

ANÁLISIS DE LOS CONCEPTOS DE *ENERGÍA*, *CALOR*, *TRABAJO* Y *EL TEOREMA DE CARNOT* EN TEXTOS UNIVERSITARIOS DE TERMODINÁMICA

ALOMÁ, EDUARDO¹ y MALAVER, MANUEL²

¹ Universidad Simón Bolívar

² Universidad Nacional Experimental Marítima del Caribe

ealoma@usb.ve

agujero_1@hotmail.com

Resumen. En este artículo se estudian los conceptos de *calor*, *trabajo*, *energía* y del *teorema de Carnot* en textos universitarios de termodinámica para el área de ingeniería, usando técnicas de análisis de contenido. Se evidencia por medio de este estudio la presencia de algunos casos de explicaciones y conceptos con características que corresponden a concepciones espontáneas o no formales, lo que podría generar interpretaciones erróneas en el estudiante que se inicia en un curso de termodinámica.

Palabras clave. Análisis de contenido, textos de termodinámica, concepciones no formales, calor, trabajo, energía, teorema de Carnot.

Analysis of energy, heat, work and Carnot's theorem in thermodynamics university textbooks

Summary. This article studies the concepts of heat, work, energy and Carnot's theorem in thermodynamics university textbooks for engineering, using analysis of content techniques. This study evidences the presence of some cases of explanations and concepts with characteristics that correspond to spontaneous or non-formals conceptions could generate erroneous interpretations in students which starting a thermodynamics course.

Keywords. Analysis of content, thermodynamics textbooks, non-formal conceptions, heat, work, energy, Carnot's theorem.

INTRODUCCIÓN

Los libros de texto han sido y continúan siendo el material curricular más utilizado para la enseñanza de las ciencias en todos los niveles educativos. Esta relevancia de los textos no parece tener correspondencia con la investigación educacional, en la que se han realizado muy pocos trabajos en libros de educación básica y media y algunos en textos universitarios (Carmen y Jiménez, 1997). Aun cuando se utilicen apuntes hechos por los propios docentes y se diseñen otros instrumentos de enseñanza y aprendizaje, el docente siempre se preocupa de proporcionarle al estudiante una bibliografía recomendable, con la que se determina el nivel del curso y la clase de problemas y actividades que han de emplearse para enseñar y evaluar el aprendizaje (Goncari y Giorgi, 2000).

A pesar de que en el proceso de enseñanza-aprendizaje se recomienda utilizar una gran variedad de recursos didácticos, tanto en bachillerato como en la universidad los libros de texto marcan la pauta a seguir en las actividades de enseñanza (Bullejos de la Higuera, 1983).

Hay diversas variables que influyen en el aprendizaje a partir de los textos. Una de ellas se relaciona con el contenido del texto y su organización. Los autores de libros de texto organizan los contenidos de tal forma que antes de presentar información nueva (una ley, por ejemplo) es necesario que se hayan introducido los conceptos que intervienen en ella. Además, lo que aprende un alumno de un texto depende del conocimiento previo que posea (Otero, 1997).

Desde hace años se investiga acerca de las características de los libros de texto en ciencias. Un área importante de investigación es la descripción de los libros de texto y cómo los estudiantes aprenden de ellos. En efecto, Finley, Lawrenz y Heller (1992), de la Universidad de Minnesota, realizaron una serie de estudios en esta área y emplearon una amplia variedad de criterios para analizar y describir las insuficiencias de los libros de texto en ciencias. Estos autores encuentran que la estructura de la prosa y los diagramas en los textos pueden generar en el estudiante concepciones erróneas. Asimismo, establecen que las metas y objetivos de una disciplina específica son reflejados en los libros de texto de educación media y universitaria.

Algunos investigadores han abordado diferentes aspectos en el análisis de un texto. Bullejos de la Higuera (1983) examinó las características de los textos, como la legibilidad, los contenidos o las actividades que se suponen tienen influencia en la calidad del texto como instrumento de enseñanza y aprendizaje. Williams y Yore (1985) analizaron la legibilidad de los textos y Wandersee (1988), la forma en que los alumnos extraen significados de ellos. Del mismo modo, Malaver y otros (2005) estudiaron las actividades y preguntas propuestas de los capítulos referidos a la estructura de la materia en textos universitarios de química general.

En los últimos tiempos se han desarrollado investigaciones en el área de enseñanza de las ciencias (Michinel y D'Alessandro-Martínez, 1993, 1994; Solbes y Traver, 1996; Alvarez, 1997; Níaz, 1998; de Posada, 1999; Goncari y Giorgi, 2000; Malaver, 2001; Doménech et al., 2003; Solbes y Tarín, 2004; García-Carmona, 2006) en las que se pone de manifiesto en el análisis del texto escrito la existencia de interpretaciones espontáneas o no formales de los fenómenos físicos y químicos que pudieran afectar el aprendizaje de las ciencias.

En Venezuela, Pujol (1993) realizó un análisis de contenido en la unidad referente a la estructura de la materia de los libros de texto en química para el noveno grado de la educación básica, el cual corresponde a alumnos de edades entre 14 y 15 años, y encontró que los libros, en general, presentan un número apreciable de conceptos e ideas sobre la estructura de la materia que poseen diversos tipos de inexactitudes e imprecisiones, lo que podría inducir en el estudiante falsas concepciones. Del mismo modo, Malaver y otros (2003, 2004a, 2004b) analizaron los estilos de prosa más utilizados por los textos universitarios de química general que proyectan estos libros sobre la estructura de la materia y encuentran que el estilo de prosa más comúnmente usado por los textos es el conocimiento en ciencia, en el que se presenta el contenido científico en términos de conceptos, principios, leyes y teorías.

El estudio de la termodinámica presenta graves obstáculos en su comprensión, lo que puede deberse a que la descripción de los fenómenos se hace a través de varias variables macroscópicas que cambian simultáneamente, ligadas por relaciones funcionales que a los alumnos les resulta complicado comprender y manejar (Rozier y Viennot, citado en Cárdenas y Ragout de Lozano, 1996).

Pérez-Bustamante y Hidalgo de Cisneros (1989) examinaron en textos de física general, química general, química-física, termodinámica y cinética el tema de las velocidades moleculares y encontraron una confusión generalizada en muchos textos en relación con el concepto, expresión y notación de los diversos tipos de velocidades moleculares en sistemas gaseosos, lo que le plantea numerosas dudas al estudiante durante la preparación de sus lecciones y temas.

Michinel y D'Alessandro-Martínez (1994), utilizando técnicas de análisis de contenido, analizaron el discurso de una serie de autores de textos de física básica del nivel universitario y cursos previos a la universidad en relación con el concepto de *energía* y otros que le son afines, y encontraron un conjunto de interpretaciones que expresan las deficiencias del autor con respecto a las teorías físicas vigentes y la permanencia de la concepción mecanicista de la energía y de la teoría del calórico, o bien del sublenguaje inherente a ellas.

Domínguez-Castiñeira y otros (1998) estudiaron las concepciones alternativas de los estudiantes relacionadas con los conceptos de *calor* y *temperatura* y encontraron que persiste la influencia del lenguaje cotidiano en la utilización y verbalización de gran parte de las ideas y razonamientos, lo que se pone de manifiesto en las proposiciones macroscópicas, generando controversias importantes dentro de la propia comunidad científica.

