
LA ENSEÑANZA DE LA ENERGÍA: UNA PROPUESTA DE DEBATE PARA UN REPLANTEAMIENTO GLOBAL⁺*

J. L. Doménech

Universitat d'Alacant – España

D. Gil-Pérez

Universitat de València – España

A. Gras

Universitat d'Alacant – España

J. Guisasola

Universidad del País Vasco – España

J. Martínez-Torregrosa

Universitat d'Alacant – España

J. Salinas

Universidad de Tucumán – Argentina

R. Trumper

Universidad de Haifa – Israel

P. Valdés

Instituto Superior Pedagógico de La Habana – Cuba

Resumen

La importancia creciente dada al estudio de la energía y la constatación de serias dificultades en su aprendizaje han dado lugar a numerosas investigaciones, la mayoría de las cuales abordan aspectos conceptuales concretos. En nuestra opinión, sin embargo, las distintas dificultades señaladas en la literatura están relacionadas entre sí y con otros aspectos –tanto conceptuales, como procedimentales y axiológicos– insuficientemente contemplados en los estudios realizados hasta aquí. En este trabajo presentamos a debate un intento de análisis global.

⁺ Teaching of Energy. The Need of a Global Analysis

* *Recibido: marzo de 2003.*

Aceito: agosto de 2003.

Palabras clave: *Energía, dificultades de aprendizaje, análisis global.*

Summary

The growing importance given to the study of energy and the detection of serious difficulties in its learning has produced a great deal of researches, most of them centred in concrete conceptual aspects. But, in our opinion, the different difficulties pointed out in the literature are interrelated and connected to other aspects –conceptual as well as procedural and axiological – not sufficiently taken into account in these researches. Our aim in this paper has been to proceed to a global analysis, trying to avoid ineffective punctual approaches.

Keywords: *Energy, learning difficulties, global analysis.*

El estudio de la energía constituye uno de los núcleos básicos en todo currículo 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. Ese estudio resulta imprescindible para la comprensión de los procesos de unificación, auténticos hitos del desarrollo científico, que han mostrado los vínculos entre campos aparentemente inconexos; imprescindible también para la comprensión del funcionamiento de las máquinas e instrumentos que impregnan nuestra vida y, muy particularmente, para la adquisición de pautas de comportamiento ante los problemas ambientales y desequilibrios sociales que caracterizan la actual situación de *emergencia planetaria* (BYBEE, 1991), estrechamente asociada, entre otros, a las crecientes necesidades de recursos energéticos, al uso de los combustibles fósiles, etc.

La importancia creciente dada al estudio de la energía ha ido acompañada de la constatación de serias dificultades en el aprendizaje de este concepto, que afectan incluso a los 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.

Una gran mayoría de estas investigaciones sobre las dificultades, así como las propuestas para hacerles frente, se centran en aspectos conceptuales concretos, como, por ejemplo, la incorrecta interpretación de la energía como un fluido material, la confusión entre fuerza y energía, etc. Se trata, en general, de investigaciones asociadas a una orientación del *aprendizaje como cambio conceptual* (POSNER et al., 1982; DRIVER, 1988), destinadas a sacar a la luz las *concepciones alternativas* de

los estudiantes y a estudiar su evolución (o persistencia) como resultado de la enseñanza (PFUNDT y DUIT, 1998).

Esto es coherente con el *reduccionismo conceptual* que ha caracterizado la enseñanza, y la misma investigación e innovación, en la educación científica (DUSCHL y GITOMER, 1991). Pero hoy no podemos seguir ignorando la estrecha vinculación existente entre las dimensiones conceptual, procedimental y axiológica en el aprendizaje de las ciencias (GIL et al., 1991; HODSON, 1992; NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 1996). Cabe esperar, pues – ésa es, al menos, nuestra conjetura –, que las distintas dificultades señaladas en la literatura acerca del aprendizaje de la energía, estén estrechamente relacionadas entre sí y *con otros aspectos* – tanto conceptuales, como procedimentales y axiológicos – escasamente contemplados en los trabajos realizados hasta aquí. Según ello, la adecuada apropiación de este campo de conocimientos, exige un planteamiento global que evite dejar en la sombra aspectos fundamentales.

Nuestro propósito es abordar este análisis global, comenzando por presentar una propuesta de cuál es, en nuestra opinión, el conjunto de aspectos *relacionados* que debería tomarse en consideración en cualquier estudio mínimamente detenido, para ir más allá de inefectivos planteamientos puntuales.

Hemos fundamentado esta propuesta en una revisión cuidadosa de la literatura publicada en torno a la enseñanza/aprendizaje de la energía (DOMÉNECH, 2000) y en los resultados de la investigación e innovación en torno a la naturaleza del aprendizaje de las ciencias, hoy sintetizados en algunos handbooks (GABEL, 1994; FRASER y TOBIN, 1998) y en proyectos de renovación curricular (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 1996).

No se nos oculta, por supuesto, el carácter tentativo y debatible de nuestra propuesta. Al contrario, la presentamos con la **voluntad explícita de generar el debate**, de provocar el intercambio de puntos de vista y de evitar quedar prisioneros de visiones parciales, insuficientemente contrastadas. Enunciaremos para ello un conjunto de proposiciones que sometemos a discusión, con vistas a avanzar hacia posibles consensos acerca de cómo orientar la enseñanza de la energía, o hacia un mejor conocimiento de distintas orientaciones posibles.

La elaboración de este artículo ha respondido ya a esta voluntad de intercambio de puntos de vista y de debate en profundidad. Y hemos de señalar, a este respecto, que si bien algunas de las proposiciones que presentamos han contado, desde el principio, con el consenso de todos los autores de este trabajo, otras han provocado debates encendidos y nos han obligado a reiteradas matizaciones y rectificaciones enriquecedoras.

Procederemos, pues, seguidamente, a enunciar el conjunto de proposiciones que hemos consensuado y que proponemos, insistimos, como contribución a un debate que haga posible avanzar conjuntamente hacia una mejor comprensión de qué convendría incluir acerca de la energía – y cómo hacerlo – en un currículo de física, en el nivel de Secundaria superior. Dejaremos de lado aquí la discusión acerca de qué

hacer con alumnos más jóvenes, es decir, de cuándo iniciar el estudio de la energía y cómo hacerlo. Mientras autores como Warren (1986) sostienen que el concepto de energía no debe comenzar a enseñarse hasta que los estudiantes hayan alcanzado un alto nivel de razonamiento abstracto, otros como Solomon (1986) o Trumper (1993) consideran que habría que empezar cuanto antes, en la Primaria. Nos remitimos a los trabajos de dichos autores para una primera aproximación a este importante debate y nos centraremos aquí en qué enseñar acerca de la energía en el nivel de Secundaria superior, estructurando nuestra propuesta en siete apartados, estrechamente relacionados:

1. Interés y relevancia del estudio de la energía.
2. Estrategias para la *construcción tentativa* de los conocimientos científicos acerca de la energía.
3. Primera aproximación al significado del concepto de energía.
4. Carácter sistémico y relativo de la energía.
5. Significado físico de los conceptos de trabajo y calor y su relación con la energía.
6. Conservación, transformación y degradación de la energía.
7. (A modo de conclusión y perspectivas): Por una plena apropiación del campo de conocimientos de la energía.

I. Interés y relevancia del estudio de la energía

Entre las numerosas investigaciones sobre las concepciones alternativas de los estudiantes acerca de la energía (PFUNDT y DUIT, 1998) y otras dificultades para su correcto aprendizaje, no hemos encontrado aportaciones relativas al interés de su estudio, su relevancia, etc. Los trabajos de investigación sobre la energía se centran, en general, en los aspectos conceptuales. Podría pensarse que ello es debido a que la educación científica ha estado orientada hasta aquí para preparar a los estudiantes como si todos pretendieran llegar a ser especialistas en física, química o biología. *Por ello* – se suele afirmar (GIL y VILCHES, 2001) – los currículos planteaban, como objetivos prioritarios, que los estudiantes supieran, fundamentalmente, los conceptos, principios y leyes de esas disciplinas.

