

# CRITERIO DE TRABAJO MECANICO EN TERMODINAMICA: ¿ES TAN SOLO UNA CUESTION DE CONVENCION?

E. Combariza C., J. Valderrama N., R. Moreno F.

Departamentos de Física y Química, Facultad de Ciencias,  
Universidad del Valle  
A.A. 2188, Cali - Colombia.

(recibido marzo 28, 1985; aceptado abril 24, 1986)

## RESUMEN

Se analiza el criterio de trabajo mecánico en termodinámica en términos de sus características en mecánica clásica. La importancia que se debe asignar el medio externo (interacción) en la interpretación de todo proceso termodinámico y la necesidad de consistencia interna en las ciencias básicas son discutidas. Se señalan los inconvenientes asociados a la definición en base a una convención de trabajo en termodinámica.

## ABSTRACT

Mechanical work in thermodynamics is analyzed within the frame of classical mechanics. The relevance of the external agent (interaction) in a thermodynamic process and the internal consistency in basic sciences are discussed. The use of conventions to define mechanical work in thermodynamics is criticized.

## 1. INTRODUCCION

Los intercambios y conversiones recíprocas de energía en sistemas interactuantes, mediante procesos térmicos y mecánicos, constituyen un objetivo de importancia central en la termodinámica clásica.

Trabajo mecánico y calor son, por tanto, cantidades fundamentales cuya definición debe ser universal, suficientemente precisa y fundamentada, de forma que su concepto esté exento de cualquier ambigüedad.

El criterio anterior se puede aplicar en general a la definición de calor<sup>(1)</sup>, mas no a la de trabajo mecánico. Existen en la literatura especializada (textos de termodinámica) y en la general (textos de química, física y fisico-química), criterios diversos sobre la conceptualización y definición de trabajo mecánico.

En la mayoría de los casos el trabajo se define en base a una simple "convención" que propone el autor del texto. Dicha convención varía de texto a texto (según el perfil académico del autor) y además rara vez viene acompañada de argumentos en favor de su racionalización. El tema ha sido planteado recientemente<sup>(2)</sup> mediante una analogía con el calor, introduciendo conceptos como trabajo mecánico endo y exógeno, haciendo énfasis en el aspecto ilustrativo y nemotécnico pero sin una mínima fundamentación física.

El propósito de la presente publicación es analizar una fundamentación sólida del concepto de trabajo mecánico en termodinámica, basada en los criterios que sobre trabajo y energía se desarrollan en mecánica clásica, procurando ofrecer una visión consistente de estas dos ramas de las ciencias básicas.

Inicialmente, se hará una presentación breve del criterio de trabajo en la mecánica clásica que servirá de referencia conceptual para definir el trabajo mecánico en termodinámica. El marco anterior permitirá ofrecer una discusión sobre las limitaciones y dificultades de las convenciones que rigen la definición del trabajo mecánico en termodinámica y la necesidad y ventajas de un desarrollo estructural autoconsistente en la ciencia.

## 2. CARACTERIZACION DEL TRABAJO EN MECANICA CLASICA

La definición generalizada de trabajo (W) que ofrece la mecánica clásica<sup>(3,4)</sup> se expresa como el producto del desplazamiento (ds) por la componente de la fuerza externa (Ft) paralela al mismo. En forma diferencial

$$dW = Ft ds \quad , \quad (1)$$

o para trabajo total

$$W(a \rightarrow b) = \int_a^b Ft ds \quad , \quad (1')$$

donde a y b definen coordenadas de posición del sistema.

La Ec. (1) define trabajo haciendo énfasis en la acción de la fuerza externa Ft sobre el sistema que la percibe. Como sistema mecánico se adopta aquí el más simple posible: una partícula de masa determinada y caracterizada por su energía cinética (K) como variable energética. El trabajo así definido es positivo o negativo según la componente de la fuerza externa Ft, sea paralela o tenga sentido opuesto al desplazamiento ds.