Seidman y Michalik (1991) encontraron que enunciados como el teorema de Carnot presentan errores en su interpretación, lo que puede ocasionar confusión y ambigüedad en estudiantes y profesores en un curso de termodinámica. Estos autores han realizado un análisis detallado de la eficiencia de las máquinas térmicas reversibles operando en ciclos distintos a los del ciclo de Carnot y concluyeron que cualquier máquina térmica reversible operando entre las mismas dos temperaturas debe tener una eficiencia más baja.

Martínez y Pérez (1997) encontraron que en estudiantes de nivel medio el concepto de *calor* permanece ligado al de *energía* como una forma, aun cuando lo relacionen directamente con la diferencia de temperatura. Asimismo, el concepto de *energía interna* no es aceptado por los alumnos como una función de estado, pero lo utilizan para explicar fenómenos como los cambios de fase.

Goodwin y Orlik (2000) realizaron una presentación en video de seis situaciones que se relacionan con la evaporación y ebullición de los líquidos y encontraron que, aun después de muchos años de su ejercicio profesional, los profesores no muestran suficiente fortaleza en la explicación científica de los conceptos y poseen varias concepciones alternativas que le permiten abordar las distintas definiciones de forma indirecta.

Doménech y otros (2003) establecieron que las dificultades de los estudiantes y del profesorado para la comprensión y el manejo del concepto de *energía* se extienden

a los conceptos de *calor* y *trabajo*, por lo que algunos autores han propuesto prescindir de los mismos y hablar sólo de variaciones de energía entre el sistema y el medio que interaccionan.

Solbes y Tarín (2004) realizaron una investigación sobre el proceso de enseñanza-aprendizaje del concepto de *energía* y su conservación en el nivel de educación secundaria española y encuentran que los profesores, al igual que los libros de texto, presentan la energía sin tener en cuenta las ideas previas de los alumnos sobre dicho concepto. Asimismo, los libros de texto sólo mencionan la conservación de la energía y, en menor medida, su transformación, transferencia y degradación.

Otros autores han propuesto conceptualizar la energía como una especie de sustancia cuasi-material que participa en todos los procesos que ocurren en el medio ambiente (Doménech et al., 2003). Sin embargo, Duit (1987) establece que esta definición dificulta el aprendizaje de la idea científica de *energía*, lo que puede conllevar a pensar que la energía es un ingrediente o componente de los cuerpos. Del mismo modo, Solomon (1985) afirma que algunos alumnos muestran una conceptualización material de la energía al considerarla como una sustancia que se puede almacenar.

García-Carmona (2006) propone aplicar en clases de bachillerato un conjunto de situaciones problemáticas relacionadas con el principio de conservación de la energía, situaciones que pueden emplearse en la construcción, corrección y reforzamiento de algunos conceptos relativos a la enseñanza-aprendizaje de la energía.

El objetivo de esta investigación es analizar los conceptos relativos a la *energía* como aspecto fundamental en termodinámica y el teorema de Carnot como una aplicación práctica del área de ingeniería, en textos universitarios de termodinámica dirigidos a estudiantes de ingeniería de la educación superior venezolana. Con base en este objetivo, se proponen las siguientes preguntas de investigación: ¿Cómo se definen los conceptos de *calor*, *trabajo*, *energía* y *teorema de Carnot*? ¿Qué tipo de concepciones espontáneas o no formales se presentan en las definiciones de cada concepto? ¿Qué deficiencias se presentan en cada una de las definiciones de acuerdo con los resultados de la investigación de que se dispone?

MATERIALES Y MÉTODOS

Técnica de análisis de contenido

Esta investigación se ubicó en la modalidad de estudio descriptivo, ya que se utilizaron técnicas de análisis de contenido en libros de texto, que permiten la recopilación de datos a fin de estudiar las características de dicho contenido, clasificando sus partes de acuerdo con categorías establecidas por el investigador (Ander-Egg, 1980; Ruiz Olabuenaga, 1996).

El análisis de contenido conforma tres etapas principales (Ander-Egg, 1980), a saber:

1. Establecer unidades de análisis, que no es más que el fragmento que se toma como elemento para la investigación.
2. Determinar las categorías de análisis de las que dependen la clasificación y la selección de la información buscada.
3. Seleccionar la muestra del material a ser analizado.

Muestra bibliográfica

En este trabajo se analizó una muestra que consiste en siete libros de texto de termodinámica de nivel universitario que son utilizados en la asignatura de termodinámica del área de ingeniería en la educación superior venezolana. La muestra fue seleccionada considerando los siguientes criterios:

- 1) Adecuación al programa oficial de la asignatura Termodinámica que cursan los estudiantes de ingeniería mecánica, industrial, química, petróleo y afines.
- 2) Demanda de los alumnos y docentes.
- 3) Disponibilidad de los textos.
- 4) Que fueran libros de texto, no problemarios de termodinámica.

La muestra quedó conformada por los libros de texto que se presentan en el anexo 1.

Para poder realizar el análisis de los textos se compararon las definiciones de los conceptos relativos a la energía que aparecen en los textos, con los que se incluyen en libros y artículos contenidos en publicaciones de revistas especializadas que se mencionan a continuación: Hierrezuelo y Molina (1990), Seidman y Michalik (1991), Atkins (1992), Liley (1993), Michinel y D'Alessandro (1994), Levine (1996), Pushkin (1996).

En lo sucesivo, todas las referencias acerca de estos textos aparecerán de acuerdo con la denominación sugerida por Sanger y Greenbowe (1999), identificándolos con las iniciales de los autores. Siguiendo el orden alfabético anterior, los libros se identificaron como B, CB, JD, MC, RA, VSB, WR y ZD.

PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En la tabla 1 se muestran los conceptos de *calor*, *trabajo*, *energía* y *teorema de Carnot* expresados por los textos de la muestra. Estos conceptos se compararon con los conceptos y definiciones contenidos en libros y publicaciones de reconocido nivel académico que se muestran en la tabla 2.

Tabla 1
Conceptos de calor, energía, trabajo y teorema de Carnot en los textos universitarios de termodinámica.

