

Detección y Clasificación de Errores Conceptuales en Calor y Temperatura



Antonio Lara-Barragán Gómez^{1,2}, Alberto Santiago Hernández¹

¹Departamento de Física, Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías, Universidad de Guadalajara, Av. Revolución 1500, Col. Olímpica, Sector Reforma, Guadalajara, Jal. México.

²Escuela de Ingeniería Industrial, Universidad Panamericana campus Guadalajara, Av. Circunvalación Poniente no. 49, Cd. Granja, Zapopan, Jal. México.

E-mail: alara@up.edu.mx

(Recibido el 10 de Marzo de 2010; aceptado el 14 de Abril de 2010)

Resumen

Se presenta un estudio descriptivo sobre errores conceptuales que alumnos de primer ingreso a la universidad tienen sobre los conceptos de calor y temperatura. Éstos se obtienen de la aplicación de un examen de diagnóstico y se clasifican de acuerdo con una taxonomía previamente establecida en la literatura. A partir de los resultados, se propone una estrategia didáctica para la superación de tales errores conceptuales.

Palabras clave: Calor, temperatura, error conceptual, enseñanza de la física, aprendizaje

Abstract

A descriptive study on alternative concepts handled by freshmen in our university is presented. The study is referred to heat and temperature. The alternative concepts are obtained from a conceptual test and are classified following a known taxonomy found in the literature. A didactic strategy to overcome the alternative conceptions is then presented.

Keywords: Heat, temperature, misconception, physics teaching, learning

PACS: 01.30.lb, 01.40.gb, 01.50.Zv, 44.10.+i

ISSN 1870-9095

I. INTRODUCCIÓN

La termodinámica es una de las ramas más generales de la física clásica, cuyo impacto es evidente por la gran cantidad de aplicaciones en la enseñanza y en la práctica. Sus dos pilares fundamentales, en el nivel introductorio, son los conceptos de calor y de temperatura, y como en muchos otros aspectos de la física clásica, la mayoría de los estudios relacionados con la conceptualización y la pedagogía se han llevado a cabo en niveles de educación media y media superior [1]. Los puntos más relevantes para una enseñanza adecuada de conceptos termodinámicos los aborda Arons [2], mientras que otras formas de acercarse a la conceptualización se encuentran en los libros de Swartz y Miner [3] y de Knight [4]. En general, estos últimos autores mencionan que los errores de concepto (EC) más comunes son que el calor es una propiedad independiente de la masa de un objeto y la temperatura es una medida de su intensidad [5]. Asimismo, también señalan que con frecuencia se considera que calor y temperatura son sinónimos.

De entre las causas de confusión encontradas en la literatura, sobresale la argumentación de Jewett sobre el uso del lenguaje [6]. Su línea de razonamiento establece que la palabra *calor* no es un nombre en sí misma; es el nombre de un *proceso* –por el cual la energía se transfiere– pero no es el nombre de lo que se transfiere. De acuerdo con esto, el uso de frases como “transferencia de calor”, “flujo de calor” y “el calor irradiado hacia fuera”, representan usos incorrectos de la palabra *calor*, al referirse realmente a la energía. Por ejemplo, la primera de ellas, “transferencia de calor” significaría “transferencia de transferencia de energía”. A su vez, un posible origen de toda la confusión es que la multicitada palabra se utiliza en el lenguaje cotidiano de formas muy libres, como por ejemplo, “hace calor”, “tengo calor”, etc. Jewett arguye que no es posible lograr que toda la población utilice el término de la manera en nosotros lo usamos, pero sí podemos lograr que una fracción de ella, nuestros estudiantes, lo utilice al menos en las discusiones, exámenes y disertaciones de acuerdo con su significado físico.

Por otro lado, en otro estudio conducido por Yeo y Zadnik [7], los investigadores aseguran que, entre los estudiantes jóvenes, las creencias tienen un estatus superior al que tiene el conocimiento puesto que éstas “se consideran verdades irrefutables pues no requieren demostración o justificación”. En particular, en el tema que nos ocupa, Yeo y Zadnik reportan que muchos de los conceptos que tienen los estudiantes dependen del contexto, y las explicaciones sólo las relacionan con situaciones aisladas o únicas. Además, tienden a no aplicar lo “aprendido” en las aulas a situaciones cotidianas, sino que es más probable que utilicen concepciones alternativas, tales como sus creencias. También argumentan que frases cotidianas como “tomar la temperatura a alguien” conducen a las creencias que causan confusión y conflicto con los conceptos físicos. Esto se relaciona muy cercanamente con los argumentos de Jewett.

Dos trabajos reportados a principios de la década de los 90's, muestran que la inquietud por la cantidad de errores conceptuales en Calor y Temperatura, no es nueva. El primero de ellos, de Bauman [8] muestra líneas de argumentación que critica los libros de texto de esa década, así como el uso inapropiado del lenguaje en el salón de clases. De acuerdo con él, tal uso de lenguaje acarrea como consecuencia la “perpetuación de errores de concepto” y trabaja en contra de nuestros mayores esfuerzos por aclarar los significados. Así, de acuerdo con Bauman, una de las dificultades es que la terminología empleada forma parte del lenguaje profano cotidiano, por lo que el uso generalizado y conceptualmente indiscriminado representa un serio obstáculo para una conceptualización adecuada. El segundo trabajo, de Ralph Baierlein [9], presenta un estudio exhaustivo sobre el concepto de temperatura, en el que subraya lo que él denomina el error de concepto más común: temperatura absoluta significa energía cinética promedio (hasta un factor constante). Este mismo error es señalado y documentado por Swartz y Miner [3] y Knight [4]. De acuerdo con la discusión de Baierlein, tal interpretación de la temperatura proviene de una interpretación errónea de las ecuaciones de la Teoría Cinética de los Gases en las que, efectivamente, la temperatura juega un papel esencial para determinar propiedades del sistema relacionadas con la energía, pero de ninguna manera proporcionan una interpretación o definición de la temperatura.

