

Termodinámica y epistemología

M.A. MARTÍNEZ NEGRETE

*Departamento de Física, Facultad de Ciencias
Universidad Nacional Autónoma de México
04510 México, D.F., México*

Recibido el 13 de noviembre de 1995; aceptado el 15 de enero de 1996

RESUMEN. Se describe la organización de la exposición de un curso de termodinámica en el nivel de licenciatura desde una perspectiva epistemológica. Cada uno de los axiomas o postulados de la termodinámica son expuestos para demostrar la existencia de variables de estado, que representan propiedades objetivas de un sistema termodinámico cualquiera. Se muestra así que son propiedades intrínsecas de un sistema (que no dependen del sujeto ni de sus instrumentos de medición) la temperatura, la energía interna y la entropía. A partir de estas variables se objetivan otras derivadas, como la función de Gibbs y, por tanto, las constantes de reacción en la química.

ABSTRACT. It is described the organization of an undergraduate course on thermodynamics according with an epistemological perspective. Each one of the axioms or postulates of thermodynamics are explained to show the existence of state variables as objective properties of any system. This way arises as intrinsic properties of any system (non depending on individuals nor on measuring instruments) their temperature, internal energy and entropy. From these variables another derived variables result intrinsic, like the Gibbs' function and the related constants of reaction in chemistry.

PACS: 01.40.Gm 01.70.+w 05.70.-a

1. INTRODUCCIÓN

La exposición de un curso de termodinámica puede desarrollarse de varias maneras, según el enfoque. En un planteamiento histórico se puede enfatizar la aparición de los conceptos (temperatura, energía, entropía, calores específicos, constantes de reacción, etc.) como surgieron asociados, sobre todo, al desarrollo de los motores térmicos, la climatología y las reacciones químicas. En un enfoque axiomático se hace abstracción de todo aspecto de la disciplina, para centrarla en ella misma; los conceptos básicos, los axiomas que los relacionan y las leyes que de ellos se deducen se presentan formalmente haciendo caso omiso de su génesis.

En la perspectiva epistemológica que aquí se describe, los axiomas o postulados se utilizan para deducir formalmente de ellos la existencia de las variables termodinámicas básicas, que son propiedades intrínsecas de los sistemas. Así, del axioma cero o de transitividad se deduce matemáticamente que la temperatura (T) es una propiedad objetiva del sistema físico y que, por tanto, no depende del sujeto ni de sus instrumentos de medición. De los axiomas primero y segundo se deduce la existencia de la energía interna (U) y la entropía (S), como propiedades propias de los sistemas termodinámicos, y se detecta también la objetividad del cero u origen de la temperatura. El tercer axioma culmina la

deducción objetiva de S y U , al precisar el carácter “universal”, “absoluto” u objetivo del cero en la escala de medición de cada una de estas variables.

El planteamiento epistemológico de la termodinámica puede hacerse en el nivel medio superior, pues las matemáticas más elevadas que se requieren son el cálculo. Y, si se trata de exhibir la relación entre la física y otras disciplinas, la conexión con la filosofía queda así manifiesta.

2. EL PRINCIPIO DE OBJETIVIDAD (PO)

Cualquier teoría física debe referirse a los objetos físicos, pero no a los sujetos que los piensan ni a los aparatos de medición que los detectan, ni tampoco debe referirse a la interacción entre el sujeto y los objetos de estudio (Ref. [9], pág. 85). El contenido de esta afirmación es lo que podría llamarse el principio de objetividad, el cual es un elemento básico de la ciencia caracterizada como “occidental”.

Por “objeto” (O) se entiende, en primera instancia, lo que no es el sujeto (S) que investiga. Se trata de una porción aislada, con fronteras definidas por el tipo de interacciones energéticas o de otro tipo, que O mantiene con otros objetos o con el resto del universo. O es lo que comúnmente se llama el “sistema físico” de estudio.

