

“DE LA MECÁNICA A LA TERMODINÁMICA”: HERRAMIENTAS METODOLÓGICAS PARA INCLUIR CONCEPTOS DE CALOR Y ENERGÍA INTERNA EN CURSOS DE “FÍSICA I” PARA ESTUDIANTES DE INGENIERÍA

ALÍ, MARÍA LAURA⁽¹⁾; *INSUA, GRISELDA LILIANA*⁽²⁾; *FERNANDEZ GUILLERMET, ARMANDO*⁽³⁾

^{1,2} Departamento de Física – Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional del Comahue – (8300) Neuquén – Argentina.

³ Centro Atómico Bariloche e Instituto Balseiro – (8400) San Carlos de Bariloche – Río Negro – Argentina.

¹marialaura_ali@yahoo.com.ar ²glinsua@hotmail.com ³a.f.guillermet@gmail.com

RESUMEN

El presente trabajo presenta herramientas metodológicas para introducir los aspectos básicos de la Primera Ley de la Termodinámica en el primer curso de Física para estudiantes de Ingeniería, en el cual se estudia Mecánica Clásica. Actualmente es notoria la segmentación de contenidos que se da en los distintos cursos de Física, resultando esto en un factor negativo para los estudiantes a la hora de integrar conceptos y fenómenos. En nuestra experiencia docente, vemos la dificultad de los estudiantes de Ingeniería para articular e integrar los contenidos de las diversas asignaturas de Física, cuestión que, en gran medida, es causada por la forma de enseñar dichos contenidos. Creemos que es necesario producir un cambio desde el primer curso de Física para lograr que los estudiantes puedan ir asociando y complementando los contenidos. En particular, el tema de la energía y su conservación atraviesa muchas de las asignaturas que se estudian en las carreras de Ingeniería y de ahí su importancia a la hora de presentarlo a los estudiantes. En este trabajo se profundiza en el concepto de *sistema* y se consideran en particular los *mecanismos de transferencia*, yendo desde lo más general a lo particular de la Mecánica.

Palabras clave: energía, integración, mecánica, calor.

INTRODUCCIÓN

La principal motivación para abordar este trabajo está en la necesidad de que los estudiantes de las carreras de Ingeniería sean capaces de establecer las conexiones necesarias entre contenidos de las diferentes asignaturas de Física, que comienza con la Mecánica newtoniana. En nuestra experiencia docente vemos que muchas veces no logran generalizar los contenidos de las diferentes áreas de la Física, y que éstos terminan siendo conceptos aislados, con lo cual se perjudica notoriamente su aprendizaje. En particular, el concepto de energía y su conservación es fundamental y atraviesa los contenidos de todas las ramas de la Física.

Durante buena parte del siglo XIX varios científicos se encontraban trabajando en la hipótesis de la conservación de la energía. Muchos de ellos describieron el mundo de los fenómenos como manifestación de una sola “fuerza” que aparecía en forma eléctrica, térmica, dinámica y muchas otras, pero en todas sus transformaciones nunca podía ser creada ni destruida. Entre 1830 y 1850 científicos dispersos por toda Europa, tales como Mayer, Joule, Colding, Helmholtz, Carnot, Séguin, Holtzmann, Hirn, Mohr, Grove, Faraday y Liebig llegaron por sí solos a lo esencial del (actual) concepto de la energía y su conservación. Casi hasta el fin del periodo de descubrimiento, pocos de sus artículos presentan más que semejanzas fragmentarias observables en oraciones y párrafos aislados. En consecuencia, lo que se observa en sus trabajos no es realmente el descubrimiento simultáneo de la conservación de la energía, sino el surgimiento rápido y a menudo desordenado de los elementos conceptuales y experimentales de los cuales, poco tiempo después, se compondría esa teoría: *la energía se conserva* (Kuhn, 1977).

La pregunta que surge entonces es ¿por qué entre los años 1830 y 1850 llegaron tan a la superficie de la conciencia científica tantos de los experimentos y conceptos necesarios para enunciar íntegramente la conservación de la energía? La respuesta se podría dar en función de tres factores históricos: la *disponibilidad de procesos de conversión*, el *interés por las máquinas* y la *filosofía de la naturaleza*.