A partir de estas observaciones, surge nuestra necesidad de identificar los conceptos que poseen estudiantes de primer ingreso a la universidad con la finalidad de aplicar una estrategia didáctica diseñada *ad hoc* para compararla, de acuerdo con los resultados obtenidos después de su aplicación, con un método tradicional de enseñanza. Las hipótesis que guiaron el presente trabajo son: (a) es posible identificar y clasificar los preconceptos y errores de concepto de estudiantes de nuevo ingreso y (b) la aplicación de una estrategia de enseñanza diseñada expresamente para enfrentar los errores de concepto identificados puede ayudar para

superarlos. La metodología utilizada en esta indagación se describe en la siguiente sección.

II. METODOLOGÍA

Siguiendo a Cohen y Manion [10] se sigue un diseño cuasi experimental para el que se selecciona un grupo de control y dos grupos experimentales. El diseño sigue el esquema O_i-X-O_f donde O_i representa la observación inicial (pretest), X la aplicación de la propuesta de enseñanza y O_f la observación final (postest). En los grupos experimentales se aplica el esquema completo, mientras que en el grupo de control no se aplica la propuesta de enseñanza, sino solamente se realizan las observaciones inicial y final. En estos esquemas lo que se denomina *observación* consiste en una prueba de diagnóstico. De esta manera, la metodología consta de cinco etapas: en la primera se seleccionan los grupos experimentales y de control. La segunda consiste en el acopio de material pertinente (investigación documental), mientras que en la tercera etapa se desarrolla la prueba de diagnóstico. En la cuarta se aplica el examen como pretest y postest y la quinta etapa tiene como finalidad analizar los datos y evaluar la propuesta de enseñanza.

Los grupos experimentales y de control forman parte de los grupos de primer ingreso al Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías (CUCEI) de la Universidad de Guadalajara (UdG). Por consiguiente, los antecedentes académicos de los estudiantes participantes se remontan al bachillerato. Los grupos experimentales se denominaron, arbitrariamente, grupo 1 y grupo 2. El grupo 1 tuvo un total de 24 alumnos, mientras que el grupo 2, 20 alumnos. Es de hacer notar que el sexo de los alumnos no se consideró como una variable, sino solamente que fuesen estudiantes de primer ingreso provenientes del bachillerato en áreas relacionadas con las ciencias básicas, física, química y matemáticas.

La selección del grupo de control se realiza de acuerdo con resultados previos sobre la práctica docente de algunos de los profesores adscritos al Departamento de Física del CUCEI de la UdG [11]. Se pidió al profesor cuya perfil docente se acerca más a la práctica tradicional (clase mayormente expositiva) su apoyo para utilizar su grupo como grupo de control. Este grupo también fue del turno vespertino y tuvo un total de 30 alumnos participantes.

El grupo de control se conduce de manera tradicional, esto es, siguiendo un método esencialmente expositivo, centrado en el contenido y en profesor, mientras que los grupos experimentales se conducen siguiendo la estrategia didáctica descrita en la sección V.

La prueba de diagnóstico desarrollada consiste de 25 reactivos de opción múltiple. Esto se llevó al cabo de la siguiente manera. Lo primero que se hizo fue seleccionar, con base en las experiencias previas, conceptos que presentan dificultad para los estudiantes de nuevo ingreso a la universidad de acuerdo con las discusiones anteriores, tomando como base el examen de Yeo y Zadnik [7] y el de

Meltzer [5]. Tal examen se aplicó en el semestre Agosto-Diciembre de 2009 al inicio y al final como *pretest* y *postest*, respectivamente.

El instrumento de diagnóstico así diseñado sigue un lineamiento estrictamente conceptual con las siguientes características:

1. Es un examen exclusivamente de diagnóstico y no para medir algún tipo de conocimiento como sería el caso de un examen de acreditación.
2. Por ser un examen de diagnóstico cuya finalidad es, por un lado, detectar errores conceptuales (EC) para posteriormente clasificarlos. Por otro lado, el diseño de las preguntas es tal, que permite evaluar habilidades de pensamiento, creencias de sentido común y EC, por lo que tal examen no es susceptible de validación por métodos semejantes al análisis de Rasch [12] que, entre otras cosas, sus resultados hablan del grado de dificultad de cada reactivo con base en el número de respuestas correctas, resultado *a posteriori* que podría ser discutible.

