

BID. T 7451

UNIVERSITAT DE VALÈNCIA

DEPARTAMENT DE DIDÀCTICA  
DE LES CIÈNCIES EXPERIMENTALS

TESIS DOCTORAL

EL PRINCIPIO DE CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA  
Y SUS IMPLICACIONES DIDÁCTICAS

Memoria presentada por  
FRANCISCO TARÍN MARTÍNEZ

Director de la tesis  
JORDI SOLBES MATARREDONA

Valencia, enero 2000

UMI Number: U607570

All rights reserved

INFORMATION TO ALL USERS

The quality of this reproduction is dependent upon the quality of the copy submitted.

In the unlikely event that the author did not send a complete manuscript and there are missing pages, these will be noted. Also, if material had to be removed, a note will indicate the deletion.



UMI U607570

Published by ProQuest LLC 2014. Copyright in the Dissertation held by the Author.  
Microform Edition © ProQuest LLC.

All rights reserved. This work is protected against  
unauthorized copying under Title 17, United States Code.



ProQuest LLC  
789 East Eisenhower Parkway  
P.O. Box 1346  
Ann Arbor, MI 48106-1346

63481



EDU D 11751

D. 1073880 C. 1073882

CB 0001073882

JORDI SOLBES MATARREDONA, doctor en Ciencias Físicas por la Universitat de València, catedrático de Bachillerato de Física y Química, y profesor de tercer ciclo del Departament de Didàctica de les Ciències Experimentals de la Universitat de València,

CERTIFICA que la presente memoria, con el título **El principio de conservación de la energía y sus implicaciones didácticas** ha sido realizada por Francisco Tarín Martínez bajo mi dirección y constituye la tesis para optar al grado de Doctor en Ciencias Físicas.

Y para que conste, en cumplimiento de la legislación vigente, se presenta esta memoria firmando el presente certificado en Valencia a dieciocho de enero del dos mil.

A handwritten signature in black ink, written vertically and slanted to the right. The signature appears to read "Jordi Solbes".



*A Emilio y Julia*



Deseo expresar mi agradecimiento a todas las personas que han colaborado en la realización de esta memoria.

A los profesores de la Facultad de Físicas de la Universidad de Valencia, Amando García, Francisco Pomer y José Ros por sus aportaciones en mecánica, electromagnetismo y física moderna.

A los profesores y alumnos que han cumplimentado cuestionarios y participado en entrevistas.

Y muy especialmente a Jordi Solbes, sin cuya dedicación y ayuda este trabajo no se habría realizado.



## PRESENTACIÓN

En esta memoria se ha pretendido analizar, en primer lugar, las dificultades de los alumnos de nivel secundario en el proceso de aprendizaje de la energía. También se ha revisado la forma en que la enseñanza habitual presenta la energía en el nivel indicado. Para ello, se ha formulado una primera hipótesis. De acuerdo con ella, los estudiantes a los que se presenta el concepto de energía, según la metodología habitual, mantienen sus preconceptos, tienen una visión limitada del principio de conservación de la energía y no lo utilizan para interpretar fenómenos de todos los campos de la física. Por otra parte, se piensa que la energía se enseña sin tener en cuenta las ideas previas de los alumnos, no mostrando su carácter unificador de todos los fenómenos físicos y sin clarificar la condición de principio o de teorema de su conservación en sus formulaciones de mecánica y termodinámica. Tampoco se presenta de forma conjunta su transformación, conservación, transferencia y degradación.

Para fundamentar la hipótesis anterior se han utilizado argumentos didácticos e históricos. En el primer apartado se muestran las características de la enseñanza habitual y sus consecuencias en el proceso de enseñanza. A continuación, se han revisado las ideas previas y dificultades de los alumnos con respecto a la energía y sus aspectos básicos, tal como aparecen en la abundante investigación educativa sobre este tema. La historia del concepto de energía muestra un paralelismo entre ciertas dificultades que presentó su desarrollo y problemas análogos encontrados en los alumnos.

Con el objeto de contrastar la hipótesis, se ha procedido a su operativización por medio del enunciado de unas consecuencias susceptibles de ser verificadas a través de un diseño múltiple y convergente. Dicho diseño contempla varias fases: la preparación de cuestionarios para el análisis de libros de texto, así como cuestionarios de profesores y alumnos; su aplicación en un ensayo piloto reducido; reelaboración de los cuestionarios de acuerdo con los resultados de dicho ensayo; aplicación de los nuevos cuestionarios a un número significativo de libros de texto, profesores y alumnos; tratamiento estadístico de los datos y análisis de los mismos. Así mismo, se han indicado los objetivos y los criterios de valoración de los items que forman parte de cada cuestionario. Por otra parte, se han realizado entrevistas con alumnos.

Después del análisis de los resultados obtenidos en la contrastación de la primera hipótesis, se ha formulado una segunda en la que se indica que es posible una enseñanza

alternativa de la energía que supere las deficiencias de la enseñanza habitual, de tal forma que parta de las ideas previas de los alumnos, active en ellos la transformación, conservación, transferencia y degradación de dicho concepto, y lo presente como unificador de todos los fenómenos, y especialmente su conservación en mecánica y termodinámica, como casos particulares de un principio general.

Para contrastar la segunda hipótesis se ha operativizado y se han realizado diseños múltiples y convergentes, tal como se ha hecho en la primera. De esta manera, se han redactado programas de actividades que se presentaron a profesores en activo para su discusión. Estos programas se desarrollan dentro del marco de referencia del constructivismo como metodología que establece un cambio conceptual, metodológico y actitudinal. Se ha confeccionado un programa de actividades dirigido a los estudiantes de cuarto curso de ESO. También se ha redactado un programa para el primer curso de bachillerato y actividades relacionadas con la energía con las que se presentan aspectos de dicho concepto correspondientes al segundo curso de bachillerato. Dichos programas se han aplicado a los alumnos, los cuales han contestado el cuestionario utilizado en la validación de la primera hipótesis. Los datos obtenidos se han comparado con los utilizados en la contrastación de la primera hipótesis con el objeto de comprobar si se han producido diferencias significativas estadísticamente en el aprendizaje de la energía. También se han realizado entrevistas a los alumnos y se ha analizado un posible cambio de actitud ante la ciencia como consecuencia de la aplicación de la nueva propuesta. Por otra parte, se ha recogido la opinión de los profesores que analizaron críticamente dicha propuesta o que la pusieron en práctica en sus clases.

Por último, se presentan las conclusiones finales y las perspectivas abiertas por las mismas. De acuerdo con todo lo expuesto anteriormente, el índice general de la investigación será el que aparece a continuación.

# ÍNDICE

<b>CAPÍTULO 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b> .....	13
<b>CAPÍTULO 2. FORMULACIÓN Y FUNDAMENTACIÓN DE LA PRIMERA HIPÓTESIS</b> .....	17
2.1. Formulación de la primera hipótesis .....	17
2.2. Fundamentación de la primera hipótesis .....	17
2.2.1. Fundamentación didáctica .....	18
2.2.2. Fundamentación histórica .....	28
<b>CAPÍTULO 3. OPERATIVIZACIÓN DE LA PRIMERA HIPÓTESIS Y DISEÑOS EXPERIMENTALES PARA SU CONTRASTACIÓN</b> .....	53
3.1. Operativización de la primera hipótesis .....	53
3.2. Diseños para la contrastación de la primera subhipótesis referente al aprendizaje de la energía realizado por los alumnos .....	55
3.2.1. Diseño para contrastar que el aprendizaje de la energía realizado por los alumnos del nivel 1 (14-16 años) resulta escasamente significativo .....	56
3.2.2. Diseño para contrastar que el aprendizaje de la energía realizado por los alumnos de nivel 2 (16-18 años) resulta escasamente significativo .....	62
3.2.3. Diseño para contrastar que las entrevistas realizadas con alumnos muestran que su aprendizaje de la energía resulta escasamente significativo .....	64
3.3. Diseño para contrastar la segunda subhipótesis según la cual los libros de texto presentan la energía de una forma poco clarificadora .....	64
3.4. Diseño para contrastar la tercera subhipótesis según la cual los profesores enseñan la energía de una forma desestructurada e incompleta .....	84
<b>CAPÍTULO 4. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS EN LOS DISEÑOS REALIZADOS PARA LA CONTRASTACIÓN DE LA PRIMERA HIPÓTESIS</b> .....	89
4.1. Resultados referentes al aprendizaje de la energía realizado por los alumnos ...	89

4.1.1. Resultados obtenidos en la contrastación de que el aprendizaje de la energía realizado por los alumnos de los niveles 1 y 2 resulta escasamente significativo .....	89
4.1.2. Resultados obtenidos en la contrastación de que las entrevistas realizadas con alumnos muestran que su aprendizaje de la energía resulta escasamente significativo .....	95
4.2. Resultados obtenidos en la contrastación de que los libros de texto presentan la energía de una forma poco clarificadora .....	104
4.3. Resultados obtenidos en la contrastación de que los profesores enseñan la energía de una forma desestructurada e incompleta .....	116

<b>CAPÍTULO 5. FORMULACIÓN Y FUNDAMENTACIÓN DE LA SEGUNDA HIPÓTESIS .....</b>	<b>121</b>
5.1. Formulación de la segunda hipótesis .....	121
5.2. Fundamentación de la segunda hipótesis .....	121
5.2.1. La introducción de la energía de acuerdo con el constructivismo .....	122
5.2.2. Criterios para el diseño de un curriculum para la enseñanza/aprendizaje del concepto de energía y de su conservación .....	126

<b>CAPÍTULO 6. OPERATIVIZACIÓN DE LA SEGUNDA HIPÓTESIS Y DISEÑOS EXPERIMENTALES PARA SU CONTRASTACIÓN .....</b>	<b>159</b>
6.1. Operativización de la segunda hipótesis .....	159
6.2. Diseño para la contrastación de la primera subhipótesis referente a la posibilidad de elaboración de una propuesta alternativa para la enseñanza y aprendizaje de la energía .....	162
6.3. Diseños para la contrastación de la segunda subhipótesis referente a los cambios experimentados en los alumnos de los grupos experimentales con respecto al aprendizaje de la energía y a su actitud .....	163
6.4. Diseños para la contrastación de la tercera subhipótesis referente a la valoración positiva de la propuesta alternativa que hacen los profesores que la conocen o utilizan .....	167
6.5 Presentación de un programa de actividades .....	170

<b>CAPÍTULO 7. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS EN LOS DISEÑOS REALIZADOS PARA LA CONTRASTACIÓN DE LA SEGUNDA HIPÓTESIS .....</b>	<b>195</b>
7.1. Resultados referentes a la posibilidad de elaboración de materiales alternativos para la enseñanza y el aprendizaje de la energía .....	195
7.2. Resultados referentes al cambio en el aprendizaje de los estudiantes de los grupos experimentales y en sus actitudes .....	196

7.2.1. Resultados obtenidos en la contrastación de que los estudiantes de nivel 1 (14-16 años) de los grupos experimentales muestran una mejora en el aprendizaje de la energía .....	197
7.2.2. Resultados obtenidos en la contrastación de que los estudiantes de nivel 2 (16-18 años) de los grupos experimentales muestran una mejora en el aprendizaje de la energía .....	202
7.2.3. Resultados obtenidos en la contrastación de los cambios observados en los estudiantes de un grupo experimental antes y después del aprendizaje de la energía .....	208
7.2.4. Resultados obtenidos en la contrastación que las entrevistas con estudiantes de los grupos experimentales muestran que el aprendizaje de la energía ha sido significativo .....	211
7.2.5. Resultados obtenidos en la contrastación de un cambio positivo en la actitud hacia la ciencia y su aprendizaje en los estudiantes de los grupos experimentales .....	218
7.3. Resultados referentes a la valoración positiva de la propuesta alternativa de enseñanza/aprendizaje de la energía que hacen los profesores que la conocen o la utilizan .....	220
<b>CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS .....</b>	<b>225</b>
8.1. Conclusiones .....	226
8.2. Perspectivas .....	230
<b>ANEXOS .....</b>	<b>233</b>
ANEXO I. Resúmenes de artículos.....	233
ANEXO II. Programa de actividades para la enseñanza de la energía. Primer curso de bachillerato .....	267
ANEXO III. Actividades de segundo curso de bachillerato relacionadas con la energía .....	291
ANEXO IV. Libros de texto revisados .....	307
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	309
ÍNDICE DE AUTORES .....	325



## CAPITULO 1

### PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El desarrollo histórico de la física presenta dos aspectos aparentemente contradictorios. La física nace como disciplinas independientes: cinemática, dinámica, termodinámica, óptica, electricidad, etc. que siguieron evoluciones propias con algún punto de contacto con las demás. Por otra parte, se realizaron síntesis de fenómenos aparentemente inconexos. La teoría de la gravitación newtoniana en el siglo XVII unificó los fenómenos terrestres y celestes. La síntesis electromagnética de Maxwell integró en una teoría los fenómenos, aparentemente no relacionados, de la electricidad, el magnetismo y la óptica. Si las dos grandes síntesis anteriores tuvieron lugar gracias al concepto de campo, la conexión entre la mecánica y la termodinámica se realizó por medio de la energía (Holton 1979).

En el proceso de unificación de la física se establecieron un conjunto de principios que son válidos en todos los campos de la física y también en las demás ciencias. Dichos principios proporcionan a la física (y a la ciencia, en general) una visión unitaria frente al elevado número de fenómenos sin ninguna relación aparente. El principio de conservación de la energía es uno de ellos. Su campo de validez es universal, desde las partículas elementales y la estructura de los átomos hasta el origen y evolución del universo; desde la física clásica hasta la relativista o la cuántica; desde los fenómenos cotidianos hasta los que trascienden la percepción directa.

La definición y el concepto de energía han evolucionado desde su introducción por Huygens. Partiendo de la energía cinética y potencial de la mecánica postnewtoniana, los estudios sobre la energía han mostrado nuevos aspectos como la energía del campo electromagnético, la relación relativista de la masa y la energía o su carácter discontinuo en la física cuántica. A pesar de las revoluciones conceptuales de la física en el siglo XX, la energía se ha mantenido en la ciencia como un elemento más válido que las definiciones que la acotan.

Por otra parte, la conservación de la energía es uno de los elementos conceptuales más importantes de la ciencia en todas sus manifestaciones: limita el número de pro-

cesos que pueden ocurrir, mientras que la evolución de los posibles viene determinada por la segunda ley de la termodinámica.

En la enseñanza secundaria obligatoria y en el bachillerato se transmite la imagen de la diversidad de la física. Para ello basta leer cualquier índice de los temas de un libro de texto. Sin embargo, la idea de unidad de la física no aparece. La conservación de la energía mecánica y el primer principio de la termodinámica se presentan como principios generales de conservación de la energía, sin introducir las ideas que permitirían su generalización. Sin embargo, la conservación de la energía no se utiliza en otros campos de la física, excepto en casos muy concretos.

Por otra parte, el concepto de energía no aparece ligado tan sólo a la física. Así, por ejemplo, se presenta en muchos fenómenos de la biología. De esta forma, se analiza su transferencia y transformación en la fotosíntesis, y en los procesos de respiración celular, a través del ATP. También se considera su conservación y transformación en los flujos que se presentan en los ecosistemas, y su progresiva degradación a través de los niveles tróficos. En geología, la energía representa un papel destacado en los procesos de modelado del relieve o en el movimiento de las placas litosféricas por medio de su transferencia convectiva. La química hace uso de la energía en conceptos tales como la entalpía, la energía libre o el calor de reacción.

Aunque el papel de la energía en las ciencias resulta muy relevante, también se deben considerar otras dimensiones como las sociales, políticas, económicas o medioambientales. La energía forma parte de la vida cotidiana, se relaciona con problemas económicos como el consumo de combustibles, el agotamiento de las fuentes de energía o el desarrollo de nuevas formas de energía. De la misma forma, el debate de la energía nuclear o los problemas de contaminación preocupan tanto a los políticos como a los ciudadanos.

Con relación al proceso de enseñanza/aprendizaje, se han detectado algunos problemas de la enseñanza habitual que reciben los alumnos y que ponen en cuestión su eficacia. Por una parte, existen concepciones espontáneas de los estudiantes (Hierrezuelo y Montero 1989) que, también en el campo de la energía, tienen una especial importancia. Además, los alumnos no resuelven los problemas que se diferencian ligeramente de los realizados en la clase (Martínez Torregrosa 1987). Por último, se ha observado una disminución del interés hacia el aprendizaje de la ciencia a medida que los estudiantes promocionan a cursos superiores (Solbes y Vilches 1989).

De acuerdo con la importancia social y científica de la energía, y teniendo presentes los problemas de la enseñanza usual se plantean las siguientes cuestiones:

**1) ¿Qué dificultades presenta a los estudiantes de nivel secundario el proceso de enseñanza/aprendizaje del concepto de energía?**

**2) ¿Cómo introduce la enseñanza habitual en el nivel secundario el concepto de energía?**

En el capítulo siguiente se procederá a la formulación de una hipótesis que marcará las líneas fundamentales para analizar la forma en que los alumnos aprenden el concepto de energía y la presentación que de dicho concepto realiza la práctica docente habitual.



## **CAPÍTULO 2**

### **FORMULACIÓN Y FUNDAMENTACIÓN DE LA PRIMERA HIPÓTESIS**

Después de analizar en el capítulo anterior la importancia de la energía desde el punto de vista científico y social, se procedió al planteamiento de dos cuestiones relacionadas con su enseñanza. Dicho problema conduce a la formulación de una hipótesis que se realizará en este capítulo. A continuación, se realizará la fundamentación de dicha hipótesis en base a dos diferentes aspectos.

#### **2.1. Formulación de la hipótesis**

La experiencia didáctica muestra que los alumnos tienen dificultades en el aprendizaje de la energía y su conservación. A título de ejemplo se puede señalar que dados problemas que se pueden resolver alternativamente mediante la segunda ley de Newton o las relaciones trabajo-energía, los estudiantes siempre optan por el primer método. Las consideraciones anteriores conducen al planteamiento de un problema: ¿cuáles son las dificultades que encuentran los alumnos cuando estudian dicho concepto? y ¿cómo presenta la enseñanza habitual la energía en el nivel secundario? Todo ello nos lleva a formular la siguiente hipótesis:

**“La mayor parte de los estudiantes a los que se presenta el concepto de energía, de acuerdo con el modelo de la enseñanza habitual, continuarán utilizando sus preconcepciones y adquirirán unos conocimientos escasamente significativos”.**

#### **2.2. Fundamentación de la hipótesis**

Con el objeto de fundamentar la hipótesis anterior, se analizará la enseñanza habitual para comprobar cómo presenta el concepto de energía. Después se hará una revisión de las aportaciones que la investigación educativa ha realizado sobre dicho concepto. Por último, se examinará la evolución histórica de la energía y se determinarán las dificultades que se plantearon hasta llegar a su establecimiento definitivo.

### 2.2.1. Fundamentación didáctica

En la práctica docente habitual resulta frecuente comprobar la existencia de estudiantes capaces de responder correctamente cuestiones tradicionales presentadas en los exámenes y que, sorprendentemente, demuestran una falta de comprensión muy profunda de conceptos científicos básicos. Algunos estudios, como los de Leboutet (1973) y Viennot (1976), dirigieron la atención a la existencia de los “errores conceptuales” o “ideas alternativas” de los alumnos. Se comprobó que tales ideas son comunes a estudiantes de diferentes países y niveles educativos. Por otra parte, las “ideas alternativas” persisten a pesar de la enseñanza (McDermott 1984).

El estudio de las ideas alternativas ha dado lugar a una amplia bibliografía. Se han catalogado en muchos campos de la física y de la química, especialmente en mecánica. A título de ejemplo se pueden mencionar las recopilaciones hechas por Hierrezuelo y Montero (1989), y por Driver, Guesne y Tiberghien (1992). También son muy numerosos los cuestionarios elaborados para su detección. Entre los más recientes se pueden señalar el de Lang da Silveira y Moreira (1996) para la detección de ideas sobre calor, temperatura y energía interna así como el de Furió y Guisasola (1999) sobre dificultades en el aprendizaje del campo electrostático.

Algunos investigadores (Driver y Bell 1996, Novak 1982) han indicado que los errores conceptuales expresan, en realidad, un conjunto de ideas intuitivas (también llamadas preconcepciones) que los estudiantes poseen con anterioridad a su escolarización. Estos preconceptos tienen su origen en:

- las experiencias sensoriales de los estudiantes observan en su vida diaria.
- la necesidad que muestran los seres humanos desde la niñez por interpretar los fenómenos cotidianos del entorno (Driver y Bell 1986).
- la utilización de ciertos términos (como trabajo y energía) que tienen un significado diferente en el lenguaje ordinario y en el científico (Solís 1984).
- los procedimientos intuitivos de razonamiento de los estudiantes como la causalidad lineal, la explicación de cambios pero no de estados, etc. (Pozo 1992).

### Enseñanza por transmisión verbal

Algunos autores (Gil *et al.* 1991) han señalado la enseñanza por transmisión verbal como una de las causas del mantenimiento de los errores conceptuales. De una forma muy esquemática se pueden señalar sus características principales. Dicha enseñanza considera que el aprendizaje se realiza por la recepción que hace el alumno de los conocimientos transmitidos por el profesor. La transmisión supone una explicación clara, coherente, precisa y exacta por parte del profesor. La comprensión de los conceptos se completa con la realización de problemas numéricos, cuestiones y prácticas de laboratorio. El

papel del estudiante en este proceso es el de un receptor, que añade los nuevos conocimientos a los que ya posee. Si el aprendizaje no se produce, la causa se encuentra en el escaso interés del estudiante o en su inteligencia limitada (Novak 1982, Gil 1983).

De acuerdo con los planteamientos anteriores, se puede concluir que la enseñanza por transmisión verbal no tiene en cuenta los conocimientos previos de los alumnos ni las dificultades que dichos conocimientos pueden plantear en el proceso de aprendizaje de nuevos conceptos. Este problema se agrava si se consideran los errores conceptuales que introducen algunos libros de texto (Carrascosa 1987). Por otra parte, la enseñanza tradicional presenta los conceptos sin considerar los problemas que llevaron a su construcción (Otero 1985).

Con respecto a las prácticas de laboratorio, la enseñanza tradicional las considera como ilustración de conceptos o comprobación de leyes (Payá 1991). Normalmente se desarrollan a través de un guión en el que aparecen detalladamente instrucciones sobre el objetivo, montaje experimental, recogida de datos y análisis de los resultados. Este procedimiento transmite a los estudiantes una idea errónea del trabajo científico, dado que no se ofrece la oportunidad de utilizarlo. En cuanto a los preconceptos, no se produce su sustitución porque no contempla que los alumnos emitan hipótesis y pongan de manifiesto sus propias ideas.

La resolución de problemas se aborda por la enseñanza tradicional como una actividad cuya solución se conoce por lo que no cabe realizar tentativas (Gil y Martínez Torregrosa 1987). Como consecuencia, los alumnos reducen la solución de problemas a la utilización mecánica de “fórmulas” o de procedimientos memorizados. De esta forma, cualquier variación en los modelos de problema produce en los estudiantes la renuncia a su resolución. Al igual que ocurre con los trabajos de laboratorio, esta metodología presenta a los estudiantes una visión distorsionada del trabajo científico.

Por último, la enseñanza habitual no presenta los cambios de modelo que se han producido en la ciencia (Solbes 1986) ni las relaciones de ésta con la tecnología y la sociedad (Solbes y Vilches 1992). Los efectos de estas circunstancias en los estudiantes se manifiestan en un desinterés por la física y una actitud negativa hacia la ciencia.

### **Aportaciones de la investigación didáctica a la enseñanza de la energía**

Después de revisar brevemente las características de la enseñanza habitual, se procederá a la presentación y análisis de las investigaciones didácticas que se han desarrollado en el tema de la energía. Para ello, examinaremos algunos aspectos generales sobre las diversas formas de introducción de la energía en la enseñanza. A continuación, se revisarán las ideas de los alumnos sobre dicho concepto.

A diferencia del operacionalismo de Bridgman, Sexl (1981) considera que la energía no debe presentarse a través de una definición operativa. Por el contrario, se pueden proponer ejemplos sencillos de movimientos (como la caída libre) para mostrar que en ellos se mantienen constante una cantidad que se llama energía. Estas conclusiones se generalizan posteriormente a todos los sistemas físicos. Una vez establecida la conservación de la energía, se introduce su transferencia de un sistema a otro, por medio del trabajo.

Duit (1981) señala las dificultades que aparecen cuando la energía se enseña por medio de su conservación. Concretamente, indica que la idea de conservación aparece muy tarde en el desarrollo cognitivo de los alumnos. Por otra parte, el concepto de energía en el lenguaje cotidiano se asocia con algo que se consume y no se conserva. Para evitar los problemas anteriores, Duit sugiere que se parta de una definición de energía, se introduzca la transferencia y transformación, y por último, la conservación.

Warren (1982) resume las posiciones mantenidas por Sexl y Duit en dos categorías:

a) Materialistas. la energía se considera como una sustancia que tiene existencia objetiva. Los alumnos tienen ideas sobre la energía adquiridas en su experiencia cotidiana y pueden entender el concepto físico de la misma. La enseñanza debe formalizar el conocimiento previo de los alumnos.

b) Conceptualistas. la energía es un concepto científico abstracto y avanzado. En la vida diaria los alumnos tienen ideas equivocadas de la energía por lo que la comprensión del concepto resultará muy difícil. Se debe aprender por medio de una instrucción sistemática a partir de la conservación.

Previamente al análisis de las ideas de los alumnos sobre la energía, se considera oportuno precisar cuáles son las causas que producen su aparición. Duit (1981) señala que la energía aparece con mucha frecuencia en la vida diaria y en los medios de comunicación. Por tanto, una fuente de las ideas previas de los alumnos se podría encontrar en su entorno.

Para Solomon (1983), el origen de las dificultades sobre la energía se encuentra en el hecho de que los alumnos piensan en dos dominios diferentes: el cotidiano y el científico. En el primero, el concepto resulta ambiguo, con multitud de significados; en el segundo, por el contrario, tiene un sentido muy definido. Los alumnos deben usar la palabra energía en el dominio cotidiano pero también deben aprender su sentido en el dominio científico y distinguir los significados que tiene en cada uno de los dos ámbitos.

Los artículos que recogen las ideas de los alumnos sobre la energía siguen dos tendencias generales. Por una parte, se analizan las concepciones de forma puntual

mientras que otros investigadores crean sistemas de referencia más amplios en los que recogen la *estructura* de las ideas de los alumnos (Watts 1983).

Aunque el esquema conceptual de Watts se ha cuestionado (Solomon 1984, Lijnse 1990), su utilización en la investigación educativa resulta frecuente (Bliss y Ogborn 1985, Lijnse 1990, Trumper 1990). Watts recoge las ideas de los alumnos sobre energía en siete ideas-núcleo o esquemas conceptuales “de estructura compleja que proporcionan una explicación sensible y coherente” (Watts 1983). Dichos marcos conceptuales son:

- 1) Esquema “antropocéntrico”. La energía se asocia con seres humanos o con objetos que tienen características humanas.
- 2) Esquema “depósito”. Los objetos tienen energía y son recargables, o necesitan energía y la gastan.
- 3) Esquema “ingrediente”. La energía aparece como un ingrediente “dormido” en el objeto y necesita un “disparador” que lo libere.
- 4) Esquema “actividad”. La energía se identifica con una muestra de actividad.
- 5) Esquema “producto”. La energía es un subproducto de una situación que se crea, permanece activa y desaparece.
- 6) Esquema “funcional”. La energía aparece como un combustible que se asocia con los procesos que hacen cómoda la vida.
- 7) Esquema “flujo”. La energía se identifica con un tipo de fluido o sustancia.

Duit (1981), por su parte, clasifica en cinco categorías las respuestas de los alumnos a las asociaciones que hacen con la palabra energía:

- 1) Cosas (seres humanos, cosas u objetos de la naturaleza, aparatos de laboratorio, etc.).
- 2) Procesos (actividades físicas o mentales).
- 3) Fenómenos (luz, calor, electricidad, etc.).
- 4) Conceptos (unidades, fórmulas, términos como trabajo, fuerza, etc.).
- 5) Palabras (términos no clasificables en otras categorías).

Duit (1981, 1984) ha realizado una contribución muy relevante en la enseñanza de la energía. Señala que dicho concepto debe contemplar cinco aspectos fundamentales: la propia noción de energía, su transformación, transferencia, conservación y degradación. Dichos aspectos deberían formar una referencia para la investigación educativa.

La identificación que realizan los estudiantes de la energía con otros conceptos ha sido el objetivo de algunos trabajos. En concreto, Solomon (1983) indica que la noción más primaria de energía se relaciona con la *energeticidad* humana. Dicha cualidad se manifiesta en la actividad y no se puede medir, de acuerdo con la opinión no científica de la vida cotidiana. En un estudio realizado con alumnos de edades comprendidas entre los 13 y los 18 años, Driver y Warrington (1985) señalan que los estudiantes confunden *tra-*

*bajo* y energía. Ambos conceptos se pueden asimilar a *esfuerzo* en el lenguaje cotidiano. Por otra parte, el concepto científico de energía se construye a partir de características del sistema como masa, velocidad, distancia, fuerza, etc. De esta forma la energía no tiene un atributo perceptivo inmediato. También se ha detectado la identificación de la energía con trabajo, fuerza (Duit 1981) y potencia (Goldring y Osborne 1994), incluso después de haberse recibido enseñanza sobre dicho tema. Montanero, Suero y Pérez (1996) han desarrollado un método para la resolución de problemas dinámicos que puede evitar la identificación de fuerza y trabajo. Algunos estudiantes piensan que los sistemas que tienen energía son los que realizan trabajo para las personas, como por ejemplo los coches o los barcos (Watts 1983). Al analizar el sistema formado por un carrito unido a la pared por medio de un muelle y preguntar a los alumnos de qué forma se podría aumentar la energía que recibe el carrito, se detectó que el *movimiento*, la *velocidad* e incluso la *masa* se confunden con la energía (Driver y Warrington 1985). En un estudio realizado con estudiantes alemanes y filipinos de 11 a 16 años (Duit 1984) se detectó que los primeros asocian la energía a la *electricidad* (y también a los combustibles) y los segundos, a los procesos. Viglietta (1990) también se refiere a la misma identificación en los estudiantes italianos.

