

¿Disponen los estudiantes de secundaria de una comprensión adecuada de los conceptos de trabajo y calor y de su relación con la energía?

(Do secondary education students have a suitable understanding of the concepts of work and heat as well as their connection with energy?)

J.L. Doménech¹ y J. Martínez-Torregrosa

Universidad de Alicante, Alicante, España

Recibido em 30/1/2009; Aceito em 3/6/2009; Publicado em 26/3/2010

El propósito de este trabajo es profundizar en el conocimiento de que disponen los estudiantes de secundaria de los conceptos de trabajo y de calor. Se proponen diferentes actividades a 170 alumnos del último curso de la secundaria postobligatoria (17/18 años) y se entrevistan a otros cinco. Las diferentes tareas pretenden, en esencia, averiguar en qué medida los alumnos disponen de ideas cualitativas sobre el trabajo y el calor, y también, si relacionan dichos conceptos con las variaciones de energía experimentadas por los sistemas. Las propuestas y argumentos utilizados por los alumnos nos permiten afirmar que terminan sus estudios con un escaso aprendizaje de dichos conceptos.

Palavras-clave: trabajo, calor, energía, enseñanza habitual, concepciones cualitativas.

The purpose of this project is to go deeply into the knowledge which secondary education students have about the concepts of work and heat. Different activities have been proposed to 170 students taking their last course of post-compulsory secondary education (aged 17/18). Moreover, other five students have been interviewed. The different tasks are devoted essentially to find out in what extent these students understand the qualitative ideas of work and heat, as well as to find out whether they are able to relate such concepts to the variations of energy experienced by the systems. The proposals and reasoning used by the students lead us to state that they have grasped poor learning of such concepts when they finish their studies.

Keywords: work, heat, energy, traditional teaching, qualitative concepts.

1. Introducción y planteamiento del problema

El estudio de la energía constituye uno de los núcleos básicos en todo currículum de educación científica, con una notable presencia en campos tan diversos como la mecánica, la termodinámica, la electricidad, las reacciones químicas, los procesos biológicos y geológicos, etc. Su estudio resulta imprescindible para la comprensión de los procesos de unificación que han mostrado los vínculos entre campos aparentemente inconexos, del funcionamiento de las máquinas e instrumentos que impregnan nuestras vidas y, también, para la adquisición de pautas de comportamiento ante los problemas ambientales y desequilibrios sociales que caracterizan la actual situación de emergencia planetaria [1], estrechamente asociada a las necesidades de recursos energéticos, al uso de combustibles fósiles, etc.

La importancia creciente dada al estudio de la energía ha ido acompañada de la constatación de serias difi-

cultades en el aprendizaje de este concepto, que afectan incluso a estudiantes universitarios. Esto ha dado origen a la realización de numerosas investigaciones y a la organización de encuentros y congresos monográficos, en los que se han abordado problemas relacionados con su enseñanza y aprendizaje y se han discutido diversas formas de introducir esta temática.

Con el propósito de mejorar el aprendizaje, diferentes autores han defendido la necesidad de no reducir la enseñanza a los aspectos conceptuales y de tener muy presente las estrechas vinculaciones existentes entre las dimensiones conceptual, procedimental y axiológica [2-7]. El punto de partida de nuestro acercamiento a este problema, ha sido que las distintas dificultades señaladas en la literatura sobre el aprendizaje de la energía, están estrechamente relacionadas entre sí y con otros aspectos –conceptuales, metodológicos/procedimentales y axiológicos– escasamente contemplados en los trabajos realizados hasta aquí. Según ello, la adecuada apropiación de este

¹E-mail: j.l.domenech@ua.es.

campo de conocimientos, en el nivel de la educación secundaria superior, exige un planteamiento globalizador en el que se integren con sentido aspectos fundamentales de los tres tipos citados, que hemos descrito y defendido en otro trabajo [8]. Sin embargo, lejos de un enfoque integrador, el análisis de los libros de texto más utilizados en los centros educativos nos permite afirmar que la enseñanza habitual de esta problemática se suele limitar a una introducción, fundamentalmente operativa, de los conceptos de energía, trabajo y calor y al establecimiento del principio de conservación de la energía, poniendo un escaso énfasis en las ideas cualitativas que subyacen a los conceptos, las relaciones entre ellos, etc. [5].

Algunas investigaciones han puesto de relieve ciertas deficiencias del aprendizaje alcanzado con esta enseñanza tan reduccionista, centrándose en las concepciones inadecuadas que sobre la energía mantienen los estudiantes después de la instrucción. Así, Ogborn [9] ha apuntado la tendencia de los alumnos a atribuir a la energía la causa de que los procesos ocurran; Solbes y Tarín [10] han analizado las ideas de los estudiantes acerca de la energía y la forma como se enseña dicho concepto en la etapa de secundaria; Speltini y Dibar [11] han investigado qué entienden por conservación de la energía los alumnos de ingeniería; Liu, Ebenezer y Fraser [12] las concepciones mantenidas por universitarios; Stylianidou, Ormerod y Ogborn [13] las dificultades de los alumnos ante los dibujos e imágenes que se incluyen en los libros de texto en los capítulos referidos a la energía...

En este trabajo profundizamos en el aprendizaje alcanzado en dos conceptos estrechamente relacionados con la energía: trabajo y calor.

2. Hipótesis. Fundamentación

Los estrechos vínculos existentes entre trabajo, calor y energía exigen detenernos en el significado de aquellos conceptos como requisito para ayudar a los estudiantes a elaborar una comprensión adecuada de lo que supone la energía. Esto supone, de entrada, evitar manejos puramente operativos, que es lo que suele hacerse en la enseñanza habitual [5, 6].

Limitándonos a objetos y sistemas inanimados² podemos aceptar, como punto de partida, que la energía es la capacidad de un sistema para originar cambios,³ y que dicha capacidad puede cambiar de dos ma-

neras diferentes.⁴ En efecto, la consideración de sistemas como, por ejemplo, un libro situado en las proximidades de la Tierra, un bloque unido al extremo de un muelle, un objeto en movimiento, etc., y la forma en que es posible cambiar su energía, apoya la idea de que dicho cambio ocurre debido a la aplicación de fuerzas externas, siempre y cuando dichas fuerzas se desplacen. A esta manera de cambiar la energía de un sistema se le llama trabajo. Esta concepción cualitativa de trabajo está vinculada a los esfuerzos de los ingenieros por comparar cuantitativamente el “trabajo” realizado por los animales de carga con el realizado por las primeras máquinas térmicas [14].

