las escalas citadas? Las temperaturas medidas con un mismo instrumento y escala permiten predecir si se conservarán o no los respectivos estados de equilibrio térmico de dos o más sistemas, al establecer una interacción térmica entre ellos.

### C. Primer Principio

En el primer Principio se encuentra el concepto que ha sufrido, quizás, el mayor número de interpretaciones erradas: calor. Incluso al presentarlo en forma depurada y moderna en un curso de Termodinámica, tarde o temprano los alumnos vuelven a caer en las confusiones clásicas. ¿Por qué sucede esto? El lenguaje ordinario de la vida diaria tiende a enfatizar la antigua concepción, la que tiene su origen en la época del calórico. Para agravar más la situación, algunos textos, con el propósito de aclarar o interpretar el concepto calor, acuden a una explicación a nivel molecular; pero aquí, otras consideraciones se deben tener presentes. (12), (13)

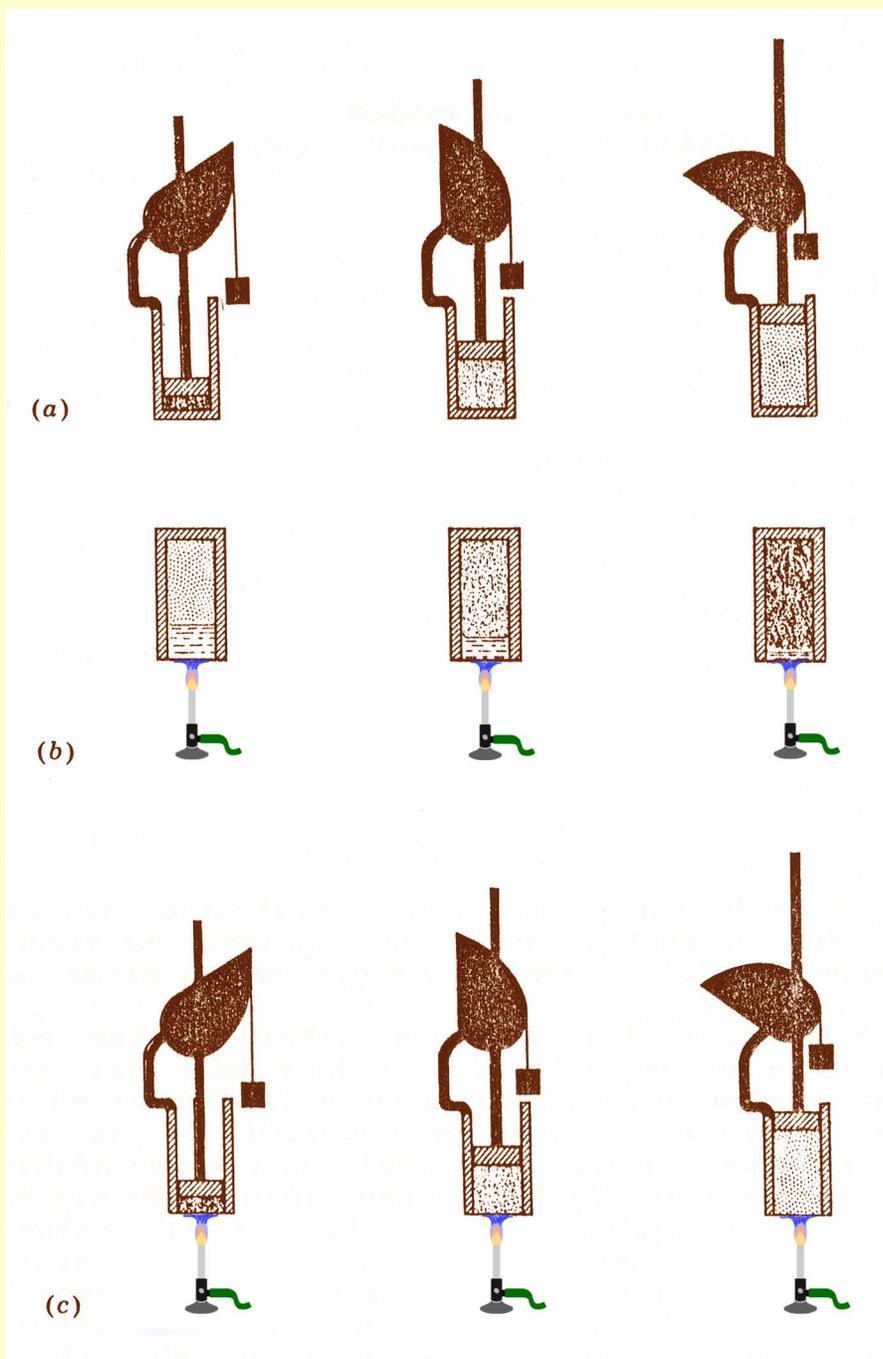
El calor no es una función matemática de las coordenadas termodinámicas de un sistema, ni menos una sustancia contenida en el mismo. Carece de todo significado pretender medir la cantidad de calor que tiene un cuerpo, noción a la que se llega influenciado también por expresiones tales como calor fluye de un cuerpo a otro o capacidad calórica. ¿Cuándo tiene sentido utilizar la palabra calor? Sólo cuando los sistemas interactúan térmicamente, es decir, cuando existe una diferencia de temperatura entre ellos. Notar que temperatura se ha definido más arriba sin recurrir al concepto calor. Habitualmente se impone la condición de que los cuerpos estén en contacto para que intervenga el calor, en circunstancia que también existe la interacción térmica a distancia, por radiación. Una vez que los sistemas alcanzan el equilibrio térmico entre sí, termina la interacción térmica y ya no se puede hablar de calor. Por razones históricas, se dice que "pasa" calor desde un sistema a otro. Calor es el nombre del proceso natural que tiende a uniformar la temperatura de los sistemas; el calor no está asociado a estados de equilibrio de los cuerpos. (14), (15)