Parte de las discusiones sobre el PO radican en la definición de S y de O . En algunas teorías físicas, como la mecánica cuántica, unos autores dejan fuera de S a los aparatos de detección y medición de O (para decir, por ejemplo en la escuela de Copenhague, que el electrón es una onda si se lo observa a través de un cristal, o una partícula si se lo detecta en una pantalla fluorescente); otros investigadores mantienen que la teoría se refiere nada más a un O que no incluye a los aparatos de observación (por ejemplo la escuela estadística realista, según la cual el electrón siempre es una partícula, pase a través de un cristal o interfiera con una pantalla fluorescente). La primera versión conduce a la suposición de que un electrón puede deslocalizarse al pasar por el cristal, interactuando después consigo mismo en la pantalla detectora, para dar el conocido patrón de interferencia. Por lo contrario, la segunda versión indica que el electrón mantiene su identidad en todo el camino que lo lleva hasta la pantalla; la interferencia se produce porque cada electrón, o un conjunto estadístico de ellos, obedecen en su movimiento a una ecuación de onda. Adicionalmente, en la primera versión se presenta el problema un tanto cuanto “misterioso” del “colapso de la función de onda ψ ” (y aun del electrón mismo, si se acepta que ψ lo representa), pues la partícula extendida como una onda en el cristal, debe después colapsarse en un punto de la pantalla fluorescente. Este problema “misterioso” no existe obviamente en la segunda versión de la mecánica cuántica.

En la mecánica clásica, paradigma de la ciencia “occidental” que se permea hasta otras ciencias (como la economía), S contiene a los aparatos de medición. Situación contraria debe considerarse en la sociología. En la termodinámica, como veremos en breve, S puede interpretarse como compuesto por el sujeto y sus aparatos experimentales.

Las consecuencias matemáticas de los axiomas son las leyes particulares de la teoría física que, a su vez (y éste es otro supuesto básico), tienen un contenido objetivo (derivado de la objetividad de los axiomas). Es decir, se asume que la manipulación matemática de los axiomas tiene un correlato ontológico, de tal manera que las consecuencias deben

referirse a O y su comportamiento experimental. Este notable hecho está detrás de las razones que llevaron a Max Planck a dedicarse a la ciencia (Ref. [8]).

Los axiomas juegan el papel principal en una teoría, para que ésta cumpla con el PO. Aspectos importantes a resaltar de los axiomas son:

1. Su objetividad no es derivada, como la de las leyes, sino que se “decreta” por un S (que puede ser un ente individual o social) en un enunciado que es postulador sobre O . Por eso a los axiomas a veces se les llama “postulados”. Como es S el que predica algo absoluto sobre O , queda claro que los axiomas dependen de S (lo cual explica su diversidad en el tiempo histórico).

2. La objetividad de los axiomas se juzga mediante la confrontación entre las leyes derivadas y la formalización de los resultados experimentales. La falta de acuerdo entre ambos no necesariamente conduce al reemplazo de los axiomas (Ref. [5]), pero es un problema que con el paso del tiempo constituye un criterio inevitable en la reformulación de una teoría física.

Cuando las leyes derivadas de los axiomas conducen a resultados comprobables objetivamente, se dice que la teoría “predice” nuevos hechos experimentales o el comportamiento de la naturaleza.

3. Consecuencias especiales del poder predictivo de los axiomas son la existencia de variables de estado, distintivas de la teoría física en consideración. Para la termodinámica ellas son T , U y S .

4. Como consecuencia de la interrelación entre S y O se va modificando la definición de O . (Un ejemplo interesante ocurre cuando, por violación del axioma cero de la termodinámica, el S tiene que redefinir la noción de “pared diatérmica”, para tomar en cuenta otras formas de interacción no consideradas originalmente (Ref. [10])).

3. AXIOMAS Y VARIABLES DE ESTADO EN TERMODINÁMICA

3.1. El axioma cero o de transitividad

En la Ref. [1], por ejemplo, se formula el axioma cero (A_0) como sigue: “dos sistemas en equilibrio diatérmico con un tercero están en equilibrio diatérmico entre sí”. Se sobrentiende que la transitividad de la relación “equilibrio diatérmico con” se postula como válida para todo individuo, instrumentos de medición y cualesquiera tres sistemas físicos.