La disponibilidad de procesos de conversión resultó principalmente de la corriente de descubrimientos que surgió a raíz de la invención de la pila eléctrica realizada por Volta en 1800. Además el hecho de que las máquinas pudieran ser vistas como dispositivos de conversión también impulsó una serie de descubrimientos y aplicaciones de la conservación de la energía. Por último se puede notar una predisposición a ver una sola e indestructible fuerza en la raíz de todos los fenómenos naturales, una concepción cuyas raíces podrían buscarse en el movimiento filosófico denominado “Filosofía de la Naturaleza”, cuyos seguidores buscaron constantemente un solo principio que unificase todos los fenómenos naturales (Kuhn, 1977).

El aumento de la mecanización durante el siglo XIX llevó al desarrollo de las máquinas de vapor, las cuales permitían obtener trabajo mecánico a partir de la combustión de carbón. El estudio de estos motores térmicos desde el punto de vista del Principio de Conservación de la Energía pronto reveló una característica de las mismas: no transformaban en trabajo toda la energía obtenida de la combustión del carbón.

Las observaciones realizadas acerca del proceso de transformación del calor en movimiento y del movimiento en calor, fueron las que llevaron de manera gradual al abandono de la antigua concepción del calor como sustancia y a la aceptación de la hipótesis de que el calor mismo era un movimiento propio de las partículas de los cuerpos (Lamanna, 1969).

La Termodinámica vendrá a ampliar el Principio de Conservación de la Energía Mecánica, introduciendo una nueva magnitud física denominada energía interna, cuya conservación en sistemas aislados viene expresada por la *Primera Ley de la Termodinámica*.

METODOLOGÍA

La materia Física I dictada para estudiantes de ingeniería en la Universidad Nacional del Comahue abarca específicamente los contenidos de la Mecánica Newtoniana.

A partir de la implementación de herramientas metodológicas, se busca generalizar el principio de conservación de la energía mecánica a la Primera Ley de la Termodinámica.

Esta generalización tiene como objetivo: analizar el sistema y su entorno; introducir el concepto de energía interna; incorporar el concepto de calor como otro mecanismo de transferencia de energía, además del trabajo mecánico.

La propuesta se desarrolla a partir del estudio de varios casos de la mecánica clásica. Considerando distintas situaciones físicas, algunas conocidas por los estudiantes y otras nuevas, se describirá el comportamiento desde un abordaje energético.

Se analizarán los posibles sistemas de estudio, se identificarán las interacciones que intervienen en dichos fenómenos y cómo estas influyen en el intercambio de energía.

Los casos a analizar son:

- Sistema masa-resorte.
- Sistema de cuerpos vinculados.

Análisis de la conservación de la energía en diferentes situaciones físicas

Cuando un objeto interactúa junto con otro u otros objetos de su entorno, somos libres de establecer que nuestro *sistema* tiene tantos o tan pocos objetos como queramos. Para cualquier definición del sistema, la conservación de la energía se cumple, siempre y cuando tengamos cuidado de seguirle la pista a las energías dentro del sistema y a las transferencias de energía entre el sistema y su entorno.

La Figura 1 muestra un sistema arbitrario, alrededor del cual hemos trazado una curva cerrada imaginaria llamada *frontera del sistema* (Resnick *et al.*, 1999).

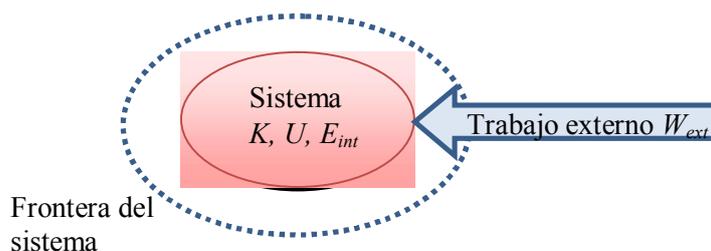


Figura 1: Un sistema encerrado dentro de la frontera tiene energía cinética K , energía potencial U y energía interna E_{int} . El entorno puede intercambiar energía con el sistema mediante el trabajo externo W_{ext} .