III. RESULTADOS

En esta sección se analizan los resultados correspondientes al promedio de respuestas correctas en la prueba de diagnóstico. Esto es, aquí se consigna el valor de la media estadística y su desviación estándar para los grupos experimentales y el de control, así como los resultados globales de los tres grupos. La naturaleza del examen de diagnóstico no permite un cálculo directo simple de la media en las respuestas correctas, por lo que se ha considerado que la forma más adecuada para realizar este análisis es mediante el uso de la distribución binomial [13]. Así, la aplicación de las fórmulas se realiza de la siguiente manera: Para la media se tiene $\mu = np$, mientras que para la desviación estándar se tiene $\sigma = \sqrt{npq}$, donde p es la probabilidad favorable (o éxito), q la probabilidad desfavorable (o fracaso), tal que $q = 1-p$, y n el número de pruebas repetidas. En este caso, n representa el número total de reactivos del examen, esto es $n = 25$. La probabilidad p se calcula dividiendo el número total de respuestas correctas –la que a su vez no es más que la suma de todas las respuestas correctas para un grupo dado- entre el número total de preguntas contestadas por ese grupo, que se calcula multiplicando n por el número de estudiantes.

Por otro lado, dentro de los estudios que se han realizado para evaluar los resultados de exámenes de diagnóstico análogos al que aquí se ha aplicado, existe el llamado factor de Hake [14], el cual representa una medida de la *ganancia posible* (mejora, adelanto). Richard Hake, de la Universidad de Indiana estudió los resultados de un examen de diagnóstico de características similares a las del examen aquí utilizado, aplicado de la misma manera que en el caso presente, pero a más de 6 500 estudiantes de 62 cursos similares al curso *Física* y al curso *Introducción a*

la Física [14]. Hake encontró que los cursos en los que se utiliza algún método interactivo -basado en un programa educativo reformado con base en lo que se denomina Investigación Educativa en Física o, de sus siglas en inglés, PER (Physics Education Research)- obtuvieron muy altas ganancias posibles en comparación con cursos tradicionales. Encontró también que en diferentes instituciones con diferentes resultados en exámenes de opción múltiple estandarizados (que van desde el 25% al 75%), los cursos de Física con estructuras similares, alcanzan proporciones similares de ganancia posible. Entonces, el factor de Hake es un buen indicador del mérito académico de un método de enseñanza.

Los resultados generales en la Universidad de Indiana muestran que los grupos con enseñanza tradicional tienen un factor de Hake de 0.16, mientras que los basados en cursos con métodos de enseñanza basados en PER, muestran factores de Hake que oscilan entre 0.35 y de 0.41, dependiendo de los métodos de enseñanza utilizados. El factor de Hake es:

$$h = \frac{\text{postest}(\%) - \text{pretest}(\%)}{100\% - \text{pretest}(\%)} \quad (1)$$

En este trabajo se ha calculado el factor de Hake para los resultados obtenidos de la prueba de diagnóstico, los cuáles se presentan a continuación. La Tabla I siguiente muestra los resultados de la aplicación de la prueba de diagnóstico. La media reportada se refiere al promedio de respuestas correctas en los grupos experimentales. La Tabla II resume los mismos resultados para el grupo de control. Se evidencia un aumento en los valores de la media, tanto como en la desviación estándar, lo cual indica un pequeño aumento en la dispersión del número de respuestas correctas. En términos generales, el Grupo 1 aumentó sus respuestas correctas en un 49.9%, mientras que el Grupo 2 en un 76.8%. En contraste, el grupo de control logró un 20.2% de aumento en respuestas correctas.

Con los resultados de las Tablas I y II se calcula factor de Hake (ecuación 1), cuyos valores se resumen en la Tabla III, los cuales muestran que la estrategia didáctica empleada (Secc. V) tuvo éxito en ambos grupos experimentales; puede verse que inclusive el grupo experimental 2 (GE2) supera los valores reportados por Redish y Steinberg [14].

TABLA I. Media y desviación estándar para pretest y postest en grupos experimentales.

	Grupo 1		Grupo 2		
	Media	Desviación estándar	Media	Desviación estándar	
Pretest	9.17	2.41	Pretest	8.90	2.39
Postest	13.75	2.49	Postest	15.74	2.41

TABLA II. Media y desviación estándar para pretest y postest en el grupo de control.

	Media	Desviación estándar
Pretest	9.87	2.44
Postest	11.86	2.50

TABLA III. Factores de Hake para el grupo de control (GC) y los grupos experimentales (GE1 y GE2).

	Factor de Hake
GC	0.13
GE1	0.29
GE2	0.42

IV. ANÁLISIS DE ERRORES CONCEPTUALES

En esta sección se presentan los EC que mayor frecuencia obtuvieron en los resultados del pretest, los cuales se han clasificado en cuatro categorías: Calor, Temperatura, Transferencia de energía y cambio de temperatura, y Propiedades térmicas de las sustancias. Para cada uno se especifica, en forma de porcentaje, la incidencia de cada uno de ellos. El pretest se aplicó a un total de 74 estudiantes.