La asociación de la idea de energía con los *combustibles* es muy frecuente y está de acuerdo con la experiencia cotidiana: todos los objetos que se mueven terminan parándose si no se les suministra energía. Para algunos alumnos, la energía es un combustible que poseen los seres vivos y los objetos que se mueven (Watts 1983). Para otros, es el combustible que hace funcionar a las máquinas (Duit 1981, 1984). Al realizar los alumnos, entre 13 y 15 años, cadenas de transformaciones energéticas, Carr y Kirkwood (1988) descubrieron que se produce una confusión entre *formas de energía* y *fuentes*. Por otra parte, Solomon (1985) ha profundizado en la identificación anterior y ha descubierto que los alumnos de 15 años no diferencian la naturaleza abstracta del concepto de energía y la sustancia material que la “suministra”. De esta forma, identifican la energía con sus fuentes. Otros alumnos de la misma edad piensan que la energía puede aparecer repentinamente de una fuente que no la tiene. Por último, un grupo de estudiantes piensan que algunos cuerpos poseen energía, mientras que otros la pueden almacenar. La idea de la energía como *sustancia material* está asociada a la de combustible y a la de las fuentes. Algunos alumnos piensan que la energía es una sustancia que se obtiene de ciertas materias primas como el petróleo (Duit 1987a), necesaria para que funcionen las máquinas o los aparatos de la vida cotidiana (Duit 1981) y que se gasta. Estas ideas muestran una caracterización material de la energía.

A partir de la mitad de la década de los 80, algunos investigadores educativos profundizaron en las ideas alternativas de los alumnos sobre energía y, de acuerdo con los esquemas conceptuales de Watts (1983), dieron a conocer sus resultados sobre la estructura del pensamiento de los estudiantes en este tema. De esta manera, Nicholls y Ogborn (1993) señalan que la principal estructura mental sobre la energía se refiere a la

diferencia entre *fuentes* y *consumidores* de energía. Las fuentes son las cosas de las que se consigue energía. De ellas se dice que son energía. Forman parte de ellas los combustibles, la madera y los fenómenos naturales activos (agua, viento, etc.). En los consumidores se incluyen tanto las cosas que necesitan energía como las que la usan de otras cosas. Entre ellos figuran los aparatos ( bombilla, horno eléctrico, etc.) y los seres vivos. En algunos alumnos comienza a activarse el mecanismo de la *transferencia* de energía cuando consideran que la energía se intercambia entre los objetos, de forma que un objeto puede ser fuente o consumidor. Bliss y Ogborn (1985) encuentran que el esquema mayoritario de sus alumnas de 15 años corresponde al número 1 de Watts en el sentido de “animado/inanimado”. Sin embargo, los resultados no pueden clasificarse en un solo esquema sino en agrupamientos binarios del tipo animado/inanimado+actividad (p. ej. inanimado/activo: luz eléctrica; animado/inactivo: chica que come). También encuentran relaciones ternarias como animado/inanimado+actividad+depósito según la siguiente estructura de pensamiento: se especifica lo que está haciendo (actividad) un objeto (animado/inanimado) y se liga a una clase de energía que necesita objeto, especificando el depósito. Trumper (1990) utiliza las categorías de Duit (1981) y encuentra que la mayoría de los alumnos de enseñanza secundaria asocian la energía a “fenómenos”. Los estudiantes de cursos superiores identifican la energía con “conceptos físicos”. En el mismo estudio se obtiene que los esquemas de Watts (1983) mayoritarios corresponden al “antropocéntrico”, “causa” y “producto”. Muy pocas respuestas corresponden al esquema “científico”. Lijnse (1990), por su parte, indica que las ideas de los alumnos se caracterizan por su carácter “antropomórfico”, “depósito” y “funcional” de los citados esquemas de Watts.

Las ideas de los profesores y las que aparecen en los libros de texto también han sido analizadas por la investigación educativa. Driver y Warrington (1985) señalan que algunos profesores utilizan un lenguaje inadecuado al referirse a algunos aspectos de la energía. Así, hablan de que la energía se usa, cuando se quiere decir que se transforma. También se dice que la energía se pierde cuando se hace referencia a la transformación en calor. McClelland (1989) ha detectado el uso inadecuado que algunos profesores hacen de la palabra “almacenamiento”. De esta manera, los alumnos pueden llegar a identificar la energía como una sustancia material. Carr y Kirwood (1988) advierten del mismo riesgo cuando indican que los profesores tratan la energía, de forma deliberada, como una sustancia porque es un concepto difícil de enseñar. Se corre el mismo riesgo cuando, de forma no consciente asocian una materia con la energía (p. ej. el carbón es energía).

Con referencia a los libros de texto, Strube (1988) examinó varios publicados en Gran Bretaña. La energía se presenta en ellos como algo (no se especifica con claridad si es material o no) que un cuerpo puede poseer. Por otra parte, no se clarifica si la energía tiene la misma realidad que otras propiedades de los objetos.

No todas las dificultades de los alumnos en el aprendizaje de la energía se deben a las ideas previas. Al analizar un problema, muchos alumnos piensan en él más como un *proceso* (secuencia de acontecimientos dependientes del tiempo) que como un *sistema* que gana o pierde energía (Driver y Warrington 1985, López Gay 1987). Por otra parte, Rozier y Viennot (1991) indican que en termodinámica se utilizan varias variables, las cuales cambian simultáneamente. Por esa razón se han detectado muchas dificultades en su estudio. Para facilitar el problema, los estudiantes emplean dos métodos: a) reducción del número de variables y b) utilización de todas las variables, de una forma simplificada que implica el razonamiento lineal causal. En algunas ocasiones los estudiantes justifican sus respuestas (sin tener en cuenta que sean correctas o incorrectas) en base a aspectos que no se han presentado en la clase. Cárdenas y Ragout (1996) indican que más de la mitad de los alumnos analizados explicaron el aumento de volumen y temperatura de un gas calentado a presión constante por medio de mecanismos microscópicos.

Muchos estudiantes tienden a negar o ignorar la variación de energía interna (van Huls y van den Berg 1993). Se debe a su inclinación a utilizar el modelo de dos pasos (entrada y salida de energía, es decir, causa y efecto), en lugar del modelo de tres (entrada de energía, cambio de la energía interna y salida de energía).

A continuación, destacaremos las ideas que se refieren a la conservación de la energía.

### **Ideas sobre la conservación de la energía**

En un estudio para determinar las dimensiones fundamentales del pensamiento espontáneo de los estudiantes de 14 a 17 años sobre la conservación (Mariani y Ogborn 1990) se enseñan a los alumnos unas tarjetas con dibujos en los que hay conceptos abstractos (energía), entidades microscópicas (electrón), entidades cósmicas (sol), aparatos (televisor), cosas (hierro, madera), máquinas ideales (péndulo), ciclos naturales (ríos) y seres vivos (plantas). Se pide a los alumnos que indiquen si cada uno de los objetos posee o no cada una de seis categorías (puede durar para siempre, puede moverse para siempre, etc.). El pequeño número de alumnos que señalan la conservación de la energía, consideran dicho concepto como una sustancia material

En el lenguaje coloquial, la conservación de la energía no tiene el mismo sentido que en el científico. La conservación se asocia a consumo de energía (Duit 1981), a su ahorro (Lijnse 1990) o a la conservación de los recursos energéticos (Carr y Kirkwood 1988). Sólo un número muy reducido de alumnos hacen referencia explícita a la energía y a su conservación cuando explican el funcionamiento de algunos aparatos o analizan sistemas físicos (Duit 1981, 1984; Driver y Warrington 1985, Trumper 1991). Prefieren palabras y nociones que proceden de sus experiencias cotidianas (Duit 1981, 1984). Al-

gunos estudiantes utilizan términos científicos como trabajo o energía pero las respuestas son confusas o incorrectas. Otro tipo de respuestas se formulan en términos de aspectos perceptivos inmediatos (“ayuda la pendiente”, “el agua desciende con más fuerza”) seguramente porque el significado científico de energía no tiene ningún atributo perceptivo (Driver y Warrington 1985).

Solomon (1985) ha detectado en los estudiantes una idea equivocada sobre el almacenamiento de la energía. Piensan que la energía se almacena en el sistema y puede volver a su forma original por medio de algún proceso reversible. Esta puede ser una razón por la que resulta difícil comprender la conservación de la energía. Otra razón puede ser la enunciación negativa del principio de conservación de la energía. Por otra parte, Brook y Wells (1988) señalan que los alumnos no adquieren el concepto de conservación de la energía mediante el proceso de manipulación de aparatos en los que analizan las diferentes formas de energía y sus transformaciones.

### **Ideas sobre la transferencia de la energía**

Jenelten Allkofer (1979) señala que los alumnos entre 10 y 12 años poseen esquemas de pensamiento que les permiten entender la transferencia y la transformación de la energía pero no su conservación. Sin embargo, la transformación de la energía es mencionada por el 1 % de alumnos a los que se les pidió una definición de energía. Ninguno indica la transferencia, la conservación o la degradación (Duit 1984).

Nicholls y Ogborn (1993) han señalado que la transferencia de energía se entiende cuando los alumnos empiezan a pensar en los objetos como fuentes de energía, en unas ocasiones, y consumidores, en otras. De esta forma, la energía puede ser intercambiada entre dos cuerpos.

### **Ideas sobre la transformación de la energía**

Los alumnos no hacen uso de la transformación de la energía para explicar procesos mecánicos. Driver y Warrington (1985) indican que sólo un alumno se refirió explícitamente a la transformación de energía cinética a potencial en la explicación del funcionamiento de un mecanismo.

### **Ideas sobre la degradación de la energía**

Los conceptos fundamentales de la segunda ley de la termodinámica son necesarios para entender el concepto de energía, su conservación (Brook y Wells 1988) o los

problemas energéticos relacionados con la crisis de la energía (Duit 1987b). La idea de degradación no es utilizada por los alumnos en los procesos que implican la transformación de la energía mecánica en interna. Kesidou y Duit (1993) plantean el caso de un péndulo que termina parándose. Las respuestas señalan que la energía del péndulo se gasta a causa de la gravedad o de la resistencia del aire pero en ninguna se indica la degradación.

### **Ideas sobre la energía cinética y potencial**

Los alumnos piensan que la energía cinética y potencial son esencialmente diferentes. Mientras que la energía potencial sólo existe en nuestro pensamiento, la cinética se asocia con algo observable (Duit 1987a). Por otra parte, los estudiantes hacen una diferenciación muy tajante entre la energía potencial y las otras clases de energía (Carr y Kirkwood 1988).

Hierrezuelo y Molina (1987) señalan que pocos alumnos relacionan la energía potencial con la posición del cuerpo. Después de la enseñanza, se olvida antes el concepto de energía potencial que el de cinética. A los alumnos les resulta muy complicado la aplicación de la energía potencial a situaciones concretas, si no se conoce el estado final del proceso (Carr y Kirkwood 1988). Así, por ejemplo, ¿qué clase de energía potencial tiene una pila: gravitatoria, química, eléctrica, etc.?

Con respecto a la localización de la energía potencial gravitatoria, los alumnos la atribuyen mayoritariamente al cuerpo (Warren 1983) y no al sistema o a la interacción del cuerpo con la Tierra (Solbes y Martín 1991). La misma idea aparece en un número muy elevado de libros de texto (Poon 1986, McClelland 1988, Solbes y Martín 1991).

Algunos alumnos no reconocen la relación causa-efecto que se encuentra implícita en el teorema de las fuerzas vivas o teorema trabajo-energía. De esta manera, no relacionan el hecho de que una fuerza que actúa a lo largo de una distancia produzca una variación de la energía cinética (O'Brien Pride *et al.* 1998).

### **Ideas sobre el calor**

La investigación educativa muestra que un número muy elevado de alumnos piensan en el calor como una sustancia material situada en el interior de los cuerpos (Albert 1978, Erickson 1979, 1980). Mientras que los alumnos pequeños creen que el calor es estático, los mayores tienen una idea dinámica (Albert 1978). Algunos alumnos diferencian el calor del frío y suponen que los dos son sustancias materiales (Tiberghien 1980). Las ideas sobre el calor de una gran parte de estudiantes, especialmente su conservación

y la concepción material, recuerdan una etapa muy concreta de la evolución histórica del concepto de calor: la teoría del calórico (Engel Clough y Driver 1985).

Con referencia a la transferencia del calor, los niños pequeños desarrollan intuitiva y sensorialmente dicha idea de transferencia cuando tocan cuerpos cuya temperatura es mayor o menor que la corporal, es decir, cuando diferencian la fuente y el receptor (Albert 1978). Algunos alumnos señalan que el frío se puede transferir y que los aislantes son agentes activos de calentamiento (Newell y Ross 1996). Para explicar la transmisión de calor por conducción, los alumnos atribuyen propiedades al calor y al objeto que sufre sus efectos. De esta forma, un objeto se calienta mucho porque el calor es “fuerte” y el cuerpo también (Triplett 1973, Erickson 1979). En otras ocasiones, piensan que el cuerpo “atrae” al calor y lo “guarda”, como ocurre en el caso de los metales (Erickson 1980). En otro modelo de conducción, los alumnos piensan que el calor tiene una fuerza interna que le hace moverse (Erickson 1979). La convección se explica asociando al calor características del humo o del vapor (Tiberghien 1980) que tienden a expandirse o identificando una disposición natural del calor a moverse (Crookes 1982).

En un estudio realizado con alumnos universitarios de primer curso, von Roon *et al.* (1994) señalan que los estudiantes piensan que el calor es una forma de energía y razonan en términos de conservación del calor.

### **Ideas sobre temperatura, calor y equilibrio térmico**

La idea de temperatura que desarrollan la mayoría de alumnos pequeños se basa en los grados de calor (Albert 1978). Por otra parte, piensan que la temperatura es una propiedad de los cuerpos, relacionada con su naturaleza pero no con el entorno (Tiberghien 1980). De esta manera, interpretan que los objetos situados en una habitación tienen temperaturas diferentes.

La diferenciación entre la cantidad de calor y la temperatura es realizada por muy pocos estudiantes (Tiberghien 1980). No se reconoce el carácter intensivo de la temperatura y se piensa que existe una relación entre la temperatura del cuerpo y su tamaño. Así, por ejemplo, un cubito grande de hielo tardará más tiempo en derretirse que uno pequeño porque su temperatura es “mas fría” (Erickson 1979). Otros alumnos consideran la temperatura como una propiedad intrínseca de los cuerpos, dado que unos parecen más fríos que otros cuando se tocan (Tiberghien 1980).

En una investigación sobre equilibrio térmico realizada con adultos y estudiantes, Arnold (1994) ha descubierto que los dos grupos de personas presentan problemas semejantes en la interpretación del fenómeno. Las dificultades se deben tanto a la identifica-

ción de calor y temperatura como a no considerar todos los elementos que forman el sistema.

### **2.2.2. Fundamentación histórica**

La filosofía y la historia de la ciencia tienen como objetivo, con relación al proceso de enseñanza/aprendizaje de la ciencia, el establecimiento de las bases para la descripción, el análisis y el desarrollo de dicho proceso. Sus implicaciones didácticas han sido analizadas con detalle por Duschl (1994) que establece dos tipos: las que se refieren al diseño del currículum y las que se relacionan con los cambios de metodología. Dentro del primer grupo se puede incluir la aportación de Schwab. Dicho autor, después de analizar más de 2000 artículos de investigación, estableció en 1960 que el trabajo científico utiliza dos tipos de investigación o indagación (“inquiry” en la denominación original inglesa) denominados “estable” y “fluida”, que se corresponden con las épocas de estabilidad y de revolución establecidas por Kuhn. La enseñanza de la ciencia debe basarse en la proposición de que el proceso de enseñanza/aprendizaje ha de reflejar la características del trabajo científico. Esto implica que los estudiantes deben adquirir conocimientos a través de los métodos que utilizan los científicos (investigación estable) y que deben ser conscientes de que los conocimientos adquiridos pueden cambiar (investigación fluida). Las implicaciones anteriores suponen que una enseñanza de la ciencia basada en la transmisión de hechos, hipótesis y teorías proporciona una visión incompleta de la misma. Tampoco es suficiente el aprendizaje de procesos como la observación, la clasificación, la medida, la predicción o la inferencia, entre otros. Tales procesos corresponden al “qué” de la ciencia pero no al “cómo”.

El desarrollo de la “investigación fluida”, según la terminología de Schwab, ha dado lugar a las aportaciones que la historia de la ciencia realiza en el dominio de la metodología en el proceso de enseñanza/aprendizaje. El objetivo de esta línea de investigación se refiere al descubrimiento y explicación del proceso de estructuración y reestructuración de las teorías científicas, es decir, la profundización en el crecimiento y desarrollo del conocimiento científico así como sus implicaciones didácticas. No existe un consenso sobre la naturaleza de dicho aspecto, como se pone de manifiesto en el desarrollo de dos líneas diferentes de pensamiento, denominadas “Concepción dinámica de las teorías” y “Filosofía naturalizada”. La primera hace énfasis en la naturaleza no lingüística de las teorías científicas mientras que la segunda considera lo contrario, de manera que el análisis del desarrollo del conocimiento científico se realiza fundamentalmente a través del significado de los términos utilizados en una teoría y de los mecanismos que producen cambios en los significados de los mismos. La aplicación a la didáctica de las conclusiones obtenidas en el análisis de la reestructuración del conocimiento científico abre una importante línea de investigación. Entre algunos de sus resultados se pueden citar los obtenidos a través de las ideas de cambio de pensamiento científico de Kuhn y Lakatos.

De acuerdo con ellas, se han clasificado los mecanismos de cambio de conocimiento de los estudiantes en dos tipos: reestructuración débil, que se asocia con el concepto de Kuhn de periodos estables de la ciencia, y reestructuración radical que corresponde a las épocas de revolución. La segunda reestructuración corresponde al cambio conceptual que se pretende en los alumnos. Siguiendo esta línea de pensamiento, Posner ha establecido cuatro condiciones que deben cumplir las nuevas ideas para dar lugar a un cambio conceptual en los estudiantes. Glaser ha señalado que la reestructuración radical de conocimientos en los alumnos exige que se enseñe un conocimiento de tipo procedimental que permita la evaluación de las teorías, las evidencias, las observaciones y los datos.

La investigación educativa ha puesto de manifiesto la existencia de paralelismos entre las ideas alternativas de los alumnos y los conceptos que se desarrollaron en ciertas etapas iniciales de la ciencia (Wandersee 1985, 1992; Gagliardi 1988, Gil 1993, Matthews 1990, 1991, 1994). Dicha semejanza no siempre puede entenderse en un sentido estricto (Saltiel y Viennot 1985, Sequeira y Leite 1991) dado que son diferentes las circunstancias culturales, históricas, sociales e ideológicas en las que se han elaborado los esquemas conceptuales de los alumnos y los conceptos científicos con los que mantienen una semejanza. Por otra parte, la revisión y análisis de los esquemas alternativos en diversos campos de la física ha revelado que algunas de las ideas que se presentan en el razonamiento espontáneo de los estudiantes no tienen equivalente en el desarrollo histórico de los conceptos (Saltiel y Viennot 1985).

La historia de la ciencia refleja los obstáculos que ciertas ideas tuvieron que superar hasta su aceptación por la comunidad científica. Este conocimiento puede ayudar a los profesores en el proceso de enseñanza/aprendizaje porque les anticipa alguna de las dificultades con las que se encontrarán los estudiantes en la construcción de conocimientos (Saltiel y Viennot 1985, Gagliardi 1988, Matthews 1991, Sequeira y Leite 1991). De acuerdo con este método se han analizado los problemas de aprendizaje que presentan algunos conceptos. Se pueden citar, entre otros, los de carga y potencial eléctrico (Furió y Guisasola 1993) o el de corriente eléctrica (Fillon 1991).

Gagliardi (1986, 1988) ha propuesto la idea de “conceptos estructurantes”. Se trata de aquellos que “al ser construidos por el alumno determinan una transformación de su sistema cognitivo que le permite incorporar nuevos conocimientos”, es decir, “... permiten la superación de obstáculos epistemológicos”. La historia de la ciencia puede determinar cuáles son dichos conceptos. Basta analizar las épocas de crisis de la ciencia para encontrar nuevas ideas que sustituyen a las antiguas. Una vez conocidos los conceptos estructurantes históricos pueden ser utilizados en la enseñanza. Por otra parte, la historia de la ciencia proporciona “situaciones problemáticas de interés” (Gil *et al.* 1991) que sirven como punto de partida para plantear el proceso de aprendizaje. (Traver 1996).

La introducción de la historia de la ciencia permite que los alumnos reflexionen sobre sus ideas sobre la ciencia y las cuestionen. De esta manera podrán apreciar que los conocimientos científicos son el resultado de un trabajo colectivo (Gagliardi 1986, Fillon 1991, Burbules 1991) y no la elaboración de un “genio” solitario. También reconocerán las profundas transformaciones que han sufrido las ciencias en algunos periodos, los problemas que han conducido a dichas crisis y las resistencias que se han tenido que superar (Gagliardi 1986). Los estudiantes considerarán el carácter transitorio y cuestionable de los conocimientos científicos así como la importancia de las críticas, los debates y las controversias en su desarrollo (Fillon 1991). Por otra parte, la ciencia que se suele presentar a los estudiantes aparece como un producto elaborado, sin conocer los problemas que dan lugar a dicho resultado. La historia de la ciencia pone de manifiesto el proceso dinámico de su construcción (Fillon 1991, Gruender y Tobin 1991, Wandersee 1992, Irwin 1996).

Las implicaciones didácticas de la historia de la ciencia han dado lugar a controversias (Matthews 1990, 1994). Klein (1972) señala que “los profesores de ciencias utilizan los materiales históricos de una forma no histórica e incluso antihistórica” dadas las visiones diferentes de los historiadores y de los físicos. Por dicha razón rechaza la utilización de la historia de la ciencia en la enseñanza. Whitaker (1979) hace referencia a la “casi historia”, entendiendo por tal la interpretación que los científicos y los profesores de ciencia hacen de los hechos históricos. Dicha interpretación refleja el carácter subjetivo de la historia en el sentido de reconocer la influencia que el contexto cultural ejerce sobre el historiador. Kuhn (1982) se muestra partidario de una “educación convergente”, es decir, la que presenta la ciencia como un conjunto de soluciones a problemas concretos sin considerar su carácter tentativo. En esas circunstancias, la historia de la ciencia se convierte en un obstáculo para el alumno por lo que debe ser ignorada. En un sentido semejante se muestra Brush (1974). La historia de la evolución de la ciencia muestra su carácter cuestionable, sujeta a críticas y debates. Sin embargo, los alumnos necesitan la certidumbre y la seguridad del dogma.

Como ejemplos de la introducción de la historia de la ciencia en el proceso de enseñanza/aprendizaje de la ciencia se pueden indicar los que recogen Bevilacqua y Giannetto (1998) divididos en cinco categorías: estudios de casos históricos, reconstrucción de experimentos históricos, estudios de los aspectos ideológicos, sociales y económicos de la ciencia, utilización de documentos históricos y estudios de casos relacionados con problemas cognitivos de la educación. Dentro de la primera categoría se puede incluir otros ejemplos, no recogidos por los autores indicados, como el caso histórico de la teoría del flogisto (Irwin 1997).

A continuación se muestra el desarrollo histórico del concepto de energía, de acuerdo con cuatro fases fundamentales:

1. La conservación de la energía en la mecánica.

A partir del estudio experimental de los choques elásticos, se formula un principio de conservación en el que sólo aparece la energía cinética del que, muy pronto, se conocen sus limitaciones. El carácter de teorema o de principio fundamental resulta confuso.

## 2. La conservación de la energía en termodinámica.

Se conceptualizan el calor, la cantidad de calor, la temperatura, la energía interna y el trabajo. Estos conceptos, unidos a una gran cantidad de hechos experimentales (procesos de conversión de energía, transformación de calor en trabajo; estudio de máquinas térmicas) dan lugar a la formulación de los dos principios de la termodinámica. El primer principio resuelve las limitaciones de la conservación de la energía en mecánica, mientras que el segundo aporta la degradación de la energía como un nuevo aspecto de la misma.

## 3. La energía en el campo electromagnético.

El establecimiento de la teoría electromagnética da lugar a la consideración de la energía de los campos y a la radiación como un nuevo proceso de transferencia de energía.

## 4. La energía en la física moderna.

La teoría de la relatividad introduce una relación entre la masa y la energía, y la energía de la masa en reposo. La desintegración  $\beta$  y el posterior descubrimiento del neutrino suponen la confirmación de la conservación de la energía a nivel microscópico. Por último, el teorema de Noether supone una visión más profunda del sentido de la conservación de la energía al relacionarla con una invarianza de las leyes naturales bajo las traslaciones temporales.

## La conservación de la *vis viva*

Durante el siglo XVII alcanzaron un gran desarrollo los estudios sobre choques. La acumulación de datos experimentales condujo a la creación *ad hoc* de una magnitud que se conservara en las colisiones elásticas. Descartes utilizó la cantidad de movimiento mientras que Leibniz y otros científicos, como Huygens y Wallis, pensaron que la *vis viva* (fuerza viva) era la magnitud que permanecía constante en el choque. Dicha magnitud se definió como el producto de la masa de un cuerpo por el cuadrado de su velocidad. De este modo, aparece, por primera vez en la historia de la física, una magnitud energética definida de manera precisa que se conserva en fenómenos mecánicos. Por otra parte, la no conservación de la *vis viva* en los choques inelásticos condujo a la introducción de la energía interna y al primer principio de la termodinámica en el siglo XIX.

Los *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nove science attenanti alla meccanica de i movimenti locali* escritos por Galileo (1564-1642) datan de 1638. En este tratado aparece una afirmación referente al movimiento de un cuerpo que cae libre-

mente. Galileo expresa que el cuerpo alcanzará la misma altura de la que partió si choca elásticamente con una superficie y no se considera el rozamiento del aire. Aunque Galileo no hace ninguna consideración de tipo conservativo o energético, se ha considerado como una de las primeras manifestaciones implícitas de la conservación de la *vis viva* (Holton 1979).

En el tratado de Galileo citado anteriormente se expone el problema del martillo-pilón. Se deja caer un cuerpo sobre una estaca hundida en el suelo y Galileo se pregunta “¿no es cierto que si un bloque cae sobre una estaca desde una altura de cuatro cúbitos y la hunde en tierra, por ejemplo cuatro dedos, si procediera de una altura de dos cúbitos, hundiría la estaca mucho menos, y se procediera de un cúbito todavía menos?” Galileo plantea la proporcionalidad entre la distancia que se hunde la estaca y la velocidad del cuerpo que cae. De esta manera, Galileo anticipa una forma de medir la “fuerza” (en el sentido actual de trabajo) a partir de sus efectos. Como se verá más adelante, Leibniz utilizaría un procedimiento semejante en la medida de la *vis viva*.

C. Huygens (1629-1695) realizó una formulación más precisa de la conservación de las fuerzas vivas. La *Royal Institution* de Londres propuso en 1668, como tema de discusión, el problema del choque de dos cuerpos. Junto a Wren (1632-1723) y Wallis (1616-1703), Huygens tomó parte en el concurso, analizando la colisión elástica el 4 de enero de 1669. Los resultados aparecieron en el *Journal de Savants* (1669) y póstumamente en *Motu corporum ex percussione* publicado en 1700. En dichos tratados se resuelve el problema de los choques elásticos por medio de la conservación de la *vis viva* (Dugas 1988, Erlichson 1997). Con Huygens aparece explícitamente la primera formulación, aunque muy restringida, del principio de conservación de la energía: la conservación de las fuerzas vivas en los choques elásticos.

Los choques inelásticos fueron analizados por J. Wallis (1616-1703), que diferenció los cuerpos perfectamente *duros (hard)* de los *blandos (soft)*. Cuando se refiere a estos últimos, afirma que “un cuerpo blando es el que se deforma en un choque de tal manera que pierde su forma original...parte de la fuerza se utiliza para deformarlos”. Las palabras anteriores indican que Wallis reconoce que una parte de la fuerza viva del cuerpo incidente se utiliza para deformar el cuerpo blando, es decir, la fuerza viva no se conserva en un choque inelástico (Dugas 1988).