Dicha orientación habría de modificarse – se concede – *a causa de* que la educación científica se plantea ahora como parte de una educación general para toda la ciudadanía. Una educación que ha de prestar una mayor atención a aspectos como las relaciones ciencia-tecnología-sociedad, susceptibles de interesar a la mayoría de la población.

Pero es preciso hacer notar que una educación científica como la practicada hasta aquí, tanto en Secundaria como en la misma universidad, centrada casi exclusivamente en los aspectos conceptuales, es igualmente criticable como preparación de futuros científicos (GIL y VILCHES, 2001). Esta orientación transmite una

visión deformada y empobrecida de la actividad científica, que no solo contribuye a una imagen pública de la ciencia como algo ajeno e inasequible – cuando no directamente rechazable –, sino que está haciendo disminuir drásticamente el interés de los jóvenes por dedicarse a la misma (MATTHEWS, 1994; SOLBES y VILCHES, 1997). La gravedad y la extensión de estas deformaciones ha sido puesta de relieve por numerosas investigaciones (FERNÁNDEZ et al., 2002).

Cabe resaltar, además, que *esta enseñanza centrada en los aspectos conceptuales, dificulta, paradójicamente, el aprendizaje conceptual*. En efecto, la investigación en didáctica de las ciencias, tanto en el campo de las preconcepciones como en el de los trabajos prácticos, la resolución de problemas, etc., ha mostrado que "los estudiantes desarrollan mejor su comprensión conceptual y aprenden más acerca de la naturaleza de la ciencia cuando participan en investigaciones científicas, con tal que haya suficientes oportunidades y apoyo para la reflexión" (HODSON, 1992). Dicho con otras palabras, esta investigación ha puesto de relieve que *la comprensión significativa de los conceptos exige superar el reduccionismo conceptual* y plantear la enseñanza de las ciencias como una actividad, próxima a la investigación científica, que integre los aspectos conceptuales, procedimentales y axiológicos (DUSCHL y GITOMER, 1991).

De acuerdo con todo lo que venimos señalando enunciaremos tres primeras proposiciones:

1. Es preciso conocer los problemas que condujeron a la introducción del concepto de energía y de todo el cuerpo de conocimientos asociado si se quiere resaltar el carácter racional del conocimiento científico. Con otras palabras, es necesario que los estudiantes (¡y los profesores!) percibamos que los conceptos no se introducen de una manera arbitraria, sino que son invenciones que se hacen, con carácter tentativo, con el propósito de resolver **problemas de interés** (OTERO, 1985; OTERO y BRINCONES, 1987; BURBULES y LINN, 1991; GIL et al., 1991; HODSON, 1992; CAMPANARIO y MOYA, 1999).

2. Conviene discutir el interés de los problemas tratados, a la luz de las reflexiones de los estudiantes, así como de las razones que explican la dedicación de la comunidad científica a esta problemática.

Ambas proposiciones están claramente relacionadas y son básicas en el planteamiento de cualquier estudio científico. Contribuyen a dar sentido a dicho estudio, evitando que los alumnos se vean inmersos en el tratamiento de una situación sin haber podido siquiera formarse una primera idea motivadora o contemplado la necesaria *toma de decisiones* (tanto por su parte como por la de la comunidad científica), acerca de la conveniencia o no de dicho trabajo. En este caso, **es posible asociar el estudio de la energía al interés acerca de los cambios, de las transformaciones de la materia**: conocer por qué se producen, cómo favorecerlos, cómo cuantificarlos, cómo evitar aquellos no deseados, etc. (GIL, FURIÓ y CARRASCOSA, 1996). En particular, conviene discutir la posible contribución de este estudio a la comprensión y *transformación* del mundo, de las repercusiones tecnológicas, me-

dioambientales, sociales, etc., que el uso de recursos energéticos conlleva. Ello nos lleva al enunciado de la tercera y última proposición de este apartado:

3. La atención a las interacciones Ciencia/Tecnología/Sociedad ha de ser un aspecto esencial en éste y en cualquier campo científico si queremos salir al paso de visiones descontextualizadas de la ciencia, y, también, para formar ciudadanos y ciudadanas capaces de comprender el mundo en el que viven (impregnado de los productos de la indagación científica) y de adoptar actitudes responsables y fundamentadas ante el desarrollo científico y tecnológico y las consecuencias que se derivan (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 1996; RAVIOLO, SIRACUSA y HERBEL, 2000). En el caso de la energía, que aquí nos ocupa, esto supone estudiar, entre otras cosas:

- cuáles son las necesidades humanas que requieren recursos energéticos;
- cómo evolucionan dichas necesidades;
- cómo se distribuye el consumo mundial de los recursos;
- cuáles son los problemas tecnológicos, ambientales, etc., asociados al uso de las diversas fuentes de la energía (extracción, transporte, residuos...);
- cómo funcionan las máquinas facilitadoras de los cambios;
- cuáles son los debates actuales sobre reducción del consumo, energías alternativas, desequilibrios entre países desarrollados y en vías de desarrollo, etc., que dibujan un marco de auténtica *emergencia planetaria* (VILCHES y GIL, 2003).

No se trata, claro está, de imponer una determinada postura en cuestiones que han sido y siguen siendo debatibles, sino de no escamotear estos contenidos por su importancia para comprender la relevancia del trabajo científico. Hemos de insistir en que la construcción de un determinado cuerpo de conocimientos responde al intento de resolver problemas de interés para los científicos (o para quienes les financian), y conviene, por tanto, prestar atención, a lo largo de todos los temas, a la discusión de su relevancia, a la toma de decisiones acerca de la conveniencia o no de su desarrollo, etc. Se trata de aspectos básicos tenidos en cuenta (aunque no siempre explícitamente) por la comunidad científica. Lo mismo ocurre con las estrategias tentativas utilizadas por los científicos para la construcción de los conocimientos (GIL et al., 1991; DUSCHL, 1997). Nos referiremos seguidamente a las mismas.

II. Estrategias para la *construcción tentativa* de los conocimientos científicos acerca de la energía

Para que los estudiantes dejen de percibir la ciencia como un *cuerpo dogmático* de conocimientos a menudo incomprensibles, con las consiguientes consecuencias de desinterés e, incluso, de rechazo, es necesario implicarlos en la (re)construcción de dichos conocimientos. Ése es el sentido de las siguientes proposiciones:

4. **No se deben presentar directamente los conocimientos en su estado de elaboración actual como algo acabado**, sino que se ha de facilitar que los estudiantes rehagan, en alguna medida, su construcción, destacando el carácter tentativo y abierto de este proceso (GIL et al., 1991; DUSCHL, 1997).

De este modo, al rehacer la evolución histórica de los conocimientos acerca de la energía (BÈCU-ROBINAULT y TIBERGHIEN, 1998), los estudiantes pueden comprender el origen confuso de los conceptos y la vinculación ciencia/técnica – tan a menudo ignorada –, que en este caso resulta tan fundamental, remitiéndonos, por ejemplo, al trabajo de los ingenieros sobre las máquinas (KUHN, 1983; DE BERG, 1997).

5. Esto exige que los estudiantes tengan **oportunidad de utilizar criterios y estrategias de elaboración y validación propias del trabajo científico** (concebir hipótesis, hacer diseños experimentales, etc.) de manera que puedan confrontar sus construcciones tentativas con las de la comunidad científica, haciéndolas evolucionar funcionalmente, como resultado de este proceso de investigación (GIL et al., 1991; DRIVER, NEWTON y OSBORNE, 2000). Ello ha de permitir, muy en particular, **que los estudiantes se familiaricen con los criterios científicos que fundamentaron la aceptación y posterior superación de las distintas concepciones acerca de la energía**, sin escamotear su evolución y la superación de las dificultades (similares a las de los propios estudiantes). Así, por ejemplo, es esencial que los estudiantes conozcan la teoría del calórico (muy próxima a algunas de sus propias concepciones), su origen y las razones de su posterior cuestionamiento.