1. Calor

- El frío es algo que se puede transferir de un cuerpo a otro. 75.7%
- El calor y el frío son sustancias. (En el sentido de que son como el agua que puede fluir dentro de una tubería, el frío y el calor pueden fluir dentro de un metal) 66.2%
- Un cuerpo frío no contiene calor (frío se define como ausencia de calor). 97.3%
- Calor y temperatura se refieren a lo mismo. 79.7%

2. Temperatura

- Temperatura es la medida del calor. 95.9%
- Temperatura y calor no están relacionados con transferencia de energía. 60.8%
- La temperatura de un cuerpo depende de su tamaño. 66.2%

3. Transferencia de energía y cambio de temperatura

- El proceso de calentar siempre conduce a un aumento de temperatura. 91.8%
- El calor sólo se “mueve” de abajo hacia arriba (como el caso de la convección en el agua). 90.5%

- La temperatura puede transferirse de un cuerpo a otro. 90.5%
- 4. Propiedades térmicas de las sustancias**
- El punto de ebullición del agua es únicamente 100°C. 60.8%
 - El hielo está a 0°C y no puede cambiar su temperatura. 63.5%
 - El agua no puede estar a 0°C. 66.2%
 - El vapor está a más de 100°C. 71.6%
 - Los objetos que se calientan rápidamente no necesariamente se enfrían rápidamente. 59.5%
 - Las burbujas en el proceso de ebullición del agua contienen aire u oxígeno. 90.5%
 - Materiales diferentes contienen la misma cantidad de calor. 66.2%

Estos resultados concuerdan mayormente con los EC reportados en la literatura. Uno que no aparece es el de la “definición de frío” como ausencia de calor. Este EC es especialmente significativo, pues en entrevistas informales, se evidencia que es la manera como se define en el ciclo escolar anterior.

V. ESTRATEGIA DIDACTICA

Uno de los EC más comunes es el de “temperatura es la medida del calor”. Así que antes de llegar al concepto adecuado de calor es conveniente dejar en claro algunas situaciones. La primera es que muchos de los conceptos tienen que ver con una experiencia directa, por lo que será importante convertir el aula en un laboratorio rudimentario. La siguiente estrategia didáctica contiene elementos propuestos por Arons [2], aunados a otros desarrollados a partir de nuestra propia experiencia. El tema puede comenzar con la pregunta: ¿cómo sabemos que un objeto está caliente? La respuesta es tan obvia que el grupo no puede dar la respuesta: “lo tocamos y lo sentimos.” Bien; ahora, siguiente pregunta: ¿Qué ocurre cuando ponemos en contacto un objeto caliente con otro frío? Ya en confianza siempre habrá alguien que conteste en términos de temperaturas, pero lo aconsejable en este momento es tratar de que lo expliquen en términos más intuitivos, asociados con sensaciones. Al fin alguien contestará con éstas u otras palabras semejantes: “El frío se calienta y el caliente se enfría”. Bien; siguiente cuestión. Como en física estamos interesados en mediciones y números objetivos, para una situación en la que tenemos, por ejemplo tres recipientes, uno lleno de agua recién obtenida de un grifo, otro con agua que se ha calentado a la flama durante unos minutos y un tercero con agua hirviendo, ¿cómo podemos cuantificar qué tan caliente está el agua en cada recipiente? Es claro que necesitamos una escala definida en unidades apropiadas. Es así que se llega a conceptuar la temperatura como *la medida de qué tan caliente está un objeto* en una escala adecuada [9]. Ahora, ¿qué ocurre, en términos de temperaturas, en el caso anterior cuando aproximamos dos

objetos uno caliente y otro frío? ¿cómo explicar lo que sucede cuando tenemos juntos dos objetos a diferentes temperaturas? La respuesta a la que deben llegar para la primera pregunta es que “llega un momento en que se igualan sus temperaturas”, mientras que para la segunda es: “el caliente le transfirió energía al frío”. El punto es que por diálogo socrático [15] hemos de hacer llegar a los alumnos y alumnas a tales respuestas.

Desde esta perspectiva podemos, ahora, evocar la noción de interacción que debe haberse desarrollado previamente en otros temas relacionados con fuerzas (por ejemplo, Gravitación o Electricidad) para hacer ver que, primero, la temperatura se concibe como un número observado en un la escala de un termómetro, mientras que la palabra “calor” se reserva para una nueva idea: la interacción asociada con los cambios de temperatura. De esta manera se aclara que tal interacción, que puede denominarse interacción térmica, no es lo mismo que las lecturas en el termómetro.

En este momento de la clase se hace mención de que en las interacciones térmicas, como en todo tipo de interacción, existe un proceso involucrado por el que un sistema (u objeto) influencia a otro con el resultado que los estados iniciales de cada uno cambian, y las lecturas del termómetro por sí solas no describen la interacción. Joseph Black (1728-1799) fue el primero que identificó este proceso y lo bautizó con el nombre de “transferencia de calor” y es a él a quien debemos la definición de calor en este sentido, lo que lo distingue de la temperatura. Por consiguiente, en la terminología científica, calor y temperatura no son intercambiables, mucho menos sinónimos. Finalmente, debe quedar perfectamente claro que cuando hablamos de calor, nos referimos estrictamente a un *proceso de transferencia de energía* por el que cambia la temperatura de al menos uno de los objetos que interacciona térmicamente. A partir de aquí se discuten las diferentes escalas de temperatura y las unidades para medir el calor, así como la descripción de los diferentes procesos de transferencia de energía, convección, conducción y radiación.

Una vez inventado el concepto cualitativo de calor como transferencia de energía, debemos transitar hacia lo cuantitativo, esto es, ¿cómo idear una manera de medirlo cuantitativamente para hablar de la “cantidad de energía transferida”? Un fundamento razonable para ello está dado por las ideas de un gran número de predecesores de Black, las cuales fueron refinadas e interpretadas claramente por Black mismo. La idea se basaba en la observación del comportamiento del agua de la manera siguiente: cuando dos cantidades iguales de agua, inicialmente a diferentes temperaturas, se mezclan, se observa que la temperatura final es prácticamente igual al promedio de las dos temperaturas iniciales (siempre que se evite o no se considere la interacción con un tercer sistema o con los alrededores).