También podemos cambiar la energía de un sistema haciéndole interactuar con otros que se encuentren a distinta temperatura. A esta manera se le llama calor. Una comprensión adecuada del calor supone, además, tanto la superación de la confusión entre calor y temperatura, como la concepción del calor como fluido material –que históricamente se corresponde a la teoría del calórico- o la muy frecuente interpretación del calor como una forma de energía [15-18]. Así, fueron las dificultades surgidas con la teoría del calórico (y muy en particular la que planteaba la extracción indefinida del calor supuestamente contenido en un cuerpo, al golpearlo o someterlo a fricción) las que llevaron a conjeturar la equivalencia entre calor y trabajo, tomando en consideración las interacciones a nivel microscópico, es decir, aceptando las concepciones corpusculares acerca de la naturaleza de la materia. Y así surgió también la idea de energía interna como un concepto distinto del calor.

En definitiva, el calor no es una sustancia (calórico), ni tampoco una forma de energía, como a menudo se afirma, incluso en libros de texto [5, 19]. Los alumnos han de ser conscientes de que con los términos energía calorífica o térmica nos referimos a la energía de las partículas constituyentes, es decir, a la energía interna. El término calor se reserva para los intercambios de energía que ocurren entre cuerpos a temperaturas diferentes. Así, desde un punto de vista científico, no es correcto en el caso, por ejemplo, de un coche que frena, hablar de la conversión de energía cinética en calor: deberíamos hablar de la transformación de energía cinética en energía interna [20]. No obstante, el problema no está en la terminología usada, sino en su correcta interpretación: seguimos hablando, por ejemplo, de la “salida” del Sol, pero comprendemos que es

²Las transformaciones experimentadas por los seres vivos son tan complejas que conviene, en los estadios iniciales, dejarlos de lado. Esta limitación al estudio, en los primeros momentos, de las situaciones más sencillas es una característica de la manera de trabajar de los científicos, que facilita el éxito en las investigaciones emprendidas.

³Aunque esta concepción no es correcta científicamente, en Bachillerato permite avanzar con comprensión y ser modificada cuando se advierten sus limitaciones al llegar a situaciones en que se conserva la energía de un sistema, pero disminuye su capacidad para realizar transformaciones. Además, todos nosotros cuando afirmamos que un mismo sistema físico tiene más energía en un estado, A, que en otro, B, imaginamos que puede realizar una transformación mayor sobre el exterior al pasar del estado A hasta alcanzar un estado de referencia, que cuando pasa del estado B al mismo estado de referencia. Por ello, dicha concepción resulta intuitiva y fácilmente aceptable por los alumnos, y, al mismo tiempo, modificable al tomar conciencia de sus limitaciones.

⁴Dejando de lado, en esta etapa, todo lo relacionado con la radiación.

algo que se produce por el giro de la Tierra alrededor de su eje. Del mismo modo, no hay inconveniente en seguir diciendo que “los neumáticos se han calentado”, pero con eso hemos de entender que ha aumentado su energía interna, así como la del entorno, y no su calor. Como escribe Solomon [21], los alumnos “no deben perder la capacidad de comunicarse”: han de seguir comprendiendo el significado de expresiones como “la lana es caliente” o “estamos consumiendo toda nuestra energía”. Y añade: “Lo que estamos pidiendo a nuestros alumnos es que puedan pensar en dos dominios de conocimientos diferentes y que sean capaces de distinguir entre ambos”.

Todo lo anterior nos permite escribir, de una forma esquemática, que las variaciones de energía, ΔE , pueden ser debidas a la realización de trabajo, W , y/o calor, Q , de acuerdo con la expresión $\Delta E = W + Q$ (donde W representa el trabajo realizado por las fuerzas exteriores al sistema, mientras que Q engloba las variaciones de energía debidas a diferencias de temperatura).

Vemos, así, que los conceptos de trabajo y calor están estrechamente ligados a las variaciones de energía de los sistemas y su aprendizaje supone mucho más que sus definiciones operativas.

Nuestra hipótesis es que la enseñanza habitual no consigue que los estudiantes de secundaria terminen sus estudios con las concepciones sobre trabajo y calor anteriores.

3. Diseños experimentales para la contrastación de la hipótesis

Para la contratación de la hipótesis hemos procedido a analizar la comprensión alcanzada por los estudiantes al final de la secundaria. Por lo que respecta al diseño experimental hemos de advertir que los alumnos analizados no han sido escogidos al azar –por lo que realmente debemos hablar de un diseño cuasi experimental– sino que hemos pasado cuestionarios a *todos* los grupos de alumnos que cursaban la asignatura de física del Curso de Orientación Universitaria (17/18 años, último curso de la educación secundaria postobligatoria) de cuatro centros educativos de localidades diferentes, seleccionados con el único criterio de cercanía al centro de uno de los investigadores. Es necesario resaltar que estos alumnos han seguido el itinerario de “ciencias puras” (matemáticas, física y química) en el Bachillerato.

El tiempo dedicado al estudio de la energía en los programas de secundaria superior ha ido disminuyendo desde el antiguo COU hasta el actual Bachillerato. En dicho curso la física y la química eran obligatorias para los alumnos que elegían la opción científica. Por lo que se refiere a los temas tratados, más de las dos terceras partes de los contenidos de física trataban sobre mecánica newtoniana (incluyendo los conceptos de trabajo y energía); por lo que respecta al calor, si bien los fenómenos caloríficos no eran estudiados en física, la termoquímica sí que era tratada con una cierta pro-

fundidad en química. Puesto que deseamos analizar la comprensión adquirida tras la enseñanza habitual, los estudiantes de COU representan una mejor muestra que los del actual Bachillerato, ya que tenían mayores oportunidades para haber aprendido los conceptos objeto de nuestro estudio.