El trabajo mecánico se define también<sup>(3,4)</sup> centrando la atención sobre el sistema que experimenta la acción de la fuerza externa, en tal caso

$$W(a \rightarrow b) = K(b) - K(a) \quad . \quad (2)$$

En la definición anterior el trabajo será positivo o negativo, según la energía cinética del sistema aumente o disminuya.

Las Ecs. (1) y (2) son equivalentes y describen, desde dos ángulos diferentes, un mismo fenómeno: la realización de un trabajo, producido por una fuerza externa actuando sobre un sistema mecánico

Si la fuerza externa Ft realiza un trabajo positivo, definido en (1), el sistema experimentará un aumento en su energía cinética, según (2). En forma similar, una disminución de la energía cinética del sistema implica que sobre él efectúa un trabajo negativo la fuerza externa (fric-

ción, por ejemplo).

En el primer caso la fuerza externa (medio externo) realiza un trabajo positivo, como consecuencia del cual el sistema absorbe energía y aumenta su energía cinética. El segundo caso se puede interpretar, apelando a la tercera ley de Newton, como si el sistema realizase un trabajo positivo, como consecuencia del cual cede energía (disminuye  $K$ ) que es absorbida por el medio externo (calentamiento por fricción). Lo anterior puede resumirse concluyendo que quien efectúe trabajo mecánico positivo cede energía. Este criterio, de lógica elemental en mecánica clásica, constituye un elemento base para la interpretación del trabajo mecánico en termodinámica.

### 3. TRABAJO MECANICO EN TERMODINAMICA

Como criterio de trabajo mecánico (citado en adelante únicamente como trabajo) en termodinámica se tomará exactamente el mismo presentado en 2 para la mecánica clásica, cuantificado por las expresiones (1).

En este caso por sistema se toma el criterio de sistema termodinámico de uso general en la literatura<sup>(5,6)</sup>, y como modelo de sistema termodinámico se adoptará el más simple posible: un gas ideal caracterizado por volumen ( $V$ ) y presión ( $P$ ) como variables mecánicas y la energía interna ( $E$ ) como variable energética. Para analizar únicamente procesos mecánicos asumimos que el sistema posee paredes adiabáticas.

Si confinamos el gas ideal en un cilindro de volumen  $V$ , una de cuyas paredes la constituye un pistón que se mueve sin fricción, el trabajo ( $dW$ ) realizado por la fuerza externa  $F_t$  al desplazar lentamente el pistón a una distancia  $ds$ , y por consiguiente variar el volumen del sistema en  $dV$ , se calcula<sup>(3)</sup> como

$$dW = -P_{ext} dV . \quad (3)$$

$$W (a \rightarrow b) = - \int_{V_a}^{V_b} P_{ext} dV , \quad (3')$$

siendo  $P_{ext}$  la fuerza  $F_t$  por unidad de área ejercida por el medio externo sobre la pared móvil del sistema. Dado el carácter lento (reversible) del proceso,  $P_{ext} = P$ .

El signo negativo que precede la parte derecha de las Ecs. (3) es consecuencia de la definición de trabajo dado en mecánica clásica (Ecs. (1)). Si la fuerza externa produce un desplazamiento del pistón paralelo a su dirección, generará un trabajo positivo, como consecuencia del cual el volumen del sistema disminuye,  $dV < 0$ . Dado que la presión es un escalar positivo, el signo negativo garantiza que el trabajo sea positivo,  $dW = -PdV$ ,  $dV < 0$ .

Para el caso opuesto (expansión), el volumen del sistema aumenta. El desplazamiento se realiza en sentido contrario a la fuerza externa  $F_t$ , y el medio externo realizará un trabajo negativo,  $dW = -PdV$ ,  $dV > 0$ .