Algebraicamente, esto significa que:

$$T_{eq} = \frac{T_1 + T_2}{2}. \quad (2)$$

Donde T_{eq} es la temperatura final de la mezcla, esto es, la temperatura de equilibrio térmico, T_1 y T_2 son las temperaturas iniciales de las dos muestras de agua. De aquí es cuestión de pasos algebraicos estándar concluir que:

$$2T_{eq} = T_1 + T_2 \Rightarrow T_{eq} - T_2 = -(T_{eq} - T_1). \quad (3)$$

Lo que significa que los dos cambios de temperatura (definidos de la manera estándar, valor final menos valor inicial) son iguales en magnitud y opuestos en signo.

El siguiente paso es analizar el caso cuando se mezclan cantidades de agua diferentes que se encuentran a temperaturas iniciales diferentes. La evidencia experimental muestra que la temperatura final no es el promedio entre las dos temperaturas iniciales, sino que siempre está más cerca del valor de la temperatura inicial de la masa de agua mayor. De hecho, los dos cambios de temperatura resultan ser inversamente proporcionales a las masas de agua, y la masa mayor experimenta el cambio menor.

Algebraicamente, habrá que probar que se cumple la relación:

$$\frac{T_{eq} - T_1}{T_{eq} - T_2} = \frac{m_1}{m_2} \Rightarrow m_2 \Delta T_2 = -m_1 \Delta T_1. \quad (4)$$

Donde m_1 y m_2 son las masas de las diferentes muestras de agua, y ΔT_1 y ΔT_2 los cambios respectivos en las temperaturas.

En este momento debe hacerse notar, por un diálogo socrático [15], que el número final del lado izquierdo de la última ecuación solo depende de los números asociados con el agua a menor temperatura, mientras que el número final del lado derecho solo depende de los números asociados con el agua a mayor temperatura. Por consiguiente, cada lado de la ecuación describe algo que “aconteció” a cada cantidad de agua por separado. Entonces, esta situación conduce a pensar que el número $m_2 \Delta T_2$ del lado izquierdo de la ecuación 4 representa la cantidad de energía *ganada* por el agua a menor temperatura, y el número $m_1 \Delta T_1$ del lado derecho, la cantidad de energía *perdida* por el agua a temperatura mayor.

El siguiente paso es hacer notar que en la interpretación de los números de las dos últimas ecuaciones como cantidades de energía transferidas (como cantidades de calor), se ha implicado inmediatamente que también hemos “creado” una unidad de medida. De aquí la definición de caloría como la cantidad de energía transferida (cantidad de calor) que cambia la temperatura de 1 g de agua en 1°C.

A. Calor específico y capacidad calorífica

Para introducir el concepto de capacidad calorífica se hace referencia a los experimentos de Black por los que demostró que la ecuación 3 no predecía correctamente el cambio de temperatura si eran dos sustancias *diferentes* las que interactuaban térmicamente; esto es, si una sustancia

es agua y la otra es hierro, cobre o algún otro material. También demostró que usando el volumen en lugar de la masa para medir la cantidad de material, tampoco satisfacía la ecuación, mientras que si usaba la masa siempre se satisfacía.

Los experimentos realizados, condujeron a Black a concluir que, aunque las otras sustancias se comportaban térmicamente de manera diferente que el agua, cada sustancia podía compararse sistemáticamente con el agua en cuanto a su capacidad para cambiar su temperatura con transferencias de calor. Por ejemplo, se encuentra que 100 g de mercurio siempre se comportan como 3.3 g de agua, lo que significaba que el agua tenía una mayor “capacidad” para el calor, en el sentido de que una cantidad de calor dada le produciría, a 100 g de agua, un cambio de temperatura menor que el que le produciría a 100 g de mercurio.

Como Black encontró que tales comparaciones eran mensurables y reproducibles, introdujo una constante de proporcionalidad que describía esta idea, multiplicando al producto $m\Delta T$, por lo que la ecuación se modificaba a:

$$c_s m_s \Delta T_s = -m_a \Delta T_a . \quad (5)$$

Donde c_s es la constante de proporcionalidad sugerida.

En la ecuación anterior, el término de la derecha representa la cantidad de calor ganado o perdido por m_a gramos de agua, mientras que $c_s m_s \Delta T_s$ representa el calor ganado o perdido por alguna otra sustancia s . Si s es agua, $c_s = 1$, mientras que si es otra sustancia, la cantidad $c_s m_s$ se interpreta como la relacionada con una cantidad de agua equivalente; por ejemplo, en el caso del mercurio, para el que el valor numérico citado, 100 g eran equivalentes a 3.3 g de agua, c_s para el mercurio debe ser 0.033. Siguiendo a Black, la cantidad c_s se denomina “calor específico” o “capacidad calorífica” de la sustancia.

El siguiente paso es la determinación de las unidades de c_s por medio de un análisis de unidades de las cantidades con las que se relaciona en los términos de la ecuación con la aclaración de que para masa en gramos y temperatura en grados Celsius, la unidad de calor es el caloría, por lo que las unidades de calor específico deben ser cal/g°C. Existen, además, otras unidades de uso común aparte de la caloría. La cantidad de calor que eleva la temperatura de 1 kg de agua en $1^\circ C$ es 1000 cal y se denomina kilocaloría (kcal).