CONCEPTO	BURGHARDT	CENGL Y BOLES	JONES Y DUGAN	MANRIQUE Y CárDENAS	RUSSEL YADEBIYI	VAN WYLEN, SONNTAG Y BORGNAKKE	WARK Y RICHARDS	ZEMANSKY Y DITTMAN (1990)
Calor	Energía que atraviesa la frontera de un sistema debido a una diferencia de temperaturas entre dicho sistema y sus alrededores. (p. 39)	Forma de energía que se transfiere entre dos sistemas debido a una diferencia de temperatura. (p. 122)	Interacción entre un sistema y su entorno, provocada por una diferencia de temperaturas entre el sistema y su entorno. (p. 62)	Interacción energética y sus alrededores, a través de aquellas porciones de los límites del sistema en que no hay transferencia de masa, como consecuencia de la diferencia de temperatura entre el sistema y sus alrededores. (p. 26).	Interacción entre un sistema y su entorno. Es un efecto de un sistema sobre su entorno que ocurre en la frontera del sistema debido a un gradiente de temperatura entre el sistema y su ambiente. (p. 60)	Forma de energía que, a una temperatura dada, se transfiere a través de los límites de un sistema a otro sistema que está a una menor temperatura y que sucede en virtud de la diferencia de temperatura entre los dos sistemas. (p. 105)	Transferencia de energía a través de la frontera de un sistema debido a una diferencia de temperatura entre el sistema y su entorno. (p. 46)	Aquello que se transmite entre un sistema y su entorno debido únicamente a una diferencia de temperatura. (p. 74)
Energía	No está definido.	No está definido.	No está definido.	No está definido.	No está definido.	Capacidad de producir un efecto. (p. 43)	No está definido.	No está definido.
Trabajo	Acción de una fuerza, F , ejercida en un desplazamiento, x , en la dirección de dicha fuerza. (p. 31)	Interacción energética que no es causada por una diferencia de temperatura entre un sistema y sus alrededores. (p. 166)	Interacción entre un sistema y su entorno. (p. 44).	Interacción energética entre un sistema y sus alrededores, a través de aquellas porciones de los límites del sistema en que no hay transferencia de masa, como consecuencia de una propiedad intensiva diferente de la temperatura entre el sistema y sus alrededores. (p. 18)	Interacción entre un sistema y su entorno. (p. 55)	Forma de energía. (p. 91)	Producto de una fuerza F por un desplazamiento ΔS , medidos ambos en la misma dirección. (p. 34)	Interacción entre un sistema y su entorno. (p. 51)
Teorema de Carnot	Todas las máquinas reversibles presentarán la misma eficiencia cuando operen entre los mismos dos depósitos térmicos de temperatura constante. (p. 136)	Las eficiencias de todas las máquinas térmicas reversibles que funcionan entre los dos mismos depósitos son iguales. (p. 267)	Todas las máquinas reversibles que operan entre los mismos límites de temperatura tienen la misma eficiencia. (p. 304)	Todas las máquinas térmicas externamente reversibles tienen la misma eficiencia, si operan entre las mismas regiones de temperatura. (p. 98)	Todas las máquinas reversibles que operan entre los mismos dos depósitos tienen la misma eficiencia. (p. 275)	Todas las máquinas que funcionan en el ciclo de Carnot entre temperaturas constantes tienen la misma eficiencia. (p. 235)	Los rendimientos térmicos de los motores térmicos internamente reversibles que funcionan entre las mismas regiones de alta y baja temperatura, son iguales. (p. 268)	No está definido.

Tabla 2
Conceptos de calor, energía, trabajo y teorema de Carnot según algunos autores de referencia.

CONCEPTO	LÓPEZ RUPÉREZ Y LÓPEZ RUPÉREZ, CITADO EN HIERREZUELO Y MOLINA (1990)	ATKINS (1992)	SEIDMAN Y MICHALIK (1991)	LILEY (1993)	MICHINEL Y D'ALESSANDRO-MARTÍNEZ (1994)	LEVINE (1996)	PUSHKIN (1996)
Calor	-----	Mecanismo de intercambio de energía.	-----	-----	Transferencia de energía de un cuerpo a otro determina exclusivamente por una diferencia de temperatura entre ellos.	Transferencia de energía entre el sistema y su entorno debida a una diferencia de temperatura.	Transferencia de energía térmica debida a una diferencia de temperatura entre sustancias.
Energía	Propiedad o atributo de todo cuerpo o sistema material en virtud del cual éste puede transformarse, modificando su situación o estado, así como actuar sobre otros originando en ellos procesos de transformación.	-----	-----	-----	Magnitud física que se presenta bajo diversas formas, está involucrada en los procesos de cambio de estado, se transforma y se transmite, depende del sistema de referencia y fijado éste, se conserva.	-----	-----
Trabajo	-----	Mecanismo de intercambio de energía.	-----	-----	-----	-----	-----
Teorema de Carnot	-----	Todas las máquinas reversibles que empleen un regenerador y que funcionen entre dos temperaturas tendrán la misma eficiencia que un ciclo de Carnot.	Si se construye una máquina térmica que opere entre dos reservorios de temperatura, entonces la máquina tendrá la máxima eficiencia posible si opera vía un ciclo de Carnot.	Un ciclo reversible que emplee un regenerador tendrá la misma eficiencia que un ciclo de Carnot.	-----	-----	-----

Energía

En casi todos los textos analizados el concepto de *energía* no se define de forma explícita, sólo se hace referencia a términos como energía cinética, energía disponible, geotérmica, interna, potencial, rotacional, traslacional, etc. En los textos CB, JD, WR aparece el término *energía* en el capítulo que se refiere a la primera ley de la termodinámica, y vinculado directamente al principio de conservación de la energía, pero en ningún caso se expresa una definición precisa. Sólo el texto VSB ofrece una definición de energía, la cual establece que la energía es la capacidad de producir un efecto sin llegar a relacionarlo con el principio de conservación. Esta definición de energía se asemeja mucho a la concepción mecanicista de la energía que afirma que la energía es la capacidad para realizar trabajo y no concuerda con la que establecen López Rupérez y López Rupérez (citado en Hierrezuelo y Molina, 1990) y Michinel y D'Alessandro-Martínez (1994), en la que se expresa que la energía es una magnitud física que puede presentarse en diversas formas y originar procesos de transformación.

En todos los textos universitarios se señala que la energía se conserva, se transmite o transforma, pero no se expresa un concepto de ella. Del mismo modo, en los textos B y RA se expresa la idea del concepto de *energía* como una propiedad que hace que las cosas funcionen, por ejemplo que las plantas de vapor, las turbinas de gas, las celdas de combustible, la gasolina tengan energía. A continuación se muestra un párrafo del texto RA:

«La energía puede existir en diversas formas. La gasolina que se usa en un automóvil posee una energía denominada energía química. Los recursos de energía que tienen energía química almacenada incluyen los combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas natural), la madera y otras sustancias combustibles. Cuando un combustible arde en el aire, la energía química del combustible se transforma en otra forma de energía que suele denominarse energía térmica.» (p. 16)

De acuerdo con Michinel y D'Alessandro-Martínez (1994), esta idea utilitaria del término podría inducir a que el estudiante pensara que un objeto como, por ejemplo, las nubes, no tienen energía almacenada. Del mismo modo, Pacca y Henrique (2004) analizaron las diversas concepciones de la energía de los profesores y estudiantes de enseñanza media y encontraron tres ideas fundamentales asociadas al concepto de *energía*: energía como algo que los cuerpos poseen y que les permite realizar alguna acción; los cuerpos que se mueven tienen energía; la energía tiene existencia casi material y puede almacenarse dentro de los objetos, como por ejemplo cuando se habla de que la comida y el carbón tienen energía almacenada, se sugiere que la energía es una sustancia; estas concepciones pertenecen al sentido común y constituyen el origen de los obstáculos al aprendizaje de la teoría física que trata de la transformación y conservación de la energía.

Una definición alternativa de energía que se propone en esta investigación a partir de los estudios realizados es la

siguiente: Propiedad o magnitud física que puede transformarse o transmitirse y que interviene en los procesos de cambios de estado.

Calor

El texto B define el calor como energía, lo que está en abierta contradicción con las definiciones dadas por Atkins (1992), Michinel y D'Alessandro (1994), Levine (1996) y Pushkin (1996), que expresan que el calor es transferencia de energía. Los textos CB y VSB expresan, de manera incorrecta, que el calor es una forma de energía lo que tampoco concuerda con los conceptos emitidos por los autores de referencia.