Por lo que respecta a las actividades propuestas a los estudiantes han sido seleccionadas a partir del análisis experto del contenido:

- Inicialmente los profesores/investigadores profundizamos en el estudio de la energía, (lo que supuso un estudio de la evolución histórica de las ideas sobre energía, trabajo y calor) hasta conseguir una autopercepción de “transparencia conceptual”. Tras este estudio –y guiados siempre por una intencionalidad didáctica– identificamos lo que algunos investigadores [22-24] han llamado “indicadores de comprensión” (indicadores que toda persona que comprenda bien el tema de energía debe haber conseguido), entre los cuales se encuentran los que hemos detallado en el apartado anterior.

- A continuación, los investigadores pensamos una serie de cuestiones que permitieran hacer aflorar el pensamiento de los alumnos sobre estos indicadores. Dichas cuestiones fueron pasadas a otros tres expertos que emitieron su valoración sobre en qué medida creían que eran útiles para lo que se quería “medir” y sugirieron modificaciones.

- A partir de ahí, los investigadores reelaboramos las cuestiones iniciales, y las pasamos a unos pocos alumnos (10). Las respuestas de este pequeño “grupo piloto” sirvieron para ajustar los enunciados (evitando posibles interpretaciones erróneas de los mismos), y para valorar si las respuestas servían para encontrar lo que buscábamos.

- Después de este proceso, las cuestiones quedaron tal y como se presentan aquí.

- Puesto que buscamos respuestas reflexivas, el planteamiento de un número considerable de actividades podría desanimar a algunos estudiantes a involucrarse activamente en su resolución, dando respuestas rápidas o superficiales a fin de acabar lo antes posible. Es por ello que decidimos que ningún alumno se enfrentase a más de cuatro tareas. Hemos utilizado pues diferentes muestras de alumnos para la contrastación deseada. Además, en el caso de actividades parecidas hemos procurado no plantearlas a un mismo grupo de alumnos. En total, en el estudio han participado 170 estudiantes. Las pruebas fueron pasadas en nuestra presencia, sin limitación de tiempo y, aproximadamente, dos semanas después de haber abordado estos conceptos en sus clases.

Para analizar las respuestas de los alumnos se ha procedido, en primer lugar, a preparar una red de análisis donde se encontraban los indicadores de comprensión que se esperaban encontrar en las respuestas de los alumnos. Cada investigador por separado

valoró las respuestas a las cuestiones, señalando en la red en qué medida se expresaban ideas que evidenciaban la adquisición del indicador correspondiente. Tras el análisis de las respuestas de veinte alumnos, se hizo una puesta en común con la finalidad de aumentar la coherencia del análisis. El grado de coincidencia al analizar estas respuestas fue muy elevada (mayor del 90%), y las discrepancias tenían su origen más frecuente en las dudas surgidas al valorar si una idea vaga o esquemáticamente expresada podía ser considerada como evidencia de adquisición de un indicador. Estas dudas se resolvieron ampliando el análisis correspondiente a la totalidad de cuestiones respondidas por el alumno. Tras esta decisión, en muy pocos casos (menos del 2%) hubo dudas en alguno de los investigadores sobre la valoración, o discrepancias entre ambos, y en dichos casos se ha escogido la opción más desfavorable para nuestra hipótesis.

Además, para apreciar en contexto los resultados después de la enseñanza, entrevistamos, previamente al estudio de este tema, a cinco alumnos académicamente brillantes (con calificación de sobresaliente en física y química el curso anterior y seleccionados por sus profesores). Estas entrevistas son simplemente una referencia (sin ninguna aspiración de validez estadística) del “mejor nivel” de conocimientos de los estudiantes antes de la enseñanza habitual de esta problemática.

Las entrevistas se realizaron al comienzo del curso, sin límite de tiempo, con un cuestionario semiestructurado, que permitía al entrevistador plantear preguntas clarificadoras con relación a las respuestas de los alumnos. La razón para no realizar más entrevistas era no contaminar la población a estudiar. Advertiremos que en el curso anterior, todos habían estudiado los conceptos de trabajo y energía, pero no ocurría lo mismo con los fenómenos caloríficos.

A continuación presentamos las tareas propuestas e indicamos qué sería de esperar que respondiesen los alumnos si realmente dispusieran de una comprensión adecuada de los conceptos analizados.

1. *Si tuvieses que explicarle a un compañero qué es el calor, ¿qué le dirías?*

Una concepción adecuada de este concepto supone, entre otras cosas, ser conscientes de que:

- El calor no es ningún tipo de sustancia contenida en los cuerpos, ni tampoco una clase de energía, sino una forma de cambiar la energía de un sistema.
- No tiene sentido hablar de energía “calorífica” por la misma razón que no hablamos de energía “trabajosa”.
- La energía interna está asociada a las partículas constituyentes de la materia; el calor es la manera de cambiar la energía de un sistema debido a diferencias de temperatura.

2. *Escribe una frase que incluya los términos calor y energía.*

A menudo nos referimos al calor como si se tratase

de una forma de energía, como por ejemplo “al poner en contacto dos objetos a temperaturas diferentes, disminuye el calor del cuerpo caliente y aumenta el del frío”. Sabemos, sin embargo, que desde un punto de vista científico, se trata de una afirmación incorrecta. El calor no es una forma de energía, sino una manera de cambiar la energía de un sistema. Lo que aumenta o disminuye al cambiar la temperatura de un objeto no es el calor sino su energía interna. Con esta actividad pretendemos averiguar si los alumnos proponen expresiones que podemos considerar correctas desde un punto de vista científico o si, por el contrario, proponen frases como la apuntada anteriormente.

Ya nos hemos referido a que no se trata de cambiar “la forma de hablar” sobre el calor o la energía. Los propios científicos utilizan un “lenguaje derivado de la teoría del calórico” cuando hablan entre ellos, por resultar menos farragoso que un lenguaje estricto aunque perfecto desde el punto de vista conceptual. Lo importante, es que cuando se demanda el significado científico de lo que se dice, la interpretación sea correcta. Con el propósito de profundizar en el significado de las afirmaciones hechas por los estudiantes sobre el calor y la energía les planteamos la siguiente actividad.