Lo que sigue a continuación es el uso de las ecuaciones y conceptos anteriores en la mayor cantidad de ejemplos y problemas posibles, dadas las condiciones de tiempo.

B. Confrontación de otros errores

Otros dos EC significativos por su incidencia son que el vapor se encuentra a más de $100^\circ C$ y que dentro las burbujas que se forman en la ebullición (del agua) hay aire u oxígeno. Para el primero de ellos basta una confrontación experimental que se puede desarrollar fácilmente como experimento de cátedra o dejarse como

tarea. En una tetera se pone a calentar agua hasta la ebullición. Puede observarse que por la boca de salida de la tetera sale lo que comúnmente se denomina vapor, el cual es visible. Una observación cuidadosa de la región muy cercana a la boca de salida evidencia que el “vapor” visible se forma alrededor de un milímetro de distancia; antes de ello no se observa nada. Por consiguiente, lo que estamos observando, no es realmente vapor, el cual no es visible pues está formado por moléculas de agua de alta energía cinética de traslación. Lo observable agua líquida, el vapor se ha condensado por contacto con el aire y en consecuencia su temperatura es menor a $100^\circ C$. Lo invisible se encuentra, cuando más a $100^\circ C$.

Por otro lado, sobre el contenido de las burbujas, cuando la respuesta es “aire”, se pueden hacer estas preguntas u otras semejantes: “¿Y de dónde sale ese aire? ¿cómo puede atraparse dentro de la burbuja? ¿su presencia no aumenta la densidad de la burbuja y por tanto no flotarían?” Si el comentario del alumnado es que dentro de la burbuja hay oxígeno, se puede preguntar: “¿De dónde proviene el oxígeno? ¿la temperatura de ebullición es suficiente como para disociar la molécula de agua? ¿por qué no hay también hidrógeno?” Después de la confrontación, por diálogo socrático se lleva a que los estudiantes concluyan que el contenido de la burbuja es agua en fase gaseosa.

VI. CONSIDERACIONES FINALES

De los resultados obtenidos se ha probado la veracidad de las dos hipótesis iniciales. La clasificación de errores conceptuales en las cuatro categorías propuestas muestra que existen, efectivamente, fuentes de desorientación conceptual. Nos parece claro que algunos de los errores conceptuales han sido imbuídos por los profesores que nuestros alumnos tuvieron en ciclos anteriores, como el más acusado de “frío es la ausencia de calor” y los referidos a la categoría 3, transferencia de energía y cambio de temperatura. Algunos otros son producto de la interpretación inexperta de experiencias cotidianas como que el vapor se encuentra a más de $100^\circ C$.

Los resultados muestran, también, que la estrategia desarrollada produce resultados satisfactorios en la superación de errores conceptuales. Los factores de Hake indican que, en promedio, la cantidad de respuestas correctas al cuestionario conceptual aumentó, lo que quiere decir que los estudiantes lograron una mejor concepción y percepción de los fenómenos físicos en cuestión.

Conocer los EC dominantes de nuestros estudiantes antes de comenzar un curso o un tema, es una condición para lograr superarlos por medio del desarrollo de estrategias didácticas *ad hoc*. La premisa que guía este trabajo y debe guiar cualquier otro, es que el aprendizaje es la meta suprema de todo esfuerzo educativo; nadie puede decir que ha enseñado algo si el sujeto de la enseñanza no logró aprender. El caso de los conceptos de calor y temperatura, por manejarse frecuentemente en la vida cotidiana, han de ocupar un lugar prioritario en el

quehacer educativo en todos los niveles. La estrategia didáctica presentada, muestra una secuencia paso a paso de su enseñanza y puede constatar, por los resultados del valor del factor de Hake, que ha funcionado en nuestro caso.

VII. REFERENCIAS

- [1] Una extensa revisión puede encontrarse en McDermott, L. C. y Redish, E. F., *Resource Letter: PER-1: Physics Education Research*, American Journal of Physics **67**, 755-767 (1999). Secc. IV A 4. También puede consultarse: www.physics.iastate.edu/per/index.html.
- [2] Arons, A. B., *Teaching Introductory Physics*, (John Wiley and Sons Inc. USA, 1997). Cap. 3, Tercera Parte.
- [3] Swartz, C. E. and Miner, T., *Teaching introductory physics: a sourcebook*, (Springer-Verlag New York, Inc., 1998).
- [4] Knight, R. D., *Five Easy Lessons. Strategies for Successful Physics Teaching*, (Addison-Wesley, San Francisco, 2004).
- [5] Meltzer, D. E., *Investigation of students' reasoning regarding heat, work and the first law of thermodynamics in an introductory calculus-based general physics course*, American Journal of Physics **72**, 1432-1446 (2004).
- [6] Jewett, J. W., *Energy and the Confused Student III: Language*, The Physics Teacher **46**, 149-153 (2008).
- [7] Yeo, S. and Zadnik, M., *Introductory Thermal Concept Evaluation: Assessing Students' Understanding*, The Physics Teacher **39**, 496-504 (2001).
- [8] Bauman, R. P., *Physics that Textbook Writers Usually Get Wrong. II Heat and Energy*, The Physics Teacher **30**, 6, 353-356 (1992).
- [9] Baierlein, R., *The Meaning of Temperature*, The Physics Teacher **28**, 94-96 (1990).
- [10] Cohen, L. y Manion, L., *Métodos de Investigación Educativa*, (Editorial La muralla, Madrid, 1990). Cap.8.
- [11] Lara-Barragán Gómez, A., Aguiar Barrera, M. A., Cerpa Cortés, G. y Núñez Trejo, H., *Relaciones Docente-Alumno y Rendimiento Académico. Un caso del Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías de la Universidad de Guadalajara. Sinéctica*, **33**, (2009). http://portal.iteso.mx/portal/page/portal/Sinectica/Revista/SIN33_03
- [12] Tristán-López, *Análisis de Rasch para todos*. San Luis Potosí, International Engineering and Statistics, (1998).
- [13] Walpole, R. E., Myers, R. H. y Myers, S. L., *Probability and Statistics for Engineers and Scientists*, (Prentice Hall, Upper Saddle River, N. J., 1998)
- [14] Redish, E. F. and Steinberg, A., *Teaching Physics: Figuring Out What Works*, Physics Today **52**, 24-30 (1999).
- [15] Julian, G. M., *Socratic dialogue –with how many?*, The Physics Teacher **33**, 338-339 (1995).

