

Implementación de una actividad de laboratorio para la integración de conceptos de termodinámica en el nivel secundario

REVISTA
DE
ENSEÑANZA
DE LA
FÍSICA

Implementation of a lab activity for the integration of thermodynamics concepts in secondary education

John Winter¹

¹Instituto Superior de Formación Docente N°804, Antúnez y Magallanes. CP 9200, Esquel, Chubut. Argentina.

E-mail: winterj.esq@gmail.com

(Recibido el 18 de mayo de 2019; aceptado el 8 de junio de 2019)

Resumen

El aprendizaje de conceptos termodinámicos como *calor específico* y *calor latente* suele conllevar varias dificultades, en particular considerando la diversidad de significados que porta un mismo término. Por este motivo comparto, en este artículo, un relato de una actividad de laboratorio que llevé a cabo en el marco de la residencia del Profesorado de Física, la cual considero de gran valor por su potencialidad para la consolidación e integración de estos conceptos.

Palabras clave: Laboratorio de física; Aprendizaje; Modelización; Termodinámica; Calor latente.

Abstract

Learning thermodynamics concepts such as *specific heat* and *latent heat* is usually accompanied by certain difficulties, especially taking into account the vast range of meanings that a single term can carry. For that reason, I share in this article my experience implementing a Physics lab as part of my final teaching practice, which I consider of great value because of its potential in consolidating and integrating these abstract concepts.

Keywords: Physics laboratory; Learning; Modelling; Thermodynamics; Latent heat.

I. CONTEXTO

La experiencia relatada se realizó en la Escuela Politécnica N°701-Francisco Eduardo Gilardoni, ciudad de Esquel, Chubut, en un curso de 5to año, con orientación en Equipos e Instalaciones Electromecánicas. Era el segundo año de estudio de Física y, por diversos motivos, tuvieron un primer cuatrimestre bastante interrumpido. Una característica general de los alumnos de esta escuela es que tienen un buen nivel de manejo matemático.

Durante el período de observación, el docente titular me indicó que, al año siguiente, el grupo tendría la materia *Máquinas Térmicas*, por lo que mi propuesta debía abordar calor específico y calor latente, para el posterior estudio de transformaciones termodinámicas. Por otro lado, mis docentes del profesorado establecieron que la residencia debe incluir al menos una actividad de laboratorio.

Las actividades de laboratorio se consideran muy importantes en la enseñanza de las ciencias naturales por sus tantas potencialidades. Entre otras, los trabajos de laboratorio pueden ayudar a la comprensión de conceptos, fomentan la interpretación de fenómenos, favorecen el trabajo en equipo y brindan espacios para acercarse a la metodología propia de la indagación científica (Caamaño, 2011).

La finalidad que yo buscaba al proponer una actividad de laboratorio era que la misma permitiera una comprensión vivencial del concepto de calor latente, esclareciendo la dimensión energética del mismo, e integrándolo, al mismo tiempo, con el concepto de calor específico.

El aprendizaje de conceptos termodinámicos suele complejizarse por nociones erróneas de los alumnos. Algunos autores (Zemansky, 1970; Romer, 2001) coinciden en que la concepción de calor como sustancia es muy difícil de modificar, especialmente dado el significado del uso cotidiano del término.

Por este motivo, un gran desafío, para mí, fue no reforzar esta noción, como lo hacen, lamentablemente, muchos libros de texto, a veces por cuestiones 'didácticas' (Bauman, 1992; Alomá y Malavera, 2007).

Por todo lo anterior, realicé una búsqueda bastante exhaustiva para incluir una actividad práctica que permitiera abordar directamente el concepto de calor latente sin recurrir a instrumental sofisticado, ni introducir variables que complejicen el fenómeno. Esto dejó fuera de las opciones el uso de *calorímetros de Joule*, los cuales utilizan una resistencia para transferir energía al sistema, ya que sería necesario calcular la potencia de la resistencia utilizando la Ley de Joule, entre otras variables que fácilmente pueden desviar el foco. Tampoco me convenció usar mecheros y vasos de precipitados para fundir el hielo, ya que no sería nada sencillo calcular la energía transferida de este modo. Por lo contrario, buscaba una experiencia sencilla, en la cual las interacciones con el ambiente fuesen mínimas, de modo que se pueda utilizar un recipiente abierto, y así observar directamente el fenómeno bajo estudio.