El sistema tiene, dentro de su frontera, una energía que puede incluir muchas formas posibles, algunas de las cuales se indican: la energía cinética K , la energía potencial U , y la *energía interna* E_{int} . Aquí, U se refiere a la energía potencial que resulta de la interacción de las partes del sistema entre ellas mismas; las interacciones con el entorno se representan no en términos de cambios de energía potencial sino en términos de trabajo (externo) W_{ext} . Posteriormente, se dará una definición precisa de la energía interna en función del potencial microscópico y de las energías cinéticas de las moléculas de que están hechos los componentes del sistema.

Ejemplos de cambios de energía interna son los cambios en la disposición de las moléculas de un sistema (tal como las soldaduras microscópicas formadas por el rozamiento) y los cambios de velocidad de las moléculas de un sistema observados como un cambio en su temperatura.

La energía del sistema dentro de la frontera puede ser cambiada cuando el trabajo externo W_{ext} es efectuado por el entorno sobre el sistema, como se representa en la Figura 1.

El trabajo interno, efectuado dentro de la frontera por una parte del sistema al actuar sobre otra, no cambia la energía total, aunque puede convertir energía de una forma a otra, tal como de potencial a cinética. Por lo tanto, se puede escribir la conservación de la energía del sistema de la siguiente manera:

$$\Delta U + \Delta K + \Delta E_{int} = W_{ext} \quad [1]$$

donde W_{ext} representa el trabajo externo total efectuado por todas las fuerzas del entorno sobre el sistema. La Figura 1 nos recuerda la importancia de la *convención de signos* que se ha elegido para el trabajo externo. El trabajo realizado sobre el sistema por el entorno se considera positivo cuando tiende a *aumentar* la energía del sistema, mientras que será negativo cuando tiende a *disminuir* la energía del sistema.

Conservación de la Energía de un sistema de *una* partícula

Se considera un sistema bloque-resorte sobre una mesa horizontal rugosa (no puede desprejarse la fricción), como muestra la Figura 2.

Se analizará la conservación de la energía considerando diferentes sistemas de estudio (Sears *et al.*, 2009).

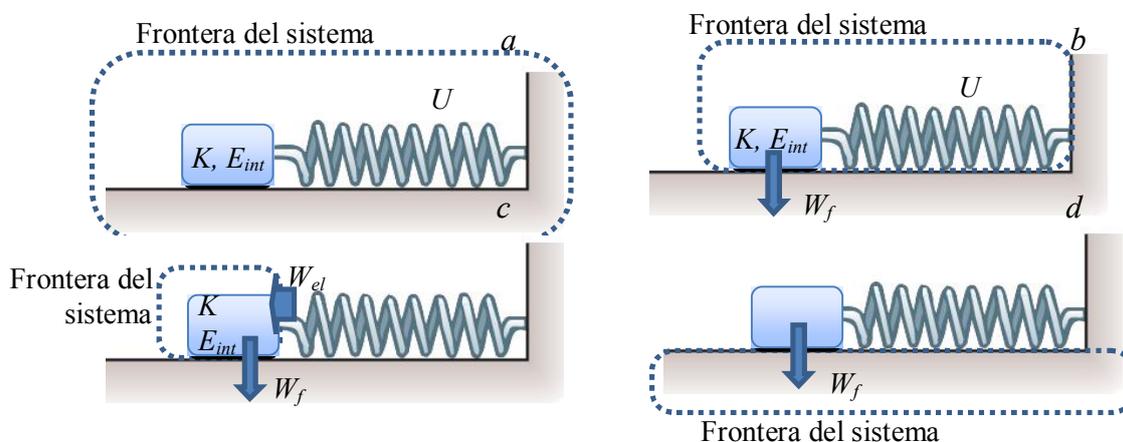


Figura 2. Análisis de un sistema considerando diferentes fronteras. a: El sistema incluye al bloque, el resorte y la mesa. La fuerza de fricción y la fuerza elástica son fuerzas internas y contribuyen a la energía interna del sistema. b: El sistema consta ahora del bloque y el resorte, y posee tanto energía cinética como energía potencial. c: El sistema consiste solamente en el bloque; la fuerza del resorte y la fricción efectúan un trabajo sobre el sistema, cambiando su energía. d: El sistema consiste solamente en la mesa; la fuerza de fricción efectúa trabajo sobre el sistema, cambiando su energía.