ANEXO

Cuestionario conceptual sobre calor y temperatura

El siguiente cuestionario tiene fines exclusivamente estadísticos; no influirá en tu calificación. Contéstalo de manera anónima y por ti mismo. Los resultados serán de utilidad para mejorar los procesos educativos en la universidad, por lo que es importante tu colaboración. Gracias.

- ¿Cuál es la temperatura más probable de los cubos de hielo que se encuentran en el congelador de un refrigerador de casa?
 - 10°C
 - 0°C
 - 5°C
 - Depende del tamaño de los cubos
- Supón que sacas cuatro cubos de hielo del congelador, luego agitas el agua con el hielo hasta que éste se derritan por completo. ¿Cuál es la temperatura más probable del agua en ese momento?
 - 10°C
 - 0°C

- 5°C
 - 10°C
- Sobre la parrilla de la estufa se encuentra una cafetera metálica llena de agua. El agua ha comenzado a hervir rápidamente. La temperatura más probable del agua es alrededor de:
 - 88°C
 - 97°C
 - 110°C
 - Ninguno de los anteriores
 - Cinco minutos después, el agua en la cafetera sigue hirviendo. Ahora la temperatura más probable del agua es alrededor de:
 - 88°C
 - 97°C
 - 110°C
 - 120°C
 - ¿Cuál crees que sea la temperatura del vapor que sale de la cafetera mientras hierve el agua?
 - 88°C
 - 97°C
 - 110°C
 - 120°C

6. **Al observar el agua mientras hierve, ves las burbujas que se forman, ¿qué crees que hay dentro de las burbujas?**
- Aire
 - Oxígeno e hidrógenos gaseosos
 - Vapor de agua
 - Nada
7. **Una persona cree que debe usar agua hirviendo para preparar una taza de té, y te dice: “No podría hacer té si me encontrara acampando en la cima de una montaña muy alta porque el agua no hierve a grandes alturas”. ¿Cuál de las siguientes sería tu respuesta?**
- “Claro que sí hierve, pero a una temperatura menor que aquí en la ciudad”
 - “Eso no es cierto, el agua siempre hierve a la misma temperatura”
 - “El punto de ebullición del agua disminuye, pero el agua misma todavía se encuentra a 100 grados”
 - “Estoy de acuerdo, en la cima de la montaña el agua nunca llega a su punto de ebullición”
8. **Supón que sacas una lata de refresco y una botella de plástico del mismo refresco del refrigerador. Ambos refrescos permanecieron dentro del refrigerador durante toda la noche. Rápidamente les mides la temperatura al refresco de la lata por medio de un termómetro que introduces en el líquido. La temperatura es de 7°C. ¿Cuál será la temperatura más probable del refresco y de la botella de plástico?**
- Ambas son menores a 7°C
 - Ambas son iguales a 7°C
 - Ambas son mayores a 7°C
 - El refresco está a 7°C, pero la botella a una temperatura mayor
 - Depende de la cantidad de refresco y del tamaño de la botella
9. **Cinco minutos después levantas la lata de refresco y te das cuenta de que la superficie de la mesa que estaba debajo de la lata está más fría que el resto de la mesa. ¿Cuál de las siguientes explicaciones es la mejor para ese hecho?**
- Se ha transferido el frío de la lata a la mesa
 - No queda energía debajo de la lata
 - Algo del calor de la mesa se ha transferido a la lata
 - La lata hace que el calor por debajo de ella se aleje a través de la mesa
10. **Supón que después de cocer unos huevos en agua hirviendo, los enfrías poniéndolos en una olla de agua fría. ¿Cuál de los siguientes procesos explica mejor el enfriamiento?**
- La temperatura se transfiere de los huevos al agua
 - El frío se mueve del agua a los huevos
 - Los objetos se enfrían de manera natural
 - Se transfiere energía de los huevos al agua
11. **Una persona toma dos botellas de vidrio que contienen agua a 20°C y las envuelve en franelas. Una de las franelas está húmeda, mientras que la otra está seca. 20 min después mide la temperatura de cada una, y encuentra que la que se envolvió con la franela húmeda está a 18°C, mientras que la otra está a 22°C. La temperatura ambiente más probable durante el experimento era:**
- 26°C
 - 21°C
 - 20°C
 - 18°C
12. **Supón que tomas simultáneamente dos envases de cartón de leche, uno frío del refrigerador y otro a temperatura ambiente que se encontraba sobre la mesa de la cocina desde hacía un par de horas. ¿Por qué crees que el envase del refrigerador se siente más frío que el que estaba sobre la mesa? Comparado con el envase a temperatura ambiente, el envase frío...**
- Contiene más frío
 - Contiene menos calor
 - Es un mal conductor
 - Conduce el calor más rápidamente de tu mano hacia él
 - Conduce el frío más rápidamente a tu mano
13. **Es un hecho que las verduras en una olla de presión se cocinan más rápidamente que una olla normal sin tapa. ¿Cuál crees tú que sería la explicación más adecuada?**
- Porque la presión interna hace que el agua hierva a más de 100°C
 - Porque la presión alta genera más calor
 - Porque el vapor está a mayor temperatura que el agua en que se cocen las verduras
 - Porque la presión generada hace que el calor se reparta mejor por toda la comida
14. **Cuál de las siguientes afirmaciones completa mejor la frase: “sudar refresca la piel, porque el sudor...”**
- ... moja la superficie, y las superficies mojadas extraen más calor que las superficies secas”
 - ... saca el calor a través de los poros y lo esparce sobre la piel”
 - ... está a la misma temperatura que la piel, pero se evapora y así se lleva el calor”