Enunciar calor igual a energía puede hacerle creer al lector que el calor y la energía son expresiones equivalentes y que un cuerpo puede contener calor, tal como se muestra en el siguiente párrafo, tomado del texto VSB:

«Otro aspecto de esta definición es que un cuerpo nunca contiene calor. En vez de ello, el calor sólo se puede identificar cuando cruza los límites. Así, el calor es un fenómeno momentáneo. Si se considera el bloque de cobre caliente como un sistema y el agua fría en el vaso de precipitado como otro sistema, se reconoce que originalmente ningún sistema contiene calor alguno (por supuesto, contienen energía). Cuando el bloque de cobre se coloca en el agua y los dos se encuentran en comunicación térmica, se transfiere calor del cobre al agua hasta que se establece el equilibrio de temperatura. En este punto ya no existe transferencia de calor porque no hay diferencia de temperatura. Al terminar el proceso, ninguno de los dos sistemas contiene calor. También se deduce que el calor se identifica en el límite del sistema porque el calor se define como la energía que se transfiere a través de los límites del sistema.» (p. 105)

Como se observa, en todo el párrafo se confunde calor con energía o se tratan ambos conceptos como sinónimos. Del mismo modo, en el texto CB también se observa esta misma confusión en fragmentos como el siguiente:

«El calor se define como la forma de energía que se transfiere (a un sistema y sus alrededores) debido a una diferencia de temperatura. Una interacción de energía es calor sólo si ocurre debido a una diferencia de temperatura. De ello se deduce que no hay ninguna transferencia de calor entre dos sistemas que se encuentran a la misma temperatura.» (p. 122)

Se observa cómo el calor en ambos textos se define a la vez como una forma de energía y luego se le considera como una forma de transferencia de energía.

En los textos JD, MC, RA y ZD se incluyen definiciones como calor latente, calor latente de vaporización, calor latente de fusión, calor sensible, calor residual, expresiones que corresponden a la teoría del calórico (Anexo 2), ya que hacen referencia al calor como una propiedad que poseen los cuerpos y no como un mecanismo de trans-

ferencia de energía. A continuación se presentan algunas muestras de estas definiciones:

«El calor añadido en el proceso 1-2 se conoce como calor sensible, porque modifica la temperatura del sistema. Una vez que se llega al estado 2, no puede añadirse más energía al líquido sin provocar el inicio de un cambio de fase. Si se añade más calor a presión constante, se inicia la evaporación del líquido. En tanto se mantenga constante la presión, la temperatura sigue siendo constante, de forma que se trata de un calor latente.» (JD, p. 218)

«El calor latente se define como la diferencia entre la entalpía (por unidad de masa) de una fase en condiciones de saturación, y la entalpía (por unidad de masa) de la otra fase en condiciones de saturación, a la misma presión y temperatura.» (MC, p. 47)

«El calor que se requiere para derretir por completo una unidad de masa de una sustancia en su punto de fusión recibe el nombre de calor latente de fusión.» (RA, p. 96)

«El denominado calor latente medido durante una transición de fase a presión constante (por ejemplo, fusión, ebullición, sublimación) es sencillamente la variación de entalpía.» (ZD, p. 228)

En todos los textos analizados aparecen expresiones como las siguientes:

«Se agrega calor a volumen constante.» (B, p. 359)

«Adición de calor a presión constante.» (CB, p. 458)

«Adición de calor a volumen constante.» (JD, p. 777)

«Disipación de calor a volumen constante.» (MC, p. 203)

«Rechazo de calor a volumen constante.» (RA, p. 496)

«El calor se adiciona a volumen constante mientras que el pistón está momentáneamente en reposo en el punto muerto del cabezal.» (VSB, p. 412)

«Suministro de calor a volumen constante.» (WR, p. 721)

Expresiones como éstas son de uso común en los textos de termodinámica y refuerzan la idea de que el calor es una propiedad que poseen los objetos, y que los sistemas pueden tener calor. De acuerdo con esto, se podría medir experimentalmente el contenido de calor que posee un cuerpo, por lo que es más razonable utilizar expresiones como las siguientes: «Elevación de temperatura a presión constante», «disminución de temperatura a volumen constante», «calentamiento isobárico», «enfriamiento isocórico».

Según Domínguez-Castiñeiras y otros (1998), el uso del término *calor* en el lenguaje ordinario, como por ejemplo, decir «cierra la ventana para que no salga el calor», unido a expresiones como calor ganado o perdido que pertenecen al lenguaje coloquial y tienen su origen en la antigua teoría del calórico, hacen más referencia a esta

última que a las nuevas ideas con las que se pretende educar al alumno, lo que lleva a creer que el calor es algo que se puede almacenar, medir, que se puede transferir de un cuerpo a otro como un fluido o ente misterioso.

Sin embargo, el texto CB justifica que el uso de estas expresiones tiene sentido ya que no se consiguen expresiones alternativas para las frases antes mencionadas. Al respecto este texto señala:

«Varias frases que actualmente son de uso común como flujo de calor, adición de calor, absorción de calor, remoción de calor, ganancia de calor, pérdida de calor, almacenamiento de calor, generación de calor, calentamiento eléctrico, calentamiento por resistencia, calentamiento por fricción, calentamiento por gas, calor de reacción, liberación de calor, calor específico, calor sensible, calor latente, calor de desecho, calor del cuerpo, calor de proceso, sumidero de calor y fuente de calor, no son consistentes con el significado termodinámico estricto del uso del término *calor*, que limita su uso a la transferencia de energía térmica durante el proceso. Sin embargo, estas frases, tan enraizadas en el vocabulario, las emplea tanto la gente lego como los científicos sin que haya ningún malentendido, ya que suelen interpretarse en su sentido apropiado en lugar de tomarse literalmente (además, no hay alternativas aceptables para algunas de estas frases).» (p. 122)

Se puede establecer una definición del calor como una transferencia de energía entre dos sistemas; el calentamiento se presenta cuando hay adición de energía y el enfriamiento cuando existe una disminución de energía.

Trabajo

En los textos B y WR se muestra una definición operacional del concepto de *trabajo* al establecer que el trabajo es el producto de la acción de una fuerza por un desplazamiento. La definición de trabajo del texto ZD es ambigua ya que el trabajo podría interpretarse como las fuerzas que ejercen los sistemas o entre un sistema y su entorno. En los textos CB, JD, MC y RA se define el trabajo como una interacción o transferencia de energía entre un sistema y sus alrededores, lo cual está en concordancia con los conceptos emitidos por Atkins (1992) y Levine (1996), lo que no ocurre con la definición del texto VSB en el que se considera que el trabajo es una forma de energía. Sin embargo, en el texto B se presenta una idea muy contradictoria de los conceptos de *calor* y *trabajo* ya que regresan a la concepción de que el calor y el trabajo son formas de energía, y se encuentran párrafos como el siguiente:

«El trabajo y el calor son dos de las más fundamentales formas de la energía que se utilizan, por lo cual resulta esencial comprenderlas perfectamente bien.» (p. 31)

Del mismo modo, el texto CB también presenta este tipo de contradicciones al afirmar que los sistemas pueden contener y producir trabajo como se muestra a continuación:

«El trabajo es también una forma de energía como el calor y, en consecuencia, tiene unidades de energía como kJ.» (CB, p. 124)

«El calor y el trabajo son mecanismos de transferencia de energía entre un sistema y sus alrededores.» (CB, p. 125)

EL TEOREMA DE CARNOT

En los textos B, CB, JD, MC, RA y WR se enuncia el teorema de Carnot de la manera usual como lo hacen la mayoría de los textos universitarios de termodinámica. Al respecto, Seidman y Michalik (1991) establecen que, debido a postulados como éste, es muy fácil concluir que cualquier máquina reversible que opere entre las mismas dos temperaturas tendrá la misma eficiencia que la máquina de Carnot, lo que puede ocasionar confusión e interpretación errónea entre los estudiantes y profesores de un curso de termodinámica. Liley (1993) afirma que este dilema aparente resulta del hecho de que un ciclo que consiste de dos procesos isocóricos (a volumen constante), operando entre dos reservorios isotérmicos, deberá tener una eficiencia más baja que la de un ciclo de Carnot. Sólo el texto VSB enuncia el teorema de Carnot de acuerdo con la definición dada por Seidman y Michalik (1991), evitando con ello una interpretación incorrecta de dicho principio.