3. *Cuando ponemos en contacto dos objetos que se encuentran a diferente temperatura, solemos decir que “pasa calor desde el objeto caliente al frío, hasta que las temperaturas se igualan”. Desde un punto de vista físico, ¿qué hemos de entender con esta afirmación?*

Se trata de averiguar en qué medida los alumnos matizan la explicación dada a la situación planteada, señalando, explícitamente, que realmente lo que ocurre no son intercambios de calor, sino intercambios de energía interna. Si ello fuese así, los estudiantes evidenciarían que no ven en el calor una forma de energía. También aceptaremos como válidas las matizaciones hechas a partir de la teoría cinético-corpúscular.

4. *Si tuvieses que explicarle a un compañero qué es el trabajo, ¿qué le dirías?*

Entre otras cosas, una comprensión satisfactoria del concepto de trabajo supone aceptar que:

- El trabajo es una manera de provocar cambios en los sistemas por medio de fuerzas que se desplazan.
- La realización de trabajo origina variaciones en la energía de los sistemas.
- Su definición operativa, para el caso de una fuerza constante en módulo y dirección, viene dada por la expresión $W = |\mathbf{F}| |\Delta \mathbf{r}| \cos \vartheta$.

5. *Lanzamos un objeto de 2 kg sobre una superficie horizontal con una velocidad de 10 m/s y recorre una distancia de 20 m hasta pararse. Calcula la fuerza de rozamiento que ha actuado sobre el objeto.*

Se trata de un tarea que puede ser resuelta a partir de los principios de la dinámica y de las ecuaciones de la cinemática, pero también, y de una manera más sencilla, mediante las relaciones trabajo-energía. Pretendemos averiguar por qué enfoque se deciden los es-

tudiantes.

6. Queremos subir un tonel a un camión y disponemos de diferentes rampas. ¿Crees que haremos el mismo trabajo en todos los casos? Razona la respuesta. (ver Fig. 1)

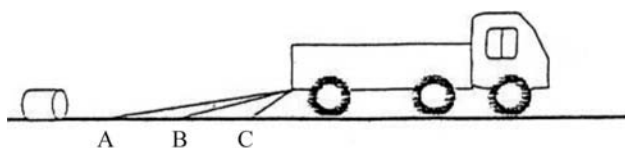


Figura 1 - Distintas rampas para subir un tonel a un camión.

El objetivo de esta actividad es averiguar si los alumnos se acercan a la determinación del trabajo realizado a partir de su relación con la fuerza y el desplazamiento, o a partir de su relación con el cambio de energía experimentado por el tonel (y la Tierra). El trabajo realizado es el mismo independientemente de la rampa utilizada. La consideración de la fuerza aplicada ha de llevar a argumentar que cuánto mayor es la inclinación de la rampa, mayor es dicha fuerza pero menor la distancia recorrida, de manera que ambos efectos se compensan. Por lo que se refiere a la determinación del trabajo a partir de su relación con la variación de energía, puesto que la transformación experimentada por el tonel (y la Tierra) es la misma en las tres situaciones, también lo será la variación de energía, y, por tanto, el trabajo.

7. Según la ley de la gravitación universal, la Tierra atrae a la Luna con una fuerza de, aproximadamente, $2 \cdot 10^{20}$ N. Supondremos que la Luna se mueve a velocidad constante y que describe un movimiento circular de 386.000 km de radio. Calcula el trabajo hecho por la Tierra sobre la Luna cuando esta describe un cuarto de vuelta (ver Fig. 2).

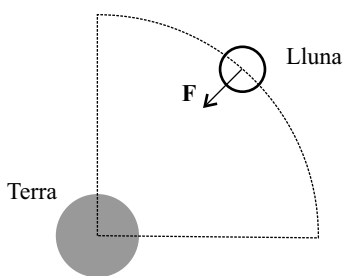


Figura 2 - Trayectoria seguida por la Luna alrededor de la Tierra.

Esta actividad supone otra ocasión para analizar en qué medida los alumnos se acercan a la estimación del trabajo realizado en un proceso a partir de su relación con la energía. En el caso en que los alumnos estuviesen habituados a realizar razonamientos cualitativos, deberían analizar la situación planteada a partir de la relación del trabajo con la energía. Puesto que a lo largo de su recorrido la Luna no cambia su capacidad para realizar transformaciones, $\Delta E = 0$, y, por consiguiente,

el trabajo realizado por la única fuerza actuante sobre ella, la ejercida por la Tierra, será 0. Si la enseñanza habitual no impulsa a análisis cualitativos, cabe esperar que los alumnos utilicen la definición operativa de trabajo, $W = |\mathbf{F}| |\Delta \mathbf{r}| \cos \vartheta$. Analizaremos en qué medida esto es así.

Seguidamente, mostramos y comentamos las propuestas y argumentaciones realizadas por los estudiantes.

4. Análisis de los resultados

Empezaremos presentando un extracto de las cinco entrevistas mantenidas y que, volvemos a repetirlo, no tienen ninguna intención de validez estadística, sino simplemente una referencia indicadora del mejor nivel de comprensión de los alumnos antes de tratar los conceptos de energía, trabajo y calor en el último curso de la secundaria postobligatoria.

- Ejemplos de fragmentos en los que los alumnos hablan sobre el calor y su relación con la energía:

- A la hora de explicar qué entienden por calor, cuatro alumnos indicaron que el calor es energía, y todos lo relacionaron con la temperatura de un objeto (asociación que se ha apuntado en otras investigaciones [25-27]):

Entrevistador: ¿Qué entiendes por calor?

Alumno 5: El calor es una fuente de energía.

Entrevistador: Si dispusiésemos de dos objetos iguales pero a diferente temperatura, ¿piensas que uno de ellos tendría más calor?

Alumno 5: Diría que sí, pero creo que el curso pasado, en clase dijimos que esto no es así.

Uno de los estudiantes, indicó que el calor provoca cambios, pero sin hacer referencia a las variaciones de energía que origina:

Entrevistador: ¿Qué entiendes por calor?

Alumno 1: El calor hace cambiar las cosas.

Entrevistador: Si dispusiésemos de dos objetos iguales pero a diferente temperatura, ¿piensas que uno de ellos tendría más calor?

Alumno 1: Sí, el que está a mayor temperatura.