6. Es preciso **resaltar la búsqueda de generalidad y coherencia global que caracteriza la labor científica, que se traduce en la integración de campos aparentemente inconexos** (CHALMERS, 1992). Se ha de destacar, por ejemplo, **la revolución que supuso la integración de la mecánica y el calor**, que permitió la comprensión de la naturaleza del calor y el establecimiento del principio de conservación y transformación de la energía (KUHN, 1983; HARMAN, 1990). E insistir en *la validez universal que ha llegado a adquirir dicho principio*, aplicable en cualquier proceso físico, químico, biológico... tanto en el nivel macroscópico como en el microscópico. El principio se ha convertido así en uno de los pilares básicos del establecimiento de la unidad de la materia (ARONS, 1997).

Para una apropiación adecuada de éste y cualquier otro campo de conocimientos científicos, resulta fundamental tomar en consideración aspectos axiológicos y procedimentales como los que hemos contemplado en estos dos primeros apartados. Tomarlos en consideración y tenerlos presentes *en todo el proceso*, evitando caer en deformantes e *ineficaces* reduccionismos conceptuales. Sólo así podemos comenzar a hablar fructíferamente de significados.

III. Primera aproximación al significado del concepto de energía

Numerosos trabajos han puesto en evidencia las graves incomprensiones de los estudiantes acerca de la naturaleza de la energía (PFUNDT y DUIT, 1998; DOMÉNECH, 2000) y ello ha generado serios debates sobre la mejor forma de definir este concepto. Algunos autores han propuesto empezar conceptualizando la energía como una especie de sustancia *cuasi-material* que participa en todos los procesos que ocurren a nuestro alrededor. En opinión de Duit (1987), el hecho de que dicha concepción coincida básicamente con su significado cotidiano, facilita su aprendizaje por parte de los estudiantes. Sin embargo, como apunta el propio Duit, dicha definición obstaculiza el aprendizaje de la idea científica de energía: no podemos pensar en la energía como una especie de "ingrediente" de los cuerpos, hace tiempo que la física ha abandonado el carácter substancial que en algún momento se le atribuyó (HARMAN 1990).

Frente a la concepción ingenua de la energía como fluido, Warren (1982 y 1983) ha propuesto seguir utilizando la definición de energía como la "capacidad de un sistema para realizar trabajo". Se trata de una idea cuyos orígenes se remontan al siglo XVII (TRUMPER, 1990) y que encontramos vigente en numerosos autores del siglo XIX, como el mismo Maxwell (1877). El establecimiento del segundo principio de la termodinámica mostró claramente que no toda energía servía para realizar trabajo, poniendo en cuestión esta definición. Por ello, como nos recuerda Duit (1986), a principios del siglo XX, Planck vaticinó que "la orientación tradicional de introducir la energía a partir de concepto de trabajo habrá desaparecido en aproximadamente veinte años". Hoy sabemos que se equivocó: como han mostrado sucesivos análisis de textos de física, la mayoría sigue introduciendo el concepto de energía como capacidad de realizar trabajo (LEHRMAN, 1973; HICKS, 1983; DUIT, 1986; DOMÉNECH et al., 2001), pese a que los inconvenientes de dicha definición han sido señalados por numerosos investigadores (SEXL, 1981; HICKS, 1983; TRUMPER, 1990a). Por ejemplo, Sexl (1981) recuerda que "la proposición según la cual la energía es la capacidad para realizar trabajo no es satisfactoria, pues no es útil en termodinámica. La energía interna no puede convertirse totalmente en trabajo". También Duit (1986) señala que dicha definición es válida únicamente en el campo de la mecánica, y que, por tanto, cuando se aborden fenómenos no mecánicos (como, por ejemplo, procesos térmicos, reacciones químicas...), los estudiantes manejarán una concepción inadecuada de la energía.

En un intento por vencer estos inconvenientes se ha sugerido la conveniencia de definir la energía, de una forma más general, como la capacidad de un sistema para *producir cambios* (ROGERS, 1965; SEVILLA, 1986; CHISHOLM, 1992; ARONS, 1997; BUNGE, 1999). Sin embargo, esta concepción presenta también problemas y ha sido criticada: hace tiempo, se señala, que se abandonó la idea de la energía como causa de los fenómenos (GAILIUNAS, 1988); aquello que hace

que un proceso ocurra no podemos relacionarlo con las variaciones de energía, sino con el aumento de entropía (RESNICK, HALLIDAY y KRANE, 1993).

Ninguno de los enfoques anteriores parece, pues, plenamente aceptable, ya que todos presentan inconvenientes, lo que ha dado lugar a serios debates (WARREN, 1983; DUIT, 1986; TRUMPER, 1990B; PRIDEAUX, 1995). Quizás por ello, numerosos autores optan, muy particularmente en el nivel universitario, por introducciones puramente operativas del concepto de energía (TRUMPER, 1991). Recordemos, a título de ejemplo, el razonamiento de Feynman et al. (1987): "Es importante darse cuenta de que en la física actual no sabemos lo que es la energía. No tenemos un modelo de energía formada por pequeñas gotas de tamaño definido. No es así. Sin embargo, hay fórmulas para calcular cierta cantidad numérica y cuando las sumamos todas siempre encontramos el mismo número". También Shadmi (1984) propone basar la enseñanza de la energía en el principio de conservación, lo que supone dejar de lado consideraciones cualitativas. En el mismo sentido Hicks (1983) advierte que la definición de energía como capacidad para realizar trabajo "no debería ser utilizada como definición inicial, ni siquiera señalando sus limitaciones, porque es tan breve y fácil de memorizar que los estudiantes pueden continuar utilizándola mucho después de haberla estudiado". Por eso Hicks propone que se evite toda definición (cualitativa) de energía.

En nuestra opinión, sin embargo, estas introducciones meramente operativas resultan inadecuadas por diversas razones. En primer lugar, el hecho de apostar por los tratamientos operativos no impide, en éste o en cualquier otro campo, la formación de visiones cualitativas deformadas o, muy a menudo, como han puesto en evidencia numerosas investigaciones (PFUNDT y DUIT, 1998), la simple persistencia de ideas intuitivas adquiridas por impregnación ambiental, al margen de la educación reglada.

En segundo lugar, porque los estudiantes han de saber que *los científicos sí recurren* a las consideraciones cualitativas como aspecto esencial de sus estrategias tentativas de construcción de conocimientos. Se puede recordar a este respecto la célebre frase de Einstein: "Ningún científico piensa con fórmulas. Antes de que el físico comience a calcular ha de tener en su mente el curso de los razonamientos. Estos últimos, en la mayoría de los casos, pueden expresarse con palabras sencillas. Los cálculos y las fórmulas constituyen el paso siguiente". Al introducir directamente los tratamientos cuantitativos se transmite una visión distorsionada y empobrecida de la ciencia que bloquea todo el proceso de construcción de conocimientos y suele generar actitudes de inhibición y rechazo.

Cabe señalar, por último, que las consideraciones cualitativas iniciales no deben juzgarse a la luz del cuerpo de conocimientos ya desarrollado, sino a la luz de su capacidad para facilitar el proceso de su construcción, durante el cual, lógicamente, los planteamientos iniciales suelen evolucionar hacia concepciones más elaboradas. **La cuestión no estriba en buscar una concepción correcta como punto de partida, sino en aceptar que los conocimientos son construcciones tentativas des-**

tinadas a evolucionar. Se trata, en definitiva, de plantear la construcción de significados como el fruto de aproximaciones sucesivas, sin renunciar a la exigencia básica de significatividad.

Las proposiciones que siguen responden a esta necesidad de introducir el concepto de energía como instrumento para el estudio de las transformaciones, considerando su significado como una primera aproximación destinada a evolucionar:

7. Las transformaciones que experimenta un sistema son debidas a las interacciones con otros sistemas o a interacciones entre sus partes, es decir, son debidas a la capacidad de la materia para interactuar de diferentes formas (ARONS, 1997).

No se trata, pues, de comenzar hablando de la energía, intentando definirla, sino de plantear el problema de los cambios y de explicar los mismos como el resultado de las interacciones. La idea de energía podría introducirse después, asociada a la búsqueda de vínculos entre los distintos cambios y a los intentos de cuantificarlos:

8. La idea de energía puede asociarse cualitativamente a la configuración de los sistemas y a las interacciones que estas configuraciones (y las propiedades de la materia) permiten. Así, por ejemplo, decimos que el viento tiene energía *porque* las partículas del aire pueden golpear las aspas de un molino y hacerlas girar venciendo la fricción, etc. (RESNICK, HALLIDAY y KRANE, 1993).