Una cuestión muy importante que busqué esclarecer fue la dimensión *energética* de los cambios en la materia estudiados, analizando el componente histórico por el cual, aun hoy, los términos *calor* específico y *calor* latente son utilizados en las comunidades científicas, a pesar de que hacen referencia a *energías específicas*, sin importar el mecanismo por el cual se dan las transferencias. Por otro lado, y considerando la falta de consenso en la actual discusión en cuanto a la dificultad de definir *energía térmica* y diferenciarla de *energía interna*, decidí referirme simplemente a la energía interna de los sistemas.

Previamente, el curso había estudiado escalas termométricas, dilatación térmica, caracterización de sistemas termodinámicos, tipos de paredes y, por último, equilibrio térmico, para lo cual realizaron una experiencia con el docente. Al comenzar mi residencia, retomamos algunos de estos conceptos y realizamos una comparación entre energía mecánica y energía interna, analizando los cambios posibles a nivel microscópico a medida que varía la energía interna de un sistema. Luego de construir el concepto de calor específico con todo el curso, deduciendo, mediante situaciones cotidianas, las relaciones entre el cambio en temperatura de un sistema, la masa del mismo y la energía transferida, y posteriormente la resolución de problemas no muy complejos, comenzamos con el estudio del calor latente. Empezamos realizando un análisis cualitativo de fenómenos conocidos, como una pava eléctrica encendida en la que hierve agua. Mediante la observación de la pava encendida con el interruptor trabado, y preguntas como *¿adónde se está transfiriendo la energía si la temperatura del agua no sigue aumentando?*, los alumnos identificaron que se trataba de un cambio de fase. A continuación, leyeron un texto adaptado de un artículo del sitio web de *Khan Academy* sobre los cambios de fase del agua, la estructura cristalina del hielo y el rol de los puentes de hidrógeno. Con esto, consideré que estaban abordados a un nivel suficiente los conceptos necesarios para la realización de la propuesta didáctica detallada en el siguiente apartado.

II. PROPUESTA DIDÁCTICA

El laboratorio implementado tiene como fin medir indirectamente el calor latente de fusión L_F del hielo. El objetivo de aprendizaje fue que los alumnos lograran relacionar el concepto de calor latente con los procesos de cambio de fase. Se trata de una experiencia sencilla, utilizando recursos de bajo costo, pero que permite realizar un análisis cuantitativo del fenómeno, identificando y diferenciando los dos cambios físicos observados (variación de temperatura y cambio de fase), y asociándolos a los conceptos respectivos de calor específico y calor latente.

La energía requerida para el cambio de fase en cuestión es provista por una masa de agua 'tibia' dentro de un recipiente aislante. Conociendo la masa y temperatura inicial del agua (y el calor específico del agua en estado líquido), solo basta conocer la masa del hielo m_B y la temperatura final del sistema para obtener un valor del calor latente de fusión, o L_F del hielo.

Al abordar esta situación, algunas cuestiones deben tenerse en cuenta incluso antes de la experiencia empírica. Fundamentalmente, comprender el proceso bajo análisis implica advertir que la experiencia consiste en dos procesos diferenciados. Primero, el hielo sufre un cambio de fase; pasa de estado sólido a líquido, debido a que se encuentra en contacto térmico con el agua que sirve como fuente de energía, pero aun sin variar su temperatura. Luego sí, aumenta la temperatura de esta masa de agua, ya en estado líquido. Por supuesto que estos dos procesos acontecen simultáneamente, pero, dado que el fin es realizar un análisis energético, solo se requieren los valores de temperatura inicial y final para cada sistema. No es necesario, entonces, incluir el tiempo ni, en consecuencia, el gradiente de temperatura. Aun así, considero que este recorte del evento debe ser explicitado, y un abordaje, al menos cualitativo, del concepto de gradiente de temperatura también es importante en el proceso de modelización.