Enunciados del teorema de Carnot como los que aparecen en la tabla 1 le pueden hacer creer al estudiante que cualquier ciclo de pasos reversibles que opere entre dos temperaturas tendrá una eficiencia igual a la de un ciclo de Carnot, cuando Seidman y Michalik (1991) y Salter (2000) plantean ejemplos de ciclos reversibles que funcionan entre dos depósitos térmicos que pueden tener menor eficiencia que la dada por uno de Carnot que opere entre los mismos límites de temperatura, como se muestra en el anexo 3.

En textos como CB, se presentan evidentes contradicciones cuando afirman que existen ciclos reversibles cuya eficiencia es menor a la de uno de Carnot, pero que presentan irreversibilidades, como se indica en el siguiente párrafo:

«Los ciclos ideales de Otto y Diesel analizados se componen de procesos internamente reversibles y por lo cual son ciclos internamente reversibles. Sin embargo, estos ciclos no son del todo reversibles, puesto que incluyen transferencia de calor debido a una temperatura finita durante los procesos no-isotérmicos de adición y rechazo de calor, los cuales son irreversibles. Por tanto, la eficiencia térmica de un motor de Otto o Diesel será menor que la de un motor de Carnot que opera entre los límites de temperatura.» (p. 454)

Sin embargo, en todos los textos analizados, cuando se hace referencia al estudio de los ciclos de potencia, se especifica que los procesos que integran estos ciclos son reversibles, ya que para su estudio se utilizan las suposiciones de aire estándar, que involucran secuencias de pasos reversibles; se muestra un ejemplo de esta afirmación, tomada del texto JD:

«En un modelo de aire estándar para máquinas de combustión interna [...], el proceso de escape de la máquina real es reemplazado por una eliminación reversible de calor a volumen constante para regresar el fluido a su estado inicial antes de la compresión.» (p. 776)

De acuerdo con Seidman y Michalik (1991), las transferencias de energía térmica deben evitarse durante estados que involucran cambios de temperatura finita, y estas transferencias requieren la presencia de muchos reservorios de temperatura si los estados son reversibles, por lo que para que la máquina reversible opere como un ciclo de Carnot, tales intercambios de energía térmica deberán ocurrir isotérmicamente. Del mismo modo, Liley (1993) y Salter (2000) establecen que la única manera de lograr que una máquina reversible tenga una eficiencia igual a la de Carnot es que utilice un regenerador, aspecto que si bien es cierto que se menciona en la mayoría de los textos analizados cuando se hace referencia al análisis de los ciclos Stirling y Ericsson, no se termina de aclarar que es la presencia de este dispositivo lo que permite que la eficiencia de estos ciclos se iguale a la de la máquina de Carnot. Sólo el texto VSB menciona que la presencia de un dispositivo como el regenerador ocasiona que la eficiencia de los ciclos Stirling y Ericsson se iguale a la de un ciclo de Carnot que funcione entre los mismos límites de temperatura:

«Las máquinas con ciclo de Stirling se han creado en fecha reciente como máquinas de combustión externa con regeneración [...] Como todo el calor se suministra y se rechaza isotérmicamente, la eficiencia de este ciclo es igual a la eficiencia de un ciclo de Carnot que trabaja entre las mismas temperaturas. Las mismas conclusiones se deberían obtener en el caso del ciclo Ericsson, [...], si ese ciclo incluyera también un regenerador.» (p. 421)

Dos propuestas alternativas al enunciado del teorema de Carnot que presentan la mayoría de los textos de termodinámica de acuerdo con la investigación realizada pueden ser las siguientes:

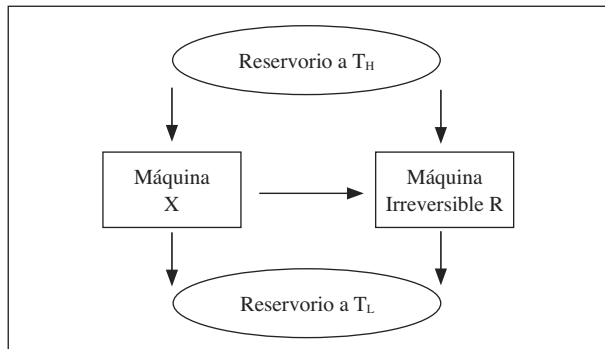
- Todas las máquinas térmicas reversibles que operan entre los mismos límites de temperaturas tendrán una eficiencia menor o igual que la de un ciclo de Carnot.
- Todas las máquinas reversibles que operan entre los mismos dos reservorios de temperatura tendrán la misma eficiencia, siempre que las transferencias de energía térmica ocurran isotérmicamente.

Los textos MC y WR muestran la demostración detallada del teorema de Carnot mientras que los libros restantes no ofrecen una deducción formal de este teorema, y presentan confusión y ambigüedad en la explicación del enunciado, tal como se indica en los siguientes párrafos:

«Para demostrar el segundo corolario de Carnot, consideremos a ambas máquinas en la figura 5.12a (Figura 1) como reversibles. Supongamos que sus eficiencias son diferentes, para que sus trabajos de salida sean diferentes para la misma cantidad de calor de entrada. Entonces, invirtamos la máquina menos eficiente. La máquina más

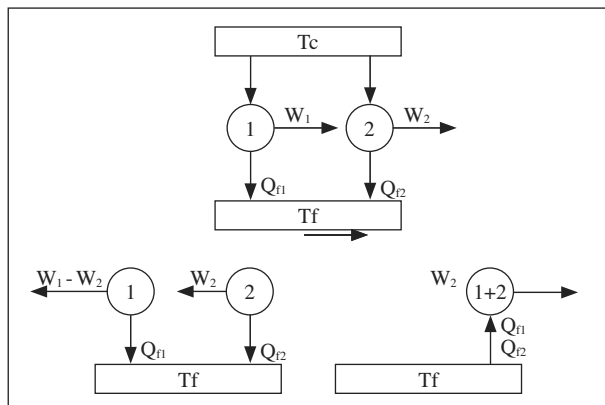
eficiente puede impulsar a la máquina inversa y tener cierta sobra de trabajo, aun cuando se extrae una cantidad neta de calor de un solo reservorio. Ésta es la misma violación de la segunda ley a la que llegamos anteriormente.» (JD, p. 305)

Figura 1
Demostración del teorema de Carnot extraída del texto JD.
En dicho texto corresponde a la figura 5.12a.