De A_0 se deduce en la Ref. [1] (págs. 6–8), la existencia de la temperatura como propiedad intrínseca (léase “objetiva”) de los sistemas en equilibrio. Como ni el individuo ni los aparatos de medición aparecen en la deducción de la existencia de T , queda implícita la objetividad de T frente a un S que incluye sus instrumentos de medición.

En la Ref. [2] (pág. 11), se demuestra también de A_0 que la forma de las isothermas (esencialmente la ecuación de estado, en caso de expresión analítica) de un sistema físico cualquiera no dependen del sistema estándar (termómetro) empleado para determinarlas ni, por supuesto, del individuo que realiza las mediciones. Se trata del mismo S que en el párrafo anterior.

Esta apreciación de S permite la comprensión coherente del conocido hecho (Ref. [1], pág. 18), de que los termómetros de gas dan lecturas diferentes para la T de un sistema,

en tanto que los valores medidos convergen a uno solo cuando la densidad tiende a cero (aproximación del gas perfecto). Es decir, el S compuesto del científico y un conjunto de termómetros de gases muy diluidos, al dar la misma lectura para la temperatura del sistema, satisfacen el criterio de objetividad (“aquello que es independiente de S ”) y, por tanto, tales termómetros leen la temperatura objetiva, T .

Además, el axioma segundo (A2) contiene (del corolario del teorema de Carnot $Q_2/Q_1 = T_2/T_1$) la posibilidad de construcción de un termómetro universal formado por un motor de Carnot, el cual resulta capaz de medir la temperatura intrínseca, objetiva, de todo sistema físico termodinámico. Este “termómetro universal de Carnot” cumple de manera más general que ningún otro la definición de objetividad, pues (recuérdese) el termómetro forma parte de S y puede estar construido con cualquier sustancia de trabajo.

Cuando la sustancia de trabajo de un termómetro de Carnot es un gas muy diluido (perfecto), entonces ambos termómetros dan obviamente la misma lectura de la temperatura del sistema. Es decir, un termómetro de Carnot de gas ideal es un caso particular del termómetro universal de Carnot y, por esto mismo, las lecturas de los termómetros de gas muy diluido a volumen constante coinciden con la temperatura absoluta de Kelvin.

Ahora bien, si la temperatura T determinada por un termómetro de Carnot es “la” temperatura de un sistema, ello quiere decir que la escala de medición debe empezar en un cero absoluto u objetivo. La evidencia del cero absoluto no surge del A0. Pero se tiene el antecedente de que los gases muy diluidos no pueden bajar del límite $T = -273.15^\circ\text{C}$, puesto que en tal caso su volumen alcanzaría valores negativos (lo que es objetivamente imposible).

Lo anterior se puede ver con más detalle de lo siguiente. Se sabe que el valor del coeficiente β de dilatación volumétrica (a p constante) de todos los gases muy diluidos tiene el mismo valor:

$$\beta = \frac{1}{V_0} \left(\frac{\Delta V}{\Delta t} \right)_p = \frac{1}{273.15} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1},$$

siendo V_0 el volumen a $t = 0$ C. Despejando V , queda

$$V = V_0(1 + \beta t), \tag{1}$$

de donde se concluye que t tiene que ser igual o mayor que $-1/\beta = -273.15^\circ\text{C}$, de lo contrario se alcanzarían volúmenes nulos o negativos.

La existencia de un cero objetivo o “absoluto” en la temperatura tiene el mismo sentido que la objetividad del cero en la escala de medición de longitudes: no tienen significado físico las longitudes negativas y, por eso, todas las cintas métricas y reglas empiezan en cero. En termodinámica hay una escala de temperaturas que empieza en cero absoluto (la de Kelvin); pero en cualquier otra, como la centígrada, debe existir un valor crítico que no se puede objetivamente rebasar ($t = -273.15^\circ\text{C}$).

En la mecánica clásica parece también necesitarse de un axioma cero o de transitividad, para poder definir objetivamente la masa de manera no tautológica con la densidad (Ref. [3], p. 92). Ya puestos en el camino, podría preguntarse si el axioma de transitividad es necesario en toda teoría física, para deducir de él la existencia objetiva de una de las variables distintivas de tal teoría (como son la masa y la temperatura en la mecánica y la termodinámica, respectivamente).