Al igual que Huygens, G. W. Leibniz (1646-1716) se interesó por el problema de los choques. En 1686 apareció en el *Acta eruditorum* de Leipzig una memoria del matemático alemán en la que señalaba el incumplimiento, en ciertos casos, del principio cartesiano de la conservación de la cantidad de movimiento. Un año después, Leibniz proponía que fuera sustituido por una ley más general de forma que “existiera una perfecta igualdad entre la causa completa y el efecto completo”. El principio propuesto por Leibniz era el de la conservación de las fuerzas vivas. Leibniz pensaba que un cuerpo que

cae adquiere una “fuerza”. El valor de dicha “fuerza” es tal que le permite ascender a la misma altura desde la que cayó, si se produce un choque elástico. Por tanto, la “fuerza” adquirida se puede medir por su efecto, es decir, por la altura alcanzada. Según las leyes de Galileo, dicha altura es proporcional al cuadrado de la velocidad inicial, de manera que la “fuerza” será proporcional al cuadrado de la velocidad. Al producto de la masa de un cuerpo por el cuadrado de su velocidad lo denomina *vis viva* (Dugas 1988). Como la altura (efecto de la *vis viva*) se conserva, también se conservará la causa, es decir, la *vis viva* se mantiene constante. La medida de una *vis viva* por el efecto producido y, más concretamente, por la altura a la que podía ascender un cuerpo, fue aplicado por Leibniz al problema de los choques y por Huygens al estudio de los péndulos (Solaz y Sanjosé 1992). En el tratado *Horologium Oscillatorium* (1673) se señala que la energía cinética del péndulo es igual a la potencial gravitatoria (utilizando los términos actuales) (Erlichson 1996). En su polémica con Descartes, Leibniz mantuvo que la *vis viva*, y no la cantidad de movimiento, es la magnitud que permanece constante en un choque.

Durante el siglo XVII la conservación de las fuerzas vivas es una ley de la mecánica que se aplica a los choques y a los movimientos de caída, tanto libres como pendulares. Su campo de validez se extendió durante el siguiente siglo. Daniel Bernouilli (1700-1782) construyó su *Hydrodynamyca* (1738) a partir de la hipótesis de la conservación de las fuerzas vivas en los fluidos (Taton 1972). Posteriormente, en las *Memoires de Berlin* (1748), lo aplicó a un sistema de cuerpos que se atraen o que se mueven hacia un punto común, de acuerdo con una ley que es función de la distancia.

El problema de la no conservación de las fuerzas vivas fue analizado por Borda (1733-1799). En su *Mémoire sur l'écoulement des fluides par les orifices des vases* (1766) considera las pérdidas de fuerza viva producidas en el movimiento de fluidos cuando atraviesan un tubo cuya sección aumenta o disminuye bruscamente. Para resolver cuantitativamente el problema considera que es análogo al choque inelástico (Dugas 1988). De esta forma puede calcular el valor de dichas pérdidas (Taton 1972).

Lazare Carnot (1753-1823) abordó los choques inelásticos en la segunda parte de su tratado *Principes généraux de l'équilibre et du mouvement* (1803). En dichos fenómenos se produce una disminución de las fuerzas vivas, como ya era conocido desde el siglo XVII. El resultado obtenido se resume en el teorema que lleva su nombre: “En el choque de cuerpos duros (inelásticos), la suma de las fuerzas vivas antes del impacto es siempre igual a la suma de las fuerzas vivas después del impacto y a la suma de las fuerzas vivas que tendría cada uno de los cuerpos si se moviera libremente con la velocidad que perdió en el impacto” (Dugas 1988).

Los estudios de Borda y Carnot tienen un especial interés porque abordan por primera vez el tratamiento cuantitativo de la pérdida de la fuerza viva en choques inelásticos o en fenómenos reducibles a ellos.

Durante los siglos XVII y XVIII aparece, de una manera implícita, el concepto de energía potencial en Galileo, Huygens, Leibniz y Bernouilli. Se relaciona con la fuerza muerta, con la tensión, etc. Euler (1707-1783) introduce en 1744 (*Methodus inveniendi lineas curvas maximi minimive proprietate gaudentes*) la *vis potencialis* de un cuerpo elástico cuando se deforma (Whittaker 1989). Correspondería al concepto actual de energía potencial elástica..

La función conocida ahora como potencial apareció en 1777 cuando Lagrange (1736-1813) resolvió un problema relacionado con un sistema de partículas que se atraen mutuamente por la acción de la gravedad. Si se coloca una pequeña partícula, no perteneciente al sistema, en un punto P, Lagrange demostró que las componentes de la fuerza gravitatoria que actúa sobre dicha partícula, se pueden calcular como las derivadas de una función V (Whittaker 1989). Dicha función se obtiene como la suma de la masa de cada partícula del sistema dividida por la distancia desde el punto P al punto en que se encuentra cada masa. La utilización de la función potencial simplifica el problema, al no tener que considerar la dirección de las fuerzas gravitatorias. Posteriormente Laplace llegó a la conclusión de que la función V cumple la ecuación (Whittaker 1989)

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 0$$

Aunque la función potencial supuso una simplificación en los cálculos matemáticos de las fuerzas, no se relacionó con ningún tipo de principio de conservación.

A finales del siglo XVIII la conservación de la energía, en su formulación de *vis viva*, es una ley establecida de la mecánica. Sin embargo, su estatus epistemológico permanece muy confuso. D'Alembert (1717-1783) considera en su *Traité de Dynamique* (1743) que la conservación de las fuerzas vivas se puede deducir de las leyes de la dinámica para sistemas con ciertas restricciones (Dugas 1988). Para Lagrange, dicho principio es un corolario de las hipótesis que aparecen en su *Mécanique analytique* (1788) cuando las ligaduras son independientes del tiempo y no tienen rozamiento (Dugas 1988). D. Bernouilli lo eleva al rango de principio fundamental en la elaboración de su *Hydrodynamyca*. no deducible, por tanto, de las leyes mecánicas. Por otra parte, parece no cumplirse en ciertos fenómenos como las colisiones inelásticas o en los que se considera el rozamiento (Dugas 1988).

## Calor

El estudio de los choques inelásticos realizado en el siglo XVII tuvo como consecuencia la revisión del calor entendido como sustancia material, de acuerdo con la teoría del calórico, y su desplazamiento por una concepción cinética.

La contribución más relevante del siglo XVII en los fenómenos relacionados con el calor fue el establecimiento conceptual de la temperatura. Hacia 1592 Galileo (1564-1642) reutilizó el termoscopio de aire descrito por Herón (c. 62 d.C.) en su tratado *Pneumaticos*. Se trataba de un aparato que determinaba el grado de calor o de frío de un cuerpo. El establecimiento de una escala termométrica en un termoscopio se debe, hacia 1612, a Sartorio (1561-1636). Aunque dotado de una escala cuantitativa, el termoscopio era un aparato poco fiable. Sus medidas resultaban afectadas por los cambios de presión atmosférica y de la gravedad. R. Bacon (1561-1626) y A. Kircher (1601-1680), entre otros, emplearon también termoscopios de aire (Taton 1972).

En 1632 aparece el termómetro de agua en una carta de Jean Rey (c.1583-1645). Dicho termómetro será rápidamente sustituido por el de alcohol, construido por primera vez en la *Accademia del Cimento* de Florencia (Taton 1972).

Durante el siglo XVIII no se produjo ningún avance importante en la termometría. Fahrenheit (1686-1736) definió la escala que lleva su nombre y en 1720 introdujo el termómetro de mercurio. La escala Reamur fue propuesta por Jean André de Luc (1727-1817) en 1772 en sus *Investigaciones sobre las modificaciones de la atmósfera* mientras que la escala centígrada o Celsius apareció en 1743 como aportación de J.-P. Christian (1683-1755) (Taton 1972).

Si en el siglo XVII tiene lugar la conceptualización de la temperatura, en el XVIII se realiza la de cantidad de calor. Algunos miembros de la *Accademia del Cimento* descubrieron en 1641 que al tomar cantidades iguales de líquidos diferentes a la misma temperatura, no funden la misma cantidad de hielo. J. Black (1728-1799) precisó la idea anterior y determinó de forma cuantitativa la cantidad de calor necesaria para que masas iguales de cuerpos diferentes sufran la misma variación de temperatura. De esta manera introdujo el concepto de calor específico (conocido entonces como *capacidad para el calor*) y la forma de determinarlo (Papp 1961). Black observó que, en los cambios de estado, se absorbe o se cede una cantidad de calor sin que la temperatura varíe. Al calor puesto en juego en dichos fenómenos le dio el nombre de calor latente e ideó un método para calcularlo (Taton 1972). En Francia, Lavoisier (1743-1794) y Laplace (1749-1827) realizaron la medida de calores específicos, latentes, de disolución, de reacción, etc. Los resultados fueron recogidos en la *Memoire sur la chaleur* (1784) (Taton 1972).

Los fenómenos relacionados con el calor fueron explicados en el siglo XVIII por la teoría del calórico (Papp 1961). De acuerdo con la misma, el calórico es un fluido sutil formado por átomos indestructibles. Dicho fluido penetra en los cuerpos cuando se calientan y escapa cuando se enfrían. Lavoisier demostró, a través de medidas muy precisas, que el calórico no tenía masa, a pesar de tratarse de una sustancia. Otra propiedad central del calórico se refiere a su conservación. Si se ponen en contacto dos cuerpos que

tienen temperaturas diferentes, pasa calórico de uno a otro hasta que se igualan las temperaturas, de manera que la cantidad de calórico que pierde un cuerpo coincide con la ganada por el otro. Esta propiedad fue confirmada por las mediciones de la cantidad de calor realizadas por Black.

Aunque la teoría del calórico explicaba satisfactoriamente todos los fenómenos de naturaleza térmica conocidos en la época, una observación de Rumford (1753-1814) planteó serias dudas sobre su veracidad. En 1798, Rumford comprobó de forma práctica la producción ilimitada de calor por medio del rozamiento en la perforación de tubos para cañones. Este hecho no podía ser explicado por la teoría del calórico. En efecto, si se perfora el tubo de un cañón, la cantidad de calor obtenida no puede ser superior a la que contiene dicho tubo porque el calórico se conserva. Rumford llegó a la conclusión de que el calórico no podía ser una sustancia porque no se mantenía constante en ciertos fenómenos (Papp 1961). El hecho fue interpretado como una transformación de la energía mecánica en calor. Dicha transformación produciría un aumento del movimiento de las partículas del cuerpo, de acuerdo con una olvidada teoría mecanicista sobre los gases propuesta por D. Bernouilli en su tratado sobre fluidos (*Hydrodynamica* 1738). En las *Philosophical Transactions* (1798) Rumford indica que “no puedo hacerme ninguna representación del calor, si no puedo considerarlo como un movimiento” (Taton 1973).

Según las hipótesis de Bernouilli, los gases están formados por partículas que se mueven y chocan elásticamente entre ellas. Las propiedades macroscópicas observables son una consecuencia del movimiento de las partículas. Así, por ejemplo, la presión producida por un gas se puede interpretar como un efecto del choque de las partículas sobre las paredes. Si un gas se calienta, aumenta la *vis viva* de las partículas y, por tanto, la presión. La teoría cinética de Bernouilli explicaba muchos fenómenos térmicos pero no la dilatación o los cambios de estado (Taton 1972).

La influencia de la teoría de Rumford en el pensamiento de la época fue pequeña. No propuso ninguna relación cuantitativa entre la energía suministrada y el calor producido. Tampoco explicó la razón por la que el calor se conserva en ciertos casos (por ejemplo, en la determinación de la temperatura de una mezcla) y no en otros (por ejemplo, en la producción de calor por rozamiento). Sin embargo, H. Davy (1788-1829), constituye una excepción. Siguiendo las ideas de Rumford, realizó en 1799 una experiencia de generación de calor a partir del rozamiento. Demostró que la fricción de dos trozos de hielo producía el calor necesario para derretirlos (Papp 1961).

En el siglo XVIII se analizaron la radiación y la conducción, como formas de transmisión del calor. Desde el siglo anterior se sabía que el calor se transmite por radiación y en el siglo siguiente se observaron analogías entre dichas ondas y la luz. P. Prevost (1751-1839) estableció en 1799 la idea dinámica de equilibrio de la radiación térmica de un cuerpo (Whittaker 1989, Taton 1973) y W. Herschel (1738-1822) demostró en 1801

la identidad entre los rayos infrarrojos y la radiación térmica (Taton 1973). Este hecho supuso otro argumento en contra de la teoría del calórico. ¿Cómo podían transformarse las partículas de calórico en ondas cuando se transmitía calor de un cuerpo a otro que no estuviera en contacto?

Aunque el paso de calor de un cuerpo a otro por conducción era un fenómeno conocido, hasta 1789 no se realizó un estudio cuantitativo de la conductividad térmica. En ese año, J. Ingenhousz (1730-1799) comparó experimentalmente las conductividades de diferentes cuerpos.

La deducción matemática de las leyes de la conducción corresponde a J. Fourier (1768-1830). En 1822 publicó el tratado *Théorie analytique de la chaleur*. En él aparece la ley de conducción del calor aplicada a una varilla cuyos extremos se encuentran a temperaturas diferentes (Taton 1973). La formulación de la ley se realiza sin necesidad de ninguna hipótesis sobre la naturaleza del calor o sobre el mecanismo de su transmisión (Papp 1961). De acuerdo con dicha ley, la cantidad de calor que atraviesa una sección de la varilla es proporcional al gradiente de temperaturas.

Como resumen de las aportaciones realizadas en los siglos XVII y XVIII a los fenómenos térmicos y a la naturaleza del calor, se puede citar el establecimiento de los conceptos de temperatura y de cantidad de calor. Los fenómenos en los que se producía una cantidad inagotable de calor gracias a la realización de un trabajo mecánico no pudieron ser explicados por la teoría del calórico. Como consecuencia, se abandonó dicha teoría y se estableció la naturaleza cinética del calor.

## La conservación de la energía

A mitad del siglo XIX se establece, de forma simultánea e independiente por R. Mayer (1814-1878), J. Joule (1818-1889) y H. Helmholtz (1821-1894), el principio de conservación de la energía. La formulación de dicho principio fue un proceso complicado y largo, resultado de varias corrientes de pensamiento: la doctrina filosófica alemana llamada *Naturphilosophie*, la interconvertibilidad de ciertos fenómenos, el desarrollo conceptual del trabajo y la equivalencia del trabajo y el calor (Kuhn 1982).

El movimiento filosófico *Naturphilosophie* se desarrolló en Alemania a principios del siglo XIX. Se trataba de una doctrina cuyos antecedentes se remontan a Leibniz, Wolff y Kant. Los filósofos de la *Naturphilosophie* creían en la unidad de todos los procesos de la naturaleza, a través de un principio unificador. Schelling (1755-1854), uno de sus representantes, publicó en 1799 el tratado *Erster Entwurf eines Systems der Naturphilosophie* (Primer bosquejo de un sistema de filosofía de la naturaleza). En dicho tratado, el filósofo alemán indica que “no cabe duda de que una sola fuerza, en sus varias

formas, está manifiesta en [los fenómenos de] la luz, la electricidad y así, sucesivamente” (Kuhn 1982). La *Naturphilosophie* ejerció sobre los científicos de la época una influencia muy considerable y creó el ambiente intelectual para la búsqueda de fenómenos de transformación.

A finales del siglo XVIII se conocía un número muy elevado de fenómenos relacionados con la mecánica, el calor, la luz, la electricidad, el magnetismo y las reacciones químicas. Sin embargo, los fenómenos conocidos de las diferentes ramas de la física no se relacionaban entre ellos. Esta situación comenzó a cambiar cuando, a principios del siglo XIX, se descubrieron conexiones entre varios procesos.

En 1801 W. Herschel (1738-1822) identificó el calor radiante con las ondas infrarrojas. Volta (1745-1827) descubrió en 1800 que una reacción química produce electricidad. Pocos años después, Davy (1778-1829) y Faraday (1791-1867) identificaron el proceso contrario: la electricidad provoca reacciones químicas (Kuhn 1982).

Oersted (1777-1851) realizó en 1820 su conocido experimento en el que se demuestra que una corriente eléctrica crea un campo magnético. El fenómeno inverso fue descubierto por Faraday (1791-1867) en 1831 cuando comprobó que se puede crear una corriente eléctrica por medio de un campo magnético variable.

Los hechos anteriores, entre otros muchos, llevaron a varios científicos a la idea de conservación. Si se puede utilizar un fenómeno para producir otro, y éste puede producir el primero, ¿existirá alguna relación entre las magnitudes que caracterizan ambos fenómenos? Algunos científicos pensaron que en los fenómenos interconvertibles se debería mantener constante alguna magnitud, a pesar de los cambios. A esa magnitud la llamaron “fuerza” (en el sentido actual de energía). K.F. Mohr (1806-1879) en 1837, M. Faraday (1791-1867) en 1844, J. Liebig (1803-1873) en 1844 y W. Grove (1811-1896) en 1846, formularon, de manera independiente, un principio de conservación de la energía de tipo cualitativo (Kuhn 1982). En su época no disponían de la capacidad técnica para medir la “fuerza” inicial y final de un proceso.

Una contribución decisiva para el establecimiento de la conservación de la energía fue la introducción del concepto de trabajo. Se realizó, a principios del siglo XIX, por los ingenieros franceses que estudiaban el movimiento de las máquinas. Un antecedente del concepto de trabajo se encuentra en la *Théorie des fonctions analytiques* (1797) de Lagrange. Al analizar un problema de ingeniería de Lazare Carnot, se formula el principio de conservación de las fuerzas vivas utilizando el producto de la fuerza por la distancia. Sin embargo, la magnitud así definida no representa ningún papel relevante en el resto del tratado. En el *Essai sur les machines en général* (1782) de Lazare Carnot aparece el concepto de trabajo con el nombre de *momento de actividad y fuerza viva latente* (Dugas 1988).

La introducción del trabajo en el sentido actual fue realizada por un grupo de ingenieros franceses entre los que figuran H. Navier (1785-1836), G. Coriolis (1792-1843) y J.-V. Poncelet (1788-1867) (Kuhn 1982). El nombre de trabajo fue propuesto por Poncelet en *Introduction à la mécanique industrielle* (1829) (Papp 1961, Kuhn 1982). El tratado de Coriolis *Du calcul de l'effet des machines* data de 1829. Allí aparece por primera vez la formulación del principio de conservación de las fuerzas vivas en términos de trabajo. Coriolis redefine la fuerza viva como  $1/2mv^2$  para que el trabajo sea igual a la variación de dicha fuerza (Kuhn 1982).

El establecimiento del concepto de trabajo fue un gran paso hacia la demostración de la equivalencia de calor y trabajo, la medida del equivalente mecánico del calor y el establecimiento del principio de conservación de la energía por Mayer, Joule y Helmholtz.

A partir de unas observaciones, realizadas en 1840, sobre el color de la sangre en los trópicos (Papp 1961), Mayer (1814-1878) desarrolló la idea de la equivalencia del trabajo mecánico y del calor así como de la conservación de la energía. Estas hipótesis fueron publicadas en 1842 con el título *Bemerkungen über die Kräfte der unbelebten Natur (Observaciones sobre las fuerzas de la naturaleza inorgánica)* y tuvieron poca repercusión. En la memoria citada aparece la interpretación de un fenómeno en base a la equivalencia del calor y del trabajo, y un resultado cuantitativo del llamado “equivalente mecánico del calor” (Papp 1961). Mayer conocía el experimento de Gay-Lussac en el que un gas mantiene constante su temperatura si se expande en el vacío pero se enfría si la dilatación se hace a presión constante. El enfriamiento se puede explicar fácilmente si se admite que una parte del calor del gas se ha utilizado para realizar el trabajo de expansión, es decir, se ha producido una conversión de calor en trabajo. A partir de los valores conocidos de los calores específicos a volumen y a presión constante del aire, Mayer obtuvo que  $1 \text{ cal} = 3,6 \text{ J}$  (Taton 1973, Holton 1979).

Mayer presentó numerosos ejemplos de conversión de “fuerzas” y de su indestructibilidad, hasta generalizar los resultados en la primera formulación escrita del principio de conservación de las “fuerzas”. Según sus palabras: “... podemos decir que las causas son cuantitativamente indestructibles y cualitativamente convertibles... Las “fuerzas” son, por tanto, entidades indestructibles y convertibles”. En 1845 publicó otra memoria (*Die organische Bewegung in ihrem Zusammenhange mit dem Stoffwechsel (El movimiento orgánico en su relación con la transformación de la materia)*) en la que extendía el principio de conservación de la energía a fenómenos fisiológicos y de 1848 data una tercera memoria en la que se consideran fenómenos de todo tipo a la luz del principio indicado.

Si las consecuencias obtenidas por Mayer son el resultado de la elaboración de datos y de la interpretación de fenómenos, en el caso de Joule proceden de una variada

actividad experimental. Joule (1818-1889) profundizó en la equivalencia del calor y el trabajo por medio de numerosos experimentos de muy diversa naturaleza. En todos ellos demostró que existe una relación constante entre el trabajo realizado y el calor producido, independientemente del fenómeno considerado o de la sustancia utilizada. En 1843 obtuvo que  $1 \text{ cal} = 4,51 \text{ J}$  al medir el trabajo necesario para mover un generador eléctrico y el calor producido en una resistencia (Holton 1979). Los resultados se publicaron en la memoria *On the Caloric Effects of Magneto-Electricity and on the Mechanical Value of Heat*. En dicho artículo aparece, por primera vez en los trabajos de Joule, la hipótesis sobre la conservación de la energía. La relación entre el calor generado por rozamiento del agua en un tubo estrecho y el trabajo realizado para mantener la corriente dieron como resultado que  $1 \text{ cal} = 4,14 \text{ J}$ . En la medida del calor desprendido en la compresión de un gas y el trabajo utilizado, estableció que  $1 \text{ cal} = 4,27 \text{ J}$ . Posteriormente realizó un conjunto de experiencias en las que se calentaba agua o mercurio por efecto de una corriente inducida o por el rozamiento de unas paletas que giraban (Holton 1979). Joule hizo numerosas variantes de sus experiencias y utilizó casi todas las formas de energía conocidas en la época. En todos los casos llegó a un valor semejante para la relación entre el calor y el trabajo. Las experiencias de Joule establecieron la equivalencia entre trabajo y calor (Harman 1990), pusieron de manifiesto la transformación de la energía y aportaron un gran número de evidencias a favor del principio de su conservación

Aunque Mayer y Joule establecieron la existencia de la energía como magnitud que se mantiene constante en los procesos, ninguno de ellos la formalizó matemáticamente. Helmholtz (1821-1894) llevó a cabo esa tarea y la presentó en la memoria *Über die Erhaltung der Kraft (Sobre la conservación de la fuerza)* (1847). En ella se analiza el sistema conservativo (es decir, excluyendo el rozamiento y los choques inelásticos) formado por una partícula sometida a fuerzas que son funciones de la distancia, o a fuerzas centrales. Se define la *cantidad de tensiones* (la energía potencial actual) y se indica que “el aumento de la energía cinética de una partícula en su movimiento bajo la influencia de una fuerza central es igual a la cantidad de tensiones que corresponden a la variación relativa desde el centro de acción”. El enunciado anterior es equivalente, con palabras actuales, a afirmar que el aumento de la energía cinética de una partícula es igual a la disminución de su energía potencial cuando se mueve sometida a una fuerza central. Unos años después, Helmholtz cambió las denominaciones de “fuerza viva” y “cantidad de tensión” por los términos “energía actual” y “potencial” respectivamente, propuestos por W. J. M. Rankine (1820-1872). De la misma forma, creyó conveniente sustituir “conservación de la fuerza” por la propuesta de Rankine “conservación de la energía”.

Helmholtz generaliza el enunciado anterior a los sistemas de partículas, a los cuerpos sólidos y a los fluidos elásticos. Más adelante la extensión se hace más amplia con el objeto de “reducir todos los fenómenos naturales a fuerzas invariables, atractivas o repulsivas, cuya intensidad depende sólo de la distancia a los centros” (Dugas 1988). De

esta forma Helmholtz expresaba su convencimiento en la aplicación universal del principio de conservación de la energía a todo tipo de fenómenos.

El principio de conservación de la energía fue aplicado por Helmholtz a fenómenos no mecánicos (Jungnickel y McCormach 1990). De esta forma obtuvo, resultados ya conocidos a través de un procedimiento diferente. Así, por ejemplo, calculó la fuerza electromotriz de dos metales en una pila o dedujo la interacción de un imán móvil y una corriente producida en una pila. También aplicó su principio para obtener nuevos resultados como, por ejemplo, el valor de la constante  $\epsilon$  de la teoría de Neumann de las corrientes inducidas en una espira, calculado anteriormente de forma empírica. Estos ejemplos son representativos de dos características relevantes del principio de conservación de la energía. La primera se refiere a la unidad de los fenómenos de la naturaleza: en el análisis de la interacción de un imán y una corriente, Helmholtz aplicó su principio a fenómenos eléctricos, magnéticos, mecánicos, térmicos y químicos. Por otra parte, la utilización del principio de conservación de la energía se puede realizar sin conocer la expresión de las fuerzas que actúan en un proceso.

En la primera mitad del siglo XIX se descubrió que ciertos fenómenos podían agruparse en pares, de forma que resultaban interconvertibles. Por otra parte, se clarificó el concepto de trabajo mecánico y se descubrió su equivalencia con el calor. Estos hechos condujeron a la búsqueda de un elemento unificador en la gran variedad de fenómenos conocidos. De esta forma, se estableció la conservación de la energía como el elemento que proporciona unidad a la diversidad.

## La termodinámica

En 1824 apareció el estudio de S. Carnot (1796-1832) *Reflexions sur la puissance motrice du feu* en el que se analiza el funcionamiento de las máquinas térmicas cíclicas. Carnot parte de la teoría del calórico para llegar a una expresión del rendimiento de la máquina (Holton 1979). Según sus cálculos, el trabajo máximo realizado es función de la cantidad de calórico y de las temperaturas del foco caliente y del frío, resultado conocido como “teorema de Carnot” (Papp 1961, Erlichson 1997). El funcionamiento de la máquina es explicado por analogía con el de un molino de agua. El flujo de calor del foco caliente al frío produce un trabajo y la cantidad de calor, que pasa de uno a otro foco, se mantiene constante.

W. Thomson (lord Kelvin, 1824-1907) hizo notar en 1849 una contradicción entre las afirmaciones de Carnot, confirmadas por la experimentación, y los resultados de Joule. Éste había demostrado de forma exhaustiva que la producción de trabajo implicaba una pérdida de calor, en contra de la conservación del calórico sostenida por Carnot. En el fondo, se planteaba un conflicto entre la teoría del calórico, mantenida por Carnot,

y la teoría cinética del calor, sostenida por Joule. La controversia fue resuelta por R. Clausius (1822-1888) en su artículo *Über die bewegende Kraft der Wärme und die Gesetze, welche sich daraus für die Wärmelehre selbst ableiten lassen (Sobre la fuerza motriz del calor y las leyes que se deducen de ella para la enseñanza del calor)* aparecido en 1850 en los *Annalen der Physik*. Clausius analiza la relación entre calor y trabajo (Jungnickel y McCommarch 1990), y su equivalencia, considerándola como la primera ley de la teoría mecánica del calor. A continuación se realiza una síntesis del teorema de Carnot y de la primera ley. Se considera correcto el resultado del teorema de Carnot y se demuestra que su negación supondría el paso de calor de un foco frío a uno caliente sin necesidad de suministrar trabajo (afirmación conocida como segunda ley de la Termodinámica). Sin embargo, se debe modificar la hipótesis de Carnot sobre la conservación del calor y admitir que una parte se transforma en trabajo.

De esta forma, Clausius formuló la segunda ley de la “teoría mecánica del calor” (Jungnickel y McCommarch 1990). Dicha ley, junto con la equivalencia de calor y trabajo (considerada como primera ley), forman la base de la Termodinámica y su reconocimiento como ciencia, con desarrollo independiente. La importancia de la segunda ley fue reconocida por Helmholtz cuando señaló que “esta ley es una de las pocas que puede reclamar una absoluta validez independientemente de toda la diversidad de cuerpos naturales y porque revela las conexiones más sorprendentes entre las ramas más distantes de la física”.

La segunda ley fue reformulada por Clausius en 1854 en el artículo *Über eine veränderte Form des zweiten Hauptsatzes der mechanischen Wärmetheorie (Sobre una forma diferente de la segunda ley fundamental de la teoría mecánica del calor)* de la siguiente forma: “el calor no puede pasar de un cuerpo caliente a otro frío sin que ocurra simultáneamente algún cambio”. A partir de dicha ley, Clausius dedujo una consecuencia sobre la conservación de una cantidad denominada *valor equivalente* (más tarde conocida como “entropía” y definida como el cociente entre el calor y la temperatura absoluta) en las transformaciones entre calor y trabajo: en un proceso cíclico reversible el valor equivalente se conserva (Holton 1979, Jungnickel y McCommarch 1990). La generalización de este teorema condujo a Clausius a la expresión analítica de la segunda ley, en la forma

$$\int \frac{dQ}{T} = 0 \quad \text{en los procesos cíclicos reversibles}$$

$$\int \frac{dQ}{T} > 0 \quad \text{en los procesos cíclicos irreversibles}$$

Independientemente de Clausius, en 1853 W. Thomson hizo una formulación de la segunda ley de la termodinámica en la que aparecía por primera vez un nuevo aspecto

de la energía, diferente de su conservación o transformación. Se trataba de la *degradación* o *disipación* (Jungnickel y McCommarch 1990). Con esa denominación se entendía la imposibilidad de que un tipo de energía pudiera ser reutilizable completamente después de haberse convertido en calor. La aplicación al universo de este nuevo aspecto de la energía tuvo como consecuencia la predicción de su muerte térmica. Otra aportación notable de Thomson a la termodinámica fue el establecimiento de la escala absoluta de temperaturas.