9. Así pues, **la energía no es una especie de fluido,** no constituye el "combustible" necesario para producir transformaciones en los sistemas, como a menudo conciben los estudiantes (OGBORN, 1986; TRUMPER y GORSKY, 1993), sino que se trata de un concepto que viene determinado, repetimos, por la configuración de dichos sistemas y las propiedades de la materia. Es la referencia concreta a la configuración y a las interacciones lo que permite comprender por qué un sistema (por ejemplo, una piedra y la Tierra) puede experimentar o producir transformaciones, superándose así las concepciones de la energía como fluido o combustible.

10. De acuerdo con las proposiciones anteriores, **podemos asociar la energía, en una primera aproximación, a la "capacidad de producir transformaciones"**, tal como históricamente se propuso también y siguen recomendando diversos autores (SEVILLA, 1986; CHISHOLM, 1992; ARONS, 1997). Y las transformaciones en la configuración de los sistemas pueden asociarse a variaciones de energía en dichos sistemas o en partes de los mismos (TRUMPER 1993).

11. Hablar de distintas formas de energía puede reforzar su concepción como algo material "que cambia de forma". Para evitarlo **se deben asociar las distintas formas de energía** (cinética, potencial gravitatoria, etc.) **a diferentes configuraciones de los sistemas y a distintas formas de interactuar de la materia.** Con otras palabras, la diversidad de calificativos con que solemos acompañar al término energía nos indica la propiedad (o propiedades) del sistema que intervendrá (o puede intervenir) en un proceso determinado, o el tipo de proceso en que participará el sistema (PINTÓ, 1991; RESNICK, HALLIDAY y KRANE, 1993; ARONS, 1997;

KAPER y GOEDHART, 2002). Así, por ejemplo, decimos que una batería tiene energía eléctrica porque la separación de cargas de distinto signo en los polos dota al sistema de la capacidad de producir transformaciones cuando se habilita la posibilidad de circulación de cargas.

Insistimos en que éstas son *aproximaciones iniciales* que resultan útiles y significativas para profundizar en el estudio de las transformaciones. Un estudio a lo largo del cual dichas concepciones iniciales se enriquecerán y experimentarán modificaciones profundas. Abordaremos, a continuación, algunos de estos enriquecimientos y transformaciones, cuya comprensión *global* resulta absolutamente necesaria, insistimos de nuevo, para que los estudiantes no queden prisioneros, como suele ocurrir en general, de concepciones alternativas incorrectas.

IV. Carácter sistémico y relativo de la energía

Una abundante investigación ha puesto de manifiesto que muchos estudiantes atribuyen la energía a cuerpos específicos y no al sistema formado por los objetos que interaccionan (BAUMAN, 1992a; MALLINCKRODT y LEFF, 1992; VAN HUIS y VAN DEN BERG, 1993; ARONS, 1997; SALTIEL, 1997; VAN HEUVELEN y ZOU, 2001). Es preciso, pues, salir al paso de esta concepción:

12. La energía es una propiedad de los sistemas y no tiene sentido hablar de la energía de un objeto aislado. Cuando hablamos, por ejemplo, de la energía potencial gravitatoria de una piedra sabemos que es debida a la interacción entre la piedra y la Tierra y, por tanto, pertenece al conjunto formado por los dos, y no sólo a la piedra. En el caso de un objeto aislado en el espacio, lejos de cualquier otro con el que poder interaccionar gravitatoriamente de manera apreciable, es obvio que no tiene sentido hablar de energía potencial gravitatoria. Como Mallinckrodt y Leff (1992) afirman “la energía potencial surge siempre en el contexto de un par (o conjunto) de objetos que interaccionan, y, por tanto, no tiene ningún fundamento asignarla completamente a cualquiera de estos objetos”.

Debemos señalar que las abundantes investigaciones que hemos mencionado acerca de las dificultades de los alumnos en torno al carácter sistémico de la energía, se refieren todas a energías potenciales. No hemos encontrado, en cambio, ninguna referencia a consideraciones similares relativas a la energía cinética: se habla sistemáticamente de la energía cinética *de un objeto* y no se aclara que esta energía expresa la capacidad del objeto para interaccionar con otros a causa, precisamente, de que se desplaza a una velocidad determinada *respecto a ellos*. En consecuencia, **sólo podemos hablar de la energía cinética de un objeto en la medida en que existen otros cuerpos con los cuales puede interaccionar**. Se trata, en definitiva, de una *propiedad del sistema* constituido por ese conjunto de objetos.

Hay que insistir en este carácter sistémico *también* de la energía cinética, porque es algo a lo que no se hace referencia en la literatura (ni en los textos de físi-

ca, ni en los trabajos de investigación) y que provoca, incluso, cierto rechazo inicial cuando se plantea la cuestión a los profesores. La superación de la concepción de la energía como fluido material que poseen los objetos, exige analizar físicamente, significativamente, los *procesos* involucrados en las transformaciones. Ello remite necesariamente al carácter sistémico de la misma y permite salir al paso de un segundo obstáculo: el que supone atribuir a la energía de un sistema valores absolutos.

13. Tampoco tiene sentido pensar que es posible determinar el valor absoluto de la energía de un sistema; solo podemos determinar sus variaciones cuando tiene lugar un determinado *proceso*.

Esto es algo que aparece generalmente aceptado y señalado explícitamente en la literatura (BEYNON, 1990; CHISHOLM, 1992; PRIDEAUX, 1995), aunque el uso frecuente de valores relativos (correspondientes a asignar arbitrariamente energía cero a una configuración determinada) puede llevar a los estudiantes a tomar como absolutos los valores manejados, lo que facilita, una vez más, la interpretación de la energía como algo que poseen los objetos.

V. Significado físico de los conceptos de trabajo y calor y su relación con la energía

Las dificultades de los estudiantes -y también del profesorado- para la comprensión y el manejo significativo del concepto de energía, se extienden a los conceptos asociados de trabajo y, sobre todo, calor. De hecho existe una amplia literatura alrededor de ambos conceptos, lo cual es indicativo de las dificultades de aprendizaje que les acompañan. Tanto es así que algunos autores han propuesto prescindir de ellos y hablar simplemente de variaciones de energía entre el sistema y el medio con el que interacciona (KEMP, 1984; BARROW, 1988). Sin embargo, al hacer esto se ocultan los mecanismos por los cuales varía la energía de los sistemas, lo cual no facilita la comprensión de las transformaciones (MALLINCKRODT y LEFF, 1992; VAN ROON, VAN SPRANG y VERDONG, 1994; ALONSO y FINN, 1997).

Consideramos esencial, pues, detenernos en el significado de estos conceptos, sin limitarnos a manejos puramente operativos. No podemos, por ejemplo, definir el trabajo, sin más, como "el producto escalar de la fuerza por el desplazamiento", añadiendo, para que no haya dudas acerca de la opción operativista adoptada, que "el concepto físico de trabajo no tiene nada que ver con su significado en la vida cotidiana". Insistimos de nuevo en que, al actuar así, se favorece una visión dogmática de la ciencia, en las antípodas de su verdadera naturaleza tentativa: los conceptos son invenciones, a título de hipótesis, que parten de consideraciones cualitativas y que pueden experimentar posteriormente retoques o remodelaciones profundas.

14. Cualitativamente podemos concebir el trabajo como "el acto de transformar la materia aplicando fuerzas". Se trata de la misma idea expuesta por Maxwell (1877) y refleja la idea de trabajo en la vida cotidiana: cualquier ejemplo elemental de lo que consideramos trabajo (labrar la tierra, elevar ladrillos, etc.) responde a esta idea cualitativa. Y la definición operativa de trabajo (producto escalar de la fuerza por el desplazamiento) se deriva también de esta idea cualitativa para el caso más simple del desplazamiento de un objeto (GIL, FURIÓ y CARRASCOSA, 1996).