«Supóngase que una máquina reversible 1 es más eficiente que otra máquina reversible 2, que opera entre las mismas regiones que se encuentran a temperaturas T_c y T_f , como se ve en la figura 6.7a (Figura 2).

Figura 2
Demostración del teorema de Carnot extraída del texto MC.
En dicho texto corresponde a la figura 6.7a y 6.7b respectivamente.



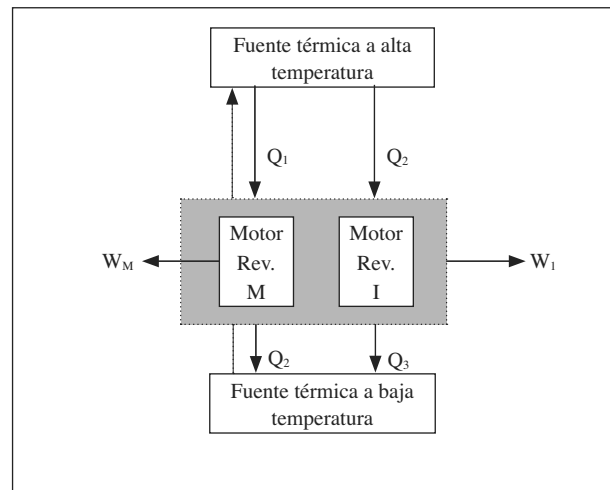
Puesto que ambas máquinas son reversibles, la máquina 2 puede arbitrariamente operarse como un refrigerador. Esto aparece en la figura 6.7b (Figura 2). Siendo la máquina 1 más eficiente, puede impulsar el compresor del refrigerador 2 y queda un excedente de trabajo ($W_1 - W_2$). Puesto que el calor Q liberado por el refrigerador es el mismo que el requerido por la máquina térmica, puede eliminarse la región que se encuentra a T_c . Si se analiza el

sistema compuesto por la máquina reversible 1 y el refrigerador reversible 2, se observa que éste constituye una violación de la segunda ley de la termodinámica a través del axioma de Kelvin-Planck. De aquí que la máquina reversible 1 no pueda ser más eficiente que la máquina reversible 2. Dado que las máquinas 1 y 2 se designaron así arbitrariamente, la máquina 1 puede reemplazar a la máquina 2, estableciéndose que esta última no puede ser más eficiente que la primera. En consecuencia, las dos máquinas reversibles tienen la misma eficiencia, y se establece la validez de la segunda proposición del principio de Carnot.» (MC, p. 99)

«El motor irreversible I de la figura 6.14 (Figura 3) se sustituye por un motor internamente reversible H. Para el sistema compuesto formado por M con funcionamiento inverso (como máquina frigorífica) y H como motor térmico, la Ecuación [...] exige que

$$W_{net,ent} = W_{M,MF,ent} - W_{H,MT,sal} = 0$$

Figura 3
Demostración del teorema de Carnot que aparece en el texto WR.
En dicho texto corresponde a la figura 6.14.



»Se ha aplicado el signo igual debido a que los dispositivos cíclicos M y H son internamente reversibles, y el proceso global de nuevo se ha supuesto externamente reversible. También, como se ha visto anteriormente, $W_{M,MF,ent} = W_{M,MT,sal}$. Por tanto, la ecuación anterior puede escribirse como

$$W_{M,MT,sal} = W_{H,MT,sal}$$

»Por consiguiente, para el mismo calor suministrado Q_1 a los motores térmicos M y H, y las mismas fuentes térmicas durante el suministro y la descarga del calor

$$\eta_{t,M} = \eta_{t,H}$$

»Por tanto se ha probado el segundo enunciado del principio de Carnot.» (WR, p. 269)

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en el análisis de los textos universitarios de termodinámica permitieron llegar a las siguientes conclusiones:

– La mayoría de los textos analizados (7 de 8 textos) no muestran una conceptualización de la energía, sólo hacen referencia a términos como energía cinética, potencial disponible, traslacional y se ofrece una noción de la energía como una sustancia o ente material capaz de modificar los cuerpos y producir cambios de estado.

– Aun cuando muchos de los textos de la muestra presenten el concepto de *calor* como una forma de transferencia de energía, en todos los textos analizados aparecen frases que confunden el calor como una forma de energía o lo definen como energía que se transfiere.

– Varios de los textos analizados muestran una definición del trabajo como una forma de transferencia de energía y unos pocos textos lo definen como la acción de una fuerza en un desplazamiento, pero al igual que en el concepto de *calor*, se siguen mostrando en varios de los textos frases que conceptualizan el trabajo como energía o como una forma de energía.

– En la mayoría de los textos analizados se enuncia el teorema de Carnot de la forma estándar en la que se esta-

blece que la eficiencia de todas las máquinas reversibles será igual a la del ciclo de Carnot cuando operan entre los mismos límites de temperatura, lo que puede ocasionar interpretaciones erróneas cuando se analizan los ciclos de máquinas reversibles, como los ciclos de potencia de gases. Un enunciado como éste genera la falsa creencia de que todos los ciclos termodinámicos que funcionan entre dos depósitos térmicos tendrán la misma eficiencia, cuando existen casos de ciclos reversibles como el ciclo de Stirling, el ciclo de Brayton para turbinas de gas y el ciclo de Otto para motores de combustión interna que pueden tener menores eficiencias que la de una máquina de Carnot aun cuando funcionen entre los mismos límites de temperatura.

– Es interesante mencionar que en casi todos los textos analizados no se muestra la deducción formal del teorema de Carnot, lo que puede reforzar aún más la idea de igualdad de la eficiencia térmica de las máquinas reversibles que funcionen entre los mismos dos depósitos.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al profesor Antonio D'Alessandro-Martínez de la Universidad Central de Venezuela y de la Universidad Simón Bolívar por sus valiosos comentarios y sugerencias durante la elaboración del presente manuscrito.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVAREZ, V. (1997). Argumentación razonamiento en los textos de física de secundaria. *Alambique. Didáctica de las Ciencias Experimentales*, 11, pp. 65-74.
- ANDER-EGG, E. (1980). *Técnicas de investigación social*. Buenos Aires: El Cid Editor.
- ATKINS, P.W. (1992). *La segunda ley*. Barcelona: Prensa Científica.
- BULLEJOS DE LA HIGUERA, J. (1983). Análisis de actividades en textos de física y química de 2º de BUP. *Enseñanza de las Ciencias*, 1(3), pp. 147-157.
- CÁRDENAS, M. y RAGOUT DE LOZANO, S. (1996). Explicaciones de procesos termodinámicos a partir del modelo corpuscular: una propuesta didáctica. *Enseñanza de las Ciencias*, 14(3), pp. 343-349.
- CARMEN, L. y JIMÉNEZ, P. (1997). Los libros de texto: un recurso flexible. *Alambique. Didáctica de las Ciencias Experimentales*, 11, pp. 7-14.
- DE POSADA, J.M. (1999). The presentation of metallic bonding in high school science textbooks during three decades: science educational reforms and substantive changes of tendencies. *Science Education*, 4(83), pp. 423-447.
- DOMÉNECH, J.L., GIL-PÉREZ, D., GRAS, A., GUIASOLA, J., MARTÍNEZ-TORREGROSA, J., SALINAS, J., TRUMPER, R. y VALDÉS, P. (2003). La enseñanza de la energía: una propuesta de debate para un replanteamiento global. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 20(3), pp. 285-310.
- DOMÍNGUEZ-CASTIÑEIRAS, J.M., DE PRO BUENO, A. y GARCÍA-RODEJA FERNÁNDEZ, E. (1998). Las partículas de la materia y su utilización en el campo conceptual de calor y temperatura: un estudio transversal. *Enseñanza de las Ciencias*, 16(3), pp. 461-475.
- DUIT, R. (1987). Should energy be illustrated as something quasi-material? *European Journal of Science Education*, 9(2), pp. 139-145.
- FINLEY, E., LAWRENZ, E. y HELLER, P. (1992). A summary of research in science education-1990. *Journal of Chemical Education*, 76(3), pp. 313-316.