En segundo lugar, el hielo debe encontrarse inicialmente a 0°C , para evitar un cambio más, previo al cambio de fase, que sería el aumento de temperatura del hielo, hasta alcanzar los 0°C . Esto, aunque no imposible, implicaría una complicación excesiva de la experiencia, y rápidamente se podría desviar del objetivo. Entonces, se sugiere preparar el hielo con anterioridad, introduciendo los trozos, o cubitos de

hielo con agua en un recipiente aislante, como un termo, de modo que la mezcla agua-hielo entre en equilibrio térmico y permanezca a 0° C hasta el inicio del laboratorio. Tal como sucedió durante la puesta en marcha, se puede incluir esta cuestión como parte del análisis previo: *¿Por qué motivo se encontraba el hielo en un recipiente con agua?*

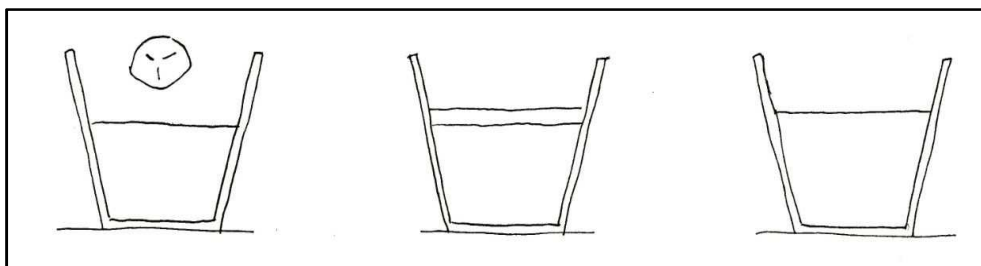


FIGURA 1. Representación gráfica del fenómeno analizado. A la izquierda, se muestra la masa de hielo (Sistema B), inicialmente a 0° C, antes de introducirse en el recipiente con agua *tibia* (sistema A). Al centro, sistema B se ha fundido ya, pero aún está a 0° C. A la derecha, por último, los sistemas A y B han alcanzado el equilibrio térmico.

Por otro lado, sería muy complejo calcular la transferencia de energía entre el sistema y el entorno, definiendo como sistema a la mezcla de agua y hielo, y como entorno al aire y el recipiente aislante. Por este motivo, se deberá modelizar el sistema como un sistema aislado; si bien esto es una evidente simplificación del problema, cabe notar que, utilizando un vaso descartable de poliestireno, y agua a una temperatura no mucho mayor a la temperatura ambiente, la transferencia de energía con el entorno es realmente mínima durante el pequeño intervalo de tiempo que tarda en fundirse un cubito de hielo. El hecho de comenzar con agua a una temperatura relativamente baja también puede ayudar a que los alumnos comiencen a utilizar el término *calor* como mecanismo de transferencia de energía, disociándolo, a su vez, del uso cotidiano, al no tratarse de agua *'caliente'*.

Considerando un sistema aislado, podemos decir que:

$$\Delta U_A + \Delta U_B = 0$$

donde ΔU_A y ΔU_B son las variaciones de la energía interna de sistemas A (el agua) y B (hielo). Es decir, la suma de las variaciones de la energía interna de los dos sistemas equivale a cero. Entonces,

$$-\Delta U_A = \Delta U_B \quad (1)$$

donde ΔU_A , al tratarse tan solo de un cambio en su temperatura, se puede calcular mediante la ecuación

$$\Delta U = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (2)$$

siendo m la masa del agua, c su calor específico y ΔT la variación de su temperatura desde que se introdujo el hielo en el agua hasta que el sistema alcanzó el equilibrio térmico. Entonces, queda que

$$-\Delta U_A = m_A \cdot c_A \cdot (-\Delta T_f) \quad (3)$$

Ahora bien, el lado derecho de la ecuación (1), es decir, la energía absorbida por el sistema B, inicialmente en estado sólido, está compuesto por dos términos; por un lado, la energía absorbida durante el cambio de fase, y luego la energía absorbida para que aumentara su temperatura, hasta alcanzar el equilibrio térmico con sistema A. Es decir,

$$\Delta U_B = \Delta U_{B1} + \Delta U_{B2} \quad (4)$$

donde la energía asociada al cambio de fase ΔU_{B1} vale

$$\Delta U_{B1} = m_B \cdot L_F \quad (5)$$

siendo L_F la magnitud desconocida – el calor latente de fusión del hielo, y ΔU_{B2} la energía asociada a la variación de la temperatura de sistema B ya en estado líquido, la cual puede ser calculada con la misma ecuación (2), quedando

$$\Delta U_{B2} = m_B \cdot c_B \cdot \Delta T_B \quad (6)$$

Sabiendo que el calor específico c_B es igual a c_A , y que ΔT_B es simplemente la temperatura final (de equilibrio T_{eq}) del sistema, ya que $T_{inicial}$ de B era 0°C , y sustituyendo ecuaciones (5) y (6) en (4), y esta en (1) junto con (3), queda

$$m_A \cdot c_{agua} \cdot (-\Delta T_A) = m_B \cdot L_F + m_B \cdot c_{agua} \cdot (T_{eq} - 0^\circ\text{C})$$