Un generador hace circular una corriente eléctrica por la resistencia, al caer una pesa.

¿Qué sucede si se considera al agua como sistema?

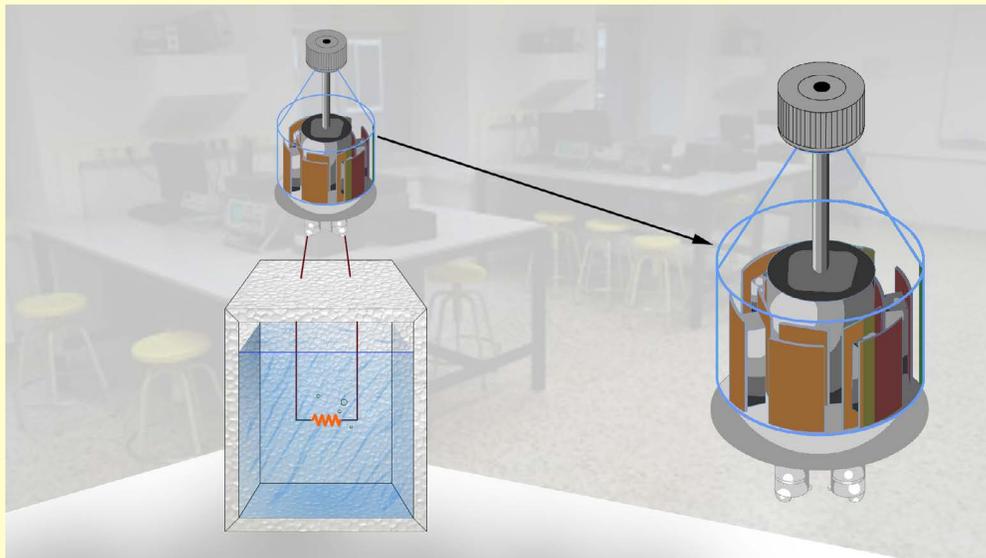
¿Qué sucede si el sistema es la resistencia y el agua?



Distinción entre trabajo y calor. a) Trabajo adiabático,  $\Delta U = - W$  ; b) Calor sin trabajo,  $\Delta U = Q$  ; c) Trabajo y calor,  $\Delta U = Q - W$ .

La energía interna de un sistema, es decir, aquella asociada a sus átomos y moléculas, y medida respecto al centro de masa del sistema, puede variar como consecuencia de la interacción con el medio exterior. (16) La palabra calor significa únicamente que el cambio de energía interna se debe a un proceso que no corresponde al de trabajo, sino que a uno provocado por una diferencia de temperatura.