- GARCÍA-CARMONA, A. (2006). Una propuesta de situaciones problemáticas en la enseñanza del principio de conservación de la energía. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 3(3), pp. 496-506.
- GONCARI, S.B. y GIORGI, S.M. (2000). Los problemas resueltos en textos universitarios de Física. *Enseñanza de las Ciencias*, 18(3), pp. 381-390.
- GOODWIN, A. y ORLIK, Y. (2000). An investigation of graduate scientist's understandings of evaporation and boiling. *Revista de Educación en Ciencias*, 1(2), pp. 118-123.
- HIERREZUELO MORENO, J. y MOLINA GONZÁLEZ, E. (1990). Una propuesta para la introducción del concepto de energía en el bachillerato. *Enseñanza de las Ciencias*, 8(1), pp. 23-30.
- LEVINE, I.N. (1996). *Fisicoquímica. Volumen 1*. Madrid: McGraw-Hill Interamericana.
- LILEY, P.E. (1993). Can a Carnot cycle ever be totally reversible? *Journal of Chemical Education*, 40, p. 868.
- MALAYER, M. (2001). «Análisis del contenido referido a la estructura de la materia en libros de texto de química básica a nivel universitario». Tesis de maestría. Universidad Pedagógica Experimental Libertador. Instituto Pedagógico de Caracas.
- MALAYER, M., PUJOL, R. y D'ALESSANDRO-MARTÍNEZ, A. (2003). Análisis de los estilos de prosa, el enfoque ciencia-tecnología-sociedad e imagen de la ciencia en textos universitarios de química general. *Educación Química*, 14(4), pp. 232-239.
- MALAYER, M., PUJOL, R. y D'ALESSANDRO-MARTÍNEZ, A. (2004a). Imagen de la ciencia y vinculaciones ciencia-tecnología-sociedad en textos universitarios de química general. *Revista de Pedagogía*, XXV(72), pp. 95-121.
- MALAYER, M., PUJOL, R. y D'ALESSANDRO-MARTÍNEZ, A. (2004b). Los estilos de prosa y el enfoque ciencia-tecnología-sociedad en textos universitarios de química general. *Enseñanza de las Ciencias*, 22(3), pp. 441-454.
- MALAYER, M., PUJOL, R. y D'ALESSANDRO-MARTÍNEZ, A. (2005). Análisis de las actividades y preguntas propuestas sobre el tema de la estructura de la materia en textos universitarios de química general. *Educación Química*, 16(1), pp. 93-98.
- MARTÍNEZ, J.M. y PÉREZ, B.A. (1997). Estudio de propuestas alternativas en la enseñanza de la termodinámica básica. *Enseñanza de las Ciencias*, 15(3), pp. 287-300.
- MICHINEL, J.L. y D'ALESSANDRO-MARTÍNEZ, A. (1993). Concepciones no formales de la energía en textos de física para la escuela básica. *Revista de Pedagogía*, 33, pp. 41-59.
- MICHINEL, J.L. y D'ALESSANDRO-MARTÍNEZ, A. (1994). El concepto de energía en los libros de texto: de las concepciones previas a la propuesta de un nuevo sublenguaje. *Enseñanza de las Ciencias*, 12(3), pp. 369-380.
- NÍAZ, M. (1998). From cathode rays to alpha particles to quantum to action: a rational reconstruction of structure of the atom and its implications for chemistry. *Science Education*, 82(5), pp. 527-552.
- OTERO, J. (1997). El conocimiento de la falta de conocimiento de un texto científico. *Alambique. Didáctica de las Ciencias Experimentales*, 11, pp. 15-22.
- PACCA, J.L. y HENRIQUE, K.F. (2004). Dificultades y estrategias para la enseñanza del concepto de energía. *Enseñanza de las Ciencias*, 22(1), pp. 159-166.
- PÉREZ-BUSTAMANTE DE MONASTERIO, J.A. y HIDALGO DE CISNEROS, J.L. (1989). Velocidades moleculares en sistemas gaseosos macroscópicos: aclaración de errores y discusión de equívocos y ambigüedades advertidos en los libros de texto. *Enseñanza de las Ciencias*, 7(1), pp. 72-76.
- PUJOL, R. (1993). «Análisis del contenido, las ilustraciones y las actividades propuestas en la unidad referente a la estructura de la materia de los libros de texto en química para el noveno grado de educación básica». Trabajo de ascenso no publicado. Universidad Pedagógica Experimental Libertador. Instituto Pedagógico de Caracas.
- PUSHKIN, D.B. (1996). A comment on the need to use scientific terminology appropriately in conception studies. *Journal of Research in Science Teaching*, 33(2), pp. 223-224.
- RUIZ OLABUENAGA, J.L. (1996). *Metodología de la investigación cualitativa*. Bilbao: Universidad de Deusto.
- SALTER, C. (2000). A simple approach to heat engine efficiency. *Journal of Chemical Education*, 77(8), pp. 1.027-1.030.
- SANGER, M.J. y GREENBOWE, T.J. (1999). An analysis of college chemistry textbooks and sources of misconceptions and errors in electro-chemistry. *Journal of Chemical Education*, 78(6), pp. 853-860.
- SEIDMAN, K. y MICHALIK, T. (1991). The efficiency of reversible heat engines. *Journal of Chemical Education*, 68(3), pp. 208-210.
- SOLBES, J. y TRAVER, M. (1996). La utilización de la historia de las ciencias en la enseñanza de la física y la química. *Enseñanza de las Ciencias*, 14(1), pp. 103-112.
- SOLBES, J. y TARÍN, F. (2004). La conservación de la energía: un principio de toda la física. Una propuesta y unos resultados. *Enseñanza de las Ciencias*, 22(2), pp. 185-194.
- SOLOMON, J. (1985). Teaching the conservation of energy. *Physics Education*, 20, pp. 165-176.
- WANDERSEE, J.H. (1988). Ways student read text. *Journal of Research in Science Teaching*, 25(1), pp. 69-84.
- WILLIAMS, R.L. y YORE, L.D. (1985). Content formats gender and grade level differences in elementary student's ability to read science materials by the close procedure. *Journal of Research in Science Teaching*, 22(1), pp. 81-88.