El análisis anterior muestra cómo el signo negativo de las Ecs. (3) no es producto de una convención, como suele presentarse en la literatura, sino que refleja el criterio de trabajo realizado por la fuerza externa dentro de la misma concepción discutida en la Sección 2 para la mecánica clásica.

El trabajo realizado por la fuerza externa (medio externo) puede también, como en el caso de la mecánica clásica, definirse en términos de los cambios en la variable energética del sistema, o sea la energía interna para el caso termodinámico:

$$W(a \rightarrow b) = E(b) - E(a) , \quad (4)$$

donde  $a$  y  $b$  representan estados accesibles al sistema.

La Ec. (4) define un trabajo en condiciones adiabáticas, dada la restricción energética impuesta sobre el sistema, y es una expresión de la primera ley de la termodinámica, que en general se anota como

$$\Delta E = W . \quad (4')$$

La Ec. (4') es, por tanto, equivalente a la ecuación (2), y refleja en el fondo el mismo fenómeno físico.

Cuando la fuerza externa realiza un trabajo positivo ( $W > 0$ ), com

presión del gas, cede energía al sistema y éste aumenta por tanto su energía interna ( $\Delta E > 0$ ).

En el caso contrario, expansión del gas, la fuerza interna realiza un trabajo negativo  $W < 0$ ; el sistema realizará por tanto un trabajo positivo (tercera ley de Newton) y cederá energía, disminuyendo su energía interna,  $\Delta E < 0$ .

La definición del trabajo en termodinámica, Ecs. (3), permite asimilar su interpretación en la misma línea de la mecánica clásica, asociando variaciones de energía interna del sistema a la realización de trabajo por el medio externo, bajo la consideración de que quien realiza el trabajo positivo cede energía.

El criterio anterior demanda una clara comprensión de la importancia del medio externo o interacción y el papel de la tercera ley de Newton dentro de la definición de trabajo y excluye el aspecto convencional asignado en la literatura a la presentación de trabajo en termodinámica.

Las equivalencias entre la termodinámica y la mecánica no se evidencian con facilidad, pero allí donde se den creemos es importante analizarlas y emplearlas a fondo. La comprensión del concepto termodinámico se ve así simplificado y fundamentado, a través de modelos sencillos, en una estructura axiomatizada como es la mecánica clásica.

#### 4. DISCUSION

El análisis anterior permite definir el trabajo en termodinámica, siguiendo el orden de ideas que sobre trabajo se desarrolla en mecánica clásica.

De esta forma se refuerza y enfatiza la consistencia interna que debe primar en la ciencia, y mucho más importante, en las ciencias básicas.

El definir trabajo mecánico en termodinámica bajo la forma (3) también simplifica el sentido de la primera ley de la termodinámica, que para un sistema que posea paredes diatérmicas se escribe, de acuerdo a

(4'), como

$$\Delta E = Q + W \quad , \quad (5)$$

siendo  $Q$  el calor intercambiado por el sistema, vía térmica, con el medio externo.

En la Ec. (5),  $Q > 0$ ,  $(\Delta E)_W > 0$  cuando el sistema absorbe calor y  $Q < 0$ ,  $(\Delta E)_W < 0$  cuando el sistema pierde calor. Análogamente, la definición de trabajo presentada en 3 asigna  $W > 0$ ,  $(\Delta E)_Q > 0$ , y  $W < 0$ ,  $(\Delta E)_Q < 0$  cuando el sistema cede trabajo. De esta forma, las variaciones  $\Delta E$  se pueden analizar con el mismo criterio para el calor y el trabajo: si el sistema cede calor o trabajo disminuye su energía interna, si el sistema gana calor o trabajo, incrementa su energía interna. Este análisis es más contundente aun si se interpreta el trabajo mecánico como la suma de múltiples intercambios térmicos a nivel atómico<sup>(3)</sup>.