A partir de las bases establecidas por Clausius y Thomson, la termodinámica se desarrolló como una ciencia aplicada a gases, máquinas térmicas, reacciones químicas, etc. La descripción termodinámica de un sistema se basaba en la medida de variables macroscópicas como la presión, el volumen, la temperatura, etc. Boltzmann (1844-1906) explicó mecánicamente los principios de la Termodinámica en el artículo *Über die mechanische Bedeutung des zweiten Hauptsatzes der Wärmetheorie (Sobre el significado mecánico de la segunda ley fundamental de la teoría del calor)* (1866) pero fue duramente atacado por los energetistas que consideraban la termodinámica como una ciencia fundamental, independiente de la mecánica (Jungnickel y McCommarch 1990). El debate pareció cerrado cuando se conoció la teoría de Poincaré (1854-1912) sobre el tiempo recurrente. Sin embargo, en los trabajos de Prigogine aparece la termodinámica como una ciencia básica, capaz de dar cuenta de la irreversibilidad y de la complejidad. La mecánica y la termodinámica del equilibrio y la reversibilidad se pueden considerar como aproximaciones.

La contradicción entre las afirmaciones de Carnot sobre la conservación del calor en las máquinas térmicas y la pérdida de calor en la producción de trabajo en dichas máquinas llevó a la formulación del segundo principio de la termodinámica que introduce la degradación de la energía. Junto con el primero (en realidad, una reformulación de la conservación de la energía) se construye el gran edificio de la termodinámica. La interpretación del principio de conservación de la energía (en su versión termodinámica) se realiza desde una perspectiva mecanicista, de acuerdo con el paradigma vigente en la época.

## **El campo electromagnético**

En la primera mitad del siglo XIX la mecánica había alcanzado un gran desarrollo. A pesar de sus éxitos en la interpretación de fenómenos quedaba un problema por resolver. La fuerza mútua que dos cuerpos ejercen entre sí se explicaba por medio de la acción a distancia que tenía lugar de manera instantánea. Esta explicación suponía una velocidad infinita para la transmisión de la acción y la existencia de un medio material, el éter, por el que se propagaría dicha acción. La fuerza eléctrica entre dos cargas, descubierta por Coulomb, presentaba los mismos problemas. Por medio del concepto de cam-

po, se pudo explicar la acción entre dos cuerpos separados. Demostrada la realidad física del campo, se constataron sus propiedades y, entre ellas, su energía. De esta forma, se amplió la visión de la energía y de su conservación, al considerar la energía propia del campo electromagnético y su transmisión a través de la radiación.

En la obra de J. C. Maxwell (1831-1879) sobre el campo electromagnético se puede observar con claridad el distanciamiento progresivo del modelo mecanicista (Berkson 1985, Harman 1990). En el artículo *On physical Lines of Force* (1861-1862) Maxwell “se propone examinar los fenómenos magnéticos desde un punto de vista mecánico”. En cambio, en *A dynamical Theory of the electromagnetic Field* (1864) señala que “según las teorías antiguas, (la energía) reside en los cuerpos electrizados, circuitos conductores e imanes, en la forma de una magnitud desconocida llamada energía potencial, o capacidad de producir ciertos efectos a distancia. En nuestra teoría reside en el campo electromagnético, en el espacio que rodea a los cuerpos electrizados o magnéticos...”.

A partir de las ecuaciones de Maxwell, J. H. Poynting (1852-1914) dedujo en 1884 que el flujo de energía del campo electromagnético es proporcional al producto vectorial del campo eléctrico y magnético (Whittaker 1989). A un resultado semejante, e independientemente de Poynting, llegó Heaviside (1850-1925) en 1885. Poynting también determinó un principio de conservación de la energía del campo electromagnético. Según dicho principio, existe una relación entre la variación de energía electromagnética en un volumen dado, el flujo de la energía radiada (determinada por el vector de Poynting) y el trabajo realizado por el campo sobre las cargas. La expresión de dicho principio resulta muy diferente a los conocidos hasta entonces:

$$-\frac{dU}{dt} = \oint \vec{S} \cdot d\vec{A} + \int \vec{j} \cdot \vec{E} dV$$

O. J. Lodge (1851-1940) estableció en 1885 dos principios relacionados con la energía. En el primero se generalizaba el teorema de Poynting al afirmar que todas las formas de energía se transmiten de forma continua. De esta manera indicaba que la trayectoria de cualquier forma de energía puede seguirse en la transferencia (principio de identidad de la energía). El segundo principio asegura que la energía se transforma cuando se transmite (Berkson 1985). Estas ideas fueron atacadas por Heaviside en 1893 señalando que la identidad de la energía era insostenible debido a que, por ejemplo, la energía cinética de un cuerpo tiene valores diferentes según el sistema de referencia empleado. Por otra parte, la energía radiante no se transforma en el proceso de la transferencia.

La presión de la radiación electromagnética absorbida o reflejada fue calculada teóricamente por Maxwell en 1871 y determinada experimentalmente por P. N. Lebedev (1866-1912) en 1899 (Whittaker 1989). Los resultados de Lebedev fueron confirmados

por las experiencias que, en 1901, realizaron E. Nichols (1869-1924) y G. Hull (1870-1956). La propagación del campo electromagnético libre, una de las predicciones de la teoría de Maxwell, fue confirmada experimentalmente por H. Hertz (1857-1894) en 1887 (Papp 1961). Poynting descubrió en 1909 la existencia de una presión de radiación contra la fuente (Whittaker 1989).

El estudio del campo electromagnético supuso la introducción de la energía propia del campo libre y su transferencia por medio de la radiación.

### La radiación del cuerpo negro

En la segunda mitad del siglo XIX se aborda el problema de la radiación térmica por medio del modelo teórico del cuerpo negro. Aunque se utilizan los recursos de la termodinámica y de la teoría electromagnética, no se pudo explicar la distribución de energías del cuerpo negro, conocida por medios experimentales. Este hecho llevó a la cuantización como un nuevo aspecto de la energía así como al establecimiento de la física cuántica.

P. Prevost (1751-1839) publicó en 1792 las *Recherches physico-mécaniques sur la chaleur*. En ellas, expone que los cuerpos irradian energía independientemente de la existencia de otros cuerpos (Whittaker 1989). También aparece un concepto dinámico relacionado con la radiación: si un cuerpo está en equilibrio térmico, recibe la misma cantidad de radiación que emite. Esta afirmación se conoce como ley del intercambio de Prevost. B. Stewart (1828-1887) desarrolló las ideas de Prevost y en 1858 demostró teóricamente la ley anterior

Era una ley experimental conocida que el cociente entre el poder emisor térmico y el poder absorbente es independiente del cuerpo emisor. Partiendo de la dicha ley, Kirchhoff dedujo teóricamente, en el artículo *Über den Zusammenhang zwischen Emission und Absorption von Licht und Wärme (Sobre la relación entre la emisión y absorción de la luz y del calor)* (1859), la ley que lleva su nombre: “Para rayos caloríficos y para una temperatura determinada, el cociente entre el poder emisor y el absorbente es el mismo para todos los cuerpos. Dicho cociente sólo es función de la temperatura y de la longitud de onda” (Taton 1973). La deducción se realizó a partir de las “leyes fundamentales de la teoría mecánica del calor” (Jungnickel y McCommarch 1990).

A partir de consideraciones energéticas, Kirchhoff realizó en 1860 una demostración diferente de su ley (Jungnickel y McCommarch 1990). Apareció en el artículo *Über das Verhältniss zwischen dem Emissionsvermögen und Absorptionsvermögen der Körper für Wärme und Licht (Sobre la relación entre los contenidos de emisión y de absorción de los cuerpos para el calor y la luz)*. En primer lugar, se identifican el calor y

la luz como ondas, con lo cual se pueden utilizar las leyes de la absorción y la reflexión de la luz para el caso de las ondas térmicas. Se asocia la *vis viva* a la radiación térmica, de tal forma que un cuerpo disminuye su *vis viva* cuando emite radiación y la aumenta cuando absorbe radiación. En ambos casos, la variación de *vis viva* cumple el principio de conservación de la energía. Por otra parte, la temperatura de un cuerpo permanece constante, si no absorbe ni emite radiaciones lo cual implica, de acuerdo con la Ley del intercambio de Prevost, que la *vis viva* de la radiación emitida tiene que coincidir con la *vis viva* de la absorbida.

A continuación, Kirchhoff imagina un cuerpo ideal (llamado *cuerpo negro*) que absorbe todas las radiaciones pero que es perfectamente reflectante en su interior para todos los rayos. Se demuestra que el cociente entre el poder emisor y absorbente de cualquier cuerpo coincide con el mismo cociente referido al cuerpo negro. Esta ley muestra una propiedad universal de la interacción de la energía con la materia.

Después de Kirchhoff, continuaron los progresos en relación con el cuerpo negro. En 1879, J. Stefan (1835-1893) descubrió experimentalmente la ley que lleva su nombre (Taton 1973, Whittaker 1989). Según dicha ley, la energía total por unidad de tiempo emitida por un cuerpo negro es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura absoluta. Boltzmann demostró teóricamente en 1884 la ley de Stefan, partiendo del segundo principio de la termodinámica y de la presión de radiación, que aparece en la teoría electromagnética de Maxwell (Taton 1973, Whittaker 1989).

A partir de la segunda ley de la termodinámica y del principio de Doppler, aplicado a la compresión de la radiación, W. Wien (1864-1924) obtuvo en 1893 una relación entre la temperatura de un cuerpo negro y la longitud de onda a la que corresponde la máxima energía emitida (Taton 1973, Whittaker 1989). Dicha relación se conoce como ley del desplazamiento de Wien.

En los últimos años del siglo XIX quedaba por resolver un problema relacionado con el cuerpo negro. Se conocía de forma empírica la distribución de energías a lo largo del espectro pero no se había conseguido teóricamente una función que la describiera. Wien propuso en 1896 una función que era válida para las frecuencias grandes. Utilizando el teorema de equipartición de la energía, lord Rayleigh (1842-1919) dedujo en 1900 una expresión que se ajustaba a los datos sólo en las frecuencias bajas (Whittaker 1989). El 19 de octubre de 1900, M. Planck (1858-1947) leyó una comunicación ante la *Deutsche Physik Gesellschaft* en la que se presentaba una solución a la distribución de energías del cuerpo negro. Planck realizó su deducción utilizando la teoría de los osciladores de Hertz, la termodinámica y la mecánica estadística de Boltzmann junto con una hipótesis nueva: la mínima energía que puede emitir o absorber un oscilador de frecuencia  $\nu$  es proporcional a dicha frecuencia, de acuerdo con la expresión  $h\nu$  (Whittaker 1989). La

hipótesis de la cuantización de la energía fue confirmada brillantemente por los trabajos de Einstein sobre el efecto fotoeléctrico y por el modelo atómico de Bohr.

En 1905 apareció el artículo de Einstein *Über einen der Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt* (Sobre un punto de vista heurístico relativo a la generación y transformación de la luz). Einstein considera que la energía de la luz de frecuencia  $\nu$  se comporta como si estuviera concentrada en paquetes de energía  $h\nu$ . En 1926, dichos “paquetes” fueron llamados fotones por G. N. Lewis. Partiendo de la hipótesis indicada, Einstein explicó los fenómenos conocidos del efecto fotoeléctrico (Whittaker 1989, Jungnickel y McCommarch 1990).

La expresión de las frecuencias del espectro de emisión del hidrógeno fue deducida teóricamente en 1913 por N. Bohr (1885-1962). Para ello se basó en un modelo atómico en el que la energía de los electrones se encontraba cuantizada (Whittaker 1989, Marburguer 1996).

En resumen, el estudio del cuerpo negro supuso la constatación de las limitaciones de la mecánica, la termodinámica y la teoría electromagnética para explicar el mundo físico. Algunos fenómenos, como la distribución de energías del cuerpo negro, el efecto fotoeléctrico o el espectro de emisión del hidrógeno, sólo podían entenderse a partir del carácter discreto de la energía.

## La relatividad

A finales del siglo XIX se consideraba la existencia del éter como una verdad indiscutible. El experimento de Michelson y Morley, realizado en 1887, tenía como objetivo medir la velocidad de la Tierra con respecto a dicho fluido. Sus resultados negativos sorprendieron porque no estaban de acuerdo con la mecánica clásica. Según ésta, la velocidad de propagación de los fenómenos ondulatorios, como el sonido, depende de la velocidad del observador. De acuerdo con los resultados del experimento de Michelson y Morley parecía que la velocidad de la luz era independiente del estado del movimiento del observador. Para explicar este hecho Fitzgerald supuso una contracción en la longitud del aparato experimental. Esta idea fue compartida por Lorentz que también sugirió una variación del tiempo y de la masa de acuerdo con el sistema de referencia (Holton 1979).

Sin embargo, los resultados del experimento de Michelson y Morely no fueron tomados como punto de partida para el desarrollo de la teoría de la relatividad de Einstein. Éste llamó la atención sobre la asimetría que existe en la interpretación del fenómeno de la inducción electromagnética (Holton 1979, Pais 1984, Jungnickel y McCormach 1990). Si se mueve un imán cerca de un conductor fijo, se induce en éste una

corriente. Se explica que se ha formado un campo eléctrico en sus cercanías, de manera que dicho campo produce una corriente en el conductor. Por el contrario, la creación de la corriente inducida en un conductor que se mueve con respecto a un imán fijo se justifica mediante una fuerza electromotriz que aparece en el conductor. Se tiene así que un mismo fenómeno - la creación de una corriente inducida- es explicado de dos maneras diferentes. Para resolver esta dificultad de interpretación, Einstein consideró que todas las leyes de la física -incluyendo también las de la electrodinámica- tienen que ser invariantes en los sistemas de referencia inerciales. Esta afirmación fue tomada como postulado. Por otra parte, Einstein consideró un segundo postulado: la velocidad de la luz es constante e independiente del movimiento del observador o de la fuente. Partiendo de dichos postulados, Einstein desarrolló la teoría especial de la relatividad que supuso una revisión radical de los conceptos de espacio, tiempo y simultaneidad -básicos en la mecánica newtoniana- así como el descubrimiento de la energía en reposo y de la relación entre la masa de una partícula y su energía.

En 1905 Einstein (1879-1955) publicó en la revista *Annalen der Physik* tres artículos. En el primero, titulado *Zur Elektrodynamik bewegter Körper (Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento)*, aparecen los dos postulados que forman la base de la relatividad especial. A partir de ellos, Einstein obtuvo las ecuaciones, ya conocidas anteriormente, de Lorentz-Fitzgerald sobre intervalos temporales y espaciales, estableció una nueva visión sobre la simultaneidad, dedujo las transformaciones a las que Lorentz (Pais 1984) había llegado por medio de procedimientos electromagnéticos, propuso un nuevo método para resolver problemas electrodinámicos y llegó a las ecuaciones de la teoría del electrón de Lorentz (Fadner 1988, Jungnickel y McCommarch 1990). El artículo indicado tuvo una influencia decisiva en el desarrollo de la física del siglo XX. Basada en dos postulados y más allá de las cuestiones electromagnéticas que planteaba, la teoría especial de la relatividad fue reconocida como aplicable a los fenómenos físicos conocidos en la época y como uno de los grandes fundamentos de la física de todos los tiempos.

Por otra parte, en el artículo indicado, Einstein obtuvo una relación entre la masa y la velocidad de una partícula (Pais 1984). Dicha relación coincidía con la deducida por Lorentz el año anterior. En dicho artículo Einstein utiliza las masas longitudinal y transversal pero no menciona la "masa en reposo". Se encuentran antecedentes particulares de este hecho en J. J. Thomson (1856-1940), que en 1881 calculó el aumento de masa, con relación a la energía del campo electrostático, de un conductor esférico cargado cuando se mueve en línea recta. J. H. Poincaré (1854-1912) señaló en 1900 que la energía electromagnética posee una densidad de masa que es igual a la densidad de energía dividida por el cuadrado de la velocidad de la luz. Por último, F. Hasenöhl (1874-1915) calculó el aumento de masa de una caja con radiación cuando se mueve (Whittaker.1989). Sin embargo, existía una discrepancia entre las predicciones de Einstein y los datos experimentales que Kaufmann había obtenido entre 1902 y 1903. La revisión de dichos datos,

realizada por Cunningham en 1914, demostró la inexactitud de los mismos. Posteriormente se comprobó la coincidencia de los datos corregidos y los predichos teóricamente por Einstein (Adler 1988).

El segundo de los artículos publicado por Einstein en 1905 analiza un cuerpo en reposo que emite simultáneamente dos ondas electromagnéticas de la misma energía moviéndose en direcciones opuestas. Después de considerar el fenómeno desde dos sistemas de referencia -uno que está en reposo y otro que se mueve con una velocidad dada-, aplicando la conservación de la energía y despreciando los términos  $v^2/c^2$  y superiores, Einstein concluye que “si un cuerpo pierde la energía  $L$  en forma de radiación, su masa disminuye en  $L/c^2$ ” (Pais 1984, Fadner 1988, Okun 1989). Este artículo ha sido muy controvertido. Algunos autores (Ives, Jammer, Arzeliés, Miller) señalan la circularidad de la demostración de Einstein puesto que utiliza la relación que quiere probar. De esta forma niegan que Einstein fuera el primero en deducir la relación entre la energía y la masa (Fadner 1988). Otros (Stachel, Torretti), sin embargo, consideran que la deducción de Einstein resulta correcta (Fadner 1988).

En 1906 Einstein dedujo, de dos formas diferentes, una relación entre la energía y la masa. De acuerdo con uno de los procedimientos se obtiene el resultado  $E = mc^2$ . Para ello, se utilizan las ecuaciones de Maxwell del campo electromagnético y se hace uso de una aproximación hasta el término  $v/c$ . En el segundo método, se considera un cilindro hueco, situado en posición horizontal. Desde un extremo se emite luz que es absorbida en el otro extremo. Por consideraciones de mecánica clásica y utilizando la cantidad de movimiento de la radiación, se llega a la conclusión de que la luz de energía  $E$  ha transferido una masa  $m = E/c^2$  (Fadner 1988). En dicho artículo también se indica que la conservación de la masa en las reacciones químicas es un caso especial del principio de conservación de la energía.

Aunque Einstein no hace uso del término, se puede considerar que la energía que aparece en el artículo de 1905, referente a un cuerpo que emite radiación en dos sentidos opuestos, es la “energía en reposo”. Sin embargo, Einstein utiliza dicho concepto explícitamente, y por primera vez, en 1907. En dicho artículo se formula la relación entre la masa y energía en los siguientes términos:  $E = \mu_0 c^2 / (1 - v^2/V^2)^{1/2}$  y  $\mu_0 = E_0/V^2$  siendo  $\mu_0$  la masa en reposo,  $E_0$  la energía en reposo,  $v$  la velocidad del cuerpo y  $V$  la velocidad de la luz (Fadner 1988). La relevancia de esta contribución de Einstein en el desarrollo del concepto de energía es muy grande. La energía en reposo permitió explicar el origen de la energía desprendida en las desintegraciones radiactivas y reacciones nucleares. Pocos meses después, Einstein generalizó el resultado obtenido e incluyó la masa gravitatoria.

Planck (1858-1947) fue uno de los primeros científicos que reconoció la importancia de la teoría especial de la relatividad. También resultan muy relevantes las contribuciones que realizó en los primeros años de su desarrollo. En 1906 inició el desarrollo

de la dinámica relativista. De esta forma, dedujo la ecuación relativista del movimiento de una partícula, formulada como  $d(mv/(1 - v^2/c^2))/dt = \mathbf{F}$ . También obtuvo las correspondientes a la energía cinética y a la cantidad de movimiento relativista, de acuerdo con las expresiones  $E_c = mc^2(1 - v^2/c^2)^{-1/2} - mc^2$  y  $\mathbf{p} = mv(1 - v^2/c^2)^{-1/2}$ , siendo  $m$  la masa en reposo. También probó que la interpretación del principio de mínima acción es la misma en la física clásica y en la relativista. Un año después, Planck dedujo la ecuación  $E = mc^2$  para la energía transferida en forma de calor e indicó que “a través de la absorción o la emisión de calor, varía la masa inercial de un cuerpo. El aumento de la masa siempre es igual a la cantidad de calor ... dividida por el cuadrado de la velocidad de la luz en el vacío” (Fadler 1988). La generalización de la relación  $E = mc^2$  para cualquier tipo de energía, denominada “ley de inercia de la energía”, fue realizada por Planck en 1908. Minkowski (1864-1909) obtuvo, de forma independiente, el mismo resultado. Para ello hizo uso de la formulación tetravectorial de la relatividad especial establecida por él (Fadner 1988). Por otra parte, Minkowski unificó la cantidad de movimiento y la energía total de una partícula al demostrar que ésta es la cuarta componente del tetravector cantidad de movimiento (Whittaker 1989). Las expresiones de la cantidad de movimiento y de la energía cinética relativistas fueron deducidas por Tolman (1881-1948) y Lewis (1875-1946) a través del análisis de un choque elástico entre dos bolas esféricas (Whittaker 1989).

A pesar de las reservas que la relatividad especial despertó inicialmente (recuérdese el comentario despectivo de Sommerfeld: “desaparecerá pronto de la escena”), contó con el apoyo de Planck. Hacia 1910 había sido aceptada por la mayor parte de los físicos alemanes, como lo prueba la publicación de gran número de trabajos teóricos en los que se plantearon nuevos problemas y se clarificaron conceptos. La revisión realizada en 1914 de los datos experimentales de Kauffmann y los obtenidos en el mismo año por Neumann confirmaron experimentalmente la validez de la relación entre masa y energía propuesta por Einstein (Fadner 1988). La teoría electromagnética del electrón desarrollada por Lorentz y otras de menor importancia fueron desplazadas gradualmente por las ideas de Einstein. La energía en reposo y la relación entre la masa y la energía fueron reconocidas como dos grandes aportaciones de la relatividad especial en el desarrollo del concepto de energía.

### **Física cuántica, nuclear y de partículas**

El análisis de los datos sobre la desintegración  $\beta$  de los núcleos radiactivos parecía demostrar que se incumplía el principio de conservación de la energía. N. Bohr (1885-1962) señaló que dicho principio era válido macroscópicamente, mientras que a escala microscópica se cumplía sólo estadísticamente (Whittaker 1989). En 1930, W. Pauli (1900-1858) sugirió la existencia de una partícula que se produciría en la desintegración  $\beta$  y cuyas características hacían que se cumplieran los principios de conservación

de la energía y de la cantidad de movimiento. A dicha partícula la llamó neutrino. Aunque su existencia fue aceptada, no se pudo detectar experimentalmente hasta 1953.

Otro caso de explicación de un fenómeno a partir de hipótesis en las que se contempla la violación del principio de conservación de la energía tuvo lugar en 1924. Bohr, H. A. Kramers y J. C. Slater dieron a conocer una teoría para explicar el cambio de frecuencias que se producía en el efecto Compton. Según dicha teoría, en los procesos atómicos el principio de conservación de la energía se cumplía sólo de forma estadística. Para ello, postulaban la existencia de la *radiación virtual*, es decir, de ondas que no transmiten energía ni momento. De esta forma, la absorción o emisión de radiación por un átomo se podía realizar sin ganar o perder energía (Whittaker 1989). En 1925, se comprobó que los resultados experimentales del efecto Compton, realizados por W. Bothe y H. Geiger, no estaban de acuerdo con los predichos. Como consecuencia, la teoría Bohr-Kramers-Slater fue olvidada.

El sentido profundo del principio de conservación de la energía se estableció gracias a E. Noether (1881-1935) con el teorema que lleva su nombre. En él aparece la relación entre la invarianza de las ecuaciones en ciertas transformaciones y los principios de conservación. Según el teorema de Noether, si las ecuaciones que determinan el comportamiento dinámico de un sistema permanecen invariables, al realizar una transformación matemática, existe, para cada una de ellas, una magnitud física que se mantiene invariable con el tiempo. En concreto, la conservación de la energía aparece como consecuencia de la homogeneidad temporal, es decir, del hecho de que las leyes de la naturaleza sean invariantes en las traslaciones temporales.

De acuerdo con las ideas alternativas de los estudiantes analizadas en el apartado 2.2.1 y con el desarrollo histórico del concepto de energía que se ha presentado, se puede concluir que existen semejanzas entre las primeras y algunos aspectos históricos de la evolución de la energía. La primera manifestación de la energía de la que se comprobó su conservación fue la asociada al movimiento, mientras que la potencial se consideró dos siglos después. De manera análoga, los alumnos asocian mayoritariamente la energía al movimiento y tienen serias dificultades en la interpretación de la energía asociada con la posición de un cuerpo.

Los alumnos piensan que calor es una sustancia que se encuentra en el interior de los cuerpos y que pasa de uno a otro, cuando se ponen en contacto. Estas ideas coinciden con la teoría del calórico. Por otra parte, el concepto de cantidad de calor y la temperatura no son diferenciados por los alumnos, de la misma forma que ocurrió en la física antes de las experiencias de J. Black.

La situación de la conservación de la energía dentro de la mecánica osciló históricamente desde posturas que la consideraban como principio fundamental a otras que la

deducían como un corolario. Esta situación se reproduce en los libros de texto actuales que tampoco clarifican la situación del primer principio de la termodinámica como principio o como consecuencia de las leyes de la dinámica.

Los límites de validez de las diferentes expresiones de la conservación de la energía no son analizadas en la enseñanza actual, a pesar de que dichos límites supusieron el motor de la evolución del concepto.

Las aportaciones de la teoría de campos o de la física moderan apenas aparecen en los libros de texto o en los programas oficiales. De esta forma, se transmite una visión incompleta de la energía y de sus aspectos fundamentales, y no se muestra que se conserva en todos fenómenos de los diversos campos de la física.

Con respecto al concepto de energía, la revisión histórica que se ha presentado pone de manifiesto que no se puede definir de una manera cerrada. La idea de dicha magnitud ha ido variando a lo largo de la historia de la ciencia, incorporando los nuevos aspectos que se iban descubriendo, del mismo modo que deberá recoger las aportaciones que, con toda seguridad, se producirán en el futuro. Reconocemos la energía como una propiedad de todos los sistemas y la importancia de su conservación como un principio universal que cumplen todos los fenómenos conocidos. A diferencia de Pintó (1991) creemos que la conservación no caracteriza completamente el concepto de energía. La cantidad de movimiento, el momento angular y la carga eléctrica son ejemplos de magnitudes físicas que también permanecen constantes en los sistemas aislados. Pensamos con Duit (1981, 1984) que la definición de energía debe incluir, además de su conservación, la transformación, transferencia y degradación. La cantidad de movimiento, el momento angular y la carga eléctrica pueden ser transferidos de un sistema a otro pero no se transforman ni se degradan. Como consecuencia de todo lo anterior, creemos que “la energía es una magnitud que se asocia al estado de un sistema, que permite analizar los cambios o transformaciones -no sólo mecánicos- a los que está sometido en su evolución temporal, y que se caracteriza porque se conserva y se transforma en los sistemas aislados, se transfiere entre sistemas no aislados y siempre se degrada en dicha evolución temporal”.

Consideramos que la anterior definición de energía no es adecuada para introducir y desarrollar el concepto de energía en los alumnos de nivel secundario. Dicha introducción puede hacerse de forma progresiva, considerando las cuatro etapas que se han establecido en su desarrollo histórico. Estos aspectos se tratan con mayor detalle en el capítulo 6 donde aparece una propuesta alternativa de enseñanza de la energía en cuya redacción se han aplicado las consideraciones anteriores.

## CAPÍTULO 3

### OPERATIVIZACIÓN DE LA PRIMERA HIPÓTESIS Y DISEÑOS EXPERIMENTALES PARA SU CONTRASTACIÓN

En el capítulo anterior se ha fundamentado la primera hipótesis a partir de un análisis de las características de la enseñanza habitual. También han sido examinadas las aportaciones de la investigación educativa en el tema de la energía y se han mostrado los obstáculos que se presentan en la introducción de dicho concepto. Por último, la historia de la evolución de la energía pone de manifiesto las dificultades que se presentaron hasta el establecimiento definitivo de su conservación. Con el objeto de contrastar la hipótesis indicada, se procederá en este capítulo a su operativización por medio de subhipótesis derivadas y se describirán los montajes experimentales diseñados.

#### **3.1. Operativización de la primera hipótesis**

La primera hipótesis, presentada en el capítulo anterior, señala que “la mayor parte de los estudiantes a los que se presenta el concepto de energía, de acuerdo con el modelo de la enseñanza habitual, continuarán utilizando sus preconceptos y adquirirán unos conocimientos escasamente significativos”.

A partir de dicha hipótesis se pueden derivar tres subhipótesis. La primera considera las características de los conocimientos que los alumnos han adquirido en el proceso de enseñanza/aprendizaje de la energía a través de la enseñanza habitual. Las dos últimas se refieren a la forma en que los libros de texto y los profesores presentan a los alumnos el concepto indicado.

Las tres subhipótesis se pueden enunciar de la siguiente forma:

**1) Los alumnos que han recibido el concepto de energía a través de la enseñanza habitual continúan utilizando sus preconceptos y adquieren unos conocimientos escasamente significativos”.**

2) “Los libros de texto presentan la energía de una forma poco clarificadora, sin tener en cuenta las dificultades de los alumnos y sin mostrar que su conservación es un principio de toda la física”.

3) “Los profesores introducen el concepto de energía de manera fragmentaria, no consideran que su conservación es un principio común a todos los fenómenos y no aplican algunas de las aportaciones de la investigación didáctica”.

La formulación de las tres subhipótesis anteriores se hará por medio de enunciados que puedan ser contrastados experimentalmente, tal como se muestra a continuación.

### **3.1.1. Operativización de la primera subhipótesis**

Las ideas de los alumnos sobre la energía serán incorrectas e incompletas. En concreto, se espera que “los alumnos:

1. muestren ideas equivocadas sobre la energía.
2. no señalen que todos los sistemas tienen energía.
3. tengan inactivados los esquemas de transformación, conservación, transferencia y degradación de la energía.
4. no entiendan si la conservación de la energía es un principio o un teorema
5. no utilicen la conservación de la energía para analizar fenómenos de todos los campos de la física”.