La caloría se introdujo como unidad de calor cuando se ignoraba la relación entre energía, trabajo y calor, en circunstancia que el Primer Principio muestra que el calor es energía también, por lo que su unidad debe ser la misma que se emplea para la energía. La caloría era la cantidad de calor necesario para que un gramo de agua aumentase su temperatura de 14,5 a 15,5 °C. Ahora bien, los experimentos de Joule mostraron que el trabajo adiabático necesario para producir la misma variación de temperatura en un gramo de agua era independiente del proceso o mecanismo empleado para tal fin; la formulación del Primer Principio está basada justamente en estos experimentos. Pero como éstos fueron previos a esa formulación, Joule los describió como "determinación del equivalente mecánico del calor", frase sin significado a la luz del Primer Principio. Lo que Joule denominó de esa forma, fue la determinación experimental del calor específico del agua en unidades de energía. (17) , (18)



Una dínamo de bicicleta que gira hace circular una corriente eléctrica por la resistencia sumergida en agua, rodeada por paredes adiabáticas. ¿Qué sucede al considerar como sistema el agua o al agua más la resistencia eléctrica?

[Ver animación](#)

## **D. Entropía**

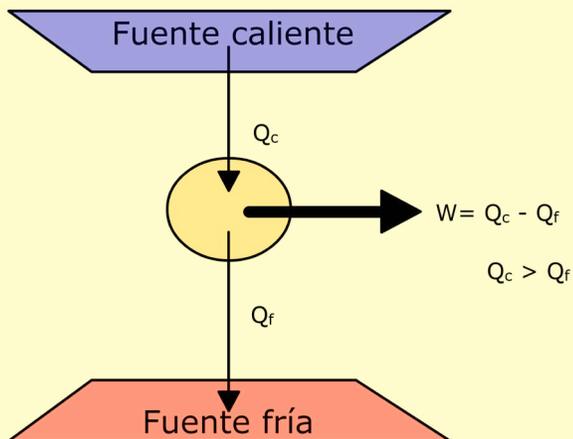
Una atmosfera de misterio envuelve el concepto de entropía; son muchas las preguntas que formula el estudiante, son muchas las inquietudes que provoca su presentación. ¿Por qué sucede esto? Entre otras razones, el desarrollo y comprensión de ella requiere pasar necesariamente por otros conceptos previos, como por ejemplo proceso reversible, calor, temperatura, etc., los que a su vez derivan de las primeras nociones que se trabajan en un curso de Termodinámica. Esta cadena de ideas de complejidad creciente, todas de naturaleza abstracta dado el carácter de la teoría, van entretejiendo una especie de red que envuelve al concepto de entropía, dificultando al estudiante su interpretación. La única sugerencia que se podría dar para obtener una visión plena del concepto, es retardar su desarrollo hasta asegurarse de que las ideas previas han sido decantadas y asimiladas adecuadamente. Para enfrentar situaciones complejas de aprendizaje, como las que se mencionan aquí, vale la pena recordar los aspectos positivos de los sistemas de enseñanza personalizada.

Una vez superada la etapa previa de aprendizaje, debe esperarse que el alumno capte el concepto entropía, relacionándolo con una función matemática que establece el sentido de evolución de un proceso real, llenando el vacío dejado por el Primer Principio. Si bien muchos procesos potenciales satisfacen el Primer Principio, no ocurren en la naturaleza.

Por otra parte, ¿es oportuno metodológicamente pretender "aclarar" el significado de la entropía acudiendo a la Mecánica Estadística, como lo hacen habitualmente muchos textos? Comúnmente al hacer esto se llega a asociar la entropía al desorden, conduciendo a un oscurecimiento aún mayor del concepto, pues no es la idea corriente de desorden la que corresponde aplicar aquí. (19), (20)

En cuanto a la manera de presentar el Segundo Principio en un primer curso de Termodinámica o en un contexto de Física General, puede ser suficiente elegir el camino histórico tradicional ligado a motores, dejando el método alternativo basado en el trabajo de Caratheodory, y depurado por Landsberg (21), Turner (22), Zemansky (23), entre otros, para un curso más especializado. El texto de M. Zemansky ofrece ambos métodos: hasta la cuarta edición presenta el método ingenieril, pero a partir de la quinta prefiere el método analítico.