- Al pedirles que explicasen qué hemos de entender, desde un punto de vista científico, con expresiones en las cuales se afirma que el calor pasa de unos cuerpos a otros, los cinco alumnos entrevistados dieron a entender que el calor es algo almacenado en los cuerpos y que se transfiere de unos a otros en los fenómenos caloríficos:

“Que el calor ha ido pasando de un cuerpo al otro, estabilizándose la temperatura”.
(Alumno 2)

“Que el calor se transmite hasta quedar los dos cuerpos de la manera más parecida posible”. (Alumno 4)

- Al plantearles, explícitamente, si el calor podía provocar cambios de energía en otros cuerpos, todos respondieron afirmativamente. Cuando se les indicó que, según esto, el calor era tanto una forma de energía como una manera de cambiar la energía de un sistema, los cinco alumnos indicaron que eso era realmente así y que el calor tiene ese doble significado:

“Cuando aportamos calor a un cuerpo su cantidad de calor aumenta”. (Alumno 3)

• Ejemplos de fragmentos en los que los alumnos hablan sobre el trabajo y su relación con la energía:

- Con relación a su concepción del trabajo, diremos que un alumno se mostró incapaz de decir alguna cosa al respecto. Los otros cuatro se limitaron a señalar la definición operativa, $W = |\mathbf{F}| |\Delta \mathbf{r}| \cos \vartheta$. Ninguno relacionó el trabajo con la energía:

El trabajo es igual a la fuerza hecha por la distancia y por el coseno del ángulo. (Alumno 2)

- Al plantearles la determinación de la fuerza de rozamiento que actúa sobre un cuerpo en movimiento, hemos visto que todos lo intentan hacer a partir de las ecuaciones de la dinámica y de la cinemática. Al sugerirles la posibilidad de utilizar los conceptos de trabajo y de energía para enfrentarse a dicha tarea, hemos encontrado serias carencias no sólo acerca de lo que supone una comprensión de la relación entre el trabajo y la variación de energía, sino también por lo que respecta al significado de las expresiones para su medida:

Entrevistador: ¿Crees que este problema se puede abordar con la expresión $W = \Delta E$?

Alumno 1: Ah, claro, con el trabajo.

Entrevistador: Pero, ¿piensas que se puede resolver con esta expresión?

Alumno 1: Es que aquí sólo hay un tipo de energía... No sé, no me acuerdo.

Entrevistador: ¿Puedes explicar qué significa la expresión $W = \Delta E$?

Alumno 1: Que la energía final menos la inicial es igual al trabajo. O sea a los cambios que tiene por desplazamiento... no, no me acuerdo muy bien.

Entrevistador: Pero, ¿crees que el problema se puede abordar con esta relación?

Alumno 1: Es que no se como se mide el trabajo.

Entrevistador: El trabajo hecho por una fuerza se define operativamente por la expresión $W = |\mathbf{F}| |\Delta \mathbf{r}| \cos \vartheta$.

Alumno 1: En este caso, el ángulo sería cero, y el coseno 1, pero, tenemos dos incógnitas, la fuerza y el trabajo... No, no lo podemos resolver.

Entrevistador: ¿Recuerdas haber abordado problemas semejantes a este a partir de las relaciones trabajo y energía?

Alumno 1: No.

- Las respuestas dadas al preguntarles sobre el trabajo realizado al subir por diferentes rampas un tonel a un camión, muestran que, aunque suelen referirse a la energía, casi todos justifican su respuesta a partir de la fuerza ejercida. Las argumentaciones hechas evidencian las dificultades de los estudiantes para analizar cualitativamente las situaciones y dar sentido a los resultados obtenidos:

Entrevistador: ¿En algún caso el trabajo realizado es menor?

Alumno 5: Todos igual, porque $W = E_c + E_p$ y si diésemos valores, nos daría el mismo resultado para la energía cinética y la potencial, y, por tanto, el trabajo sería el mismo.

Entrevistador: ¿Cómo estás seguro, si desconoces las expresiones para la medida de la energía cinética y la potencial?

Alumno 5: Porque me acuerdo del curso pasado, y esta es la solución.

Entrevistador: Piensa en la situación real, ¿crees que tendrías que hacer el mismo trabajo?

Alumno 5: El trabajo que yo tendría que hacer no sería el mismo, pero es que el concepto de trabajo que nosotros utilizamos no es el mismo que en física.

Hemos de resaltar que dos alumnos centran su atención en sólo uno de los factores influyentes (la magnitud de la fuerza aplicada o la distancia recorrida), sin detenerse en el hecho de que cuánto mayor es la fuerza ejercida menor es el desplazamiento del tonel, de manera que el trabajo realizado es el mismo. Se trata de la manifestación de lo que se ha dado en llamar *reducción funcional* y, según el cuál, en aquellos casos en que son diversos los factores que influyen en una magnitud, los estudiantes se fijan solamente en uno de ellos e ignoran al resto a la hora de hacer predicciones [28-30]:

Entrevistador: ¿En algún caso el trabajo realizado es menor?

Alumno 4: Realizaremos un trabajo menor con aquel plano que esté menos inclinado, el A.

Entrevistador: Querría que imaginases la situación real y que intentases utilizar la expresión $W = |\mathbf{F}| |\Delta \mathbf{r}| \cos \vartheta$ para justificar tu respuesta.

Alumno 4: Si el ángulo es mayor hemos de hacer más fuerza para subir y, entonces, hemos de hacer más trabajo, ya que hace falta más energía.

Entrevistador: Sí, pero te pregunto por el trabajo no por la fuerza.

Alumno 4: Sí, ya lo sé, pero una fuerza mayor significa un trabajo mayor.

- Estas confusiones y dificultades aparecen también cuando se enfrentan a la determinación del trabajo realizado por la Tierra sobre la Luna cuando ésta describe un cuarto de vuelta. Los cinco alumnos razonan la respuesta a partir de la fuerza que actúa sobre la Luna:

Alumno 2: El coseno de 90° es cero y, por tanto, el trabajo es cero.

Entrevistador: ¿Y crees que este resultado tiene sentido?

Alumno 2: Sí, si el ángulo es de 90° , este es el resultado que da.

Entrevistador: Pero, ¿crees que es posible que la Luna le dé vueltas a la Tierra sin que se le haga ningún trabajo?