### **3.1.2. Operativización de la segunda subhipótesis**

La utilización de los libros de texto constituye una práctica educativa seguida por la mayor parte del profesorado (Yager y Penich 1986). Por tanto, su análisis resulta determinante para examinar cómo se realiza la enseñanza de la energía dado que se convierte en un medio relevante de transmisión de conceptos.

De acuerdo con la segunda subhipótesis, se espera que “los textos:

1. introduzcan dogmáticamente el concepto de energía, sus características, su relación con otros conceptos y las leyes de su conservación.
2. no tengan en cuenta las ideas previas de los alumnos.
3. no consideren conjuntamente los aspectos de transformación, conservación, transferencia y degradación de la energía.
4. no clarifiquen cuáles son los principios fundamentales de la dinámica y los teoremas derivados.
5. introduzcan la conservación de la energía en mecánica como un teorema y no señalen que se trata de un caso particular de un principio general.

6. no presenten la conservación de la energía en termodinámica como la verificación contrastada de experiencias, y no señalen que se trata de un caso particular.
7. no utilicen los principios de la termodinámica para explicar procesos cotidianos.
8. no introduzcan las características particulares de la energía en las ondas.
9. no exponga las contribuciones del electromagnetismo al concepto de energía y no haga uso del principio de conservación de la energía para interpretar fenómenos electromagnéticos.
10. no señalen las aportaciones de la física moderna al concepto de energía y no empleen el principio de conservación de la energía para analizar fenómenos de la física moderna.
11. no presenten los problemas planteados a la conservación de la energía en la física moderna”.

### **3.1.3. Operativización de la tercera subhipótesis**

En el proceso habitual de enseñanza/aprendizaje, los profesores ejercen un papel destacado. Las concepciones que poseen son transmitidas a los estudiantes por medio de la práctica docente. Nuestra tercera subhipótesis hace referencia a las ideas de los profesores en el concepto de energía. De acuerdo con ella, se espera que “los profesores:

1. presenten la energía sin tener en cuenta las ideas previas de los alumnos.
2. no introduzcan de forma conjunta la conservación, transformación, transferencia y degradación de la energía.
3. indiquen que la conservación de la energía en mecánica es un teorema y en ningún momento lleguen a mostrar que se trata de un caso particular de un principio general.
4. presenten la conservación de la energía en termodinámica como un principio general.
5. no muestren aspectos de la energía en electromagnetismo y física moderna”.

### **3.2. Diseños para la contrastación de la primera subhipótesis referente al aprendizaje de la energía realizado por los alumnos**

Para comprobar el grado de aprendizaje del concepto de energía se utilizarán varios diseños convergentes que permitan la contrastación de los resultados y su coherencia. En primer lugar, los alumnos contestarán por escrito un cuestionario, cuya elaboración se hará de acuerdo con las técnicas habituales de la investigación educativa (Serramona 1980, Fox 1981). Para ello, se redactará un borrador que será examinado por varios expertos educativos. Este borrador se aplicará a los estudiantes en forma de ensayo piloto para considerar la aplicabilidad y analizar los resultados obtenidos. Por último, el borrador será revisado, de acuerdo con las consideraciones de la fase experimental.

Con respecto al tamaño de las muestras, se aplicarán las normas de la Open University (1979). Para que el resultado de una investigación sea estadísticamente significativo, se recomienda utilizar muestras no inferiores a 30 alumnos. El carácter aleatorio de la muestra se garantizará dado que el cuestionario será aplicado a alumnos procedentes de Institutos diferentes.

El cuestionario de alumnos será cumplimentado tres meses después de impartirse un tema referente a la energía. Se informará a los alumnos de que debe ser contestado de forma anónima, utilizando el tiempo que se crea necesario para su terminación, aunque la duración media no sobrepasará nunca una hora. Por otra parte, los profesores no tendrán conocimiento previo del contenido de dicho cuestionario. Después de ser cumplimentado por los alumnos, se realizará un tratamiento estadístico de los datos para proceder al análisis de los resultados.

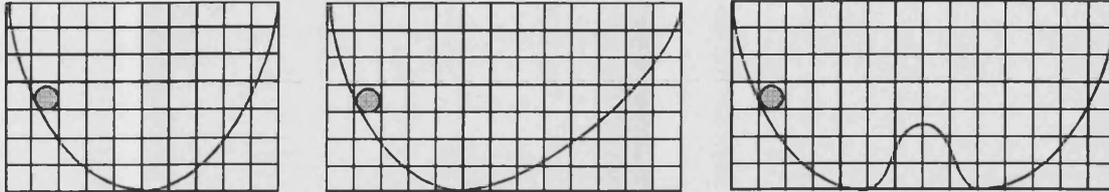
Por otra parte, se realizarán entrevistas con estudiantes. De esta forma, se puede profundizar en las contestaciones presentadas en el cuestionario y comprobar la coherencia entre las ideas expresadas oralmente y por escrito. Las entrevistas tendrán lugar de forma individual, tres meses después de haberse impartido a los estudiantes un tema de energía.

### **3.2.1. Diseño para contrastar que el aprendizaje de la energía realizado por los alumnos del nivel 1 resulta escasamente significativo**

En este diseño se utilizará el cuestionario 3.1 que consta de once preguntas de carácter abierto. En ellas aparecen aspectos de la energía relacionados con su conservación, transformación, transferencia y degradación. También se consideran las ideas previas de los alumnos, el carácter de principio o teorema de la conservación de la energía, y el análisis de fenómenos por medio de la energía. El cuestionario, que se ha redactado de acuerdo con las indicaciones que han aparecido con anterioridad, será cumplimentado por alumnos de segundo curso de BUP y de cuarto curso de ESO que forman el nivel denominado 1. En su aplicación se seguirán las normas comentadas anteriormente.

**Cuestionario 3.1. Cuestionario de alumnos de nivel 1**

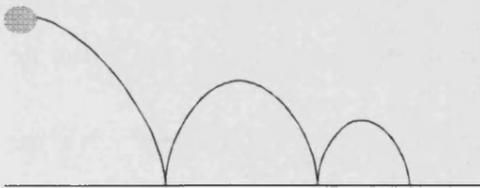
1.- En la figura aparece una bola que se mueve por un riel. Si no existe rozamiento y se deja caer desde el punto indicado, señala con una cruz el punto que alcanzará. Explica tu respuesta.



2.- Cita tres ejemplos de sistemas con energía y tres de sistemas sin energía.

3.- Indica fenómenos que puedan ser explicados por el principio de conservación de la energía.

4.- Se deja caer una pelota de tenis sobre un suelo duro y se observa que rebota como se ve en la figura. ¿Se conserva la energía mecánica en el sistema formado por la pelota y el suelo? Explica tu respuesta.



5.- La conservación de la energía, ¿es un principio o un teorema?

6.- Se lanza verticalmente y hacia arriba una piedra con una determinada velocidad inicial. Si se utiliza el principio de conservación de la energía se puede calcular la altura que alcanza. ¿Cómo se podría calcular la velocidad que tiene en cualquier punto de la trayectoria? Explica tu respuesta. (Se considera que el rozamiento de la piedra con el aire es despreciable).

7.- ¿Crees que la energía es sólo cinética o potencial? En caso contrario, ¿podrías citar otros tipos de energía?

8.- Un cuerpo de 25 kg situado a una altura de 30 m se dice que tiene una energía potencial de 7500 J. ¿Dónde crees que está esa energía potencial? Explica tu respuesta.

**9.- Un trozo de hierro se calienta al rojo vivo y se deja enfriar. ¿Se conserva la energía en el sistema formado por el entorno y el trozo de hierro? ¿Por qué? Indica los mecanismos por los que se transfiere la energía que tiene el trozo de hierro.**

**10.- Explica las transformaciones de energía que tienen lugar desde que el agua contenida en un pantano produce electricidad hasta la utilización de dicha electricidad para hervir agua en una cocina.**

**11.- Si la energía se conserva, ¿por qué se habla de crisis energética?**

### **Objetivos y criterios de valoración de los items**

A continuación se analizan los objetivos que se pretenden con cada uno de los items del cuestionario.

**1.- En la figura aparece una bola que se mueve por un riel. Si no existe rozamiento y se deja caer desde el punto indicado, señala con una cruz el punto que alcanzará. Explica tu respuesta.**

Este item ha sido propuesto por Duit (1981) para comprobar que los alumnos tienden a explicar los fenómenos mecánicos sin hacer uso de la energía o de su conservación. Se consideran correctas, y por tanto contrarias a la hipótesis, las respuestas que indiquen que el cuerpo alcanza la misma altura que la inicial y se justifique por medio de la conservación de la energía mecánica.

**2.- Cita tres ejemplos de sistemas con energía y tres de sistemas sin energía.**

Normalmente los alumnos no reconocen la energía como una propiedad de todos los cuerpos debido a que asocian la energía con el movimiento (Driver y Warrington 1985). De acuerdo con dicha preconcepción, los cuerpos en reposo no poseerán energía. Por otra parte, la energía se introduce en mecánica y termodinámica por lo que se espera que los ejemplos que se citen de sistemas con energía serán de los campos de la física citados antes. Este item pretende comprobar los dos aspectos citados.

Se aceptan como correctas, y desfavorables a nuestra hipótesis, las respuestas que citen, por lo menos, tres sistemas con energía de cualquier tipo (alguno de los cuales no debe ser mecánico ni termodinámico) e indiquen explícitamente que no existen sistemas sin energía.

**3.- Indica fenómenos que puedan ser explicados por el principio de conservación de la energía.**

Aunque todos los fenómenos que se refieran a sistemas aislados se pueden explicar por el principio de conservación de la energía, se espera que los alumnos citen mayoritariamente fenómenos mecánicos o termodinámicos. La energía se trata formalmente en dichos campos de la física y se hacen muy pocas referencias a ella en otros apartados de la física clásica o moderna. De esta manera no se presenta el carácter general de la energía.

Se consideran correctas, y contrarias a nuestra hipótesis, las respuestas que citen tres o más fenómenos de cualquier naturaleza, uno de los cuales no debe ser ni mecánico ni termodinámico.

**4.- Se deja caer una pelota de tenis sobre un suelo duro y se observa que rebota como se ve en la figura. ¿Se conserva la energía mecánica en el sistema formado por la pelota y el suelo? Explica tu respuesta.**

Se trata de un choque inelástico, es decir, de un fenómeno de tipo disipativo en el que no se conserva la energía mecánica. La parte de ésta que se pierde, se transforma en energía interna del sistema, de forma que la energía total se mantiene constante. Posteriormente, la energía interna del sistema se transfiere al exterior por medio del calor. El objetivo de este ítem es analizar en qué términos interpretan los alumnos el fenómeno. Cabe esperar que utilicen el concepto de calor aunque no el de energía interna. Por tanto, las respuestas se consideran correctas, y contrarias a la hipótesis, si se realizan las consideraciones anteriores, aunque no se exige que se cite la energía interna. También se admiten las respuestas que indiquen una transferencia de energía por medio de ondas sonoras.

**5.- La conservación de la energía, ¿es un principio o un teorema?**

A partir de los principios de una teoría se pueden deducir teoremas o corolarios. Sin embargo, éstos pueden considerarse como principios y obtener aquéllos como teoremas. La conservación de la energía se presenta en la mecánica como un teorema, sin indicar que constituye un principio válido para todos los campos de la física. Este ítem pretende analizar si los alumnos conocen estas circunstancias. Las respuestas se aceptan como correctas, y contrarias a nuestra hipótesis, cuando señalen que la conservación de la energía es un principio y se justifique de acuerdo con las consideraciones anteriores.

**6.- Se lanza verticalmente y hacia arriba una piedra con una determinada velocidad inicial. Si se utiliza el principio de conservación de la energía se puede calcular la altura que alcanza. ¿Cómo se podría calcular la velocidad que tiene en cualquier punto de la trayectoria?**

**Explica tu respuesta. (Se considera que el rozamiento de la piedra con el aire es despreciable).**

La enseñanza habitual suele realizar un tratamiento estático de la conservación de la energía. Dicha conservación se aplica al estado inicial y final de un fenómeno, considerando, muy pocas veces, que también se cumple en estados intermedios. Con este ítem se quiere comprobar si los alumnos tienen una visión de este tipo. Se consideran correctas, y no favorables a nuestra hipótesis, las respuestas que utilicen la conservación de la energía mecánica en dos estados, uno de los cuales debe ser intermedio.

**7.- ¿Crees que la energía es sólo cinética o potencial? En caso contrario, ¿podrías citar otros tipos de energía?**

La conservación de la energía mecánica se suele generalizar por medio de la introducción de múltiples tipos de energía: química, acústica, térmica, etc. Si se realiza de esa manera, se produce una confusión en los alumnos, que ven confirmadas sus ideas de la vida cotidiana sobre la diversidad de formas de energía. Aunque todas las clases de energía que se consideran en mecánica se pueden reducir a cinética o potencial, existen otros tipos como la de los campos, y la energía de la masa en reposo. Si se cita, por lo menos, una de estas clases de energía junto con la cinética y potencial, se acepta la respuesta como correcta y no favorable a nuestra hipótesis.

**8.- Un cuerpo de 25 kg situado a una altura de 30 m se dice que tiene una energía potencial de 7500 J. ¿Dónde crees que está esa energía potencial? Explica tu respuesta.**

Uno de los errores más persistentes en la enseñanza de la energía se refiere a la localización de la energía potencial gravitatoria. De una manera superficial se atribuye dicha energía al objeto que está situado en un campo, ignorando la existencia de dicho campo (Warren 1983). La energía potencial gravitatoria es una energía de interacción entre cuerpos, o entre un cuerpo y un campo, y no la de un cuerpo aislado. La respuesta se considera correcta, y contraria a la hipótesis, si se indica que la energía potencial se localiza en el campo gravitatorio. También se aceptan como correctas las que se refieran al sistema formado por la Tierra y el cuerpo, o bien a la interacción del cuerpo con el campo gravitatorio creado por la Tierra.

**9.- Un trozo de hierro se calienta al rojo vivo y se deja enfriar. ¿Se conserva la energía en el sistema formado por el entorno y el trozo de hierro? ¿Por qué? Indica los mecanismos por los que se transfiere la energía que tiene el trozo de hierro.**

En este ítem se presenta un fenómeno no mecánico en el que se produce una transferencia de energía por calor. Se trata de averiguar si los alumnos analizan la conservación de la energía del sistema, señalando el proceso por el que se produce la transferencia y los tres mecanismos por los que tiene lugar. Se aceptan como correctas, y con-

secuentemente no favorables a la hipótesis, las respuestas que indiquen que se conserva la energía del sistema hierro-entorno y que se transfiere del cuerpo caliente al entorno por medio de tres mecanismos: conducción, convección y radiación.

**10.- Explica las transformaciones de energía que tienen lugar desde que el agua contenida en un pantano produce electricidad hasta la utilización de dicha electricidad para hervir agua en una cocina.**

Este ítem pretende constatar si la enseñanza recibida ha activado en los alumnos el esquema de transformación de la energía y si utilizan términos diferentes a las energía típicamente mecánicas. Se consideran correctas, y desfavorables a nuestra hipótesis, las respuestas que citen, como mínimo, cuatro de las siguientes transformaciones: energía potencial del agua → energía cinética del agua → energía cinética de rotación de las turbinas → energía eléctrica → energía interna del agua.

**11.- Si la energía se conserva, ¿por qué se habla de crisis energética?**

Para interpretar correctamente fenómenos en los que se produce la transformación de una parte de la energía en energía interna y su transferencia por medio del calor, es necesario utilizar la degradación de la energía. En este ítem se presenta una situación de la vida cotidiana que no se puede explicar utilizando únicamente el concepto de conservación de la energía. La respuesta se acepta como correcta, y desfavorable a la hipótesis, si se indica que la energía se degrada, es decir, se transforma en otras clases de energía de “peor” calidad. Estas clases de energías permiten un número menor de transformaciones y son, por tanto, menos aprovechables.

La correspondencia entre las hipótesis operativas y los ítems del cuestionario se muestra en la tabla siguiente.

**Tabla 3.1. Relación entre las subhipótesis operativas y los ítems del cuestionario de alumnos de nivel 1**

Subhipótesis operativas	Ítems
Los alumnos: muestran ideas equivocadas sobre la energía.	2, 7, 8
no señalan que todos los sistemas tienen energía.	2
tienen inactivados los esquemas de transformación, conservación, transferencia y degradación de la energía.	3, 4, 6, 9, 10, 11
no entienden si la conservación de la energía es un	5

principio o un teorema

no utilizan la conservación de la energía para analizar fenómenos de todos los campos de la física

1, 4, 9

---

### **3.2.2. Diseño para contrastar que el aprendizaje de la energía realizado por los alumnos de nivel 2 resulta escasamente significativo**

El nivel 2 está formado por alumnos procedentes de tercer curso de BUP, COU, y primer y segundo cursos de Bachillerato. Se ha preparado un cuestionario formado por los 11 ítems utilizados con los estudiantes de nivel 1 y tres preguntas que recogen aspectos de la energía relacionados con el movimiento ondulatorio, las ondas electromagnéticas y la relación masa/energía. En su aplicación se seguirán las normas indicadas anteriormente.

#### **Cuestionario 3.2. Cuestionario de alumnos de nivel 2**

Once ítems del cuestionario de alumnos de nivel 1

---

12.- ¿Por qué las ondas electromagnéticas que se emiten desde una emisora de televisión pueden producir imágenes y sonidos en tu televisor?

13.- Cuando alguien grita, el sonido sólo puede ser oído hasta una determinada distancia. ¿Quiere esto decir que no se conserva la energía? Explica tu respuesta.

14.- Algunos autores dicen que, según Einstein, la materia se transforma en energía. ¿Pone esto en cuestión el principio de conservación de la energía? Explica tu respuesta.

### **Objetivos y criterios de valoración de los ítems**

A continuación se analizan los ítems 12 a 14 correspondientes al nivel 2.

**12.- ¿Por qué las ondas electromagnéticas que se emiten desde una emisora de televisión pueden producir imágenes y sonidos en tu televisor?**

En este ítem se presenta una situación no mecánica ni termodinámica para que se analice desde el punto de vista de la conservación de la energía del campo electromagnético y su transferencia por medio de las ondas electromagnéticas o radiación. El objetivo del ítem es, pues, determinar si los alumnos reconocen que el campo electromagnético tiene energía y que se transfiere por medio de las ondas electromagnéticas. La respuesta se acepta como correcta, es decir, desfavorable a nuestra hipótesis, si se realiza una explicación en los términos anteriores.

**13.- Cuando alguien grita, el sonido sólo puede ser oído hasta una determinada distancia. ¿Quiere esto decir que no se conserva la energía? Explica tu respuesta.**

Con este ítem se pretende saber si los alumnos explican la conservación de energía en el movimiento ondulatorio por medio de la atenuación y la absorción como mecanismos de amortiguamiento de las ondas. En este caso, la respuesta se considera correcta, y contraria a la hipótesis.

**14.- Algunos autores dicen que, según Einstein, la materia se transforma en energía. ¿Pone esto en cuestión el principio de conservación de la energía? Explica tu respuesta.**

Con este ítem se intenta saber si los alumnos conocen el significado de la relación de la masa y la energía o, por el contrario, creen que dicha relación significa la transformación de la masa en energía (Warren 1976, Gil *et al.* 1988). En este último caso, pensarán que la masa o la energía no se conservan. Se considera que la respuesta es correcta, y no favorable a nuestra hipótesis, cuando se indique que la equivalencia masa/energía supone la equivalencia de los principios de conservación de la masa y de la energía, siempre que el segundo incluya la energía de la masa en reposo o que el primero tenga en cuenta la masa de las energías presentes.

La relación entre las hipótesis operativas y los ítems del cuestionario se presenta en la siguiente tabla.

**Tabla 3.2. Relación entre las subhipótesis operativas y los ítems del cuestionario de alumnos de nivel 2**

Subhipótesis operativas	Ítems
Los alumnos: muestran ideas equivocadas sobre la energía.	2, 7, 8
no señalan que todos los sistemas tienen energía.	2

tienen inactivados los esquemas de transformación, conservación, transferencia y degradación de la energía.	3, 4, 6, 9, 10, 11
no entienden si la conservación de la energía es un principio o un teorema	5
no utilizan la conservación de la energía para analizar fenómenos de todos los campos de la física	1, 4, 9, 12, 13, 14

---

### **3.2.3. Diseño para contrastar que las entrevistas realizadas con alumnos muestran que su aprendizaje de la energía resulta escasamente significativo**

Las entrevistas realizadas a los estudiantes forman parte de los procedimientos utilizados por la investigación didáctica para la exploración de las ideas que han desarrollado. Por otra parte, dicho método es compatible con cualquier otro y se ha demostrado que su utilización es uno de los medios más poderosos en el análisis de los conocimientos de los estudiantes (Novak y Gowin 1984). Aunque se han descrito distintas técnicas (Abdullah y Scaife 1997), nos limitaremos a realizar entrevistas sobre aspectos conceptuales con estudiantes de los niveles 1 y 2 que serán elegidos al azar. Los ítems de los cuestionarios 3.1 y 3.2 servirán como punto de partida para desarrollar la conversación en la que se profundizará en las contestaciones escritas. Las entrevistas serán grabadas con el objeto de proceder a un análisis posterior.

### **3.3. Diseño para contrastar la segunda subhipótesis según la cual los libros de texto presentan la energía de una forma poco clarificadora**

La revisión de los libros de texto se realizará por medio de cinco cuestionarios que se aplican a los libros de nivel 1 y 2. En el primer nivel se incluyen textos de primer y segundo cursos de FPI así como libros de segundo curso de BUP. Los libros de tercer curso de BUP y los de COU formarán el segundo grupo (nivel 2). En los cuatro primeros cuestionarios (3.3 a 3.6) se analizan aspectos de la energía relacionados con la mecánica, termodinámica, movimiento ondulatorio y electromagnetismo. Para los libros del segundo nivel se utilizarán todas los ítems de los anteriores cuestionarios y los que aparecen en el denominado “nivel 2” ( cuestionario 3.7.), que recoge ítems referentes a la física moderna. La aplicación de los cuestionarios a los primeros libros ha sido realizada, de forma independiente, por dos investigadores para contrastar posteriormente sus resultados y comprobar la coherencia de los criterios aplicados.

La amplitud del cuestionario de libros refleja el gran número de campos de la física en el que aparecen aspectos de la energía. Por otra parte, su aplicación no plantea ningún problema de tiempo porque los libros siempre se encuentran disponibles.

**Cuestionario 3.3. Cuestionario de libros de texto. Mecánica. Nivel 1 y 2**

<b>CUESTIONARIO DE LIBROS DE TEXTO</b>		
<b>TÍTULO</b> _____	<b>FECHA</b> _____	<b>Nº ref</b> _____
<b>NIVEL</b> _____	<b>CURSO</b> _____	
<b>EDITORIAL</b> _____	<b>AUTOR</b> _____	
<b>1. CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA EN MECÁNICA</b>		
1.1. ¿Se tienen en cuenta las ideas previas de los alumnos sobre	<b>SI</b>	<b>NO</b>
a) trabajo.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
b) energía.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
c) calor?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
1.2. ¿Se define un trabajo puramente mecánico?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
1.3. ¿Se indica que el trabajo es una forma de transferencia de energía?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
1.4. ¿Se clarifica el trabajo de rozamiento?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
¿Se relaciona con		
a) el calor	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
b) la energía interna?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
1.5. ¿Se clarifica el tipo de fuerza que realiza trabajo en los distintos tipos de transformación?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
1.6. ¿Se deduce la ley de conservación de la energía en mecánica a partir del teorema de las fuerzas vivas?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
1.7. a) ¿Se introducen múltiples tipos de energía para generalizar la ley de conservación de la energía mecánica?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
¿Cuáles? _____		
b) ¿Se reduce toda la energía a cinética y potencial?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
1.8. ¿A qué se atribuye la energía potencial gravitatoria/eléctrica?		
a) al cuerpo.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

b) a la interacción entre los cuerpos que constituyen el sistema.	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
c) a la interacción del cuerpo con el campo.	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
1.9. ¿Se establecen los límites de validez de la ley de conservación de la energía mecánica?	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
1.10. ¿Se presentan actividades que desarrollan los siguientes esquemas referentes a la energía?	
a) transformación.	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
b) conservación.	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
c) transferencia.	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
d) degradación.	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

### Objetivos y criterios de valoración de los ítems

A continuación se exponen los objetivos que se pretenden con cada uno de los ítems de los dos cuestionarios de libros de texto, así como los criterios que se seguirán en la corrección.

#### 1. CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA EN MECÁNICA

##### 1.1. ¿Se tienen en cuenta las ideas previas de los alumnos sobre trabajo, energía y calor?

Las ideas previas de los alumnos constituyen uno de los mayores obstáculos en la introducción de conceptos. Su conocimiento por parte del profesor facilita el proceso de enseñanza/aprendizaje. Este ítem tiene como objetivo examinar si los libros de texto tienen en cuenta las ideas alternativas de los alumnos.

Se considera que la respuesta es afirmativa, y contraria a la hipótesis, cuando se presenten actividades que permitan a los alumnos poner de manifiesto sus ideas. También se acepta exposiciones sobre dichas ideas, como la diferencia entre trabajo y esfuerzo, energía y sus fuentes, etc. siempre que también se analicen críticamente.

##### 1.2. ¿Se define un trabajo puramente mecánico?

Al realizar una definición operativa de trabajo, como el producto de la fuerza por el desplazamiento de su punto de aplicación, resulta difícil relacionar dicho concepto con un proceso de transferencia de energía. Por el contrario, si se establecen relaciones cualitativas entre el trabajo y la energía, se puede presentar el trabajo como “la transformación de la materia a través de interacciones”, y la energía como “la capacidad de un sistema para producir transformaciones, en particular, trabajo”. Esto conduce a la idea de

que se produce una variación de energía del sistema cuando se realiza un trabajo y de ahí la idea del trabajo como transferencia de energía.

La respuesta se considera afirmativa, y favorable a nuestra hipótesis, si el trabajo se define como el producto de una fuerza por el desplazamiento y se considerará negativa si se introduce una definición más general como la indicada anteriormente.

### **1.3. ¿Se indica que el trabajo es una forma de transferencia de energía?**

El trabajo no puede ser considerado como una forma de energía, sino como un proceso por el cual la energía se transfiere de un sistema a otro. Con este ítem se pretende averiguar si esta idea se presenta en los libros de texto por medio del análisis de relaciones cualitativas entre el trabajo y la energía, como se ha indicado en el ítem anterior. Sólo se considera afirmativa la pregunta, y desfavorable a nuestra hipótesis, cuando se indique explícitamente que el trabajo es una forma de transferir energía.

### **1.4. ¿Se clarifica el trabajo de rozamiento? ¿Se relaciona con el calor y la energía interna?**

El trabajo que hace la fuerza de rozamiento es un ejemplo de trabajo no conservativo o disipativo. Dicho trabajo se introduce por medio de una definición operativa como el producto de la fuerza de rozamiento por el desplazamiento del cuerpo pero no se clarifica que dicho trabajo es igual al realizado por el rozamiento sobre el cuerpo más el trabajo realizado sobre la superficie.

El trabajo realizado por la fuerza de rozamiento produce una disminución de la energía cinética del cuerpo que coincide con un aumento de la energía interna del sistema. Dicha variación da lugar a un aumento de la temperatura del sistema y el proceso posterior de transferencia de energía al exterior por medio del calor. Si no se hace una clarificación de este tipo, no se muestra que la conservación de energía en mecánica está limitada. En efecto, la ley de conservación de la energía se ha deducido a partir de las leyes de Newton, aplicadas a una partícula y, en ésta no tiene ningún sentido el concepto de energía interna. Las respuestas se aceptan como afirmativas, y contrarias a nuestra hipótesis, si se realizan explícitamente las consideraciones anteriores.

### **1.5. ¿Se clarifica el tipo de fuerza que realiza trabajo en los distintos tipos de transformación?**

El trabajo realizado por una fuerza conservativa presenta diferencias notables con respecto al que hace una fuerza no conservativas (p. ej. la fuerza de rozamiento). En el primer caso, el trabajo sólo depende de la posición inicial y final, mientras que en el segundo, el trabajo es función de la trayectoria seguida. Por otra parte, el trabajo que se

hace para vencer una fuerza conservativa se almacena como energía potencial, en tanto que el otro se disipa y se pierde. La diferenciación entre las dos clases mencionadas de trabajo resulta útil para que los estudiantes comprendan las relaciones trabajo-energía.

La respuesta será afirmativa, y no favorable a nuestra hipótesis, cuando aparezcan de forma explícita las ideas anteriores o bien enunciados operativos que relacionan el trabajo y la variación de energía, como los siguientes:  $W_{\text{res}} = \Delta E_c$ ,  $W_{\text{cons}} = -\Delta E_p$ ,  $W_{\text{ext}} = \Delta E_c + \Delta E_p$ , etc.

**1.6. ¿Se introduce la ley de conservación de la energía en mecánica a partir del teorema de las fuerzas vivas?**

La conservación de la energía en mecánica se suele introducir a partir del teorema de las fuerzas vivas. Este procedimiento transmite a los estudiantes la idea de que la ley de conservación de la energía es una consecuencia de las leyes de Newton y no un principio general de la física. Si dicha ley de conservación aparece deducida de la manera indicada anteriormente, la respuesta se considera afirmativa y favorable a nuestra hipótesis.

**1.7. ¿Se introducen múltiples tipos de energía para generalizar la ley de conservación de la energía mecánica, o se reduce a cinética y potencial?**

La introducción de varias clases de energía es un procedimiento empleado en los libros para generalizar a otros dominios la ley de conservación de la energía mecánica. Por otra parte, la energía no puede reducirse a cinética y potencial porque se olvida la energía de los campos libres o la energía de la masa en reposo.