3.2. El axioma primero (A1) o de la conservación de la energía

En la Ref. [1], se postula la validez universal del axioma adiabático: “el trabajo adiabático es independiente de la trayectoria, para todo sistema termodinámico”. De aquí se deduce la existencia objetiva de la energía interna U del sistema, pues por conocido teorema de cálculo $\Delta U = -W_{\text{ad}}$ (en la convención de signos que pone un signo negativo al trabajo realizado sobre el sistema). Cuando el mismo trayecto se realiza sin condiciones adiabáticas, el cambio en U ya no es igual al trabajo adiabático; el postulado de conservación de la energía permite deducir la existencia de otra forma de energía, el calor Q , que es por ello igual a la diferencia detectada. Completo, el axioma primero (A1) queda como

$$\Delta U = Q - W. \quad (2)$$

De (2) o de $\Delta U = -W_{\text{ad}}$ se ve que U queda indefinida por una constante aditiva. La determinación total de U requiere de la objetivación de su valor en el origen objetivo de la variable distintiva de la termodinámica, que es la temperatura T . Es decir, hay que dar el valor de U en $T = 0$ K, que se puede llamar U_0 . El valor de U_0 no se deduce de los axiomas A0 y A1.

3.3. El axioma segundo (A2) o del incremento de la entropía

El A2 postula como universalmente válido que un sistema aislado con diferencias internas de temperatura evoluciona espontáneamente al estado de equilibrio. Del A2 se desprende que existe otra propiedad intrínseca de los sistemas, la entropía, tal que para un pequeño cambio reversible de estado vale que

$$dS = \frac{\delta Q}{T}. \quad (3)$$

Esta ecuación diferencial de primer orden determina a S hasta una constante aditiva S_0 , por lo que, al igual que con el caso de U y A1, la objetivación de S no es completa por A2. El valor de S_0 tiene que objetivarse mediante un postulado extra, referido a su valor en el origen de T , es decir $S_0 = S(T = 0$ K).

Los axiomas A1 y A2 no determinan los orígenes de U y S , pero en cambio fijan el origen de T en 0 K, como valor límite que no puede pasarse por ningún O . Esto es así porque en 0 K una isoterma coincide con una adiabática y sería posible reducir un ciclo de Carnot a una especie de triángulo formado por una isoterma y dos adiabáticas que se cortan. Como se puede demostrar (aunque en la Ref. [2] (págs. 48–52), se presentan serias objeciones), un motor trabajando con este ciclo violaría el A2 en la formulación de Planck (“es imposible la operación de un motor que, funcionando en ciclos, convierta íntegramente calor en trabajo”). En el siglo pasado se introdujo la notación de cero “absoluto”, para el valor de T que ningún sistema puede rebasar hacia abajo. (Epistemológicamente “absoluto” o “universal” es equivalente por definición con el concepto de “objetivo”, como se viene reiteradamente insistiendo aquí).

En este contexto de relación entre axiomas y objetivación de variables básicas termodinámicas, puede hacerse la pregunta: ¿cuál es la relevancia del A3? (La pregunta no es

ociosa, a juzgar al menos por la opinión dada en la Ref. [12] (pág. 123): “The third law has no special significance...”).

4. EL AXIOMA TERCERO (A3) O DEL ORIGEN DE S Y U

De las diferentes formulaciones del A3, el que se adecúa perfectamente para el presente enfoque epistemológico es el enunciado de Planck: “en el cero absoluto las entropías de todas las sustancias tienen el mismo valor igual a cero”. En fórmula

$$S_{i,0} = 0, \quad \text{para toda sustancia } i \text{ en } 0 \text{ K}, \quad (4)$$

es decir, el valor 0 u origen de S es independiente del sistema físico, correspondiendo, por tanto, a la definición de lo que es “objetivo”. Igual que sucede con las longitudes y la temperatura, cualquier escala de medición de S debe contener un cero absoluto.