➤ Caso A: Sistema *Bloque+Resorte+Mesa*

En primer lugar se define el sistema incluyendo al bloque, el resorte y la mesa, como se muestra en la Figura 2-a. Analizando este sistema, vemos que no existe una fuerza externa, conservativa o no, que sea responsable de las transferencias de energía a través de las fronteras del sistema. Con esta definición del sistema, el trabajo externo es cero, y entonces:

$$\Delta U_{el} + \Delta K + \Delta E_{int} = 0 \quad [2]$$

La fuerza de fricción es en este caso una fuerza interna, junto con la fuerza del resorte. La energía puede ser transferida, dentro del sistema, de energía mecánica $U+K$ del *Bloque+Resorte* a energía interna del *Bloque+Mesa*, pero la energía total mecánica+interna

permanece constante. Supongamos, por ejemplo, que soltamos al bloque desde el reposo con el resorte comprimido. El bloque se desliza por la mesa hasta que llega al reposo.

En este caso $\Delta K = 0$ porque $K_f = K_i = 0$, y por lo tanto $\Delta E_{\text{int}} = -\Delta U_{el}$. La pérdida de energía potencial que estaba originalmente almacenada en el sistema resulta en un aumento de la energía interna del sistema. De este análisis no podemos determinar los cambios individuales en la energía interna del bloque y de la mesa, sólo el cambio total del sistema en conjunto.

La fuerza de fricción es un ejemplo de una fuerza no conservativa, disipativa. En un sistema mecánico cerrado como el que aquí se ilustra, la energía mecánica se transforma en energía interna por la fuerza de la fricción. La energía mecánica *no* se conserva en este caso, siendo compensada la pérdida de energía mecánica por una ganancia equivalente de la energía interna. Es importante aclarar que no todas las fuerzas no conservativas son disipativas; algunas fuerzas no conservativas, como la fuerza magnética, pueden *aumentar* la energía mecánica de un sistema.

➤ Caso B: Sistema *Bloque+Resorte*

Consideremos ahora que el sistema consta del bloque y el resorte como se muestra en la Figura 2-b. El sistema tiene ahora una energía potencial asociada a la fuerza del resorte. La fuerza de fricción es la única fuerza externa que efectúa un trabajo sobre el sistema. Para esta definición del sistema la conservación de la energía resulta:

$$\Delta U_{el} + \Delta K + \Delta E_{\text{int}} = W_f \quad [3]$$

La energía del sistema es ahora $U + K + E_{\text{int}}$; en este caso, las transferencias de energía entre el resorte y el bloque no cambian la energía del sistema. La fuerza del resorte es una *fuerza interna* que puede transferir energía dentro del sistema de una forma a otra $U \leftrightarrow K$ pero no puede cambiar la energía total del sistema. El trabajo negativo de fricción de la superficie horizontal puede disminuir la energía del sistema.

➤ Caso C: Sistema *Bloque*

La Figura 2-c muestra dos transferencias de energía a través de la frontera del sistema: el trabajo conservativo W_{el} positivo efectuado sobre el bloque por el resorte y el trabajo no conservativo W_f negativo efectuado sobre el bloque por la fuerza de fricción ejercida por la mesa. Para este sistema, la conservación de la energía puede escribirse de la siguiente manera:

$$\Delta K + \Delta E_{\text{int}} = W_{el} + W_f \quad [4]$$

Aquí $\Delta U = 0$, porque el sistema que está dentro de la frontera no experimenta cambio alguno de energía potencial. El resorte no es parte del sistema, de modo que no se considera la energía potencial del resorte; en cambio, el resorte es parte del entorno a través del cual el trabajo conservativo W_{el} opera sobre el sistema.

Nótese en la Figura 2-c las direcciones de las flechas que indican las transferencias de energía; la ecuación [4] indica que el trabajo positivo efectuado por el resorte (el cual damos por sentado que se comprime a partir de su longitud de relajamiento) tiende a aumentar la energía del bloque, y el trabajo negativo efectuado por la superficie horizontal tiende a disminuir la energía del bloque.