Por otra parte, dado que la energía se introduce como expresión de la *capacidad* de un sistema para experimentar transformaciones, un trabajo, es decir, "un acto de transformación mediante fuerzas", queda vinculado a variaciones de energía, a intercambios de energía entre diferentes sistemas o entre las partes de un mismo sistema. Ello nos permite **concebir el trabajo como una forma de intercambio de energía**. (Entendiendo, claro está, por variaciones o intercambios de energía la modificación de las configuraciones de las partes del sistema que interaccionan, tal como hemos expresado en las proposiciones 8 a 10).

Las dificultades asociadas al desarrollo del concepto de calor son, sin duda, mayores, e incluyen la confusión entre calor y temperatura, la concepción del calor como fluido material -que corresponde, históricamente, a la teoría del calórico- o la muy frecuente interpretación del calor como una forma de energía (TARSITANI y VICENTINI, 1991; BAUMAN, 1992b; ALONSO y FINN, 1996; ARONS, 1999). Estas concepciones deben ser abordadas funcionalmente como parte del proceso de construcción de conocimientos. Así, fueron las dificultades surgidas en 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 submicroscópico, es decir, aceptando las concepciones corpusculares acerca de la naturaleza de la materia. Y así surgió también la idea de "energía interna térmica" de las partículas (ARONS, 1999). Como afirman Alonso y Finn (1996), "...la transferencia de energía llamada calor implica una multitud de intercambios microscópicos de energía debidos a las colisiones elásticas e inelásticas de partículas externas con las partículas del sistema, resultando un cambio en las energías de sus partículas". Podemos, pues, enunciar la siguiente proposición:

15. El calor aparece, en el marco de la teoría cinético-molecular, como una magnitud que engloba el conjunto del gran número de (micro)trabajos realizados a nivel submicroscópico, como consecuencia de las (micro)fuerzas exteriores que actúan sobre las partículas del sistema. Y la energía de este conjunto de partículas se puede englobar en el concepto de "energía interna térmica".

Por tanto, el calor no es ni una substancia (calórico) *ni tampoco una forma de energía*, como a menudo se afirma, incluso en libros de texto (Doménech et al., 2001). Un objeto o un sistema no *tiene* calor, del mismo modo que no *tiene* traba-

jo. **El calor, al igual que el trabajo, no es una forma de energía, sino un mecanismo de intercambio de energía** (TARSITANI y VICENTINI, 1991; ATKINS, 1992; ARONS, 1997). Un intercambio que tiene lugar al poner en contacto sistemas a distintas temperaturas.

Es necesario, a este respecto, salir al paso de la frecuente confusión entre “calor” y “energía calorífica” (SEVILLA, 1986; MAK y YOUNG, 1987). Cuando hablamos de energía calorífica o térmica nos estamos refiriendo a un tipo de energía interna. Conviene reservar el término “calor” para los intercambios de energía que ocurren entre cuerpos a temperaturas diferentes. No es correcto, por ejemplo, en el caso 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 térmica (ARONS, 1999). No obstante, el problema no está en el vocabulario manejado, sino en su correcta interpretación: seguimos hablando, por ejemplo, de "la salida" del Sol, pero comprendemos que es 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 hemos de entender que eso significa que ha aumentado su energía térmica, así como la del entorno. Como escribe Solomon (1983), los alumnos "no deben perder la capacidad de comunicarse": han de seguir comprendiendo 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".

También es necesario salir al paso del frecuente error de concebir la energía térmica como una magnitud que engloba exclusivamente la energía *cinética* de las partículas (BESSON, 1999). Ello sería cierto en el caso de gases perfectos. En los demás casos, las continuas interacciones que tienen lugar al nivel microscópico hacen que la energía cinética y *potencial* de las partículas estén modificándose también continua e indisolublemente, sin que podamos ir más allá de una consideración *global* de la energía (cinética y *potencial*) del conjunto de partículas.

Como vemos, las profundizaciones en los conceptos de energía, calor y trabajo se potencian mutuamente y confluyen con los avances en la teoría corpuscular, dando lugar a la integración de la mecánica y el calor, dos ciencias que históricamente se habían desarrollado autónomamente (ver proposición 6). De este modo, trabajo y calor quedan relacionados entre sí y su plena comprensión se adquiere a partir de su relación con la energía (KAPER y GOEDHART, 2002). Existe un amplio consenso entre los investigadores en torno a la conveniencia de abordar con detenimiento las transferencias de energía, es decir, en relacionar el trabajo y el calor con las variaciones de energía experimentadas por un sistema (ELLSE, 1988; ARONS, 1989; BAUMAN, 1992a y b; KOLIOPOULOS y RAVANIS, 1998):

16. De acuerdo con los significados de trabajo y calor que acabamos de discutir, las variaciones de energía de un sistema, ΔE , pueden ser debidas a realización de trabajo W y/o a calor Q de acuerdo con la expresión $W + Q = \Delta E$ (donde W representa el trabajo realizado por las fuerzas exteriores al sistema y Q

engloba los trabajos microscópicos que se realizan al poner en contacto objetos a distintas temperaturas). Pero cabe señalar que esta expresión no es absolutamente general:

17. En general, las variaciones de energía pueden ser debidas, además de al trabajo y al calor, a otros procesos como, por ejemplo, al intercambio de radiación y/o de materia. Esto es algo que se contempla en los textos universitarios de física (ALONSO y FINN, 1996; ARONS, 1997), pero muy a menudo no suele vincularse el estudio de la radiación con el de la energía. En particular no hemos visto trabajos de investigación didáctica sobre los problemas de enseñanza/aprendizaje de la energía que se refieran a este aspecto. **Y aunque el estudio de esta forma de intercambio de energía pueda dejarse a un lado en un primer nivel, dada su complejidad, su importancia sí exige que se hagan referencias cualitativas a la misma:** pensemos que casi todos los recursos energéticos de la Tierra (incluidos los fósiles) tienen su origen en la radiación solar; o que el llamado "efecto invernadero" remite a intercambios energéticos por radiación, etc.

Pero lo que resultó determinante en el desarrollo de los conocimientos acerca de las transformaciones y de la energía como concepto clave fue, sin duda, la integración de la mecánica y el calor. Fue esta integración, auténticamente revolucionaria, asociada a los trabajos de Carnot, Joule, Kelvin, Mayer, etc., la que hizo posible el establecimiento del principio de conservación y transformación de la energía y la que permitió profundizar en su significado y en una mejor comprensión de las causas de las transformaciones, dando lugar a la introducción de nuevos conceptos como el de entropía. Abordaremos estas cuestiones en el siguiente apartado.

VI. Conservación, transformación y degradación de la energía

Como apunta Duit (1986), la construcción de una idea adecuada de energía exige contemplar todo un conjunto de características, algunas de las cuales (transformación, transferencia...) ya han sido analizadas en las proposiciones precedentes. Estamos ahora en situación de abordar dos nuevas características esenciales para la comprensión de la energía: la conservación y la degradación. En primer lugar nos referiremos a su conservación. Distintos autores han señalado que la concepción actual de la energía emergió, precisamente, a partir del establecimiento de su conservación (TRUMPER 1990; GOLDRING y OSBORNE, 1994; BÈCU-ROBINAULT y TIBERGHIE, 1998):

18. Los cambios experimentados por los sistemas comportan transformaciones de unas formas de energía en otras y/o transferencias de energía de unos sistemas a otros (o de unas partes del sistema a otras), pero la energía total (incluida la energía térmica) de un sistema aislado permanece constante.

Debemos insistir en que el establecimiento de este principio es deudor de la comprensión del papel jugado por el nivel submicroscópico y está asociado, como hemos señalado en la proposición 17, a la integración de la mecánica y el calor, que se habían desarrollado autónomamente, en la termodinámica. Esta insistencia es necesaria porque algunos textos presentan el principio de conservación de la energía como una consecuencia de las leyes de la dinámica del movimiento. Según ello, la expresión $E_c + E_p = \text{constante}$, obtenida en mecánica a partir del teorema de las fuerzas vivas, constituiría una primera versión del principio de conservación de la energía. Pero como afirma Arons (1989) "...la ley de la conservación de la energía no es, por supuesto, derivable de las leyes de la dinámica del movimiento; es una afirmación independiente sobre el orden en la naturaleza. (...). La manera como se introduce frecuentemente el concepto de energía en los textos de física elemental no aclara suficientemente este hecho a los estudiantes, y la introducción habitual de dicho concepto (...) deja a muchos de ellos con la impresión de que la conservación de la energía ha sido derivada de la segunda ley".