[Artículo recibido en septiembre de 2005 y aceptado en octubre de 2006]

ANEXO 1

Muestra de libros

- Burghardt, M.D. (1984). *Ingeniería Termodinámica*. México, D.F: Editorial Harla.
- Cengel, Y. y Boles, M. (2003). *Termodinámica*. México, D.F: McGraw-Hill Interamericana.
- Jones, J.B. y Dugan, R.E. (1997). *Ingeniería Termodinámica*. México, D.F: Prentice-Hall Hispanoamericana, S.A.
- Manrique, J. y Cárdenas, R. (1981). *Termodinámica*. México, D.F: Editorial Harla.
- Russell, L.D. y Adebisi, G.A. (1997). *Termodinámica clásica*. Delaware, EUA: Addison-Wesley Iberoamericana, S.A.
- Van Wylen, G.J., Sonntag, R.E. y Borgnakke, C. (2000). *Fundamentos de Termodinámica*. México, D.F: Editorial Limusa, S.A.
- Wark, K.J. y Richards, D. (2001). *Termodinámica*. Madrid: McGraw-Hill Interamericana, S.A.
- Zemansky, M.W. y Dittmann, R.H. (1990). *Calor y termodinámica*. México, D.F. McGraw-Hill Interamericana.

ANEXO 2

Teoría del calórico

De acuerdo con Michinel y D'Alessandro-Martínez (1994), los resultados que se obtuvieron al colocar en contacto cuerpos a diferentes temperaturas le permitieron a Black (1728-1799) establecer que el calor no se crea ni se destruye pero si se puede transferir de un cuerpo a otro. En términos formales, esto se puede escribir de la siguiente manera:

$$\Delta Q_A + \Delta Q_B = 0$$

$$\text{con } \Delta Q = M_{\text{muestra}}(\text{g}) \times C_e(\text{cal/g} \cdot ^\circ\text{C}) \times [T_{\text{final}}(^{\circ}\text{C}) - T_{\text{inicial}}(^{\circ}\text{C})],$$

donde A y B son dos cuerpos, por ejemplo, un bloque caliente de metal y una cierta cantidad de agua fría. La ecuación para ΔQ significa que el calor perdido por A es igual al calor ganado por B y se cumple siempre que el sistema esté aislado y no haya cambios químicos ni de estado físico. El hecho de suponer que Q es proporcional a T sugiere que el calor es poseído por los cuerpos, como lo asumieron erróneamente los defensores de la teoría del calórico. Si se escribe $\Delta Q = M_m C_e (T_f - T_i)$ se puede suponer que $Q_f = M_m C_e T_f$ y $Q_i = M_m C_e T_i$ por lo que el calor también se podría interpretar de manera incorrecta como una propiedad de los cuerpos. Estas expresiones permitieron a Black introducir los términos de caloría, capacidad calorífica, calor latente y calor sensible.

ANEXO 3

Ciclo Stirling

Ejemplo (Seidman y Michalik, 1991)

Sea el siguiente ciclo reversible que opera entre dos temperaturas:

$T_1 = 424 \text{ K}$	expansión isotérmica	$T_2 = 424 \text{ K}$
	Etapa 1	
$V_1 = 6,96 \text{ L}$	\Rightarrow	$V_2 = 27,8 \text{ L}$
$P_1 = 10,0 \text{ atm}$		$P_2 = 2,50 \text{ atm}$
calentamiento isocórico		enfriamiento isocórico
\uparrow etapa 4		\downarrow etapa 2
$T_4 = 300 \text{ K}$	\Leftarrow	$T_3 = 300 \text{ K}$
$P_4 = 6,96 \text{ L}$	etapa 3	$V_3 = 27,8 \text{ L}$
$V_4 = 7,07 \text{ atm}$	compresión	$P_3 = 1,77 \text{ atm}$
	Isotérmica	

Este ciclo, llamado ciclo de Stirling, consiste de cuatro etapas reversibles, y usa 2 moles de gas ideal monoatómico como fluido de trabajo. Se puede calcular el calor transferido Q y el trabajo W para cada etapa del ciclo.

Etapa 1: Puesto que ésta es una expansión isotérmica reversible:

$$W_1 = -nRT_1 \ln(V_2/V_1) = -9,76 \times 10^3 \text{ joules}$$

Como este fluido de trabajo es un gas ideal y el proceso es isotérmico, $\Delta U = 0$ y $Q_1 = -W_1$

Etapa 2: Puesto que no hay cambio de volumen durante esta etapa $W_2 = 0$, y

$$\Delta U = Q_2 = C_v(T_3 - T_2) = -3,09 \times 10^3 \text{ joules}$$

Etapa 3: Para una compresión isotérmica reversible

$$W_3 = nRT \ln(V_4/V_3) = 6,91 \times 10^3 \text{ joules}$$

ΔU también es cero y $Q_3 = -W_3$

Etapa 4: No hay cambio de volumen en esta etapa, y $W_4 = 0$. De este modo,

$$\Delta U = Q_4 = C_v(T_1 - T_4) = 3,09 \times 10^3 \text{ joules}$$

La energía térmica que es transferida al ciclo es:

$$Q = Q_1 + Q_4 = 12,86 \times 10^3 \text{ joules}$$

El trabajo total realizado durante el ciclo es:

$$W = W_1 + W_3 = -2,85 \times 10^3 \text{ joules}$$

y la eficiencia del ciclo Stirling reversible es:

$$\eta = -W/Q = 0,222$$

Esta eficiencia es más baja que la de un ciclo de Carnot operando entre los mismos límites de temperatura; en efecto, una máquina de Carnot que opere entre estas temperaturas tendrá una eficiencia de $\eta = 1 - T_4/T_1 = 0,29$. La razón por la que el ciclo de Stirling tiene una eficiencia menor es que este ciclo requiere de mucho más que dos reservorios de temperatura para operar reversiblemente, incluyendo transferencias noisotérmicas de energía térmica. Una forma de incrementar la eficiencia del ciclo de Stirling es utilizando un regenerador (Salter, 2000), el cual permite que el calor perdido durante el enfriamiento isocórico sea reutilizado en el calentamiento isocórico de la siguiente etapa del ciclo, por lo que las transferencias de energía térmica en el ciclo ocurren en los dos reservorios isotérmicos, es decir en las etapas 1-2 y 3-4 del ciclo, de acuerdo con esto:

$$Q = -W_1 = 9,76 \times 10^3 \text{ joules}$$

$$W = -2,85 \times 10^3 \text{ joules}$$

Entonces $\eta = 0,29$

Salter (2000) plantea que otro ciclo reversible donde se observa este comportamiento es el siguiente:

$T_1 = 424 \text{ K}$	expansión isotérmica	$T_2 = 424 \text{ K}$
	Etapa 1	
$V_1 = 6,96 \text{ L}$	\Rightarrow	$V_2 = 27,8 \text{ L}$
$P_1 = 10,0 \text{ atm}$		$P_2 = 2,50 \text{ atm}$
calentamiento isocórico		enfriamiento adiabático
\uparrow etapa 4		\downarrow etapa 2
$T_4 = 300 \text{ K}$	\Leftarrow	$T_3 = 300 \text{ K}$
$P_4 = 6,96 \text{ L}$	etapa 3	$V_3 = 46,7 \text{ L}$
$V_4 = 7,07 \text{ atm}$	compresión	$P_3 = 1,05 \text{ atm}$
	isotérmica	

Para este caso la eficiencia es $\eta = 0,26$, menor para una máquina de Carnot que funcione entre las mismas dos temperaturas, como es de esperarse.