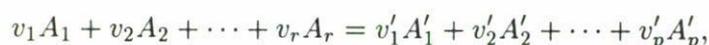
El A3 elimina la indeterminación de la constante arbitraria implícita en la Ec. (3), con lo cual desaparece este último subjetivismo de la entropía.

Y, claro, queda la última pregunta: ¿está U definida realmente hasta una constante arbitraria?, ¿tiene U un origen objetivo? ¿cómo se fija?, ¿requiere de la postulación de un axioma extra para la termodinámica?, ¿no es demasiado engorro un postulado adicional, sólo para completar el criterio epistemológico?

En pocos textos de termodinámica se hacen afirmaciones tocantes a las preguntas anteriores; entre ellos se encuentran Fermi (Ref. [7] pág. 23): “This additive constant (de la energía interna) affects the final results of the calculations only when chemical transformations or changes of states of aggregation of the substances are involved... In all other cases, one may place the additive constant equal to zero”; o Kirillin *et al.* (Ref. [4] pág. 45): “El valor absoluto de la energía interna tiene importancia en la termodinámica química para el cálculo de las reacciones. En cambio, en la inmensa mayoría de las aplicaciones técnicas de la termodinámica lo que tiene importancia no es el valor absoluto de U , sino las variaciones que experimenta esta magnitud en los diversos procesos termodinámicos... De aquí se deduce que el punto de referencia para medir la energía interna puede tomarse arbitrariamente (esta afirmación es justa para las sustancias puras y para las mezclas de sustancias que no reaccionan químicamente entre sí)”.

Como se aprecia de las citas anteriores, las respuestas a las preguntas formuladas al inicio del presente capítulo provienen del estudio de los cambios de fases y las reacciones químicas. Precisamente el análisis de estas últimas propició las formulaciones originales del A3 (véase Ref. [4], cap. 15 o Ref. [11], cap. 10).

En la Ref. [4] (pág. 562), se describe la forma general de una reacción química como



en donde los diferentes v y v' se refieren a los coeficientes estequiométricos de los r reactivos A y los p productos A' de la reacción, respectivamente; v y v' , a su vez, son proporcionales a las concentraciones c y c' de reactivos y productos.

La tarea central de la termoquímica es el cálculo objetivo de las concentraciones de equilibrio para cualquier reacción, pues sólo de esta manera se pueden construir reactores químicos reales. El problema radica en que las concentraciones dependen de los valores de S_1 y U_1 de los reactivos y de S_2 y U_2 de los productos, de manera que si las entropías y las energías internas (de hecho, sus diferencias) no se objetivan, entonces las concentraciones serían arbitrarias o subjetivas. En el ejemplo de gases perfectos reaccionando

$$G_1 - G_2 = H_1 - H_2 - T(S_1 - S_2) = -mRT \ln K_c, \quad (5)$$

en donde G_i y H_i ($i = 1, 2$) son las funciones de Gibbs y las entalpías para reactivos y productos, m es la masa molecular de la mezcla y K_c es la constante de reacción en equilibrio (la que depende de las concentraciones finales respectivas). En general,

$$\ln K_c = c_1^{v_1} + c_2^{v_2} + \dots + c_r^{v_r} - (c_1'^{v_1'} + c_2'^{v_2'} + \dots + c_p'^{v_p'}). \quad (6)$$

Las concentraciones quedan determinadas por las Ecs. (5) y (6) cuando se especifican los valores absolutos de G_1 y G_2 . Los valores reales de las entropías se fijan por $S_{1,0} = S_{2,0} = 0$, que es la condición (4) aplicada a cada substancia en el cero absoluto.

Queda ahora en la Ec. (5) el problema de la utilización de entalpías reales u objetivas. Para un gas perfecto la entalpía sólo depende de T , $H = H(T)$, por lo que la cuestión se puede tratar como sigue (Ref. [4], pág. 589): $H(T) = \int_0^T C_p dT + H_0$, con $H_0 = H(T = 0 \text{ K})$; el primer término integral es la entalpía absoluta $H(T)$.