## Esquemas simbólicos



### Máquina térmica

$W = Q_c - Q_f$        $Q_c > Q_f$   
Definición de rendimiento térmico:

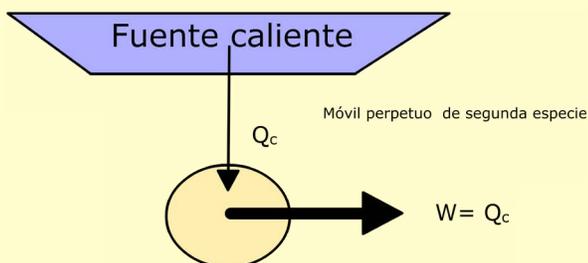
$$\eta = \frac{W}{Q_c}$$

Luego  $\Delta U = 0$  en un ciclo completo, y queda

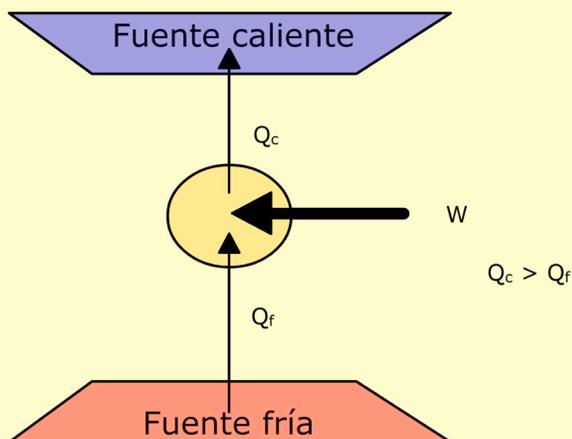
$$\eta = 1 - \frac{Q_f}{Q_c}$$

¿Es posible diseñar una máquina térmica con un rendimiento igual al 100%?

Tal máquina realizaría un trabajo igual a la energía absorbida desde la fuente caliente.



### Móvil perpetuo de segunda especie



### Refrigerador

Como el refrigerador opera en ciclos,  $\Delta U = 0$ , lo que implica  $Q_c = Q_f + W$ , de acuerdo al Primer Principio.

Tanto más eficiente es un refrigerador cuanto mayor es la energía  $Q_f$  absorbida y menor el trabajo gastado en accionarla.

Definición de eficiencia:

$$\omega = \frac{Q_f}{W}$$

## Referencias

- (1) M. Zemansky, Heat and Thermodynamics ( Mc Graw-Hill, New York, 1968), 5th ed., pp. 86-87.
- (2) E. A. Guggenheim, Thermodynamics (North – Holland Publishing Co., Amsterdam, 1967), 5th ed., p. 86.
- (3) D. Halliday and R. Resnick, Physics (John Wiley & Sons, New York, 1978), Combined 3rd ed., pp. 482 – 483.
- (4) M. L. McGlashan, J. Chem. Educ. 43, 226 (1966).
- (5) Leybold – Heraus GMBH: Equipment for Scientific and Technical Education, 520.30.2, p. 3/31.
- (6) Phywe: University Laboratory Experiments, Physics Volume 2, p.73.
- (7) Sargent – Welch Scientific Company, Catalog 1984 – 85, pp. 593 – 594.
- (8) Griffin, Catalogue 84, p. 440.
- (9) H. G. Jones, Phys. Educ. 19, 15 (1984).
- (10) K. Andrew, Am. J. Phys. 52, 492 (1984).
- (11) "Teaching thermal physics/ Is as easy as a song:/ You think you make it simpler/ When you make it slightly wrong!/" M. Zemansky, Phys. Teach. 8, 295 (1970).
- (12) Ibid. ref. 11.
- (13) J. W. Warren, Phys. Educ. 11, 388 (1976).
- (14) Ibid. ref. 11.
- (15) Ibid. ref. 13.
- (16) Es necesario especificar que la energía interna del sistema está medida respecto a su centro de masa, cuando se formula el Primer Principio como  $\Delta U = Q - W$ .
- (17) Ibid. ref. 1.
- (18) Ibid. ref. 2.
- (19) Ibid. ref. 4.
- (20) W. Brostow, Science 178, 123 (1972).
- (21) P. T. Landsberg, Nature 201, 485 (1964)
- (22) L. A. Turner, Am. J. Phys. 28, 781 (1960).
- (23) M. W. Zemansky, Am. J. Phys. 34, 914 (1966).