- d. ... es ligeramente más frío que la piel debido a la evaporación, de manera que se transfiere calor de la piel al sudor”
- 15. ¿Por qué utilizamos suéteres o chamarras cuando hace frío?**
- Para mantener el frío afuera
 - Para generar calor
 - Para reducir la pérdida de calor
 - Las tres anteriores
- 16. ¿Cuál de las siguientes afirmaciones te parece más adecuada?**
- El frío es la ausencia de calor
 - Una sustancia invisible que puede fluir de un cuerpo a otro
 - El frío es ausencia de temperatura
 - Frijo y calor es lo mismo sólo que a temperatura diferentes
- 17. ¿Cuál de las siguientes afirmaciones te parece la mejor definición de temperatura?**
- La medida del calor de un cuerpo
 - La medida de la energía cinética de las moléculas de un gas
 - La lectura en un termómetro
 - La medida de qué tan caliente está un cuerpo
- 18. El calor es...**
- La cantidad de energía que tiene un cuerpo
 - La temperatura alta que tiene un cuerpo
 - Una sustancia invisible que puede fluir de un cuerpo a otro
 - La energía que se transfiere de un cuerpo caliente u otro frío
- 19. La temperatura de un cuerpo...**
- Es independiente del volumen del cuerpo
 - Depende del volumen del cuerpo
 - Depende de la cantidad de masa del cuerpo
 - Es independiente de la masa y del volumen del cuerpo
- 20. Supón que calientas 1 litro de agua en una estufa durante un cierto tiempo, de tal manera que su temperatura se eleva 2 °C. Si calientas ahora 2 litros de agua, en la misma estufa durante el mismo tiempo que calentaste el primer litro, ¿en cuánto se eleva su temperatura?**
- en 4 °C
 - en 2 °C
 - en 1 °C
 - en poco más de 2 °C
- 21. Cuando tocas la superficie de un objeto metálico que se encuentra a la sombra, la sientes fría. Esta sensación es porque...**
- Lo frío del metal se transfiere a la mano
 - Hay flujo de calor de la mano al metal
 - Los metales siempre son más fríos que el cuerpo
 - Las sensaciones de frío y caliente dependen de la situación
- 22. Supón que tienes 50 gramos de agua en un vaso y una pieza de metal, también de 50 gramos. Ambos materiales se encuentran a la misma temperatura. ¿Cuál de las siguientes afirmaciones te parece la más adecuada para esta situación?**
- El agua y el metal contiene la misma cantidad de calor por tener la misma temperatura
 - El agua tiene más calor porque su volumen es más grande
 - El metal tiene más calor porque es más pesado
 - El metal tiene menos calor porque es más denso
- 23. Supón que colocas al sol un vaso que contiene 100 gramos de agua y una pieza de metal también de 100 gramos. Es evidente que al cabo de unos minutos el metal está más caliente que el agua. Si los llevas a la sombra...**
- El agua se enfría más rápidamente
 - El metal se enfría más rápidamente
 - El agua y el metal se enfrían con la misma rapidez
- 24. Para cocinar un pastel en el horno es mejor ponerlo en la charola superior del horno porque...**
- Está más caliente porque la charola de metal tiende a concentrar el calor
 - Es más caliente en la parte superior porque el aire caliente es menos denso
 - No es posible que sea más caliente en la parte superior; el horno está igual de caliente en todo el interior
 - La parte superior es más caliente porque el calor tiende a subir
- 25. Puede un objeto estar más caliente que otro si tienen la misma temperatura?**
- No, porque la temperatura nos indica la cantidad de calor, entonces misma temperatura significa misma cantidad de calor
 - No, porque si uno está más caliente es porque tiene más temperatura
 - Sí, porque puede ser que uno tenga más masa que otro y por tanto más calor pero no más temperatura
 - Sí, porque calor y temperatura son cosas diferentes