Entonces,

$$Q_{p,T} = H_2 - H_1 = Q_{p,0} + \int_0^T C_p^2 dT - \int_0^T C_p^1 dT = Q_{p,0} + H_2' - H_1',$$

con $Q_{p,0} = H_{2,0} - H_{1,0}$. $Q_{p,T}$ y $Q_{p,0}$ son los efectos caloríficos de la reacción a T y 0 K , en tanto que H_2' y H_1' son las entalpías absolutas, respectivamente. Los efectos caloríficos son cantidades que tienen un significado real por cuanto se pueden medir experimentalmente; $Q_{p,0}$ es la energía química de formación a 0 K de las substancias que aparecen en la reacción.

Finalmente, se tiene que

$$G_1 - G_2 = -Q_{p,0} + (H_1' - H_2') - T(S_1 - S_2), \quad (7)$$

en términos de puras cantidades objetivas.

La Ec. (7) describe no sólo reacciones químicas, sino también cambios de fase y procesos no químicos como la ionización atómica, trátese o no de gases ideales (veáse en la Ref. [7], págs. 152–155, el ejemplo clarificante de la ionización del sodio, Na).

Ahora bien, a la vista de la Ec. (7) cabe una reinterpretación un tanto cuanto formal: si en ella las entalpías que aparecen son las absolutas, entonces puede decirse que

$$H_{1,0} = H_{2,0} = 0, \quad (8)$$

o bien que

$$U_{1,0} = U_{2,0} = 0, \quad (9)$$

puesto que en 0 K el producto pV es cero.

Cuando las condiciones del proceso ocurren a T y V constantes entonces a $Q_{V,0}$ se lo puede identificar con la energía real de formación de los compuestos. Un interesante ejemplo es la ecuación de Saha, que describe la disociación del sodio. En este caso (Ref. [7], pág. 153) $Q_{V,0}$ resulta ser la energía de ionización de los átomos en una mol de sodio.

Las Ecs. (8) y (9) contestan las preguntas que se hicieron al inicio del presente capítulo, respecto al valor de la constante arbitraria U_0 . Tal vez se las podría considerar como un complemento del A3. En cualquier caso, son necesarias para que la formulación de la termodinámica satisfaga a plenitud el P0. Nótese, sin embargo, que la Ec. (9) no tiene el significado fundamental que tiene la Ec. (4), pues no se puede afirmar que la energía de cualquier sistema sea cero en 0 K; la Ec. (9) resulta aquí más bien como consecuencia de referir las entalpías al cero absoluto en la Ec. (7), lo cual provoca la aparición del término $Q_{p,0}$ o $Q_{V,0}$, según el caso. Como se vio, ambas cantidades son reales, en el sentido en que lo son Q y W para hacer objetivo el valor de ΔU en la Ec. (2).

5. CONCLUSIONES Y COMENTARIOS

La exigencia de que la termodinámica cumpla con el P0 conduce a la concepción de los axiomas como deductores de propiedades objetivas (“intrínsecas”, “absolutas”, “reales”), básicas, de los sistemas termodinámicos: T , U , S . De estas variables se infiere la objetividad de otras variables derivadas, como son los potenciales termodinámicos: entalpía ($H = U + pV$), energía libre de Helmholtz ($F = U - TS$) y función de Gibbs ($G = H - TS$).

Sin la certeza de la objetividad de las variables anteriores no podría saberse que se pueden construir termómetros que miden “la” temperatura de un cuerpo físico, ni calorímetros que miden “el” calor de combustión de sustancias a través de los cambios reales de la energía interna de un sistema en combustión, ni reactores químicos que determinan “las” concentraciones de las reacciones en equilibrio.

Ciertamente termómetros, calorímetros y reactores se han construido antes de (o simultáneamente con) la formulación axiomática de la termodinámica y su relación con el principio de objetividad.

Pero piénsese en la pregunta: ¿qué significado tienen las lecturas de, por ejemplo, los termómetros de gases no diluidos, antes de saber que existe “la” temperatura del sistema que están midiendo? Y luego, al observar que las medidas de todos los gases convergen cuando se hacen a muy baja densidad, ¿cómo interpretar este resultado en términos de la lectura de “la” temperatura del sistema? Es claro, entonces, que el P0 y la definición de objetividad aquí adoptada juegan un papel ordenador de las experiencias; permiten identificar a esa lectura única de los termómetros con la temperatura real del sistema.