El concepto de trabajo desarrollado en mecánica clásica enfatiza la acción del medio externo sobre el sistema. La evolución de un sistema se analiza en base a la presencia del medio externo, ya que es éste la razón última de cualquier cambio en el sistema. Con una perspectiva de unicidad y claridad se debe trasponer a la termodinámica la misma concepción. Mientras no obre el medio externo (no se produzca una interacción) no cambia el estado mecánico de un sistema y no puede tampoco cambiar un estado termodinámico.

La equivalencia señalada entre las Ecs. (1) y (3) no es únicamente un factor cuantitativo. Se expresa en el fondo una equivalencia conceptual sobre la forma de aproximación a fenómenos diversos. La termodinámica y la mecánica no son idénticas, pero sí están enmarcadas dentro de un mismo paradigma.

Es posible también expresar el trabajo en termodinámica centrando la atención sobre el sistema. Esta aproximación se utiliza ampliamente en la literatura<sup>(7,8,9)</sup> y se presenta en la mayoría de los casos como una simple convención. El trabajo  $W$  realizado por el sistema para el mismo proceso propuesto en 3, para obtener la Ec. (3), se define como

$$W (a \rightarrow b) = \int_{V_a}^{V_b} PdV \quad , \quad (6)$$

siendo  $P$  la presión asociada al gas. Con esta convención, la primera ley de la termodinámica se presenta como

$$\Delta E = Q - W \quad . \quad (7)$$

La definición (6) se utiliza fundamentalmente en el estudio de máquinas térmicas en donde la eficiencia se define en términos de la razón entre el trabajo realizado y el calor absorbido por el sistema. Si el trabajo realizado por el medio externo se anota como  $W_{ext}$  y el realizado por el sistema como  $W_{sis}$ , las Ecs. (3) y (6) muestran que  $W_{ext} = -W_{sis}$ . Queda así suficientemente definido el sentido físico de la eficiencia  $\frac{W_{sis}}{Q}$  tomada como  $\frac{-W_{ext}}{Q}$ , siendo  $W_{ext} < 0$  cuando  $W_{sis} > 0$ .

El adoptar en termodinámica la definición de trabajo propuesta en (6), rompe con el criterio de trabajo definido en mecánica, Ec.(1), introduciendo confusiones tales como la proyección centrada del sistema que tiende al desconocimiento de la interacción.

La historia y la enseñanza previenen contra este tipo de obstáculo epistemológico. Bachelard<sup>(10)</sup> ilustra cómo un realismo ingenuo hace pensar que la resistencia que se presenta al desear sumergir un cuerpo en un fluido está originada en el mismo cuerpo, creándose una concepción animista del mismo, lo cual conduce al desconocimiento total de la acción del fluido.

Cohen<sup>(11)</sup> en un cuidadoso trabajo sobre la física newtoniana, pone al descubierto el obstáculo que constituye el desconocimiento de la interacción. En forma similar, resalta el significado de la tercera ley de Newton como base de la revolución newtoniana. Originada ésta, al descentrar la atención ubicada tradicionalmente sobre el sistema.

Algunos textos, principalmente de química<sup>(12,13)</sup> y fisicoquímica<sup>(14,15)</sup>, adoptan la convención dada en (6) y presentan la primera ley de la termodinámica como  $\Delta E + W = Q$ . En esta ecuación es objetable el que el trabajo esté del lado de la energía interna, pues es muy evidente la dependencia del trabajo vs. carácter del proceso, no univocidad originada por su marcada relación con la interacción dominante. La energía interna caracteriza un estado, el trabajo un proceso.

El presentar trabajo en termodinámica según la Ec. (3), permite

mostrar cómo su definición es una extensión formal del criterio mecánico de trabajo, enfatizándose de esta forma el papel que desempeña el medio externo frente a la evolución termodinámica del sistema (Ec. (5)). Desarrollar la misma presentación en base a las Ecs. (6) y (7) fuera de romper la línea conceptual que se inicia en la mecánica, reforzando una visión ecléctica de la ciencia, desorienta y crea las confusiones animistas sobre el sistema mencionadas anteriormente.