Alumno 2: Sí, sí que lo hace... Pero, no estoy demasiado seguro porque no tengo demasiado claras las diferencias entre trabajo y fuerza. No sé.

Estas respuestas y argumentaciones hacen intuir que, inicialmente, los alumnos disponen de una escasa comprensión de los conceptos de calor, trabajo y de su relación con la energía. No obstante, ello no sería dramático si su comprensión mejorase sustancialmente en el último curso de la secundaria.

A continuación presentamos los resultados obtenidos por los alumnos después de haber estudiado en clase dichos conceptos. Junto a los porcentajes de estudiantes que indican los diferentes aspectos analizados, hemos considerado conveniente presentar algunas de las afirmaciones hechas pues clarifican su nivel de comprensión.

La Tabla 1 recoge los resultados cuando se les pidió que explicasen a otro estudiante qué entienden por calor (1ª actividad).

Tabla 1 - Propuestas hechas con relación al calor (%).

	n = 33	
	%	(Sd)
El calor es una manera de cambiar la energía	15	(1)
Distinguen la energía interna del calor	3	(-)
Hacen afirmaciones incorrectas	85	(1)

Sólo el 15% de los alumnos a quienes se ha propuesto esta actividad indican que el calor es una forma de cambiar la energía de un sistema, y únicamente un alumno menciona a la energía interna como un concepto distinto del calor.

La gran mayoría de los estudiantes (85%) se refieren al calor como un tipo de energía, o como algo substancial:

El calor es una energía natural o también artificial, es una energía, la cual tiene normalmente una temperatura.

Le diría que el calor es un tipo de energía que desprende un cuerpo y no la temperatura que pueda hacer un día de mucho calor, ya que muchos conceptos no son los mismos en la vida cotidiana de las personas.

Calor y temperatura no es lo mismo, pero la temperatura está relacionada con el calor.

Algunos utilizan el calor y el frío como conceptos diferenciados:

El calor es cuando un cuerpo emite temperaturas elevadas. Por ejemplo, una estufa emite calor y un congelador emite frío.

[El calor] es la propiedad que tiene un cuerpo por el hecho de estar caliente, por tener temperatura. Es decir, cuando le aplicamos fuego a un trozo de hierro, éste comienza a calentarse, y cuando lo tocamos, nos quemamos porque tiene calor y el calor se mide con la temperatura. Por contra, cuando tocamos el hielo no nos quemamos porque no tiene calor sino frío.

Ningún alumno (de los 31 a los que se planteó la 2ª cuestión) propuso, con relación al calor y la energía, una frase que podamos considerar correcta desde un punto de vista científico. Todos se refirieron al calor como un ingrediente de los cuerpos o como una forma de energía:

Cuando un objeto tiene calor desprende energía.

Todos los cuerpos por encima de 0 K emiten calor.

La energía se puede transformar en calor.

La fuente de calor es la energía.

Con el propósito de decidir en qué medida la referencia al calor como una forma de energía es simplemente una manera de expresarse, les pedimos que analizaran la manera en que habitualmente se explica el equilibrio térmico que se alcanza al poner en contacto objetos a temperaturas diferentes (3ª actividad). En la Tabla 2

se muestra que algunos alumnos (19%) matizan la explicación dada en el enunciado y para ello hacen uso de la teoría cinético-corpúscular o del concepto de energía interna (lo cual supone una interpretación adecuada de lo que ocurre), pero la gran mayoría (81%), o no responden o lo hacen incorrectamente. Apuntaremos que casi la mitad de los alumnos (43%) hablan de transferencias de calor.

Tabla 2 - Propuestas dadas con relación al equilibrio térmico (%).

	n = 33	
	%	(Sd)
Usan la teoría corpúscular o la energía interna	19	(1)
Lo explican a partir de un trasvase de calor	43	(1)
Otras explicaciones incorrectas o sin respuesta	38	(1)

Algunos de los argumentos aportados son:

Que los dos cuerpos tienden a igualar las temperaturas, bien transmitiendo o bien absorbiendo calor.

Cuando ponemos en contacto dos cuerpos, el calor tiende a igualarse formándose un gradiente térmico”

Cuando se les pidió que explicasen a otra persona qué es el trabajo (4ª actividad), la gran mayoría (79%, como se ve en la Tabla 3) se limitó a proponer la definición operativa, $W = |\mathbf{F}| |\Delta \mathbf{r}| \cos \vartheta$.

Tabla 3 - Propuestas hechas con relación al trabajo (%).

	n = 33	
	%	(Sd)
Idea cualitativa correcta de trabajo	3	(-)
Definición operativa: $W = \mathbf{F} \Delta \mathbf{r} \cos \vartheta$	79	(1)
Aparece el término energía	21	(1)
Relacionan el trabajo y variación de energía	3	(-)

En aquéllos casos en que se proponía alguna idea sobre el significado del término trabajo, ésta se limitaba a la descripción de la expresión o evidenciaba una comprensión errónea de la misma:

El trabajo es una fuerza y esta depende de unos determinados factores. Depende, por una parte, de la cantidad de fuerza realizada sobre un determinado cuerpo. También depende de la distancia en que está efectuándose esta fuerza. Y por último, hemos de tener en cuenta el ángulo que forma con la horizontal. De todo esto podemos afirmar que el trabajo es $W = F \cdot d \cdot \cos \alpha$.

El trabajo es la fuerza que realizamos por el desplazamiento y por el coseno del ángulo con que se mueve el objeto.

Aun cuando el 21% de los estudiantes mencionan a la energía cuando se refieren al trabajo, la gran mayoría (todos excepto uno) hacen afirmaciones incorrectas:

Es la energía (fuerza) que hemos de realizar para mover, romper, lanzar, etc., un objeto.

El trabajo depende también del espacio, del tiempo, etc., en que se realiza la fuerza

En la Tabla 4 se muestran los resultados obtenidos al pedirles la determinación de la fuerza de rozamiento que actúa sobre un cuerpo que se ha lanzado sobre una superficie horizontal (5ª actividad). Constatamos que ningún estudiante se enfrenta a esta situación a partir de las relaciones trabajo-variación de energía. Este resultado vuelve a evidenciar el escaso aprendizaje conseguido de dichas relaciones, y eso a pesar de que hacia dos semanas que los alumnos las habían estado utilizando en clase (se trata, por lo demás, de un resultado coincidente con el obtenido por otros investigadores [31-34]).