La respuesta a la primera pregunta se acepta como afirmativa, y favorable por tanto a nuestra hipótesis, si se citan, además de la energía cinética y potencial, otros tipos como acústica, química, térmica, etc.

Se considera que la respuesta a la segunda pregunta es afirmativa, y también favorable a nuestra hipótesis, si se indica que sólo existen dos formas de energía: cinética y potencial. Igualmente se acepta que se citen tipos de energía potencial como gravitatoria, elástica, eléctrica, nuclear, etc.

**1.8. ¿A qué se atribuye la energía potencial gravitatoria/eléctrica: al cuerpo, a la interacción entre los cuerpos que constituyen el sistema o a la interacción del cuerpo con el campo?**

La energía potencial se atribuye normalmente al cuerpo (Poon 1986, McClelland 1988), olvidando que dicha energía se debe a la interacción del cuerpo con el campo y,

por tanto, no tiene sentido considerar únicamente el cuerpo. Si aparecen afirmaciones del tipo “el cuerpo posee energía potencial gravitatoria/eléctrica” y no se explica su significado, la respuesta del apartado a) se acepta como afirmativa, y favorable a nuestra hipótesis.

Se considera que las respuestas de los apartados b) y c) son afirmativas, por tanto no favorables a nuestra hipótesis, cuando se tenga en cuenta el sistema formado por el cuerpo y la Tierra (o por la carga prueba y la carga fuente) y se señale con claridad que la energía potencial se debe a la interacción de los cuerpos considerados o a la interacción del cuerpo con el campo gravitatorio o eléctrico.

### **1.9. ¿Se establecen los límites de validez de la ley de conservación de la energía mecánica?**

La ley de conservación de la energía mecánica se obtiene a partir de las leyes de Newton aplicadas a una partícula o a sistemas de partículas. Por tanto, dicha ley no es aplicable a sistemas que no puedan reducirse a dicho concepto. En este caso, se incluyen los cuerpos deformables o los fenómenos que presenten disipación, en concreto, el rozamiento y los choques inelásticos. Si no se indican los límites de validez de la ley de conservación de la energía mecánica, no se transmite a los alumnos la idea de que dicha ley es un caso particular de un principio completamente general.

Se acepta que la respuesta es afirmativa, y contraria a la hipótesis, cuando sólo aparezca uno de las dos situaciones indicadas anteriormente: choques inelásticos o fenómenos de rozamiento. Si sólo se hace referencia al carácter no conservativo de la fuerza, no se admitirá la respuesta como afirmativa.

### **1.10. ¿Se presentan actividades que activan los siguientes esquemas referentes a la energía: transformación, conservación, transferencia y degradación?**

La conservación de la energía es un concepto que se encuentra en contradicción con las experiencias cotidianas de los alumnos (Duit 1987a, Brook y Wells 1988). En dicho dominio se habla de consumo de energía (Duit 1981), de crisis energética (Carr y Kirkwood 1988), etc. La conservación de la energía sólo puede ser entendida, si se acompaña su desarrollo con la transformación, la transferencia y, especialmente, con la degradación (Brook y Wells 1988). Los libros de texto normalmente proponen sólo actividades relacionadas con la conservación de la energía. Con este ítem se pretende analizar si los textos presentan también actividades sobre transformación, transferencia y degradación de la energía.

Se considera que aparecen actividades de transformación si se encuentran cadenas de transformación de energía, interpretación de gráficas de la variación de energía

cinética y potencial de un proceso, análisis de datos de dichas energías, o cualquier actividad equivalente. No se admiten los problemas cualitativos o cuantitativos de conservación de la energía, excepto en el caso en que pregunte explícitamente por las transformaciones de energía con enunciados del tipo: ¿cuánta energía cinética se ha transformado en potencial?

Las actividades de conservación se refieren a situaciones cualitativas o cuantitativas en las que se interprete un fenómeno mecánico en base a la conservación de la energía o problemas en los que se plantea dicha conservación en varios instantes del proceso.

Se consideran actividades de transferencia aquellas en las que se analicen procesos mecánicos cuya energía varía como consecuencia de un trabajo exterior. También se admiten las actividades en las que se debe calcular una variación de energía cuando se realiza un trabajo, siempre que previamente se haya indicado explícitamente que el trabajo es un proceso de transferencia de energía.

Se consideran actividades de degradación las que impliquen la interpretación cualitativa o cuantitativa de procesos en los que la energía mecánica se transforme en energía interna. También se debe indicar que la energía interna es una forma menos utilizable de energía porque todo el calor no se puede convertir en trabajo. No se consideran actividades de degradación los problemas de rozamiento resueltos con  $W_{roz} = \Delta E_c + \Delta E_p$ .

Las respuestas se aceptan como afirmativas, y desfavorables a la hipótesis, cuando aparezcan actividades que respondan a las consideraciones anteriores.

**Cuestionario 3.4. Cuestionario de libros de texto. Termodinámica. Nivel 1 y 2**

<b>2. TERMODINÁMICA</b>	
2.1. La temperatura se introduce	
a) como la medida de un termómetro.	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
b) como la medida de la energía cinética media de las partículas del sistema.	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
c) de otra forma.	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
¿cuál? _____	
2.2. El calor se introduce	
a) como un proceso de transferencia de energía.	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
b) como la energía que se transfiere debido a una diferencia de temperaturas.	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
c) como la energía térmica.	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
d) como un proceso de transferencia de energía debido a choques microscópicos que no se puede expresar como el producto de una	

- fuerza por un desplazamiento.
- e) de otra forma.
- ¿cuál? \_\_\_\_\_

- 2.3. La energía interna se introduce
- a) como la energía propia de las partículas del sistema en el sistema de referencia del centro de masas.
- b) como cualquier forma de energía interna del sistema que incluya la energía de los campos, la de interacción de las partículas con el campo y la energía de las partículas libres (energía cinética y de la masa en reposo).
- c) de otra forma.
- ¿cuál? \_\_\_\_\_

**CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA**

- 2.4. ¿Se deduce el primer principio de la termodinámica a partir del teorema de las fuerzas vivas aplicado a un conjunto de partículas?
- 2.5. ¿Se indica que la transferencia de energía se realiza a través del trabajo y del calor?
- 2.6. ¿Se explican las formas de transferencia del calor?
- ¿cuáles? \_\_\_\_\_
- 2.7. ¿Aparecen los límites de validez del primer principio de la termodinámica en su formulación  $Q - W = \Delta U$ ?

**DEGRADACIÓN DE LA ENERGÍA**

- 2.8. ¿Se introduce la degradación de la energía?
- a) ¿Aparece la conversión de la energía en energía interna
- b) o su transferencia en calor?
- 2.9. ¿Se utilizan los principios de la Termodinámica para explicar fenómenos como la crisis energética, el calentamiento global, etc.?
- 2.10. ¿Se presentan actividades de construcción de cadenas de transformación y transferencia de energía?

Los objetivos de cada ítem y los criterios de valoración se muestran a continuación.

### **2.1. La temperatura se introduce**

- a) como la medida de un termómetro.**
- b) como la medida de la energía cinética media de las partículas del sistema.**
- c) de otra forma. ¿Cuál? \_\_\_\_\_**

La temperatura es un concepto que se presenta en los libros de varias formas y, en ocasiones, de forma errónea. Dado que se trata de una idea fundamental en la termodinámica, en este ítem se trata de analizar la forma en que se introduce. Se consideran desfavorable a nuestra hipótesis las respuestas afirmativas de los apartados a) y b).

### **2.2. El calor se introduce**

- a) como un proceso de transferencia de energía.**
- b) como la energía que se transfiere debido a una diferencia de temperaturas.**
- c) como la energía térmica.**
- d) como un proceso de transferencia de energía debido a choques microscópicos que no se puede expresar como el producto de una fuerza por un desplazamiento.**
- e) de otra forma. ¿Cuál? \_\_\_\_\_**

Al igual que la temperatura, el calor puede aparecer en la termodinámica por medio de diversas definiciones. Resultan contrarias a la hipótesis las respuestas afirmativas en los apartados a), b) y d).

### **2.3. La energía interna se introduce**

- a) como la energía propia de las partículas del sistema en el sistema de referencia del centro de masas.**
- b) como cualquier forma de energía interna del sistema que incluya la energía de los campos, la de interacción de las partículas con el campo y la de la masa en reposo.**
- c) de otra forma. ¿Cuál? \_\_\_\_\_**

La opción a) se utiliza en los libros que deducen el primer principio de la termodinámica a partir de la mecánica, mientras que la segunda proporciona una imagen más general de la energía interna, siempre que en ella se incluyen el tipo de energías que aparecen en el enunciado. Resultan favorables a nuestra hipótesis las respuestas negativas a los dos primeros apartados del ítem.

## **CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA**

### **2.4. ¿Se deduce el primer principio de la termodinámica a partir del teorema de las fuerzas vivas aplicado a un conjunto de partículas?**

En algunos libros de texto, el primer principio de la termodinámica se presenta como una deducción que toma como base el teorema de las fuerzas vivas aplicado a un

sistema de partículas. Este procedimiento transmite a los alumnos la idea equivocada de que el primer principio de la termodinámica es una consecuencia de las leyes de la mecánica y no una ley fundamental. El objetivo de este ítem es constatar si los libros de texto muestran dicha visión.

Se considera que la respuesta es afirmativa, y favorable a nuestra hipótesis, si la deducción del primer principio de la termodinámica se realiza de la forma indicada anteriormente, identificando el calor con un trabajo que no se puede expresar como el producto de una fuerza por un desplazamiento, y la energía interna con la energía cinética y potencial de las partículas del sistema.

### **2.5. ¿Se indica que la transferencia de energía se realiza a través del trabajo y del calor?**

En muchas ocasiones, el trabajo y el calor se identifican como formas de energía y no como procesos de transferencia de energía (von Roon *et al.* 1994). El objetivo de este ítem es reconocer si los libros de texto clarifican esta cuestión.

La respuesta será afirmativa, y se considera desfavorable a nuestra hipótesis, si se hace referencia explícita a la palabra “transferencia”. No se admiten respuestas del tipo “al calentar un cuerpo o realizar un trabajo sobre él aumenta su energía” en las que no aparece claramente expuesto el concepto de transferencia de energía por medio del trabajo o del calor.

### **2.6. ¿Se explican las formas de transferencia del calor? ¿Cuáles?**

La presentación y el análisis de las formas en que la energía se transfiere por medio del calor ayuda a clarificar el significado de dicho concepto como proceso de transferencia. Si se indican las formas de transferencia del calor: conducción, convección y radiación, y se explican las características de cada una de ellas, se considera que la respuesta es afirmativa y, por tanto, contraria a nuestra hipótesis.

### **2.7. ¿Aparecen los límites de validez del primer principio de la termodinámica en su formulación $Q - W = \Delta U$ ?**

La formulación tradicional del primer principio de la termodinámica no representa un principio general de conservación. En él no aparece la radiación como forma de transferencia de energía. Por otra parte, la energía interna se limita a la energía cinética y potencial de las partículas pero no recoge la energía de los campos, la de interacción de las partículas y el campo cuando éste no es conservativo, o la de la masa en reposo. Si no se realizan estas observaciones, se presenta una imagen parcial de la conservación de la energía. El objetivo de este ítem es constatar si los libros presentan las limitaciones del

primer principio de la termodinámica. La respuesta se acepta como afirmativa y, en consecuencia, no favorable a nuestra hipótesis, cuando el libro de texto recoja las consideraciones anteriores.

## **DEGRADACIÓN DE LA ENERGÍA**

### **2.8. ¿Se introduce la degradación de la energía? ¿Aparece la conversión de la energía en energía interna y su transferencia en calor?**

La introducción de los procesos irreversibles ayuda a establecer en los alumnos el concepto de degradación de la energía. Si en dichos procesos se cumple la ley de conservación de la energía, ¿por qué tienen lugar sólo en un sentido?. La conversión de la energía en energía interna y calor también se relaciona con la idea de degradación. Este aspecto de la energía resulta importante para entender su conservación. Normalmente los libros de texto no activan el esquema de la degradación.

Se considera que la respuesta es afirmativa, y no favorable a nuestra hipótesis, si se indica la imposibilidad de convertir toda la energía interna de un sistema en energía y se explica el significado de dicha imposibilidad: la energía interna es menos utilizable que otras formas de energía. También se acepta el enunciado del segundo principio de la termodinámica, en la formulación que hace referencia a la imposibilidad de transformación total del calor en trabajo, si se completa con las características de la utilización de la energía interna.

La segunda respuesta se acepta como afirmativa, y desfavorable a nuestra hipótesis, si se señala que los procesos de degradación de la energía se caracterizan por la conversión de la energía en interna, y su posible transferencia como calor.

### **2.9. ¿Se utilizan los principios de la termodinámica para explicar fenómenos como la crisis energética, el calentamiento global, etc.?**

Los fenómenos presentados en el ítem no pueden ser explicados a partir únicamente de la conservación de la energía. Es necesario considerar también la degradación. Con este ítem se pretende saber si los libros de texto presentan actividades de interpretación de fenómenos del mundo cotidiano en base a aspectos de la energía, concretamente su conservación y degradación.

La respuesta se acepta como afirmativa, o sea, desfavorable a nuestra hipótesis, cuando se explican los fenómenos indicados de la siguiente manera o equivalente: la energía se conserva en ellos pero se produce su degradación al convertirse en energía interna que se puede transferir como calor.

**2.10. ¿Se presentan actividades de construcción de cadenas de transformación y transferencia de energía?**

La transformación de la energía forma parte de los cuatro aspectos fundamentales del concepto. Dicho aspecto se desarrolla en mecánica utilizando la energía cinética y potencial. La introducción de la energía interna en termodinámica permite su empleo en las cadenas de transformación. El objetivo de este ítem es mostrar si las cadenas de transformación aparecen en los libros de texto.

Si se propone la realización de actividades en las que se indiquen las formas de energía, entre ellas la interna, que tienen lugar sucesivamente en un proceso determinado, se considera que la respuesta es afirmativa y no favorable a nuestra hipótesis.

**Cuestionario 3.5. Cuestionario de libros de texto. Ondas. Nivel 1 y 2**

**3. VIBRACIONES Y ONDAS**

- |   |                          |                          |
|---|--------------------------|--------------------------|
| 3.1. ¿Se clarifica la transmisión de energía por las ondas, indicando el carácter deslocalizado y continuo de la energía? | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 3.2. ¿Se clarifica el concepto de intensidad de las ondas y su dependencia del cuadrado de la amplitud de la onda?        | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 3.3. ¿Se presentan los procesos de amortiguamiento de las ondas?  |                          |                          |
| a) atenuación.  | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| b) absorción.   | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| c) dispersión.  | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

A continuación aparecen los objetivos y los criterios de corrección de cada ítem del cuestionario anterior.

**3.1. ¿Se clarifica la transmisión de energía por las ondas, indicando el carácter deslocalizado y continuo de la energía?**

El estudio del movimiento ondulatorio permite el análisis de ciertos aspectos de la energía y de su conservación que no aparecen en la mecánica o en la termodinámica. Uno de ellos se refiere a la forma de transmisión de energía por medio de las ondas caracterizada por los aspectos señalados en el enunciado. Con este ítem se pretende examinar si los libros de texto consideran dichos aspectos.

Se admite que la respuesta es afirmativa, y desfavorable a nuestra hipótesis, si se explica que las ondas transmiten energía. También debe aparecer explícitamente que dicha energía está deslocalizada en el espacio y se distribuye de forma continua en un

frente de ondas. No se acepta las afirmaciones del tipo “la energía se irradia en todas direcciones”.

**3.2. ¿Se clarifica el concepto de intensidad de las ondas y su dependencia del cuadrado de la amplitud de la onda?**

La introducción de la intensidad de una onda permite poner de manifiesto la utilización del concepto de energía en un campo de la física diferente de la mecánica o de la termodinámica, así como las relaciones de la física con un tema de la vida cotidiana (García 1988). La dependencia de la intensidad de una onda con el cuadrado de su amplitud muestra una expresión diferente a la que aparecía en las ecuaciones de la energía cinética o potencial.

Sólo se considera afirmativa la respuesta, es decir, no favorable a nuestra hipótesis, cuando se indique que la intensidad de la onda se define como la energía que atraviesa la unidad de superficie en la unidad de tiempo, y que dicha intensidad es directamente proporcional al cuadrado de la amplitud de la onda.

**3.3. ¿Se presentan los procesos de amortiguamiento de las ondas: atenuación, absorción y dispersión?**

En los fenómenos de amortiguamiento citados parece no cumplirse la conservación de la energía. Si se analizan con detalle se observará que la suposición anterior resulta equivocada porque la energía se distribuye en un frente de ondas mayor, se transfiere al medio o se dispersa en otras direcciones.

Se considerará afirmativa la respuesta y, por tanto, desfavorable a nuestra hipótesis, si aparecen las consideraciones anteriores y también se señala que la atenuación supone la disminución de la amplitud de la onda, siempre que su frente no sea plano.

**Cuestionario 3.6. Cuestionario de libros de texto. Electromagnetismo. Nivel 1 y 2**

<b>4. ELECTROMAGNETISMO</b>	
4.1. ¿Se realiza la deducción de la ley de Ohm generalizada a partir del principio de conservación de la energía?	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
4.2. ¿Aparece la inducción electromagnética como un fenómeno en el que se conserva la energía?	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
4.3. a) ¿Se indica que el campo eléctrico y el magnético poseen energía?	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
b) ¿Se indica que la energía del campo electromagnético es	

es proporcional al cuadrado de la magnitud del campo

4.4. ¿Se clarifica que la fuerza magnética no es conservativa y que, en consecuencia, no existe energía potencial magnética?

4.5. ¿Aparece la radiación como una forma de transferencia de energía?

4.6. ¿Se diferencia entre la energía del campo electromagnético, la energía de las partículas libres y la energía de interacción entre las partículas y el campo electromagnético?

Los objetivos y los criterios de corrección de los items del cuestionario se desarrollan a continuación.

**4.1. ¿Se realiza la deducción de la ley de Ohm generalizada a partir del principio de conservación de la energía?**

La deducción de la ley de Ohm generalizada permite la utilización del principio de conservación de la energía en un campo diferente de la mecánica o la termodinámica como es el del electromagnetismo. Se considera que la respuesta es afirmativa, y contraria a nuestra hipótesis, si se indica que la energía se conserva y, por tanto, se puede igualar la energía suministrada por la fuente con la energía que se consume en las resistencia y los motores.

**4.2. ¿Aparece la inducción electromagnética como un fenómeno en el que se conserva la energía?**

La inducción electromagnética permite mostrar un ejemplo de proceso de conservación de la energía cuando se experimenta una transformación de energía mecánica en eléctrica. Se acepta como respuesta afirmativa, y por tanto desfavorable a la hipótesis, si aparece explícitamente que el sentido de la corriente inducida (ley de Lenz) es una consecuencia de la conservación de la energía.

**4.3. a) ¿Se indica que el campo eléctrico y el magnético poseen energía?**

**b) ¿Se indica que la energía del campo electromagnético es proporcional al cuadrado de la amplitud del campo?**

Los campos eléctricos y magnéticos poseen una energía que no se debe confundir con la energía de interacción de las cargas situadas en ellos ni con la energía de las cargas libres. Normalmente, en los libros de texto no se indica la realidad de la energía del campo electromagnético y, en algunas ocasiones, se presenta la energía del campo eléctrico

de forma particular. Por otra parte, la diferencia entre la energía del campo electromagnético y otras energías, como las de interacción, se puede mostrar señalando la dependencia de la energía de dicho campo con una característica propia del mismo como es la amplitud.

Sólo se considera afirmativa la respuesta del apartado a), y desfavorable a nuestra hipótesis, cuando se indique que tanto el campo eléctrico como el campo magnético poseen energía, aunque no se indique la expresión de su valor. También se considera afirmativa para el campo eléctrico, si aparece la expresión de la energía de un condensador cargado, siempre que se indique que dicha energía está almacenada en el campo eléctrico y que el resultado obtenido se puede generalizar a cualquier campo eléctrico. Se aceptan como negativas las respuestas que se refieran a la energía potencial eléctrica o cuando sólo se indica la energía de uno de los dos campos.

La respuesta del apartado b) es afirmativa, y no favorable a nuestra hipótesis, si aparece la expresión de la energía del campo electromagnético o se indica que la energía es proporcional al cuadrado de la amplitud del campo.

#### **4.4. ¿Se clarifica que la fuerza magnética no es conservativa y que, en consecuencia, no existe energía potencial magnética?**

La energía de interacción de una partícula con un campo puede identificarse con la energía potencial si el campo es conservativo, como ocurre con el campo eléctrico. Sin embargo, el campo magnético no tiene dicho carácter y la energía de interacción no recibe dicho nombre. Con este ítem se pretende comprobar si los libros de texto señalan las características del campo magnético relacionadas con su carácter no conservativo. La respuesta se acepta como afirmativa, y contraria a nuestra hipótesis, cuando aparezcan las consideraciones anteriores.

#### **4.5. ¿Aparece la radiación como una forma de transferencia de energía?**

La radiación supone un mecanismo de transferencia de energía, propio del campo electromagnético, mediante el cual se transmite la energía que transportan las ondas electromagnéticas. En el campo electromagnético, la radiación tiene un carácter general, aplicable a cualquier tipo de radiación (frenado, sincrotón, etc.). En este sentido, se diferencia de la termodinámica que sólo considera la radiación térmica. Con este ítem se pretende comprobar si los libros de texto clarifican la transmisión de energía en los campos por medio de la radiación, considerando afirmativa la respuesta, es decir, no favorable a nuestra hipótesis, si se señalan los aspectos anteriores.

**4.6. ¿Se diferencia entre la energía del campo electromagnético, la energía de las partículas libres y la energía de interacción entre las partículas y el campo electromagnético?**

La energía del campo electromagnético y la de interacción de las partículas con dicho campo pueden prestarse a confusión. La primera es la propia del campo y su valor es proporcional a la intensidad del campo. La energía de interacción se llama potencial en el caso de campos conservativos. Dicha energía coincide con la propia del campo cuando éste es estático. Por último, se considera que la energía cinética y la de la masa en reposo son formas de la energía de las partículas libres. La respuesta se acepta como afirmativa, y contraria a nuestra hipótesis, si el libro de texto realiza un comentario en los términos anteriores.

**Cuestionario 3.7. Cuestionario de libros de texto. Física moderna. Nivel 2**

**5. FÍSICA MODERNA**

**RELATIVIDAD**

- 5.1. ¿Se clarifica la relación masa/energía?
- 5.2. ¿Se indica que los cuerpos en reposo tienen energía?
- 5.3. ¿Se explica el significado de la conservación de la masa/energía?

**FÍSICA CUÁNTICA**

- 5.4. ¿Se explicita que las siguientes ecuaciones son consecuencia de la aplicación del principio de conservación de la energía?
  - a) ecuación del efecto fotoeléctrico.
  - b) ecuación de Bohr de las frecuencias del espectro del átomo de hidrógeno.
  - c) ecuación del efecto Compton.
- 5.5. ¿Se relaciona que la energía de una onda electromagnética es proporcional a su frecuencia y proporcional al cuadrado del campo?

**FÍSICA NUCLEAR Y PARTÍCULAS ELEMENTALES**

- 5.6. ¿Se presenta la radioactividad como un proceso en el que se conserva la energía?
- 5.7. ¿Aparece la desintegración beta como un proceso en el que se pone en cuestión la conservación de la energía?
- 5.9. ¿Aparecen las reacciones nucleares como procesos en los que se

conserva la energía?

5.8. ¿Se explica la aparente violación del principio de conservación de la energía en la interacción entre dos partículas cargadas como intercambio de fotones?

A continuación aparecen los objetivos y los criterios de corrección de los items.

### 5.1. ¿Se clarifica la relación masa/energía?

La relación masa/energía supone una de las contribuciones más importantes de la teoría de la relatividad al concepto de energía. A pesar de su relevancia, la relación entre masa y energía se presta a confusiones. Dicha relación no significa que la masa se convierte en energía o a la inversa. Quiere decir que la masa tiene un contenido en energía y ésta tiene una masa, que se relacionan por la ecuación  $E = mc^2$  (Warren 1976, Gil *et al.* 1988). Se considera que la respuesta es afirmativa, y no favorable a la hipótesis, cuando se realice una exposición análoga a la anterior.

### 5.2. ¿Se indica que los cuerpos en reposo tienen energía?

Otra aportación significativa de la teoría de la relatividad en el campo de la energía es la constatación de que los cuerpos en reposo poseen energía (Okun 1989, Bickertaff y Patsakos 1995), hecho desconocido por la mecánica, la termodinámica o la teoría de campos. La expresión de dicha energía viene dada por el producto de la masa en reposo del cuerpo y el cuadrado de la velocidad de la luz en el vacío. La importancia de la energía en reposo se constata por la circunstancia de que los balances energéticos de los procesos radiactivos o nucleares sólo se pueden realizar correctamente si se considera dicha energía. Con este item se trata de comprobar si los libros presentan la energía en reposo y analizan su importancia. Si el libro de texto realiza las consideraciones anteriores, la respuesta será afirmativa, y desfavorable a nuestra hipótesis.

### 5.3. ¿Se explica el significado de la conservación de la masa/energía?

Antes de la teoría de la relatividad especial, el principio de conservación de la masa y el de la energía eran considerados como dos leyes independientes. Mediante la relación de la masa y de la energía, ambos principios resultan equivalentes siempre que en el segundo se incluya la energía de la masa en reposo, o que el primero recoja la masa de las energías presentes. Este nuevo principio de conservación permite explicar fenómenos que no son abordables desde la física clásica, como las reacciones nucleares y los procesos de aniquilación o materialización. Se considera que la respuesta es afirmativa, y

contraria a la hipótesis, si aparecen comentarios semejantes a los anteriores referentes a la conservación de la masa/energía.

## **FÍSICA CUÁNTICA**

**5.4. ¿Se explicita que las siguientes ecuaciones son consecuencia de la aplicación del principio de conservación de la energía?**

**a) ecuación del efecto fotoeléctrico.**

**b) ecuación de Bohr de las frecuencias del espectro del átomo de hidrógeno.**

**c) ecuación del efecto Compton.**

Los tres casos que aparecen en el ítem son ejemplos de la conservación de la energía en fenómenos microscópicos. También permiten mostrar la utilización del principio de conservación de la energía en campos de la física distintos de la mecánica y la termodinámica. La finalidad de este ítem es la comprobación de que el principio de conservación de la energía se utiliza en los libros de texto para analizar fenómenos no mecánicos ni termodinámicos. La respuesta se considera afirmativa, y desfavorable a nuestra hipótesis, si aparece de forma explícita que, en los fenómenos indicados, se cumple el principio de conservación de la energía.

**5.5. ¿Se relaciona que la energía de una onda electromagnética es proporcional a su frecuencia y proporcional al cuadrado del campo?**

De acuerdo con la física cuántica, la energía de una onda es proporcional al número de fotones que la constituyen. Si la energía de un fotón es igual al producto de la constante de Planck por la frecuencia, la energía de la onda resulta también proporcional a dicha frecuencia. Según la mecánica, la energía de las ondas es proporcional a su amplitud. Por otra parte, la relación entre el cuadrado de la amplitud del campo y la frecuencia permite establecer el comportamiento probabilístico del fotón en el sentido de que la probabilidad de su localización es proporcional al cuadrado de la amplitud del campo. La respuesta se acepta como afirmativa, y por tanto contraria a la hipótesis, si recoge las consideraciones anteriores.

## **FÍSICA NUCLEAR Y PARTÍCULAS ELEMENTALES**

**5.6. ¿Se presenta la radiactividad como un proceso en el que se conserva la energía?**

En los fenómenos radiactivos la energía en reposo del núcleo inicial coincide con la suma de la energía en reposo del núcleo final, de la partícula emitida y de la energía cinética de ésta (o la energía del fotón si se producen rayos gamma), de acuerdo con el principio de conservación de la energía. Este ítem tiene como objetivo comprobar si los libros de texto analizan la conservación de la energía en el proceso de la forma indicada.

Así mismo, la respuesta será afirmativa, y desfavorable a nuestra hipótesis cuando aparezca una interpretación como la expuesta.

### **5.7. ¿Aparece la desintegración beta como un proceso en el que se pone en cuestión la conservación de la energía?**

En la emisión beta parece no cumplirse el principio de conservación de la energía porque la energía en reposo del núcleo inicial es mayor que la suma de la energía en reposo del núcleo final y de la energía cinética del electrón. Bohr supuso que la energía se conservaba en los procesos macroscópicos pero no en los microscópicos. Pauli postuló que en la desintegración beta se producía además una partícula, de forma que se cumpliera la conservación de la energía. Posteriormente fue descubierta dicha partícula y, de esta manera, se confirmó el cumplimiento de la conservación de la energía en la desintegración beta. La respuesta se considera afirmativa, y contraria a la hipótesis, si recoge el análisis anterior.

### **5.8. ¿Aparecen las reacciones nucleares como procesos en los que se conserva la energía?**

La energía que se pone en juego en las reacciones nucleares se puede analizar fácilmente con ayuda del principio de conservación de la masa/energía. En dichos procesos se cumple que la suma de la energía en reposo de los átomos iniciales, de las partículas incidentes y la energía cinética de éstas coincide con la suma de la energía en reposo de los núcleos finales, de las partículas producidas y la energía cinética de estas últimas. Con este ítem se quiere comprobar si los libros de texto hacen uso del principio de conservación de la masa/energía para explicar la producción de energía en las reacciones nucleares de acuerdo con las consideraciones anteriores. La respuesta afirmativa resulta no favorable a nuestra hipótesis.