➤ Caso D: Sistema *Mesa*

La Figura 2-d muestra la transferencia de energía a través de la frontera del sistema: el trabajo no conservativo W_f positivo efectuado sobre la mesa por la fuerza de fricción ejercida por el bloque. Para este sistema, la conservación de la energía puede escribirse como:

$$Q + \Delta E_{\text{int}} = W_f \quad [5]$$

Aquí $\Delta U = 0$, porque el sistema que está dentro de la frontera no experimenta cambio alguno de energía potencial. Nótese que en los ejemplos anteriores hemos expresado la energía potencial macroscópica de un resorte como un término explícito. Podríamos haber considerado la energía almacenada en el resorte como una parte de la energía interna del sistema. Sin embargo, por conveniencia, se elige separar términos macroscópicos que puedan fácilmente ser tomados en cuenta, dejando en E_{int} los términos microscópicos restantes que no están incluidos en U . Esto es, el reordenamiento de las moléculas del resorte se halla incluido en U , mientras que el reordenamiento de las moléculas del bloque y de la mesa se incluyen en E_{int} . Esta clasificación un tanto arbitraria se hace por conveniencia al discutir la energía de este sistema particular. La ecuación [5] representa un primer paso en el avance de una ley de la conservación de la energía *mecánica* a una ley generalizada de la conservación de la energía. Esto es, esta ley generalizada puede enunciarse, como sigue (Resnick – Halliday – Krane, 1999):

En un sistema aislado, la energía puede ser transformada de una clase a otra, pero no puede ser creada o destruida, la energía total del sistema permanece constante.

Por *aislado* nos referimos a que no se efectúa sobre el sistema ningún trabajo externo, conservativo o no conservativo. Esta definición de la conservación de la energía es una generalización de nuestra experiencia, hasta ahora no desmentida por ningún experimento de laboratorio o por observación de la naturaleza.

Conservación de la Energía en un sistema de *varias* partículas

En este caso tenemos un sistema formado por dos cuerpos, A y B que se mantienen vinculados a través de una cuerda. Analizaremos la conservación de la energía para el sistema A, el sistema B y el sistema A+B.

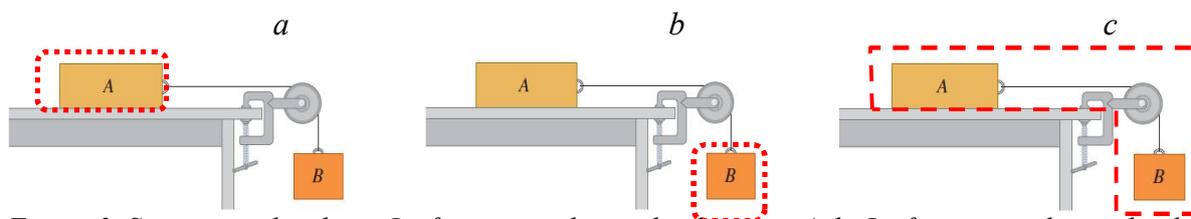


Figura 3. Sistema analizado. a: La frontera incluye solo al cuerpo A. b: La frontera incluye solo al cuerpo B. c: La frontera incluye al cuerpo A y al B.

Analizando la Figura 3-a, las únicas interacciones que realizan trabajo mecánico sobre el sistema A son la fuerza de fricción dinámica y la tensión que ejerce la cuerda. Ambas interacciones son no conservativas, por lo que el sistema es no conservativo. Aplicando el teorema de trabajo y energía, se tiene:

$$W_{F_{\text{noCons}}}^{i \rightarrow f} = \Delta E \quad [6]$$

$$W_{T/A}^{i \rightarrow f} + W_{f/A}^{i \rightarrow f} = \Delta K_A \quad [7]$$

Para el sistema B, la única interacción no conservativa que realiza trabajo es la tensión que actúa sobre B, por lo que el sistema también es no conservativo.

$$W_{T/B}^{i \rightarrow f} = \Delta K_B + \Delta U_{gB} \quad [8]$$

Ahora observamos el sistema conformado por A y B. Haciendo un análisis de las interacciones para este sistema, se observa que la única interacción no conservativa que realiza trabajo es la fricción cinética de la mesa sobre A, por lo que el sistema es no conservativo. ¿Qué sucedió con las tensiones que actúan tanto en el sistema A como B? Ambas interacciones son no conservativas y realizan trabajo. Al definir como sistema al conjunto A+B, dichas interacciones quedan en el interior de la frontera que definimos como

sistema de estudio (Figura 3-c), por lo que ambas interacciones son internas al sistema y en el conjunto A+B no contribuyen al cambio de energía mecánica.

$$W_{f/A}^{i \rightarrow f} = \Delta K_A + \Delta K_B + \Delta U_{gB} \quad [9]$$

Entonces podríamos preguntarnos cuál es el efecto de este trabajo de fricción sobre el entorno y si es posible su aprovechamiento.