De igual manera, piénsese en la pregunta aparentemente fantásica: ¿se puede gobernar a voluntad la constante de reacción K_c de una reacción química, fijando al antojo los orígenes de G (o sea, de S y U)? Si así fuera, la producción de la industria química sería

tan arbitraria como la voluntad de los individuos. Por lo contrario, el $P0$, el $A3$ (4) y su ampliación (9) demuestran que la construcción de reactores químicos tiene que obedecer leyes objetivas naturales, deducidas de axiomas de validez universal.

En el principio de toda teoría física está, desde luego, el acto postulatorio, "libre", del sujeto sobre la conducta que todo objeto O debe cumplir. Se trata de los axiomas predicados por S sobre O . Los axiomas pueden reformularse, sobre todo a través de las confrontaciones entre sus leyes derivadas y las expresiones teóricas correspondientes de las mediciones experimentales. En el proceso de confrontación (que se da en los laboratorios e históricamente) se transforman tanto los objetos como los sujetos. Por esto, el conocimiento científico es una interrelación permanente entre S y O . Recalcar esta dinámica puede contribuir a que el estudiante afine su formación como científico y asimile mejor los conceptos de la teoría física.

Una última observación respecto a los límites de validez de la termodinámica macroscópica axiomática así expuesta. El $A2$ puede en principio violarse debido a fluctuaciones (aun las clásicas), en tanto que algo semejante sucede con el $A3$ si el estado del sistema en 0 K es degenerado. Ahora bien, dado que las condiciones en que tales límites pueden encontrarse son en general remotas, no parece que la teoría macroscópica tenga que reformularse drásticamente. Más bien podría uno adherirse a la opinión de Einstein, (Ref. [4], pág. 580): "Una teoría impresiona tanto más, cuanto más simples son sus premisas, más diversas las materias que liga y más amplio su campo de aplicación. De aquí la profunda impresión que en mí produjo la termodinámica clásica. Ésta es la única teoría física de contenido general con respecto a la cual estoy convencido de que, dentro de los límites de aplicación de sus conceptos fundamentales, nunca será refutada (para conocimiento especial de los escépticos por principio)".

Parece factible someter las consideraciones anteriores a estudiantes de nivel igual o más elevado que los del sistema de enseñanza media superior. Es posible que tal presentación contribuya al esclarecimiento de los conceptos básicos de la termodinámica, para que su aprendizaje sea significativo (Ref. [6]). En todo caso, se trata de una hipótesis de trabajo, a ser comprobada en la práctica de la docencia.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco los comentarios y sugerencias del M. en C. Ignacio Campos Flores y la ayuda editorial del Fís. César Zepeda.

REFERENCIAS

1. M.W. Zemansky, *Heat and thermodynamics*, Fifth Edition, McGraw-Hill, New York (1968).
2. A.B. Pippard, *The elements of classical thermodynamics*, Cambridge University Press, Cambridge (1966).
3. R.B. Lindsay and H. Margenau, *Foundations of physics*, Dover, New York (1957).
4. V.A. Kirillin, V.V. Sichev y A.E. Sheindlin, *Termodinámica técnica*, MIR, Moscú (1976).
5. T.S. Kuhn, *La estructura de las revoluciones científicas*, Fondo de Cultura Económica, Madrid (1971).

6. M.A. Moreira, *La teoría del aprendizaje significativo de David Ausubel*, notas del curso impartido en la Facultad de Ciencias, UNAM, México (abril de 1995).
7. E. Fermi, *Thermodynamics*, Dover, New York (1956).
8. M. Planck, *Una autobiografía científica*, en Ensayos Científicos, CONACYT, México (1982).
9. M. Bunge, *Filosofía de la física*, Ariel, México (1978).
10. B. Bergthorsson, *Am. J. Phys.* **45**, No. 3, (1977) 270.
11. H.B. Callen, *Thermodynamics*, Wiley, New York (1960).
12. C. Kittel, *Thermal physics*, Wiley, New York (1969).