### **5.9. ¿Se explica la aparente violación del principio de conservación de la energía en la interacción entre dos partículas cargadas como intercambio de fotones?**

La interacción entre dos partículas cargadas puede interpretarse como un intercambio de fotones realizado en un tiempo determinado. Sin embargo, si una partícula cargada emite un fotón de energía  $h\nu$ , el principio de conservación de la energía parece no cumplirse porque aumenta la energía del sistema en una cantidad igual a la energía del fotón. Este problema se puede analizar a partir de las relaciones de indeterminación de Heisenberg: la energía de una partícula viene dada por una incertidumbre igual a la energía del fotón durante un tiempo determinado. El objetivo de este ítem es determinar si los libros de texto presentan dicho proceso como una aparente violación del principio de conservación de la energía y lo interpretan en los términos descritos anteriormente. En

este caso, la respuesta se acepta como afirmativa y se considera contraria a nuestra hipótesis.

En la tabla siguiente aparece la correspondencia entre las hipótesis operativas y los items de los cuestionarios anteriores.

**Tabla 3.3. Relación entre las subhipótesis operativas y los items del cuestionario de libros**

<b>Subhipótesis operativas</b>	<b>Items</b>
Los libros de texto:	
introducen dogmáticamente el concepto de energía, sus características, su relación con otros conceptos y las leyes de su conservación.	1.1, 1.2, 1.4, 1.5, 1.6, 1.9, 2.7, 2.9, 3.1, 4.3, 4.4, 4.6, 5.1, 5.2, 5.3, 5.7, 5.8
no tienen en cuenta las ideas previas de los alumnos.	1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 1.7, 1.8, 5.1
no consideran conjuntamente los aspectos de transformación, conservación, transferencia y degradación de la energía.	1.10, 2.5, 2.6, 2.8, 2.10
introducen la conservación de la energía en mecánica como un teorema y no señalen que se trata de un caso particular de un principio general.	1.6, 1.9
no presentan la conservación de la energía en termodinámica como la verificación contrastada de experiencias, y no señalen que se trata de un caso particular.	2.1, 2.2, 2.3, 2.4, 2.7
no utilizan los principios de la termodinámica para explicar procesos cotidianos.	2.9
no introducen las características particulares de la energía en las ondas.	3.1, 3.2, 3.3
no exponen las contribuciones del electromagnetismo al concepto de energía y no haga uso del principio de conservación de la energía para interpretar fenómenos electromagnéticos.	4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.6
no señalan las aportaciones de la física moderna al concepto de energía y no empleen el principio de conservación de la energía para analizar fenómenos de la física moderna.	5.1, 5.2, 5.3, 5.4, 5.5, 5.6, 5.8

no presentan los problemas planteados a la conservación de la energía en la física moderna

5.7, 5.9

### **3.4. Diseño para contrastar la tercera subhipótesis según la cual los profesores enseñan la energía de una forma desestructurada e incompleta**

La elaboración del cuestionario dedicado a profesores, tanto en activo como en formación, se ha realizado con el objetivo de conocer la forma en que se enseñan habitualmente el concepto de energía. Para ello, se ha redactado el cuestionario 3.8 formado por tres preguntas abiertas relacionadas con dicho concepto. El cuestionario consta de dos partes que se presentan por separado para evitar que los enunciados de unas cuestiones influyan en las respuestas de las restantes. La primera parte está formada por el ítem 1, mientras que los ítems restantes constituyen la segunda.

#### **Cuestionario 3.8. Cuestionario de profesores**

1.- **¿Cómo introduces el concepto de energía?**

2.- **¿Crees que toda la energía es cinética y potencial?**

3.- **La conservación de la energía, ¿es un principio o un teorema?**

#### **Objetivos y criterios de valoración de los ítems**

El análisis de los objetivos y los criterios utilizados para la valoración de cada uno de los ítems se muestran a continuación.

1.- **¿Cómo introduces el concepto de energía?**

En este ítem se pretenden analizar varios aspectos de la enseñanza habitual de la energía, en concreto los siguientes:

a) **¿Se tienen en cuenta las ideas previas de los alumnos sobre trabajo, energía y calor?** El aprendizaje de la energía se ve obstaculizado por la existencia de concepciones alternativas en los alumnos. Si son conocidas por el profesor, se pueden utilizar técnicas para sustituirlas por ideas científicas.

**b) ¿Se realizan actividades para desarrollar la transformación, la conservación, la transferencia y la degradación de la energía?** La comprensión del concepto de energía requiere el entendimiento del concepto propiamente dicho y de los cuatro aspectos indicados que se relacionan entre ellos de una forma muy estrecha.

**c) ¿Se introduce la energía sólo en mecánica y termodinámica?** En la enseñanza habitual la conservación de la energía se introduce en mecánica y termodinámica pero no se generalizan las expresiones obtenidas ni se indican que son casos particulares de un principio universal. Por otra parte, la conservación de la energía apenas aparece en el resto del curriculum.

Se consideran favorables a nuestra hipótesis las respuestas en las que se indique que la introducción de la energía se realiza sin tener en cuenta las ideas de los alumnos (apartado a), y las que señalen que no se realizan actividades para desarrollar los esquemas de transformación, conservación, transferencia y degradación (apartado b).

Las respuestas del apartado c) se agruparán en tres categorías. El primer grupo comprenderá las respuestas que introduzcan la energía en campos de la física diferentes a la mecánica o a la termodinámica. Se consideran desfavorables a nuestra hipótesis las respuestas que citen solamente un dominio de la física diferente de los indicados. En un segundo apartado se recogerán las respuestas que introduzcan la conservación de la energía sólo en la mecánica, partiendo de una definición puramente mecánica del trabajo y de las definiciones de energía cinética y potencial, para llegar a la formulación tradicional  $\Delta E_c + \Delta E_p = 0$ , o bien  $\Delta E_c + \Delta E_p = W_{\text{ncons}}$ . El último grupo incluirán las respuestas que hagan referencia a la energía interna y al calor como proceso de transferencia de energía y utilicen la expresión  $\Delta E_c + \Delta E_p + \Delta U = W + Q$  o bien  $\Delta U = W + Q$ . Las respuestas de los categorías segunda y tercera resultan favorables a nuestra hipótesis.

## 2.- ¿Crees que toda la energía es cinética o potencial?

La ley de conservación en mecánica se deduce a partir del teorema de las fuerzas vivas e introduce la energía cinética y potencial. Para generalizarlo, se hace uso de múltiples formas de energía: acústica, térmica, química, solar, etc. En otros casos, se reducen a cinética y potencial. En la enseñanza secundaria raras veces aparece la energía del campo electromagnético, la de interacción de una partícula con el campo (potencial, sólo si el campo es conservativo) o la energía de la masa en reposo. El ítem 2 pretende analizar la visión que transmiten los profesores sobre las diferentes clases de energía.

La respuesta se considera afirmativa cuando se explique que sólo hay dos tipos de energía: cinética y potencial. En este caso, la respuesta será favorable a nuestra hipótesis porque no aparece la energía del campo libre ni la energía en reposo. Las respuestas

que justifiquen que otros tipos de energía -como la gravitatoria, eléctrica, elástica, eólica, etc.- se pueden clasificar como cinética o potencial también se consideran a favor de nuestra hipótesis por la misma razón indicada.

Las respuestas negativas se clasifican en dos grupos. El primero recoge las que señalen múltiples formas de energía: térmica, acústica, química, etc. Dichas respuestas están a favor de nuestra hipótesis. En el segundo grupo se consideran las respuestas, contrarias a la hipótesis, en las que se haga referencia a tres tipos de energía: de las partículas libres (cinética o de la masa en reposo), de interacción de las partículas con el campo (y, en concreto, potencial si el campo es conservativo) y de los campos libres.

### 3.- La conservación de la energía, ¿es un principio o un teorema?

En mecánica la conservación de la energía aparece como un teorema, deducido a partir de las leyes de Newton. Dicho teorema es la expresión particular de un principio de conservación completamente general, aplicable a todos los procesos de la naturaleza. La introducción de la conservación de la energía en termodinámica sigue dos tendencias opuestas. Por una parte, se presenta como un principio. Por otra, se obtiene a partir del teorema de las fuerzas vivas aplicado a un sistema de partículas. Por medio del ítem 3 se examinará si los profesores presentan la conservación de la energía como principio o como teorema.

Las respuestas se clasifican en tres apartados. En el primero se recogen las que justifiquen que se trata de un principio, señalando que se establece como resultado de evidencias experimentales. Se considera que es un teorema, si se indica que se deduce matemáticamente, a partir de enunciados tomados como principios. En el tercer apartado se incluirán las respuestas que justifiquen su elección en base a criterios diferentes de los establecidos anteriormente. Las respuestas a favor de nuestra hipótesis corresponden a las incluidas en los grupos segundo y tercero.

A continuación se muestra la conexión entre los ítems del cuestionario y las subhipótesis operativas.

**Tabla 3.4. Relación entre las subhipótesis operativas y los ítems del cuestionario de profesores**

Subhipótesis operativas	Ítems
Los profesores: presentan la energía sin tener en cuenta las ideas previas de los alumnos.	1, 2

no introducen de forma conjunta la conservación, transformación, transferencia y degradación de la energía.	1
indican que la conservación de la energía en mecánica es un teorema pero no clarifiquen que se trata de un caso particular de un principio general.	3
presentan la conservación de la energía en termodinámica como un principio general.	3
no muestran aspectos de la energía en electromagnetismo y física moderna	1

---

En el capítulo siguiente se analizarán los resultados obtenidos por aplicación de los diseños experimentales mostrados anteriormente correspondientes a alumnos, libros de texto y profesores.



## **CAPÍTULO 4**

### **PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LOS DISEÑOS REALIZADOS PARA LA CONTRASTACIÓN DE LA PRIMERA HIPÓTESIS**

La contrastación de la primera hipótesis se ha realizado de acuerdo con los diseños experimentales presentados en el capítulo anterior. Dichos diseños se refieren a la forma en que los alumnos aprenden el concepto de energía, así como la presentación que hacen de dicho concepto los libros de texto y los profesores. En este capítulo se mostrarán los resultados obtenidos por la aplicación de los diseños indicados y se procederá al análisis de los mismos.

#### **4.1. Resultados referentes al aprendizaje de la energía realizado por los alumnos**

La contrastación de la subhipótesis referente a las ideas que tienen los estudiantes sobre la energía, después de haber recibido enseñanza sobre dicho concepto, se ha realizado por medio de varios diseños. En el primero, los estudiantes de los niveles 1 y 2 han contestado un cuestionario sobre aspectos de la energía. Recordemos que el cuestionario está formado por 11 ítems en el nivel 1 y por los ítems indicados y tres suplementarios, en el nivel 2. Por otra parte, se han realizado entrevistas con alumnos. A continuación, se ofrecen los resultados de cada uno de los diseños.

##### **4.1.1. Resultados obtenidos en la contrastación de que el aprendizaje de la energía realizado por los alumnos de los niveles 1 y 2 resulta escasamente significativo**

Los resultados obtenidos en el cuestionario de alumnos se recogen en la tabla 4.1. En ella aparece el porcentaje (%) de respuestas correctas, y no favorables a nuestra hipótesis, así como la desviación standard (d.e.) correspondientes a cada uno de los ítems.

La muestra de alumnos está formada por un total de 320, pertenecientes a dos institutos de BUP y uno de Secundaria, situados en Valencia y su provincia. La distribución de alumnos por cursos figura a continuación:

- 134 alumnos de segundo curso de BUP.
- 18 alumnos de cuarto curso de ESO.
- 69 alumnos de tercer curso de BUP.
- 41 alumnos de COU.
- 39 alumnos de primer curso del Bachillerato de Ciencias de la Naturaleza.
- 19 alumnos de segundo curso del Bachillerato de Ciencias de la Naturaleza.

Los resultados se han clasificado en dos niveles. El primero (N = 152) comprende los grupos de segundo curso de BUP y de cuarto curso de ESO, y el segundo (N = 168) los de tercer curso de BUP, COU y primer y segundo cursos del Bachillerato de Ciencias. En la tabla de resultados aparece el porcentaje (%) de respuestas correctas y la desviación standard (sd) de cada uno de los niveles.

**Tabla 4.1. Resultados del cuestionario de alumnos**

Items	Nivel 1		Nivel 2		Global	
	N = 152		N = 168		N = 320	
	%	d.e.	%	d.e.	%	d.e.
1. En la figura aparece una bola que se mueve por un riel. Si no existe rozamiento y se deja caer desde el punto indicado, señala con una cruz el punto que alcanzará.	4,1	1,6	19,9	3,1	12,3	2,5
2. Cita tres ejemplos de sistemas con energía y tres de sistemas sin energía.	15,0	2,9	33,6	3,6	24,0	3,3
3. Indica fenómenos que puedan ser explicados por el principio de conservación de la energía.	20,3	3,2	20,8	3,1	20,5	3,1
4. Se deja caer una pelota de tenis sobre un suelo duro y se observa que rebota como se ve en la figura. ¿Se conserva la energía mecánica en el sistema formado por la pelota y el suelo?	8,2	2,2	4,6	1,6	6,4	1,9
5. La conservación de la energía, ¿es un principio o un teorema?						
5.1. teorema.	7,9	2,2	4,8	1,6	6,3	1,4
5.2. principio.	15,1	2,9	29,2	3,5	22,5	2,3
5.3. no diferencian entre teorema y principio.	77,0	3,4	66,1	3,7	71,3	2,5
6. Se lanza verticalmente y hacia arriba una piedra con una determinada velocidad inicial. Si se utiliza el principio de conservación de la energía						

se puede calcular la altura que alcanza. ¿Cómo se podría calcular la velocidad que tiene en cualquier punto de la trayectoria?	14,1	2,8	16,0	2,8	15,0	2,8
7. ¿Crees que la energía es sólo cinética o potencial?	1,3	0,9	1,3	0,9	1,3	0,9
8. Un cuerpo de 25 kg situado a una altura de 30 m se dice que tiene una energía potencial de 7500 J. ¿Dónde crees que está esa energía potencial?	1,4	0,9	0,7	0,6	1,1	0,8
9.a. Un trozo de hierro se calienta al rojo vivo y se deja enfriar. ¿Se conserva la energía en el sistema formado por el aire y el trozo de hierro?	32,7	3,8	33,1	3,6	32,9	3,6
9.b. Indica los mecanismos por los que se transfiere la energía que tiene el trozo de hierro.	0,0	0,0	2,1	1,1	1,0	0,8
10. Explica las transformaciones de energía que tienen lugar desde que el agua contenida en un pantano produce electricidad hasta la utilización de dicha electricidad para hervir agua en una cocina.	9,8	2,4	11,2	2,4	10,5	2,4
11. Si la energía se conserva, ¿por qué se habla de crisis energética?	20,0	3,2	13,1	2,6	16,5	2,9
12. ¿Por qué las ondas electromagnéticas que se emiten desde una emisora de televisión pueden producir imágenes y sonidos en tu televisor?	---	---	13,1	2,6	13,1	2,6
13. Cuando alguien grita, el sonido sólo puede ser oído hasta una determinada distancia. ¿Quiere esto decir que no se conserva la energía?	---	---	45,5	3,8	45,5	3,8
14. Algunos autores dicen que, según Einstein, la materia se transforma en energía. ¿Pone esto en cuestión el principio de conservación de la energía?	---	---	2,9	1,3	2,9	1,3

Item 1. Muy pocos alumnos (12,3 %) utilizan la conservación de la energía para interpretar el fenómeno y señalar la altura correcta, de acuerdo con Duit (1981, 1984). La mayoría de las respuestas que no hacen uso de la energía, señalan incorrectamente la altura alcanzada por el cuerpo. Algunos alumnos indican que el cuerpo sube a una altura determinada porque no tiene, según los casos, velocidad, fuerza, potencia, impulso o energía para llegar a un altura mayor. En otros casos, se hace referencia a que la gravedad impide al cuerpo subir más alto. Para otros estudiantes, la forma y la longitud del riel determinan la velocidad del cuerpo y la altura alcanzada. Si la pendiente del riel es gran-

de, la velocidad del cuerpo en la parte inferior será muy grande y le permitirá subir a una altura mayor. Lo mismo ocurrirá si el riel es largo. Por el contrario, la existencia de ondulaciones en la parte inferior frena al cuerpo y disminuye su velocidad.

Item 2. El 15 % de alumnos del nivel 1 y el 33,6 % del nivel 2 reconocen la energía como una propiedad de todos los cuerpos. En este caso, se señala la energía interna como la común a todos los sistemas pero no se menciona la energía de la masa en reposo. Algunos alumnos indican que el fotón y el neutrino no tienen energía, y en algún caso muy aislado, que todos los sistemas con masa tienen energía. Generalmente, se mencionan como sistemas sin energía los que se encuentran en reposo o “los que están libres de influencias externas”.

Item 3. Aunque la energía se conserva en todos los fenómenos que involucren sistemas aislados, los alumnos citan mayoritariamente los de tipo mecánico y, en muy escasas ocasiones, los termodinámicos. Sólo el 20,3 % de los estudiantes señala procesos de otros campos de la física. Esta característica tiene seguramente su origen en la introducción de la energía en la enseñanza a través de la mecánica y la termodinámica. Los fenómenos que indican los alumnos se relacionan con cuerpos que ascienden, caen o chocan, muelles, etc. Como ejemplos de fenómenos termodinámicos aparecen cuerpos que se calientan o enfrían. En algunas ocasiones, los alumnos no diferencian los fenómenos de las situaciones estáticas como “la presión que soporta un submarinista dentro del agua”. Entre los fenómenos no mecánicos, los alumnos hacen referencia a la combustión, la conversión de la energía del sol en energía eléctrica realizada en una placa solar, o la transformación de la energía cinética del viento en eléctrica.

Item 4. Los alumnos muestran dificultades para analizar el fenómeno considerando el sistema pelota-suelo. Casi todos se centran en examinar, de manera exclusiva, las variaciones de la energía de la pelota. De esta forma, se reconoce que dicha energía disminuye porque cada vez bota menos o porque pierde “fuerza”. Como causas de esa variación se indica que, en cada salto, la pelota “debe superar el rozamiento y la gravedad”, ésta “le quita fuerza” o parte de la energía se queda en el suelo. En otros casos, se considera que la energía de la pelota se conserva y, al mismo tiempo, se va perdiendo porque “la energía tiene menos fuerza”. También se señala que la energía deja de conservarse en el momento en el que la pelota se para porque, en ese momento, su energía es cero. Muy pocos alumnos del nivel 1 y 2 relacionan la transformación de la energía mecánica con la energía interna o con el calor. El item ha sido contestado correctamente por el 6,4 % de los alumnos.

Las respuestas del item 5 se han agrupado en tres apartados. En el primero figuran las que indican que la conservación de la energía es un teorema, mientras que el segundo recoge las respuestas que consideran dicha conservación como principio. El tercer grupo lo forman las respuestas que justifican su elección en base a una diferenciación

incorrecta entre principio y teorema. El 6,3 % de los alumnos piensan que la conservación de la energía es un teorema frente a un porcentaje mayor (22,5 %) que la consideran como principio. Sin embargo, la mayoría de los estudiantes (71,3 %), en correlación con los resultados del cuestionario de profesores, tienen una imagen de principio y teorema tal como se muestra en las matemáticas, como se pone de manifiesto en estos ejemplos. “los teoremas se demuestran, como el de Pitágoras, pero los principios, no”, “si demuestro un principio, ya no es principio y se convierte en teorema”.

En el ítem 6 se presenta, ligeramente modificada, una actividad que se realiza habitualmente en los cursos de Física y Química. A pesar de la familiarización de los alumnos con tales problemas, los resultados (15 % de respuestas correctas) ponen de manifiesto un operativismo acrítico. Los alumnos señalan que se puede obtener la altura restando la energía cinética y potencial, igualando las variaciones de la energía cinética y potencial, o despejando la velocidad en la expresión de la energía cinética. Otro grupo de respuestas hace uso de las expresiones del movimiento rectilíneo uniforme o uniformemente acelerado, mientras que algunos alumnos citan genéricamente las leyes de la dinámica.

Ítem 7. Casi todos los alumnos (98,7 %) reconocen que existen muchas formas de energía. Las más citadas se relacionan con la mecánica, el calor, la electricidad o las nuevas energías. Entre ellas, aparecen la energía gravitatoria, elástica, mecánica, térmica, calorífica, eléctrica, solar y eólica. También se hace referencia a otros tipos de “energías mecánicas” como la hidráulica, “cinestésica”, aerostática, hidrostática, centrífuga y estática. Por último, se cita la energía geotérmica, de la biomasa, magnética, de los combustibles, radiactiva, nuclear y fotolítica. Muy pocos alumnos indican que la energía es sólo cinética y potencial. Alguno señala que toda la energía se puede reducir a cinética porque no existe la potencial. En muy pocas respuestas aparece la energía electromagnética y en ninguna la de la masa en reposo.

Ítem 8. Según la opinión casi unánime de los alumnos (98,9 %), la energía potencial se atribuye al cuerpo situado en un campo gravitatorio. En algunos casos, se detalla que dicha energía se encuentra en la parte inferior del cuerpo, en su centro de gravedad o en la velocidad. Para un número muy reducido de alumnos la energía potencial “está en el cuerpo pero pasa a la altura”. También se señala que la energía potencial se encuentra en la altura, en la gravedad, en el peso del cuerpo, en “la fuerza con la que cae”, en “el trabajo hecho para subirlo”, en “la atracción de la Tierra” o “entre el peso y la altura”.

Ítem 9. Muy pocos alumnos (32,9 %) analizan correctamente el fenómeno de enfriamiento de un metal. Tal como sucede en el ítem 4, la mayoría de los estudiantes interpretan el proceso considerando sólo el trozo de hierro, sin utilizar el concepto de sistema. De esta forma, señalan que la energía del hierro disminuye y no se conserva,

pero no indican ningún proceso de transferencia de dicha energía al aire. También se constatan las dificultades que presenta el concepto de calor. Una mayoría de alumnos confunden el calor, como proceso de transferencia de energía, con una clase de energía. Ésta es llamada, en algunas ocasiones, energía calorífica, y se encuentra en el interior de los cuerpos. De acuerdo con esto, se dice que “la energía del hierro se conserva pero el calor vale cero porque se enfría” o “la energía calorífica del hierro se pierde pero la energía interna se conserva”. Aunque un número muy reducido de alumnos (1 %) menciona los mecanismos de transferencia de energía, algunos señalan, de una forma muy implícita, una posible transferencia al indicar que “el hierro desprende energía” o “el hierro pierde calor”. Cuando se analiza el fenómeno teniendo en cuenta el sistema, se utilizan de forma incorrecta ciertos conceptos. De esta manera, se dice que la energía se conserva en el sistema porque “está aislado y no entra ni sale calor”, sin considerar las transformaciones de energía que han ocurrido en el interior del sistema.

Item 10. Muchas respuestas describen la serie de fenómenos que tienen lugar en el proceso pero no indican las transformaciones de energía que se producen. La construcción de la cadena de transformaciones ha sido realizada correctamente por el 10,5 % de los estudiantes. En este ítem reaparece la idea de multiplicidad de energías que tienen los alumnos. De esta forma, se hace referencia a la energía “de las aguas”, hidráulica, calorífica o térmica, e incluso al calor como forma de energía. En cambio, la energía interna aparece muy pocas veces, incluso en el nivel superior. Los resultados anteriores ponen de manifiesto la escasa activación del esquema de transformación de energía en los alumnos.

Item 11. La mayoría de los alumnos relaciona la crisis energética con el uso de la energía, la cual no se conserva porque se utiliza, se gasta, y se agota. Algunos alumnos piensan que la energía es difícil de conservar o de recuperar. Otros creen que no se conserva porque se transforma. En algunas respuestas se admite parcialmente la conservación de la energía, en el sentido de que “existen energías que se conservan y otras, no” o “la energía se conserva ‘hasta cierto punto’”. Muy pocos alumnos (16,5 %) señalan la degradación de la energía como explicación de la crisis. Las ideas mostradas por los alumnos en las respuestas de este ítem reflejan el sentido de la conservación de la energía en el lenguaje cotidiano. Mientras que la física señala que la energía se conserva, la experiencia de la vida diaria parece estar en contra de la afirmación científica porque la energía se gasta (Duit 1981).

Item 12. Un número muy reducido de respuestas (13,1 %) recogen la idea de la transmisión de energía por medio de las ondas electromagnéticas desde la emisora al receptor de televisión. Para muchos alumnos, las ondas se transforman en imagen y sonido al alcanzar el televisor, sin especificar cómo lo hacen. Algunos estudiantes explican la formación de la imagen en el televisor por medio de los electrones pero no se refieren a las ondas electromagnéticas. Aunque, en algunos casos, se señala la transmisión de im-

pulsos, códigos u órdenes por medio de las ondas electromagnéticas, no se relaciona con la energía. En términos generales, las respuestas señalan que pocos alumnos reconocen la existencia de la energía del campo electromagnético y su transmisión por radiación, incluso en fenómenos tan cotidianos como las emisiones de televisión.

En las respuestas incorrectas del ítem 13 aparecen dos tipos de razones. Para algunos alumnos, la energía del sonido se conserva pero no se oye porque el oído es imperfecto. En otros casos, la razón se encuentra en el propio sonido. De esta manera, aparecen ideas no científicas relacionadas con la atenuación y la absorción. Pertenecen al primer grupo respuestas del tipo “la energía del sonido se va terminando”, “la energía vibra hasta un determinado lugar y momento”, “las ondas se pierden al alejarse”, “las ondas conservan el sonido” o “se conserva la energía y se pierde la potencia”. Se podrían relacionar con la absorción y la dispersión opiniones como “la energía del sonido se pierde por el rozamiento” o “por desviaciones o retenciones que sufre en obstáculos”. Finalmente, existen alumnos que no creen en la amortiguación de las ondas cuando afirman que un sonido no se oye debido a que su potencia es pequeña. Las respuestas anteriores señalan que la transmisión de energía por las ondas es un fenómeno conocido por los alumnos pero no tanto los procesos de amortiguamiento del movimiento ondulatorio. El número de respuestas correctas (45,5 %) indica que se trata del ítem contestado por los alumnos con el mayor grado de aciertos.

El gran número de respuestas erróneas muestra que la relación masa/energía (ítem 14) resulta muy confusa. Para algunos alumnos, la masa se transforma en energía; para otros, la relación entre la masa y la energía es semejante a la que existe entre la masa y la energía desprendida en una combustión. Sólo el 1,3 % de los alumnos muestra una comprensión de dicha relación y de la conservación de los dos conceptos.

#### **4.1.2. Resultados obtenidos en la contrastación de que las entrevistas realizadas con alumnos muestran que su aprendizaje de la energía resulta escasamente significativo**

El autor de esta memoria ha entrevistado a 7 alumnos de cuarto curso de ESO (nivel 1) y a 8 de primer y segundo curso de Bachillerato (nivel 2). Todos los estudiantes pertenecen al Instituto donde el autor imparte clase pero no a sus grupos. Los alumnos de segundo curso de Bachillerato fueron entrevistados en el mes de mayo y los restantes, en junio. A continuación se presenta un resumen analizado de las respuestas obtenidas.

## Ideas previas

### 1. ¿Todos los cuerpos tienen energía? La energía se asocia al movimiento y a los seres vivos

Las respuestas de alumnos de los grupos de control, tanto del nivel 1 como del 2, muestran que la energía es una propiedad asociada al movimiento, de forma semejante a las recogidas por medio del cuestionario de estudiantes. Por tanto, sólo tendrán energía los cuerpos animados o inanimados que se mueven.

Entrevisador: *¿Podrías decir cosas de todos los días que tengan energía?*

Alumno/a: *Un tren en marcha, un vaso cuando lo dejas caer.*

E: *¿Y cosas que no tengan energía?*

A: *Una mesa que está quieta, el cenicero que está sobre la mesa y tu cartera.*

E: *¿Y por qué piensas que no tienen energía?*

A: *Porque están paradas. Cuando estén moviéndose pueden tener energía.*

Un grupo más reducido de alumnos creen que la energía es una característica propia de los seres vivos.

E: *¿Puedes decir cosas que no tienen energía?*

A: *Una mesa que está quieta.*

E: *¿Y si te la tiro?*

A: *Si me la tiras, tiene una fuerza, una energía.*

E: *Entonces, las cosas que están paradas ¿tienen energía?*

A: *No. Pero las plantas están paradas en el suelo y sí que tienen energía.*

E: *Pero una mesa parada no tiene energía.*

A: *Una mesa, no.*

E: *¿Y qué diferencia hay?*

A: *La planta tiene (sic) organismos vivos y la mesa, no.*

### 2. Múltiples clases de energía

Un gran número de estudiantes de los niveles 1 y 2 señalan que existen otras clases de energía además de la cinética y potencial. Normalmente citan como formas de energía las fuentes de las que proceden. Estos resultados son coherentes con los obtenidos en el cuestionario de estudiantes.

A: *La energía del Sol, la del viento, la del agua, la de las olas, la del motor de un coche, la de los combustibles, la de la biomasa, la de las bombas ...*

En ocasiones se confunde el calor (mecanismo de transferencia de energía) con una forma de energía y se nombra como *energía calorífica* o *energía térmica*. Con menor frecuencia se cita la *energía luminosa*, *la mecánica*, *la química* y *la termoquímica*.