Estos ejemplos sugieren que hay implicada alguna nueva clase de energía y que ésta debería aparecer explícitamente en la expresión general del teorema de trabajo y energía para sistemas formados por muchas partículas (Güemez, 2012):

$$Q + W = \Delta K + \Delta U_g + \Delta U$$

Ahora bien, podemos avanzar más aún en la generalización de un enunciado que describa el comportamiento de un sistema no aislado, el cuál está representado por la ecuación de conservación de energía:

$$\Delta E_{\text{Sistema}} = \sum \text{Transferencias}$$

a partir del cual se pueden incluir todos los tipos de almacenamiento y transferencia de energía que se producen, obteniéndose de este modo la expresión:

$$\Delta U + \Delta K + \Delta E_{\text{int}} = W + Q + T_{\text{OndasMecánicas}} + T_{\text{Materia}} + T_{\text{Electromagnéticas}}$$

Para cada situación física determinada, esta ecuación se reducirá a un número menor de términos.

Experimento de Joule

Los experimentos realizados a mediados del siglo XIX demostraron una fuerte conexión entre la transferencia de energía mediante calor en los procesos térmicos y la transferencia de energía por trabajo en los procesos mecánicos.

Joule ideó un experimento para demostrar que se podía elevar la temperatura de un sistema transfiriéndole energía mecánica. Mediante dicho experimento se puede determinar una cantidad conocida como equivalente mecánico del calor, que relaciona ambas transferencias de energía (Joule, 1850).

El dispositivo de Joule consistía de un recipiente con agua, en el que estaba sumergido un agitador de unas paletas giratorias cuyo giro estaba accionado por un mecanismo que dependía del descenso de un peso. El agua estaba en un contenedor de paredes adiabáticas que impedían la transferencia de calor.

Las pesas caían a velocidad constante y permiten que al agitador diera vueltas dentro del agua, esto es, se realizaba trabajo sobre el agua. Despreciando la energía que se disipa en los rozamientos, el trabajo mecánico realizado sobre el agua es igual a la variación de energía mecánica de las pesas que caen. La pérdida de energía potencial puede medirse fácilmente determinando la distancia que descienden las pesas. Si las pesas (de masa m) caen desde una altura h , la pérdida de energía potencial es igual a mgh . Esta energía causa el incremento en la temperatura del agua.

Teniendo en cuenta la experimento anterior, nos podríamos preguntar en esta instancia, con qué otros dispositivos podríamos lograr el mismo efecto que el obtenido por Joule, es decir, un aumento de temperatura del sistema (Baher, 1965).

En la Figura 4 se esquematizan las diferentes formas de generar un aumento de temperatura por medio de procesos mecánicos, térmicos, o con la combinación de ambos.