Resolviendo para L_F , entonces, obtenemos que el calor latente de fusión de hielo vale

$$L_F = \frac{m_A \cdot c_{agua} \cdot (T_{eq} - T_i) - m_B \cdot c_{agua} \cdot T_{eq}}{m_B} \quad (7)$$

El laboratorio se realizó en grupos de no más de cuatro integrantes. A cada uno se le dio una guía explicitando claramente el objetivo: *medir indirectamente el calor latente de fusión del hielo (L_F hielo); la energía necesaria para pasar 1kg de agua (a 0°C) de estado sólido a estado líquido*. También se incluyó un breve marco teórico y metodología, aunque se dejó a elección de cada grupo las variables iniciales; el valor de m_A , m_B y la temperatura inicial de A. Opté por darles a los estudiantes este grado de libertad para que piensen y debatan en sus grupos sobre la influencia de estas variables, e hipoteticen los posibles resultados en caso de que utilizaran un valor muy bajo para m_A , una temperatura inicial muy baja, o una masa de hielo m_B muy grande.

Dado que el objetivo del laboratorio era lograr una comprensión del calor latente a partir del análisis de un fenómeno sencillo, incluí en la guía de laboratorio algunas preguntas para que debatan en grupos antes de comenzar, las cuales apuntaban a definir el sistema y entorno, el tipo de pared, los recortes y simplificaciones que había de realizarse, entre otras cuestiones. Algunas de estas preguntas fueron: *¿Por qué el hielo a utilizar se encuentra en un termo con agua? ¿Qué transferencias energéticas habrá que afectarán los resultados de la experiencia? ¿Cómo podrán minimizar estos factores, para poder desestimarlos o considerarlos irrelevantes?*

A cada grupo se le entregó un vaso descartable de poliestireno y un termómetro de mercurio. Contaban con una balanza digital de precisión, agua en bidones, pava eléctrica y cubitos de hielo en un termo.

III. RESULTADOS

Los alumnos destinaron bastante tiempo a la lectura y análisis de la guía, a responder las preguntas orientadoras, y a tomar decisiones metodológicas. Si bien me alegré de que le dieran tanta importancia a la preparación y el análisis previo, resultó problemático en el caso de un grupo que, a pesar de reiteradas advertencias, realizaron la experiencia en la última media hora de la clase. Al haber utilizado una masa de agua muy pequeña, no se llegó a fundir completamente el hielo, sino que el sistema agua-hielo alcanzó el equilibrio térmico, sin restar tiempo suficiente para volver a realizar la experiencia con una masa de agua mayor y/o a mayor temperatura. A otros dos grupos les sucedió lo mismo, y a uno se le volteó el montaje experimental, aunque todos ellos sí pudieron realizar la experiencia de nuevo.

Por lo menos dos grupos me llamaron porque no podían responder una de las preguntas de la guía, sobre el motivo por el cual el hielo se encontraba en un recipiente con agua. La finalidad por la que incluí esta pregunta era que identifiquen que el sistema agua-hielo estaría en equilibrio térmico, lo cual implicaría que el hielo se encontraría a una temperatura de 0°C . Sin embargo, la dificultad que les causó dicha pregunta sin aparente respuesta me obligó a repreguntar: *¿qué está a menor temperatura dentro del termo, el agua o el hielo?* Tras una respuesta esperada: *el hielo*, volví a preguntar, *¿el hielo estará siempre a menor temperatura? ¿Qué pasa cuando dos cuerpos, con una diferencia de temperatura, se encuentran en contacto térmico?* Luego de hacer memoria a unas clases atrás, recordaron lo trabajado sobre equilibrio térmico y reconocieron que, en algún momento, el agua y el hielo entrarían en equilibrio térmico, y cesaría la transferencia por calor.

Por diversos motivos, no llegamos a concretar la parte de la experiencia de mayor riqueza, que en mi opinión es el análisis energético. Reconozco que un error fue no destinar un momento en el transcurso de la clase siguiente para analizar las transferencias de energía de manera conceptual, con los dibujos de la figura 1, de modo de vislumbrar lo sencillo que se torna el fenómeno una vez modelizado como un sistema aislado adiabáticamente. El nivel de manejo de ecuaciones del grupo era más que suficiente para resolver el problema, por lo que considero que la falencia en la puesta en marcha no fue esto, sino la parte de modelización.