Tabla 4 - ¿Cómo resuelven un problema de movimiento? (%).

	n = 33	
	%	(Sd)
Ecuaciones de la dinámica y la cinemática	74	(1)
Relación $W = \Delta E$	0	(-)
Resolución correcta	26	(1)

Cuando les hemos pedido (a 31 alumnos) que indicasen con qué rampa se realizaba un trabajo menor al subir un tonel a un camión (6ª actividad), hemos encontrado que sólo el 32% afirma que el trabajo realizado es independiente de la rampa usada.

Al analizar las argumentaciones realizadas por los estudiantes que responden correctamente hemos encontrado que un poco más de la mitad lo justifica a partir de la definición operativa del trabajo realizado por una fuerza, e indicando que si bien la fuerza realizada en el caso A es menor que en el B y en el C, el desplazamiento es mayor, de manera que dichos efectos se compensan. El resto indican que puesto que la altura a que asciende el tonel es la misma en las tres situaciones, también lo será el trabajo realizado, lo cual supone que estos alumnos (4 del total) razonan en términos de energía.

En relación al trabajo realizado por la Tierra sobre la Luna cuando ésta gira un cuarto de vuelta (7ª actividad), hemos encontrado que sólo el 10% de los 31 alumnos a quienes se les propuso dicha tarea afirman que la Tierra no hace ningún trabajo sobre la Luna. Al analizar las argumentaciones realizadas por los estudiantes que responden correctamente hemos encontrado que todos justifican dicho resultado por el hecho de ser perpendiculares las direcciones de la fuerza y el desplazamiento. Ninguno hace uso de la relación $W = \Delta E$, lo cual vuelve a poner de manifiesto la poca comprensión alcanzada respecto de la conexión entre el trabajo y la variación de energía.

5. Conclusiones

Los resultados que acabamos de presentar confirman nuestra hipótesis de que la enseñanza habitual no consigue que los estudiantes elaboren una idea aceptable de los conceptos de trabajo y calor, y de su relación con la energía, y eso a pesar de que, muy generalmente, se limita a tratar estos aspectos parciales. A principios del curso, los alumnos disponen de concepciones básicamente cotidianas, pero lo preocupante es que dicho significado no mejora sustancialmente con la enseñanza.

De una manera resumida, podemos afirmar que una gran mayoría de los alumnos no dispone de ideas cualitativas acerca de los conceptos de trabajo y de calor, lo cual supone una deficiencia importante, pues ello les impide enfrentarse cualitativamente a las situaciones que se les plantean, de manera que puedan argumentar sobre ellas, analizar la validez de los resultados obtenidos, darles sentido, etc. Puesto que únicamente disponen de definiciones operativas, son éstas las que utilizan para resolver las tareas planteadas, pero el poco éxito alcanzado muestra el escaso significado de las mismas.

Por lo que se refiere al calor, algunos alumnos ven en él un agente productor de cambios, pero son muy pocos los que lo distinguen de la energía interna. A la luz de las afirmaciones propuestas en las diferentes actividades y entrevistas, podemos afirmar que los estudiantes, en sus clases, es decir, en un contexto académico, utilizan una concepción cotidiana del calor: el calor origina cambios en los sistemas (concepción aceptada por la ciencia), pero también ven en él una medida de lo caliente que se encuentra un objeto (lo que científicamente sería la energía interna).

En relación al trabajo, el hecho de carecer de una concepción cualitativa de dicha magnitud les impide no sólo acercarse cualitativamente a las situaciones sino, también, dar significado a la definición operativa.

A la hora de buscar razones que den cuenta de lo escasamente difundida que está la conexión entre el trabajo y la variación de energía (y eso a pesar de ser un aspecto que se trata en todos los cursos) podemos pensar en la superficialidad con que se introducen y desarrollan los conceptos en la enseñanza habitual. Así, por ejemplo, en la inmensa mayoría de las situaciones que se abordan en clase, el trabajo realizado se determina a partir de la fuerza y el desplazamiento; no se proponen tareas en las que el trabajo se calcule a partir de la variación de energía, o, lo que sería preferible, determinarlo, siempre que fuera posible, de las dos maneras y analizar la coherencia de los resultados obtenidos. Habitualmente, en las clases, la expresión $W = \Delta E$ se usa únicamente para determinar velocidades, alturas, distancias recorridas o fuerzas, pero no para determinar el trabajo.

No obstante, y a pesar de este reduccionismo, la

enseñanza habitual no se consigue que los estudiantes la utilicen para enfrentarse a los movimientos: todos usan los conceptos de la cinemática y la dinámica. Seguramente en ello hemos de ver la tendencia de los alumnos (y de las personas en general) a no ir más allá de lo que se tiene delante. Es decir, si lo que se pretende determinar es la velocidad o la distancia recorrida, lo más “inmediato” es recurrir a las ecuaciones de la cinemática (que es donde aparecen dichas magnitudes); si lo que se demanda es la fuerza, usar la ecuación fundamental de la dinámica. Utilizar los conceptos de trabajo y de energía a la hora de calcular la velocidad, la distancia o la fuerza, es algo que no es inmediato ni evidente en sí mismo: se necesita un dominio aceptable de estos conceptos para verlos pertinentes a la hora de enfrentarse a los movimientos. El que ningún alumno lo haga evidencia que dicho dominio no se consigue.

El hecho de que un porcentaje considerable se fije, a la hora de hacer estimaciones sobre el mayor o menor trabajo realizado, en sólo una de las magnitudes influyentes (fuerza o desplazamiento) confirma el reduccionismo funcional como una característica de la manera de razonar de los estudiantes.