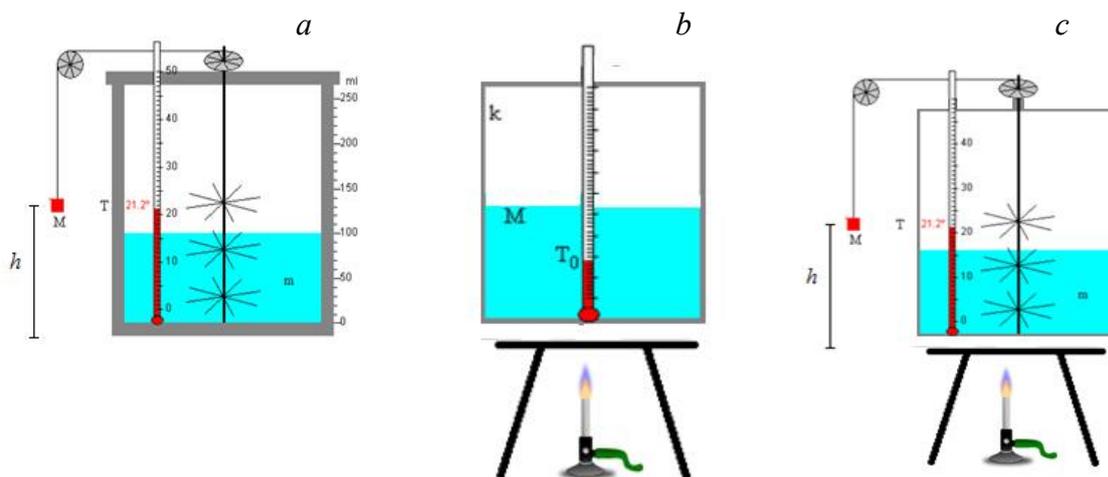


Figura 4: Dispositivos para generar un aumento de temperatura mediante distintos mecanismos de transferencia de energía. a: El proceso es mecánico. b: El proceso es térmico. c: Se combinan ambos mecanismos, mecánico y térmico.

CONCLUSIONES

Como hemos analizado, el cambio en la cantidad total de energía en el sistema es igual a la cantidad total de energía que cruza la frontera del sistema (Serway y Jewett, 2008). El enunciado más general que describe el comportamiento de un sistema no aislado es la ecuación de conservación de energía, que incluye todos los tipos de almacenamiento y transferencia de energía:

$$\Delta E_{\text{Sistema}} = \sum \text{Transferencias} = W + Q + T_{\text{OndasMecánicas}} + T_{\text{Materia}} + T_{\text{Electromagnéticas}}$$

Desde esta visión más general sería posible incorporar nociones de Termodinámica en un curso de Física I, estableciendo un “hilo conductor” a lo largo de la Física en términos de las leyes de conservación. Este análisis global de la conservación resultaría beneficioso para que los estudiantes no aprendan los conceptos de manera segmentada y puedan relacionarlos en forma fluida y significativa. De aquí la importancia de brindarles desde el primer curso de Física esta forma generalizada de abordar el tema de energía que resulta un concepto transversal en las materias de Física.

En lo concreto, se podría presentar a los estudiantes casos en donde además de analizar el sistema en estudio se incluya el entorno de dicho sistema. De este modo, utilizar de manera general el principio de conservación de la energía permitiría el análisis de diversas situaciones que involucren conceptos termodinámicos, reduciéndose a casos particulares aquellas situaciones que no abarquen dichos conceptos.

Nuestra intención es compartir esta propuesta metodológica de abordaje del concepto de conservación con el resto de los docentes, no sólo de la misma materia, sino de las sucesivas Físicas del plan de estudios. Esto sería un primer paso para lograr que los estudiantes puedan adquirir una visión global y general a lo largo de su carrera.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Baheer, H.D. (1965). *Tratado moderno de Termodinámica. Teoría y aplicaciones técnicas*. Buenos Aires. Editor José Montesó.

Gúemez, J. (2012). *Termodinámica del Equilibrio. Capítulo 3. Energía Interna y Primer Principio*. Disponible en:

<http://web.archive.org/web/20120627144835/http://www.loreto.unican.es/Termodin/Termo99/Cap03.html> Consultado el 17/08/15

Joule, J.P. (1850). On the Mechanical Equivalent of Heat. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, Vol. 140: 61-82.

Kuhn T.S. (1977). *La Tensión Esencial. Estudios selectos sobre la tradición y el cambio en el ámbito de la ciencia*. México. Fondo de Cultura Económica.

Lamanna E. P. (1969). *Historia de la Filosofía IV: La Filosofía del siglo XIX*. Buenos Aires. Librería Hachette.

Resnick R., Halliday D., Krane K. (1999). *Física Voll*. México. Compañía Editorial Continental.

Sears, Zemansky, Young H.D., Freedman R.A. (2009). *Física Universitaria Volumen I*. México. Addison-Wesley.

Serway R.A., Jewett J.W. (2008). *Física para ciencias e ingeniería*, volumen 1. Ed. Brooks/Cole.