La definición de trabajo en termodinámica no debe estar, por tanto, sujeta a una convención, como usualmente se presenta el tema en la literatura. El signo negativo que precede al término PdV en la Ec.(3), tiene una justificación sólida, omitirlo en aras de una "convención" es desconocer, por "convención", la importancia conceptual de la mecánica clásica.

Desde el punto de vista de la didáctica, la presentación del trabajo es una oportunidad para reforzar ante el estudiante la importancia del medio externo (interacción) en un proceso cualquiera, mostrándose de paso la universalidad de los conceptos en la ciencia.

Analizar el trabajo como efecto de la interacción permite la adquisición en el estudiante de criterios abiertos, pues un arraigo al sistema exige el uso constante de convenciones que sectorizan y hacen perder la unidad conceptual que debe regir desde la mecánica hasta los cursos superiores, pasando por la termodinámica.

## 5. CONCLUSIONES

De lo expuesto en las secciones anteriores se puede concluir:

- A. Toda discusión en termodinámica debe darse orientada a reforzar el carácter unitario de las ciencias básicas y la consistencia interna de las mismas.
- B. El papel que juega la interacción (medio externo) en un proceso termodinámico debe enfatizarse al máximo en todo análisis del criterio de trabajo.
- C. La presentación de trabajo en termodinámica debe hacerse siguiendo el concepto que para él rige en la mecánica clásica, o sea a través de las Ecs. (3).

- D. El uso de convenciones en la presentación del concepto de trabajo en termodinámica no debe hacerse en detrimento de las conclusiones A y B. Creemos, por tanto, no recomendable su definición dada por la Ec. (6).
- E. El presente análisis muestra la gran riqueza de los conceptos termodinámicos, los cuales no deben tomarse como hechos definitivos. Sobre ellos la discusión permanece abierta.

## BIBLIOGRAFIA

1. T.B. Tripp, *J. of Chem. Education*, 53 (1976) 782.
2. B.D. Joshi, *J. of Chem. Education*, 60 (1983). 895.
3. M. Alonso y E. Finn, *Física*, Vol. I, Fondo Ed. Inter Am. (1976).
4. C. Kittel *et al.*, *Berkeley Physics Course*, Vol. I, Mc Graw-Hill Co. (1973).
5. F.C. Andrews, *Thermodynamics: Principles and Applications*, Wiley Interscience (1971).
6. H.B. Callen, *Thermodynamics*, John Wiley & Sons. (1960).
7. W. Pauli. *Pauli Lectures on Physics*, Vol. 3, The M.I.T. Press (1973).
8. S. Maron y C. Prutton, *Fundamentos de Físico-química*. Ed. Limusa, Mexico (1980).
9. D.R. Gaskell, *Introduction to Metallurgical Thermodynamics*, Mc-Graw-Hill (1973).
10. G. Bachelard, *La Formación del Espíritu Científico*, Ed. Siglo Veintiuno, Mexico (1979).
11. B. Cohen, *La Revolución Newtoniana y la Transformación de las Ideas Científicas*, Ed. Alianza, Madrid (1983).
12. P. Ander y A. Sonessa, *Principios de Química*, Ed. Limusa, México (1980).
13. B. Mahan, *Química*, Fondo Educativo Interamericano, S.A., Bogotá (1968)
14. G. Castellan, *Físico-química*, Fondo Educativo Interamericano S.A. Mexico (1976).
15. L.S. Darken and R.W. Gurry, *Physical Chemistry of Metals*, Mc Graw Hill. (1953). Las referencias citadas se hacen prácticamente en forma aleatoria y parcial, ya que son muchos los textos que traen el trabajo definido según la Ec. (3) y muchos los que la definen según la Ec. (6). En la gran mayoría, las dos alternativas se presentan como una convención.