Esta confusión, que pone de relieve una comprensión inadecuada del principio de conservación de la energía, ha sido ampliamente estudiada en la literatura (SHERWOOD 1983; SHERWOOD y BERNARD 1984; BERNARD, 1984; ARONS, 1989 y 1999; MONLEÓN, 1991; BAUMAN, 1992a; MALLINCKRODTT y LEFF, 1992; LEFF y MALLINCKRODTT, 1993; SALTIEL, 1997; SOLBES y TARÍN, 1998; DOMÉNECH, 2000; VAN HEUVELEN y ZOU, 2001).

Por otra parte, la formulación del principio de conservación con la afirmación de que "la energía de un sistema aislado no varía" ha llevado a algunos autores a cuestionar la idea de que la energía tenga algo que ver con los cambios, puesto que, señalan, su valor permanece constante y no es posible utilizar sus variaciones para explicar por qué se produce, o no, una secuencia de cambios (DUIT, 1986; OGBORN, 1986 y 1990; PINTÓ, 1991). Conviene detenerse en esta argumentación:

19. Si bien la energía total de un sistema aislado permanece constante, siempre que dicho sistema experimente cambios, necesariamente se han de producir transferencias y/o transformaciones de energía en su interior, aunque la suma de estas variaciones sea cero.

Las expresiones $E = \text{constante}$ o $\Delta E = 0$ pueden hacer pensar que la energía tiene poco que decir acerca de las transformaciones. Pero la expresión $\Delta E = 0$ engloba toda una serie de variaciones de energía cinética (ΔE_c), potencial gravitatoria ($\Delta E_{p \text{ gravitatoria}}$), potencial eléctrica [$(\Delta E_{p \text{ eléctrica}})$], etc., de forma que $\Delta E = 0$ conlleva una serie de variaciones de energía:

$$\Delta E_c + \Delta E_{p \text{ gravitatoria}} + \Delta E_{p \text{ eléctrica}} + \dots = 0$$

Así se justifica plenamente la asociación entre energía y cambio, aunque esta asociación no ha de conducirnos a la idea de *consumo* de energía (su variación *total* es nula), sino que remite a su *degradación*, que abordaremos seguidamente:

20. Como resultado de las interacciones y consiguientes transformaciones de los sistemas, la energía se *degrada o distribuye homogéneamente*. Es decir, los sistemas aislados evolucionan hacia estados más desordenados, que son más probables: es más probable, por ejemplo, que las partículas de un sistema se agiten en diferentes direcciones en lugar de que todas se desplacen en una misma dirección. Este paso a configuraciones más desordenadas hace que disminuya la posibilidad de ulteriores transformaciones de los sistemas (BOLTZAM, 1986; DUIT, 1986; OGBORN, 1990; ATKINS, 1992). De ahí que se hable de degradación de la energía y se introduzca una nueva magnitud, la entropía, S , que mide en cierto modo el grado de desorden, cumpliéndose que en un sistema aislado la entropía crece (mientras la energía total permanece constante). No hay transformaciones sin crecimiento de entropía y este crecimiento disminuye la probabilidad de subsiguientes transformaciones. Ello puede expresarse también diciendo que **la energía mecánica y la energía térmica no son totalmente equivalentes**, ya que mientras en un sistema aislado es posible transformar íntegramente *toda* la energía mecánica en energía térmica, el proceso recíproco tiene siempre un rendimiento menor a la unidad, pues no es posible la transformación completa del movimiento desordenado de una infinidad de partículas en un movimiento ordenado (FRISH y TIMOREVA, 1972; ATKINS, 1992).

21. Más precisamente, deberíamos decir que la distribución de la energía (el crecimiento de la entropía) disminuye la posibilidad de transformaciones... *macroscópicas* de los sistemas aislados. Es necesario insistir sobre esta precisión, (que no hemos visto tratada en la literatura didáctica) porque las interacciones (y, por tanto, las transformaciones) continuarán produciéndose a nivel submicroscópico. Aquello que es realmente muy improbable (aunque no imposible) son las transformaciones "macroscópicas" que presuponen la obtención de "orden" a partir de "desorden" (LEVINE, 1991).

22. La comprensión de los procesos de degradación u homogeneización de la energía (crecimiento de la entropía) permite explicar la aparente contradicción entre expresiones como "crisis energética" y el principio de conservación de la energía: **cuando hablamos de "consumo de energía", "crisis energética", etc., no queremos decir que la energía desaparece**, sino que se homogeneiza y deja de ser útil (la configuración del sistema ya no permite que tengan lugar cambios "macroscópicos"). Se explica así, insistimos, una contradicción que contribuye a dificultar la comprensión de los estudiantes (DUIT 1986; OGBORN 1990; GOLDRING y OSBORNE, 1994).

Sintetizaremos este apartado con una última proposición:

23. Dos son las condiciones que deben verificarse en los cambios que un sistema aislado puede experimentar:

- **han de producirse necesariamente intercambios y transformaciones de energía entre partes del sistema** (en forma de trabajo, calor o radiación), satisfaciéndose *globalmente* el principio de conservación de la energía, y

- **para que ello sea posible, la energía no ha de estar distribuida, inicialmente, de manera uniforme**, evolucionando el sistema hacia configuraciones *globalmente* más uniformes (de mayor entropía), aunque la entropía de algunas partes del sistema pueda disminuir.

VII. A modo de conclusión y perspectivas: por una plena apropiación del campo de conocimiento de la energía

Un buen dominio de los conocimientos supone, en general, la capacidad de utilizarlos en la resolución de problemas, en la interpretación cualitativa de situaciones diversas, correspondientes, por ejemplo, a cuestiones de la vida práctica, etc. Por eso preocupa la tendencia de los estudiantes a no hacer uso de los planteamientos energéticos y a limitarse sistemáticamente a los dinámico-cinemáticos cuando resuelven problemas de movimientos (DRIVER y WARRINGTON, 1985; MCDERMOTT, 1993; DOMENECH, 2000).

Este hecho ha de tener, en nuestra opinión, otra lectura: no se trata de lamentar "la tendencia de los estudiantes", ni de utilizarla como índice de su falta de dominio de los conocimientos sobre la energía, sino, al contrario, de tener presente que el dominio de un cierto cuerpo de conocimientos exige proporcionar reiteradas oportunidades a los estudiantes para usar las nuevas ideas en una pluralidad de situaciones (DRIVER, 1986). Son estas oportunidades las que no parece que proporcionemos suficientemente; con otras palabras, es nuestra actividad docente la que está en cuestión. Más aún, resulta sintomático que lo que se echa en falta sea únicamente el manejo operativo del principio de conservación y las magnitudes implicadas, en la resolución de problemas de lápiz y papel. Es preciso por ello evitar consciente y explícitamente el reduccionismo conceptual que hemos criticado desde el principio:

24. La plena apropiación del campo de conocimientos de la energía exige la utilización reiterada de los conocimientos construidos en una variedad de situaciones, para hacer posible su profundización y afianzamiento, yendo más allá del simple manejo operativo de los conceptos y relaciones establecidas:

- *Poniendo un énfasis especial en las relaciones Ciencia/ Tecnología/ Sociedad/ Ambiente*. Y esto supone potenciar la elaboración de productos científicos y tecnológicos, susceptible de romper con planteamientos excesivamente escolares y de reforzar el interés por la tarea (construcción y manejo de máquinas, generadores solares y eólicos...), así como mostrar la estrecha vinculación de la problemática de la energía (su papel en nuestras vidas, problemas asociados a la obtención y uso de los recursos energéticos...) con la actual situación de emergencia planetaria (VILCHES y GIL, 2003), preparando para la toma de decisiones a este respecto.