Si bien la instancia de la actividad de laboratorio me permitió realizar un seguimiento de cada grupo y evaluar su nivel de comprensión del fenómeno estudiado, no fue posible una evaluación del aprendizaje de los conceptos abordados sino hasta la última clase de mi residencia. En ella, propuse una actividad en la que los estudiantes debían elaborar un gráfico de temperatura en función de la variación de la energía

interna, $T(\Delta U)$, para un sistema ideal compuesto por una masa de agua con una temperatura inicial de varios grados Celsius bajo cero, a la cual se le transferiría una determinada cantidad de energía. Debían también determinar el estado y temperatura final en que se encontraría el sistema una vez transferida toda la energía. La figura 2 muestra un gráfico similar al que produjeron los alumnos. El mismo se suele incluir en libros de texto de Termodinámica y permite ilustrar los distintos cambios que va sufriendo el sistema a medida que absorbe energía, y comparar visualmente cuánta energía requiere cada cambio.

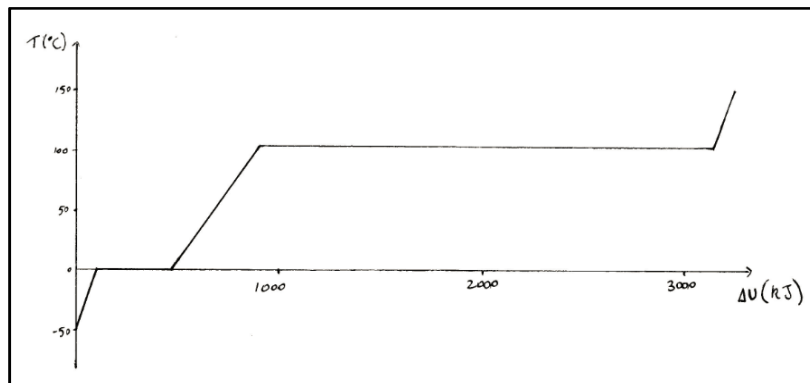


FIGURA 2. Gráfico representativo de lo que los alumnos lograron realizar durante la actividad final. La elaboración del mismo integra y relaciona los conceptos de calor específico y calor latente con los procesos de aumento de temperatura y cambio de fase.

A varios alumnos les costó conceptualizar la situación e identificar que, inicialmente, el agua se encontraba en estado sólido, pero luego de una breve intervención, comprendieron que se trataba de una masa de hielo, cuya temperatura aumentaría hasta alcanzar el punto de fusión, en proporción a su masa, calor específico y la cantidad de energía transferida. Así, lograron proceder, identificando y utilizando correctamente los valores de calor específico para las distintas fases del agua y los de calor latente de fusión y de vaporización para los dos cambios de estado.

VI. CONSIDERACIONES FINALES

A diferencia de otros laboratorios comunes para abordar los mismos temas, el aquí desarrollado no incluye conceptos abstractos como la *masa equivalente en agua* (que en realidad se podría calcular, pero al tratarse de un recipiente de tan poca masa y tan aislante se puede desestimar). Por lo contrario, se limita a los conceptos fundamentales que son *calor específico* y *calor latente*, permitiendo observar claramente el cambio de fase y la variación de la temperatura indicada en el termómetro.

A pesar de no haberse concluido la actividad como había sido planificada, se pudo retomar dicha experiencia durante la realización de la última actividad, reconociendo gráficamente los procesos correspondientes a los que sufrió el cubito de hielo, y brindando otro contexto para terminar de significar el concepto y los valores de calor latente.

REFERENCIAS

- Alomá, E., Malavera, M. (2007). Análisis de los conceptos de Energía, Calor, Trabajo y el Teorema de Carnot en Textos Universitarios de Termodinámica. *Enseñanza de las Ciencias*, 25(3), 387-400.
- Bauman, R. P. (1992). Physics that textbook writers usually get wrong: II. Heat and energy. *The Physics Teacher*, 30(6), 353-356.
- Caamaño, A. (2011). Los trabajos prácticos en Física y Química: interpretar e investigar. En *Didáctica de la Física y la Química*. Barcelona: Graó.
- Romer, R. H. (2001). Heat is not a noun. *American Journal of Physics*, 69(2), 107-109.
- Zemansky, M. W. (1970). The Use and Misuse of the Word "Heat" in Physics Teaching. *The Physics Teacher*, 8(6), 295-300.