Merecen un comentario las referencias frecuentes que los estudiantes hacen respecto del diferente significado que a los conceptos científicos se les da en la vida diaria. Se trata, sin duda, de una idea transmitida por la enseñanza habitual pero que proporciona una imagen distorsionada de lo que constituye el proceso de construcción de conocimientos. Por supuesto que, habitualmente, hay diferencias en su significado, pero ello no puede esconder el origen cotidiano de muchos conceptos científicos. Así, la definición operativa de trabajo está históricamente ligada al intento de los científicos por comparar el trabajo realizado por máquinas con el realizado por animales de tracción [14, 34]. En relación al calor apuntaremos que hasta mediados del siglo XIX dicho concepto se utilizaba en el mismo doble sentido en que lo utilizan los estudiantes [19, 36] y, además, era visto como un fluido contenido en los cuerpos. El énfasis en la desconexión entre los significados cotidiano y científico de los conceptos esconde la racionalidad de la ciencia, su naturaleza tentativa, en la que el significado de los conceptos va evolucionando a medida que van usándose para abordar nuevos problemas, etc., lo cual constituye un obstáculo para el aprendizaje [37, 38].

Resumidamente, la limitación que suele hacerse en la enseñanza habitual a tratar, básicamente, los conceptos operativos de trabajo y calor no consigue, ni tan siquiera, el aprendizaje de dicho aspecto parcial. Lejos de este reduccionismo, podemos suponer que facilitaremos su comprensión en la medida en que los alumnos conozcan los problemas que se intentan resolver, su carácter hipotético, sus limitaciones, las relaciones entre ellos, las modificaciones que experimentan en su significado, las implicaciones tecnológicas, sociales

y medioambientales, etc. En definitiva, y esta es una hipótesis cuya contrastación dejamos para otro trabajo, mejoraremos el aprendizaje si nos enfrentamos a esta problemática de una manera holística.

Referencias

- [1] R.W. Bybee, *The American Biology Teacher* **53**, 146 (1991).
- [2] D. Gil-Pérez, J. Carrascosa, C. Furió y J. Martínez-Torregrosa, *La enseñanza de las ciencias en la educación secundaria* (MEC, Madrid, 1991).
- [3] D. Hodson, *International Journal of Science Education* **14**, 541 (1992).
- [4] National Research Council. *National Science Education Standards* (DC National Academy Press, Washington, 1996).
- [5] J.L. Doménech, D. Gil-Pérez, A. Gras, J. Guisasola, J. Martínez-Torregrosa, y J. Salinas, *Revista de Enseñanza de la Física* **14**, 45 (2001).
- [6] J. Guisasola, A. Gras-Martí, J. Martínez-Torregrosa, J.M. Almudi e C. Becerra, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **26**, 197 (2004).
- [7] J. Guisasola, C. Furió y M.J. Cebeiro, En *Science education in focus* (Nova Science Publishers, Inc, Hauppauge, 2008).
- [8] J.L. Doménech, D. Gil-Pérez, A. Gras, J. Guisasola, J. Martínez-Torregrosa, J. Salinas, R. Trumper, P. Valdés, and A. Vilches, *Science & Education* **16**, 43 (2007).
- [9] J. Ogborn, En R. Driver y R. Millar (eds.) *Energy Matters* (University of Leeds, Leeds, 1986).
- [10] J. Solbes y F. Tarín, *Enseñanza de las Ciencias* **16**, 387 (1998).
- [11] C. Speltini, C. y M.C. Dibar, *Science & Education* **11**, 475 (2002).
- [12] X. Liu, J. Ebenezer and D.M. Fraser, *Journal of Research in Science Teaching* **39**, 423 (2002).
- [13] F. Stylianidou, F. Ormerod. and J. Ogborn, *International Journal of Science Education* **24**, 257 (2002).
- [14] T.S. Kuhn, *La Tensión Esencial* (Siglo XXI, México, 1983).
- [15] C. Tarsitani y M. Vicentini, *Calore, Energia, Entropia* (Franco Angeli, Milán, 1991).
- [16] R.P. Bauman, *The Physics Teacher* **30**, 353 (1992).
- [17] M. Alonso y E. Finn, *Revista Española de Física* **10**, 25 (1996).
- [18] A.B. Arons, *American Journal of Physics* **67**, 1063 (1999).
- [19] M.I. Cotignola, C. Bordogna, G. Punte and O. Cappannini, *Science & Education* **11**, 279 (2002).
- [20] A.B. Arons, *Teaching in Introductory Physics* (John Wiley & Sons, New York, 1997).
- [21] J. Solomon, *European Journal of Science Education* **4**, 49 (1983).
- [22] R. López y J. Martínez-Torregrosa, *Enseñanza de las Ciencias* **23**, 321 (2005).
- [23] R. Verdú y J. Martínez-Torregrosa, *La Estructura Problemática de los Temas y Cursos de Física y Química como Instrumento de Mejora de su Enseñanza y Aprendizaje* <http://hdl.handle.net/10045/2782> (2005).
- [24] J. Guisasola, A. Montero, e M. Fernández, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **30**, 1604 (2008).
- [25] S.Y. Mak and K. Young, *School Science Review* **68**, 464 (1987).
- [26] J.M. Martínez y B.A. Pérez, *Enseñanza de las Ciencias* **15**, 287 (1997).
- [27] A.G. Harrison, D.J. Grayson and D.F. Treagust, *Journal of Research in Science Teaching* **36**, 55 (1999).
- [28] L. Viennot, En *Construction des Savoirs: Obstacles et Conflicts* (Agence d'ARC Inc, Ottawa, 1989).
- [29] L.C. McDermott, *Revista de Enseñanza de la Física* **6**, 19 (1993).
- [30] J. Guisasola, J. Salinas, J.M. Almudi e S. Velazco, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **25**, 195 (2003).
- [31] R. Duit, *European Journal of Science Education* **3**, 291 (1981).
- [32] A. Brook and R. Driver, *Aspects of Secondary Students' Understanding of Energy, Children's Learning Science Project* (University of Leeds, Leeds, 1984).
- [33] R. Driver and L. Warrington, *Physics Education* **20**, 171 (1985).
- [34] R.A. Lawson and L.C. McDermott, *American Journal of Physics* **55**, 81 (1987).
- [35] K.C. de Berg, *Science & Education* **6**, 511 (1997).
- [36] P.M. Harman, *Energía, fuerza y materia* (Alianza, Madrid, 1990).
- [37] C. Sutton, *Alambique* **12**, 8 (1997).
- [38] D. Gil y J. Martínez-Torregrosa, *Alambique* **20**, 17 (1999).