- *Dirigiendo todo este tratamiento a mostrar el carácter de cuerpo coherente que tienen los conocimientos construidos*, favoreciendo, para ello, las actividades de

síntesis y de conexión de los mismos con otros ya conocidos (incluyendo la resolución de problemas por caminos alternativos).

- *Propiciando la concepción de nuevos problemas*, evitando cualquier impresión de cuerpo cerrado y dogmático y despertando interés por ulteriores desarrollos (estudio de la radiación, de los campos, de la relatividad...) que conducirán a nuevas profundizaciones y modificaciones de los conceptos.

Con este conjunto de 24 proposiciones hemos intentado ofrecer una visión global de lo que podríamos considerar una adecuada comprensión *inicial* del campo de la energía para los estudiantes de Bachillerato y Universidad. Queremos insistir en que, en nuestra opinión, estas distintas proposiciones (y otras que muy posiblemente se podrían enunciar como resultado de una mayor profundización) se apoyan mutuamente y no pueden considerarse como aspectos autónomos, inconexos. Dicho de otra manera, nuestra hipótesis básica es que este conjunto de aspectos conceptuales, procedimentales y axiológicos, ha de ser contemplado globalmente para hacer posible la comprensión de este campo de conocimientos. De ahí la importancia de realizar un debate en profundidad para avanzar hacia posibles consensos acerca de cómo orientar la enseñanza de la energía. Éste es, en definitiva, el objetivo básico de nuestro estudio y de nuestras propuestas tentativas, que presentamos aquí para su discusión y crítica.

VIII. Referencias Bibliográficas

ALONSO, M.; FINN, E. Un enfoque integrado de la termodinámica en el curso de Física General. **Revista Española de Física**, v. 10, n. 2, p. 25-31, 1996.

ALONSO, M.; FINN, E. On the notion of internal energy. **Physics Education**, v. 32, n. 4, p. 256-264, 1997.

ARONS, A. B. Developing the energy concepts in introductory physics. **The Physics Teacher** (oct.), p. 506-517, 1989.

ARONS, A. B. **Teaching introductory physics**. New York: Wiley, 1997.

ARONS, A. B. Development of energy concepts in introductory physics courses. **American Journal of Physics**, v. 67, n. 12, p. 1063-1067, 1999.

ATKINS, P. W. **La segunda ley**. Barcelona: Prensa científica, 1992.

BARROW, G. M. Thermodynamic should be built on energy-not on heat and work. **Journal of Chemical Education**, v. 65, n. 2, p. 122-125, 1988.

BAUMAN, R. P. Physics that textbook writers usually get wrong. I Work. **The Physics Teacher**, v. 30, p. 264-269, 1992a.

BAUMAN, R. P. Physics that textbook writers usually get wrong. II Heat and energy. **The Physics Teacher**, v. 30, p. 353-356, 1992b.

BÈCU-ROBINAULT, K.; TIBERGHIE, A. Integrating experiments into the teaching of energy. **International Journal of Science Education**, v. 20, n. 1, p. 99-114, 1998.

BERNARD, W. H. Internal work: A misinterpretation. **American Journal of Physics**, v. 52, n. 3, p. 253-254, 1984.

BESSON, U. Bilan énergétiques: une mise au point conceptuelle. **Bulletin de l'Union des Physiciens**, v. 93, n. 812, p. 383-405, 1999.

BEYNON, J. Some myths surrounding energy. **Physics Education**, v. 25, p. 314-316, 1990.

BOLTZAM, L. **Escritos de mecánica y termodinámica**. Madrid: Alianza, 1986.

BUNGE, M. La energía entre la física y la metafísica. **Revista de Enseñanza de la Física**, v. 12, n. 1, p. 53-56, 1999.

BURBULES, N.; LINN, M. Science education and philosophy of science: congruence or contradiction. **International Journal of Science Education**, v. 13, n. 3, p. 227-241, 1991.

BYBEE, R. W. Planet earth in crisis: how should science educators respond? **The American Biology Teacher**, v. 53, n. 3, p. 146-153, 1991.

CAMPANARIO, J. M.; MOYA, A. ¿Cómo enseñar ciencias? Principales tendencias y propuestas. **Enseñanza de las Ciencias**, v. 17, n. 2, p. 179-192, 1999.

CHALMERS, A. **La ciencia y cómo se elabora**. Madrid: Siglo XXI, 1992.

CHISHOLM, D. Some energetic thoughts. **Physics Education**, v. 27, p. 215-220, 1992.

DE BERG, K. C. The development of the concept of work: a case where history can inform pedagogy. **Science & Education**, v. 6, p. 511-527, 1997.

DOMÉNECH, J.L. **L'ensenyament de l'energia en l'educació secundària. Anàlisi de les dificultats i una proposta de millora**. 2000. Tesis (Doctoral) - Universitat de València, Valencia, España.

DOMÉNECH, J. L.; GIL-PÉREZ, D.; GRAS, A.; GUIASOLA, J.; MARTÍNEZ-TORREGROSA, J.; SALINAS, J. La enseñanza de la energía en la educación secundaria. Un análisis crítico. **Revista de Enseñanza de la Física**, v. 14, n. 1, p. 45-60, 2001.

DRIVER, R.; NEWTON, P.; OSBORNE, J. Establishing the norms of scientific argumentation in classrooms. **Science Education**, v. 84, p. 287-312, 2000.

DRIVER, R. Psicología cognoscitiva y esquemas conceptuales de los alumnos. **Enseñanza de las Ciencias**, v. 4, n. 1, p. 3-15, 1986.

DRIVER, R. Un enfoque constructivista para el desarrollo del currículo en ciencias. **Enseñanza de las Ciencias**, v. 6, n. 2, p. 109-120, 1988.

DRIVER, R.; WARRINGTON, L. Students use of the principle of energy conservation in problem situation. **Physics Education**, v. 20, p. 171-176, 1985.

DUIT, R. In search of an energy concept. In: ENERGY MATTERS, 1986. Leeds: University of Leeds, 1986.

DUIT, R. Should energy be illustrated as something quasi-material? **European Journal of Science Education**, v. 9, n. 2, p. 139-145, 1987.

DUSCHL, R. A. **Renovar la enseñanza de las ciencias**. Madrid: Narcea, 1997.

DUSCHL, R. A.; GITOMER, D. H. Epistemological perspectives on conceptual change: implications for educational practice. **Journal of Research in Science Teaching**, v. 28, n. 9, p. 839-858, 1991.

ELLSE, M. Transferring not transforming energy. **School Science Review**, v. 69. p. 427-437, 1988.

FERNÁNDEZ, I.; GIL, D.; CARRASCOSA, J.; CACHAPUZ, A.; PRAIA, J. Visiones deformadas de la ciencia transmitidas por la enseñanza. **Enseñanza de las Ciencias**, v. 20, n. 3, p. 401-414, 2002.

FEYNMAN, R. P.; LEIGHTON, R. B.; SANDS, M. **Física**, vol. 1. Bogotá: Adison Wesley Iberoamericana, 1987.

FRASER, B.; TOBIN, K. G. (Eds.). **International Handbook of Science Education**. London: Kluwer Academic Publishers, 1998.

FRISH, S.; TIMOREVA, A. **Curso de física general**, vol. 1. Moscú: Mir, 1972.

GABEL, D. L. (Eds.). **Handbook Of Research On Science Teaching And Learning**. New York: MacMillan Pub. Co., 1994.

GAILIUNAS, P. Is energy a thing? Some misleading aspects of scientific language. **School Science Review**, v. 69, p. 587-590, 1988.

GIL-PÉREZ, D.; CARRASCOSA J.; FURIÓ, C.; MARTÍNEZ-TORREGROSA, J. **La enseñanza de las ciencias en la educación secundaria**. Barcelona: Horsori, 1991.

GIL-PÉREZ, D., FURIÓ, C. y CARRASCOSA J. **Curso de formación para profesores de ciencias. Unidad I.1. La energía: la invención de un concepto fructífero**. Madrid: MEC, 1996.

GIL, D.; VILCHES, A. Una alfabetización científica para el siglo XXI. Obstáculos y propuestas de actuación. **Investigación en la Escuela**, v. 43, p. 27-37, 2001.

GOLDRING, H.; OSBORNE, J. Students' difficulties with energy and related concepts. **Physics Education**, v. 29, p. 26-31, 1994.

HARMAN, P. M. **Energía, fuerza y materia**. Madrid: Alianza, 1990.

HICKS, N. Energy is the capacity to do work -or is it? **The Physics Teacher**, v. 21, p. 529-530, 1983.

HODSON, D. In search of a meaningful relationship: an exploration of some issues relating to integration in science and science education. **International Journal of Science Education**, v. 14, n. 5, p. 541-566, 1992.

KAPER, W. H.; GOEDHART, M. J. 'Forms of energy', an intermediary language on the road to thermodynamics? Part I. **International Journal of Science Education**, v. 24, n. 1, p. 81-95, 2002.

KEMP, H. R. The concept of energy without heat and work. **Physics Education**, v. 19, n. 5, p. 234-240, 1984.

KOLIOPOULOS, D. ; RAVANIS, K. L'enseignement de l'énergie au collège vu par les enseignants. Grille d'analyse de leurs conceptions. **Aster**, v. 26, p. 165-182, 1998.

KUHN, T. S. **La tensión esencial**. México: FCE, 1983.

LEFF, H. S.; MALLINCKRODT, A. J. Stopping objects with zero external work: Mechanics meets thermodynamics. **American Journal of Physics**, v. 61, n. 2, p. 121-127, 1993.

LEHRMAN, R. Energy is not the ability to do work. **The Physics Teacher**, v. 11, p. 15-18, 1973.

LEVINE, I. N. **Físico-Química**. Madrid: McGraw-Hill, 1991.

MAK, S-Y.; YOUNG, K. Misconceptions in the teaching of heat. **School Science Review**, v. 68, p. 464-470, 1987.

MALLINCKRODT, A. J.; LEFF, H. S. All about work. **American Journal of Physics**, v. 60, n. 4, p. 356-365, 1992.

MATTHEWS, M. Historia, filosofía y enseñanza de las ciencias: la aproximación actual. **Enseñanza de las Ciencias**, v. 12, n. 2, p. 255-277, 1994.

MAXWELL, J. C. **Matter and motion**. Reedición de 1991. New York: Dover, 1877.

McDERMOTT, L. C. Cómo enseñamos y cómo aprenden los estudiantes. ¿Un desajuste? (Primera parte). **Revista de Enseñanza de la Física**, v. 6, n. 1, p. 19-32, 1993.

MONLEÓN, M. Analysis of a trivial example and critical considerations following from it regarding the historiography of energy conservation. In: **THERMODYNAMICS: HISTORY AND PHILOSOPHY**. Singapore: World Sci. Pu, 1991.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL. **NATIONAL SCIENCE EDUCATION STANDARDS**. Washington, DC: National Academy Press, 1996.

OGBORN, J. Energy and fuel -the meaning of 'the go of things'. En: **ENERGY MATTERS**, 1986. Leeds: University of Leeds, 1986.

OGBORN, J. Energy, change, difference and danger. **SSR**, v. 72, n. 259, p. 81-85, 1990.

OTERO, J. Assimilation problems in traditional representation of scientific knowledge. **European Journal of Science Education**, v. 7, n. 4, p. 361-369, 1985.

OTERO, J.; BRINCONES; I. El aprendizaje significativo de la segunda ley de la termodinámica. **Infancia y Aprendizaje**, v. 38, p. 89-107, 1987.

PINTÓ, R. **Algunos aspectos implícitos en la primera y segunda ley de la termodinámica**: una aportación al estudio de las dificultades de su aprendizaje. 1991. Tesis (Doctoral) - Universitat Autònoma de Barcelona, Barcelona, España.

PFUNDT, H.; DUIT, R. **Bibliography: Students' alternative frameworks and science education**. University of Kiel. Kiel: Institute for Science Education, 1998.

POSNER, G. J.; STRIKE, K. A.; HEWSON, P. W.; GERTZOG, W. A. Accommodation of a scientific conception: toward a theory of conceptual change. **Science Education**, v. 66, n. 2, p. 211-227, 1982.

PRIDEAUX, N. Different approaches to the teaching of the energy concept. **SSR**, v. 77, n. 278, p. 49-57, 1995.

RAVIOLO, A.; SIRACUSA, P.; HERBEL, M. Desarrollo de actitudes hacia el cuidado de la energía: experiencia en la formación de maestros. **Enseñanza de las Ciencias**, v. 18, n. 1, p. 79-86, 2000.

RESNICK, R.; HALLIDAY, D.; KRANE, K. S. **Física**, vol. 1. México: Compañía Editorial Continental, 1993.

ROGERS, E. **Physics for the inquiring mind**. Princeton, NJ: Princeton University Press, 1965.

SALTIEL, E. Le principe de conservation de l'énergie et le théorème de l'énergie mécanique en classe de première. **Bulletin de l'Union des Physiciens**, v. 91, n. 794, p. 957-972, 1997.

SEVILLA, C. Reflexiones en torno al concepto de energía. Implicaciones curriculares. **Enseñanza de las Ciencias**, v. 4, n. 3, p. 247-252, 1986.

SEXL, R. U. Some observations concerning the teaching of the energy concept. **European Journal of Science Education**, v. 3, n. 3, p. 285-289, 1981.

SHADMI, Y. An outline of a mechanics course based on the israeli junior High School Physics Curriculum. In: **SCIENCE TEACHING IN ISRAEL ORIGINS. Development and Achievements.** Jerusalem, 1984.

SHERWOOD, B. A. Pseudowork and real work. **American Journal of Physics**, v. 51, n. 7, p. 597-602, 1983.

SHERWOOD, B. A.; BERNARD, W. H. Work and heat transfer in the presence of sliding friction. **American Journal of Physics**, v. 52, n. 11, p. 1001-1007, 1984.

SOLBES, J.; TARÍN, F. Algunas dificultades en torno a la conservación de la energía. **Enseñanza de las Ciencias**, v. 16, n. 3, p. 387-397, 1998.

SOLBES, J.; VILCHES, A. STS interactions and the teaching of Physics and Chemistry. **Science Education**, v. 81, n. 4, p. 377-386, 1997.

SOLOMON, J. Learning about energy: how pupils think in two domains. **European Journal of Science Education**, v. 4, p. 49-59, 1983.

TARSITANI, C.; VICENTINI, M. **Calore, energia, entropia.** Milán: Franco Angeli, 1991.

TRUMPER, R. Energy and constructivist way of teaching. **Physics Education**, v. 25, p. 208-212, 1990a.

TRUMPER, R. Being constructive: an alternative approach to the teaching of the energy concept - part one. **International Journal of Science Education**, v. 12, p. 343-354, 1990b.

TRUMPER, R. Being constructive, an alternative approach to the teaching of the energy concept, part two. **International Journal of Science Education**, v. 13, n. 1, p. 1-10, 1991.

TRUMPER, R. Children's energy concepts: a cross-age study. **International Journal of Science Education**, v. 15, n. 2, p. 139-148, 1993.

TRUMPER, R.; GORSKY, P. Learning about energy: the influence of alternative frameworks, cognitive levels, and closed-mindedness. **Journal of Research in Science Teaching**, v. 30, n. 7, p. 637-748, 1993.

VAN HEUVELEN, A.; ZOU, X. Multiple representations of work-energy processes. **American Journal of Physics**, v. 69, n. 2, p. 184-194, 2001.

VAN HUIS, C.; VAN DEN BERG, E. Teaching energy: a systems approach. **Physics Education**, v. 28, p. 146-153, 1993.

VAN ROON, P. H.; VAN SPRANG, H. F.; VERDONG, E. 'Work' and 'Heat': on a road a towards thermodynamics. **International Journal of Science Education**, v. 16, n. 2, p. 131-144, 1994.

VILCHES, A.; GIL, D. **Construyamos un futuro sostenible. Diálogos de supervivencia**. Madrid: Cambridge University Press, 2003.

WARREN, J. W. The nature of energy. **European Journal of Science Education**, v. 4, n. 3, p. 295-297, 1982.

WARREN, J. W. Energy and its carriers: a critical analysis. **Physics Education**, v. 18, p. 209-212, 1983.