### 3. Localización de la energía potencial

Para un gran número de alumnos la energía potencial de un cuerpo situado en el campo gravitatorio de la Tierra se encuentra dentro del cuerpo. Las respuestas son del tipo *“Esa energía es la que tiene el cuerpo, claro. Está dentro del cuerpo”*. En algunos casos se precisa el lugar donde se puede localizar dicha energía: *“Sí, está dentro del cuerpo pero del volumen de la piedra y de la altura de la que cae”*. A veces se relaciona con la transferencia de la energía (*“Yo creo que está dentro del cuerpo y que se transmite a otros”*) o con su transformación: *“Está en el cuerpo pero cuando se mueve. Cuando está parado no sé dónde está”*, *“La energía no está en el cuerpo, está en la cosa que cae. Si lo dejas caer desde esta altura, rompe algo pero si lo dejas caer desde más alto rompe más”*. Un alumno piensa que la energía potencial se comparte: *“El cuerpo tiene cierto grado de energía y la gravedad tiene otra parte de la energía”*.

Otros estudiantes piensan que la energía potencial se sitúa fuera del cuerpo, en lugares como la gravedad (*“La energía está en la gravedad”*), en el aire (*“La energía está fuera, en el aire. Cuando cae es cuando la tiene”*), en el suelo (*“La energía está en el suelo porque es el que atrae”*) o bien *“alrededor del cuerpo”*.

### 4. La conservación de la energía, ¿principio o teorema?

Con respecto a la diferenciación general entre principio y teorema, la mayor parte de los alumnos entrevistados de los dos niveles no la conocen. Las ideas que tienen sobre teoremas se reducen a los que han estudiado en matemáticas, como el de Pitágoras.

E: *¿Sabes la diferencia que hay entre principio y teorema?*

A: *Un teorema tiene una fórmula y en los principios hay unos que sí y otros que no.*

A: *El principio es conforme tú lo has visto y el teorema es después de pensarlo, entonces tú ya dices una frase, una parrafadita.*

Con respecto a la demostrabilidad de los teoremas y a la comprobación experimental de los principios, las opiniones son muy variadas:

A: *Un teorema no es justificable al 100 % y un principio sí que es justificable, demostrable.*

E: *Pero, ¿se pueden demostrar con matemáticas?*

A: *Un teorema se puede demostrar tanto con matemáticas como con otras cosas.*

E: *¿Los teoremas se demuestran?*

A: *No, igual que lo de pi que es 3,14.*

E: *¿Los principios se demuestran?*

A: *No.*

La mayor parte de los alumnos entrevistados no conocen que los teoremas tienen un campo de validez en su aplicación y que los principios son generales.

E: *¿Crees que los teoremas se pueden utilizar siempre?*

A: *Los teoremas sirven siempre porque el de Pitágoras se aplica mucho.*

E: *¿Y los principios?*

A: *No, los principios no.*

Cuando se les pregunta a los estudiantes si la conservación de la energía es un principio o un teorema, sus respuestas se justifican con argumentos muy peculiares. Dichas respuestas resultan coherentes con el hecho de que desconocen las diferencias entre principio y teorema, como se ha visto anteriormente.

E: *... ¿Así que tú crees que la conservación de la energía es un principio?*

A: *Sí. Yo pienso que es un principio porque no se ha demostrado, o sea porque dicen que la energía ni se crea ni se destruye, tan sólo se conserva.*

E: *Pero tú no te lo crees.*

A: *Yo no porque ninguno te lo ha podido demostrar. En un teorema tienes una demostración del por qué es  $x = y$ . Pero en un principio, no. Yo puedo enunciar un principio de una cosa y no poderla demostrar. Entonces nunca se sabe si es verdad o no.*

## **Conservación, transformación, transferencia y degradación de la energía**

### **5. Conservación de la energía (1)**

Cuando se pide a los alumnos que consideren una pelota que se lanza al suelo, rebota y cada vez alcanza una altura menor, la mayoría de ellos señalan que la energía de la pelota disminuye. Sin embargo, piensan que la energía que pierde la pelota, desaparece. En muy pocas ocasiones se indica que la energía que pierde la pelota se transfiere al suelo o se transforma en energía interna, permaneciendo constante su valor total en el sistema formado por la pelota, el aire y el suelo.

A: *[La pelota] bota menos porque pierde fuerza.*

E: *¿Por qué pierde fuerza?*

A: *Por la gravedad.*

E: *¿La energía de la pelota es siempre la misma?*

A: *No, pierde energía.*

E: *Y esa energía, ¿se pierde?*

A: *Sí, se pierde.*

Otros alumnos señalan que la energía de la pelota es la misma en cada bote, a pesar de que la altura alcanzada es cada vez menor.

A: *La pelota tiene la misma energía en todos los botes.*

E: *Entonces, ¿por qué salta menos?*

A: *Por la atracción de la Tierra.*

Un alumno piensa en una transferencia de energía de la pelota a la gravedad.

A: *[La pelota] cada vez tiene menos energía por la gravedad.*

E: *¿Y esa energía se pierde o se conserva?*

A: *No, la energía se conserva.*

E: *¿Y dónde estará?*

A: *Si la gravedad atrae a la pelota, estará en la gravedad porque la energía no se puede perder.*

## 6. Conservación de la energía (2)

Un gran número de estudiantes interpretan correctamente el enfriamiento de una bola caliente. Estos resultados son coherentes con los obtenidos en el cuestionario de alumnos donde dicho ítem ocupa el segundo lugar entre los que han conseguido mayor número de respuestas correctas.

A: *[La bola] tiene más energía cuando está caliente.*

E: *¿Adónde ha pasado esa energía?*

A: *Al aire. Del "calentor" (sic) del hierro se calienta el aire.*

E: *La energía, ¿se ha perdido?*

A: *No, está en el aire.*

Para otros alumnos, la energía de la bola permanece constante.

A: *Cuando [la bola] está caliente tiene más energía que es la energía calorífica.*

E: *Esa energía que ha disminuido, ¿dónde está?*

A: *Yo creo que se queda dentro del cuerpo.*

E: *Entonces, ¿cómo es que cuando está frío tiene menos energía?*

A: *No es que tenga menos, tiene la misma pero de otra forma.*

### 7. Transformación de la energía

Algunos estudiantes indican los procesos que tienen lugar en la central hidráulica, sin mencionar las transformaciones de energía.

*A: Una cascada mueve unas turbinas que están debajo y esas turbinas mueven unos condensadores que es cuando se produce electricidad.*

Cuando se señalan las transformaciones de energía, aparecen también algunas ideas alternativas referentes a las múltiples formas de energía o a la ausencia de energía en los cuerpos en reposo. En algunas ocasiones, se utilizan mal los términos científicos.

*A: Si el agua está quieta en el pantano, no tiene energía. Cuando cae por las tuberías va cogiendo energía cinética, se transforma en luz.*

### 8. Transferencia de la energía

El calor, como mecanismo de transferencia de energía, es citado con más frecuencia que el trabajo. La conducción resulta ser la forma de transferencia de calor mejor conocida por los alumnos. En algunas respuestas se pueden reconocer la radiación, aunque no se emplea esa denominación.

*E: ¿Cómo ha pasado el calor al aire?*

*A: Por conducción, el metal es conductor y si lo tocas, te quemas.*

*A: Cuando enciendes una fogata, da calor al aire.*

Algunas veces se confunde la conversión de energía en energía interna con un mecanismo de transferencia de calor.

*A: Por frotamiento también puede pasar el calor.*

La transferencia de energía de un cuerpo a otro por medio del trabajo aparece en un menor número de respuestas. Normalmente se indica, de forma implícita, la aplicación de una fuerza y un desplazamiento pero nunca se menciona la palabra “trabajo”.

*A: Una pelota de tenis y le das energía con la raqueta. Una bicicleta que le das energía con los pedales. Si coges un diccionario y lo tiras o lo mueves.*

### 9. Degradación de la energía

Las respuestas más frecuentes de los alumnos se pueden clasificar en dos grupos. Para algunos, la energía no se conserva porque se gasta. Para otros, la energía se trans-

forma y se transfiere pero en ninguna respuesta se indica explícitamente que la energía se convierte en otras formas que no son utilizables.

a) La energía se gasta porque desaparece.

A: *La energía se gasta. Igual que nosotros que tenemos la energía ahí y cuando nos vamos haciendo mayores, vamos perdiendo la energía.*

E: *¿Y en un coche?*

A: *Va chupando gasolina y cuando se pone en reserva tiene menos energía que cuando tiene el depósito lleno.*

b) La energía se conserva pero se transforma en otras clases de energía o en materia.

A: *Supongo que para hacer unas cosas se necesita esa energía pero después esa energía se va. Por ejemplo, cuando da vueltas el radiocassette, luego esa energía se va.*

E: *Lo que quieres decir es que esa energía se ha transformado en otra.*

A: *Claro. Por ejemplo, la energía de la pila se transforma en energía de rotación de la cinta.*

E: *¿Y la energía de la gasolina?*

A: *Se transforma en que el coche se mueva.*

## 10. Conservación de la energía en ondas mecánicas

Las respuestas son de varios tipos. De acuerdo con la opinión de algunos estudiantes, la causa de que el sonido no se oiga se encuentra en el receptor o en la intensidad del emisor.

A: *El grito no tiene la suficiente energía. Si gritara más fuerte, se oiría.*

E: *¿Qué le ha pasado a la energía del sonido?*

A: *El sonido no le llega bien a la persona.*

Algunas respuestas señalan una transferencia de la energía de la onda al aire que se podría relacionar, de una manera muy lejana, con el fenómeno de la absorción.

A: *La energía se ha perdido porque en todo el espacio hay aire y tu grito no es tan fuerte como para atravesar todo el aire que está allí.*

E: *Entonces, se pierde por el aire.*

A: *Claro, va perdiendo fuerza.*

En otros casos, la energía de la onda ha sufrido una transformación.

A: *La energía de la voz de la persona se ha transformado pero no sé en qué.*

Ninguna respuesta hace referencia a la atenuación.

### **11. Conservación de la energía en ondas electromagnéticas**

Todos los alumnos entrevistados reconocen que las ondas electromagnéticas se transforman en el aparato que las recibe. Sin embargo, no señalan claramente que transportan energía sino sonidos, impulsos, etc.

A: *Las ondas transportan unas señales y después ...*

E: *¿Y esas señales de que estarían formadas?*

A: *De sonido. Y al llegar al aparato se transforman en lo que quiere ser.*

### **12. Relación masa/energía**

La relación entre la masa y la energía, tal como aparece en la teoría especial de la relatividad, no es comprendida por los alumnos. Para algunos de ellos, la materia desaparece y se transforma en energía.

A: *Yo tengo al principio un cigarro que es una materia. Yo quemo esa materia y la transformo en energía.*

E: *¿Y qué es esa energía?*

A: *Es energía igual pero de otra manera.*

E: *O sea que al principio tienes materia y después energía.*

A: *Sí. Al final tengo energía, humo y la "calentor" (sic) que te da el cigarro.*

Otros alumnos piensan que la energía se encuentra almacenada en la materia y aparece en algunos procesos como la combustión o el movimiento.

A: *Yo creo que toda la materia tiene algo de energía. Y eso se pone de manifiesto cuando, por ejemplo, se quema. O se pone de manifiesto cuando yo cojo una silla y la tiro.*

Las respuestas de los alumnos confirman los resultados presentados en la tabla 4.1. De acuerdo con ellas, los estudiantes, en general, tienen ideas previas sobre la energía que no coinciden con las de la física, no pueden diferenciar los principios de los teoremas y, por tanto, no saben que la conservación de la energía es un principio de toda la física. Utilizan con alguna frecuencia la conservación de la energía en mecánica pero no en el resto de los campos de la física. Hacen un menor uso de la transformación, transferencia y degradación de la energía y desconocen aspectos importantes de la energía en electromagnetismo y física moderna.

Por otra parte, el análisis de las entrevistas realizadas a los alumnos permite extraer algunas conclusiones sobre su forma de pensamiento.

### 1. Utilización incorrecta del lenguaje científico

El uso en la ciencia de palabras con el significado que tienen en la vida cotidiana da lugar a la identificación equivocada de conceptos. De esta forma, algunos alumnos identifican la fuerza o la aceleración con la energía, o bien piensan que el calor es una forma de energía.

E: *¿Puedes decir cosas que no tienen energía?*

A: *Una mesa que está quieta.*

E: *¿Y si te la tiro?*

A: *Si me la tiras, tiene una fuerza, una energía.*

A: *La aceleración es una clase de energía.*

[Se refiere al enfriamiento de un trozo de hierro]

A: *El calor ha desaparecido. Se ha perdido porque no está en el hierro*

### 2. Incoherencias/contradicciones

Cuando los estudiantes utilizan sus esquemas conceptuales para interpretar fenómenos no intergrados en ellos, se pueden producir incoherencias o contradicciones.

[Se refiere a la localización de la energía potencial en el caso de un cuerpo situado a una altura sobre la Tierra]

A: *[La energía potencial] no está dentro del cuerpo.*

E: *¿Y dónde crees que está?*

A: *Cuando lo levantas o lo empujas es cuando tú le aplicas tu energía a él.*

E: *Cuando lo dejas caer, esa energía que tiene el cuerpo y que tú le has dado, ¿dónde está?*

A: *Está dentro del cuerpo.*

### 3. Puntos de vista centrados en una parte del sistema

Si en el análisis de fenómenos se hace una elección no adecuada del sistema, pueden tener lugar interpretaciones erróneas o incompletas. Este caso se suele dar en los procesos en los que se produce una transferencia de energía, como las situaciones consideradas en las preguntas 4 y 9. Algunos alumnos analizan dichos procesos fijando su atención en una parte del sistema (la pelota o la barra de hierro) y no en todo el conjunto, como se puede ver en las conversaciones que aparecen en los apartados correspondientes a dichas preguntas y en las siguientes respuestas.

A: *La pelota ha perdido fuerza y los botes son más pequeños.*

A: *El calor ha desaparecido. Se ha perdido porque no está en la bola de hierro.*

#### **4. Esquemas dinámicos de razonamiento**

En algunas ocasiones, los alumnos modifican su forma de analizar un fenómeno como consecuencia de la interacción que tiene lugar a lo largo de la entrevista. Si la aplicación del esquema conceptual del estudiante da lugar a una incoherencia, se puede producir un cambio en la interpretación del fenómeno. Esta circunstancia se ha observado en dos casos.

[Se está hablando sobre sistemas que no tienen energía]

A: *Una cosa parada [no tendría energía]. ¿O sí que tendría? Porque si la quemas, sí que tiene energía.*

E: *Entonces, ¿qué piensas?*

A: *Que todo tiene energía.*

#### **5. Pensamiento limitado**

Si los conceptos enseñados en la clase no sustituyen a los esquemas conceptuales de los estudiantes, la interpretación de procesos se realizará de acuerdo con sus ideas alternativas no científicas. En las respuestas que aparecen a continuación se pone de manifiesto este hecho.

[La conversación se refiere al enfriamiento de un trozo de hierro]

A: *Tiene la misma energía al principio y al final.*

E: *Entonces, la diferencia entre que esté frío o caliente, ¿cuál sería?*

A: *El tocarlo. Si lo tocas está caliente y luego está frío.*

#### **4.2. Resultados obtenidos en la contrastación de que los libros de texto presentan la energía de una forma poco clarificadora**

La revisión del tratamiento del concepto de energía que realizan los libros se ha realizado por medio de un cuestionario aplicado a 34 textos. Estos se distribuyen de la siguiente forma: 10 libros de segundo curso de BUP, 6 de primer y segundo curso de FP1, 9 libros de tercer curso de BUP y 9 libros de COU. Los datos de los libros anteriores aparecen en el anexo IV.

Recordemos que el cuestionario de textos se divide en cinco partes que contemplan aspectos de la introducción de la energía en mecánica, termodinámica, movimiento ondulatorio, electromagnetismo y física moderna.

Los resultados se presentan en las tablas 4.2. a 4.6. En ellas aparecen el porcentaje (%) de respuestas favorables a nuestra hipótesis y la desviación estandar (d.e.) de cada ítem del cuestionario. Por otra parte, para facilitar la lectura del análisis de los resultados, se han considerado los apartados que figuran a continuación.

**Tabla 4.2. Resultados del cuestionario de libros. Mecánica**

Items	Nivel 1		Nivel 2		Global	
	%	d.e.	%	d.e.	%	d.e.
1.1. No se tienen en cuenta las ideas previas sobre:						
a) trabajo.	73,3	11,1	83,3	8,8	78,8	7,0
b) energía.	86,7	8,5	88,9	7,4	87,9	5,6
c) calor.	86,7	8,5	94,1	5,6	90,6	5,0
1.2. Se define un trabajo mecánico.	86,7	8,5	87,5	7,8	87,1	5,7
1.3. No aparece el trabajo como forma de transferencia de energía.	66,7	11,8	58,8	11,6	62,5	8,3
1.4. No se clarifica el trabajo de rozamiento.	88,9	7,9	87,5	7,8	88,0	5,6
a) No se relaciona con el calor.	66,7	11,8	43,7	11,7	52,0	8,6
b) No se relaciona con la energía interna.	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0
1.5. No aparece el tipo de fuerza que aparece en las transformaciones.	83,3	9,3	41,2	11,6	58,6	8,4
1.6. Se deduce la conservación de la energía a partir del teorema de las fuerzas vivas.	28,6	11,3	100,0	0,0	66,7	8,1
1.7.a. Se introducen múltiples tipos de energía.	61,5	12,2	18,8	9,2	37,9	8,3
1.7.b. Sólo se introduce la energía cinética y potencial.	38,5	12,2	81,3	9,2	62,1	8,3
1.8.a. Se atribuye la energía potencial al cuerpo.	92,3	6,7	66,7	11,1	78,6	7,0
1.8.b. No se atribuye a la interacción de los cuerpos.	92,3	6,7	66,7	11,1	78,6	7,0
1.8.c. No se atribuye a la interacción del cuerpo con el campo.	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0
1.9. No se establecen los límites de validez de la conservación de la energía mecánica.	54,5	12,4	31,2	10,9	40,7	8,4
1.10. No se activan los esquemas de						

1.10.a. transformación.	50,0	12,5	75,0	10,2	63,3	8,3
1.10.b. transferencia.	71,4	11,3	68,7	10,9	70,0	7,9
1.10.c. degradación.	92,9	6,4	93,7	5,7	93,3	4,3
1.10.d. Se activa la conservación.	78,6	10,3	100,0	0,0	90,0	5,1

## Mecánica

Las ideas previas de los alumnos sobre el trabajo, la energía o el calor son tenidas en cuenta por muy pocos libros de texto, en todos los niveles (item 1.1). Especialmente son ignoradas las que hacen referencia al calor (9,4 %). Con referencia al concepto de trabajo (item 1.2), se observa que un 87,1 % de textos hacen uso de una definición puramente mecánica, por lo que a los alumnos les resultará difícil comprender su carácter de proceso de intercambio de energía entre los sistemas (item 1.3). Dicho carácter no aparece en el 62,5 % de los libros. En algunos textos, el sentido del trabajo como intercambio se indica muy confusamente de la siguiente manera: "...ha de reponer esta energía empleada en el trabajo que ha desarrollado al trasladarse de un sitio a otro". En algunas ocasiones, el trabajo se considera una forma de energía como se pone de manifiesto en los siguientes ejemplos: "además del trabajo, la energía potencial y la energía cinética, existen otras formas de energía que irán apareciendo en capítulos posteriores", "el trabajo aplicado a un cuerpo y la energía cinética que adquiere son interconvertibles".

El trabajo de rozamiento (item 1.4) no se clarifica en ninguno de los textos analizados de FP1, mientras que resulta muy escaso el número de los libros de BUP y COU que lo examinan. Resulta significativo el hecho de que el trabajo de rozamiento se relacione con el calor, en algunos casos (48 %), pero en ninguno con la energía interna. También conviene poner de relieve la circunstancia de que muchos libros presentan problemas cuantitativos de rozamiento sin haber clarificado el sentido del trabajo de fricción. Son representativas frases del tipo "en los rozamientos, la energía mecánica se convierte en calor".

La relación entre las fuerzas que realizan trabajo y su relación con la variación de energía cinética o potencial (item 1.5) se presenta con mayor frecuencia en los textos de tercer curso de BUP y de COU. Este hecho se relaciona seguramente con la deducción del teorema de la conservación de la energía, realizado a partir del teorema de las fuerzas vivas. En los libros del nivel 1, dicho procedimiento se utiliza escasamente (28,6 %). En la mayoría de las ocasiones se presenta sin demostrar, o bien se utiliza el caso de un cuerpo que cae verticalmente. Por relaciones cinemáticas se llega a la conclusión de que coincide la energía mecánica en el punto de partida y en el suelo. Este procedimiento no hace uso del carácter conservativo de la fuerza gravitatoria. En todos los textos examinados de tercer curso de BUP y de COU, la conservación de la energía mecánica se realiza a partir del teorema de las fuerzas vivas. Dicho procedimiento no resultaría inadecuado si se indicaran las limitaciones de su aplicación y se señalara que el resultado obtenido es un caso particular de un principio general. Generalmente, esas puntualizaciones

no se suelen hacer, como se tendrá ocasión de comprobar en el análisis de los resultados del ítem 1.9.

Ítem 1.7. Se observa que la introducción de múltiples tipos de energía disminuye a medida que aumenta el nivel. De esta forma, frente a un 61,5 % de textos del primer nivel que presentan varias clases de energía, se encuentran sólo un 18,8 % del segundo. Las energías no mecánicas que se citan mayoritariamente son la química, calorífica, térmica, magnética, luminosa y radiante. Dentro de la energía potencial figuran la gravitatoria, la elástica, la electrostática y la nuclear. Frente a la posición de considerar numerosas formas de energía, algunos libros presentan una postura reduccionista y mecanicista. Para estos, todas las energías pertenecen a la clase de la energía cinética o potencial (“sólo hay energía mecánica que, a su vez, se divide en energía potencial y en energía cinética. Con frecuencia, se habla de energía térmica, energía eléctrica, energía química,... pero todas estas energías no son más que formas de la energía mecánica”). Sin embargo, tal opinión no se puede considerar correcta porque olvida la energía de los campos libres y la de la masa en reposo.

La localización de la energía potencial gravitatoria o eléctrica da lugar a uno de los errores conceptuales transmitidos con mayor frecuencia por los textos. En las respuestas del ítem 1.8 se puede comprobar que un 92,3 % de libros del nivel 1 atribuyen la energía potencial gravitatoria al cuerpo. Dicho porcentaje disminuye en el segundo nivel aunque persiste con un 66,7 %. Las expresiones que dan lugar al error conceptual son del tipo “la energía potencial del cuerpo...”, “la energía potencial que acumula un cuerpo de masa  $m$ ...”, “la energía potencial que posee el cuerpo...”, “cualquier cuerpo material en reposo acumula cierta energía...Se le da el nombre de energía potencial gravitatoria”, “la energía contenida en el cuerpo capaz de iniciar el movimiento es la potencial gravitatoria”. Algunos libros ofrecen una incoherencia en el tratamiento de la energía potencial. A pesar de atribuir la gravitatoria al cuerpo situado en el campo, señalan que la energía potencial elástica se encuentra en el muelle y no en el cuerpo sujeto a él.

Los límites de validez de la conservación de la energía en mecánica (ítem 1.9) aparecen en el 59,3 % de los libros de texto. Esta circunstancia hace que se presente la conservación de la energía como un teorema de la mecánica, sin ninguna conexión con otros dominios de la física.

De los cuatro aspectos fundamentales de la energía (ítem 1.10) sólo la conservación es abordada por todos los textos analizados, excepto por el 25 % de los libros de FP. Normalmente, las actividades relacionadas con la conservación están formadas por ejercicios cuantitativos en los que se plantea la conservación de la energía mecánica en dos o más puntos de una trayectoria con el objeto de calcular el valor de una magnitud. Algunos libros señalan el carácter de artificio matemático para dicho procedimiento como una forma más sencilla de resolución de problemas (“Se introducen el concepto de

trabajo y energía porque se pueden resolver problemas...”). Muy pocas veces aparecen actividades cualitativas de conservación. La transformación de la energía suele presentarse únicamente en los problemas de conservación pero no se pregunta explícitamente por la energía transformada. Tampoco se realizan cadenas de conversión ni se analizan gráficas. Por otra parte, se observa que el número de textos que proponen actividades de transformación disminuye en los niveles superiores. Una situación análoga se presenta con la transferencia de energía, que aparece en situaciones cuantitativas relacionadas generalmente con el teorema de las fuerzas vivas. Sin embargo, la degradación de la energía sólo se desarrolla en el 6,7 % de los libros a pesar de la realización de problemas de conservación de energía relacionados con el rozamiento. Éstos suelen explicarse, de una manera superficial, como la transformación de una parte de la energía en calor. De las consideraciones anteriores se puede concluir que la enseñanza de la energía a través de los libros se basa esencialmente en la conservación y, en menor medida, en la transformación. Los procesos de transferencia y la degradación apenas se muestran.

### Termodinámica

Los resultados obtenidos en el apartado de la termodinámica se presentan en la tabla 4.3. que figura a continuación.

**Tabla 4.3. Resultados del cuestionario de libros. Termodinámica.**

Items	Nivel 1		Nivel 2		Global	
	%	d.e.	%	d.e.	%	d.e.
<b>2.1. La temperatura</b>						
a) no se introduce como la medida de un termómetro.	66,7	11,8	100,0	0,0	75,0	8,7
b) se introduce como la medida de la energía cinética media de las partículas del sistema.	25,0	10,8	25,0	10,2	25,0	8,7
c) se introduce de otra forma.	41,7	12,3	75,0	10,2	50,0	10,0
<b>2.2. El calor</b>						
a) no se introduce como un proceso de transferencia de energía.	100,0	0,0	75,0	10,2	94,7	4,5
b) no se introduce como la energía que se transfiere debido a una diferencia de temperaturas.	53,3	12,5	50,0	11,8	52,6	10,0
c) se introduce como la energía térmica.	20,0	10,0	25,0	10,2	21,1	8,2
d) se introduce como un proceso de transferencia de energía debido a choques microscópicos que no se puede expresar como el producto de una fuerza por un desplazamiento.	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
e) se introduce de otra forma.	33,3	11,8	0,0	0,0	26,3	8,8
<b>2.3. La energía interna</b>						
a) se introduce como la energía propia de las par-						

tículas del sistema en el sistema de referencia del centro de masas.	50,0	12,5	50,0	11,8	50,0	10,0
b) no se introduce como cualquier forma de energía interna del sistema que incluya la energía de los campos, la de interacción de las partículas con el campo y la energía de las partículas libres (energía cinética y de la masa en reposo).	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0
c) se introduce de otra forma.	50,0	12,5	50,0	11,8	50,0	10,0
2.4. El primer principio de la termodinámica se introduce a partir del teorema de las fuerzas vivas	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2.5. No se indica que la transferencia de energía se realiza a través del trabajo y del calor	72,7	11,1	50,0	11,8	66,7	9,4
2.6. No se explican las formas de transferencia del calor.	50,0	12,5	100,0	0,0	61,1	9,8
2.7. No aparecen los límites de validez del primer principio de la termodinámica en su formulación $Q - W = \Delta U$ .	83,3	9,3	100,0	0,0	90,0	6,0
2.8. No se introduce la degradación de la energía.	61,5	12,2	25,0	10,2	52,9	10,0
2.8.a. No aparece la conversión de la energía en energía interna.	92,3	6,7	75,0	10,2	88,2	6,5
2.8.b ni su transferencia en calor.	61,5	12,2	25,0	10,2	52,9	10,0
2.9. No se utilizan los principios de la Termodinámica para explicar fenómenos como la crisis energética, el calentamiento global, etc.	88,9	7,9	100,0	0,0	92,3	5,3
2.10. No se presentan actividades de construcción de cadenas de transformación y transf. de energía.	92,3	6,7	100,0	0,0	94,1	4,7

El concepto de temperatura (ítem 2.1) es introducido por los libros de dos formas mayoritarias: mecanicista y termodinámica. El 25 % de los libros siguen la primera forma y relacionan la temperatura con la energía cinética media de las partículas. Desde un punto de vista termodinámico, algunos textos (25 %) indican que la temperatura es la medida del termómetro, mientras que otros hacen referencia a situaciones de equilibrio térmico (“la propiedad que caracteriza los estados de los sistemas que se hallan entre sí en equilibrio térmico”, “la variable que tiene el mismo valor en los sistemas en equilibrio térmico”). Algunos libros de FP relacionan la temperatura con aspectos de los sentidos (“[la temperatura es] la sensación térmica palpable por el sentido del tacto que nos manifiesta cuándo un cuerpo está más caliente que otro”, “la sensación del tacto nos informa de la temperatura”) mientras que un libro de segundo curso de BUP menciona que la temperatura es “el factor de intensidad que posee la energía calorífica”.

Al igual que ocurre con el concepto de temperatura, el de calor (item 2.2) se puede presentar mecánica o termodinámicamente. Un 21,1 % de los libros introduce el calor como la energía térmica, mientras que el enfoque termodinámico es seguido por el 47,4 % . Por otra parte, el concepto de calor se presenta en muchos libros de una forma inadecuada, dando lugar a la introducción de errores conceptuales. En el 25 % de los libros de COU, por ejemplo, se identifica el calor con la energía térmica. Sin embargo, es considerado como un proceso de transferencia de energía sólo por un 5,3 % del conjunto de todos los libros. En algunos casos, se relaciona el calor con “una forma de energía acumulada por el cuerpo”, que “pasa de una sustancia a otra”. En otros, se muestra el calor como “la energía suministrada a un cuerpo para que éste aumente su temperatura o cambie de estado”.

La mitad de los textos de todos los niveles dan una interpretación mecanicista de la energía interna (item 2.3) cuando la consideran como la suma de la energía cinética y potencial del conjunto de partículas que forman el sistema. Ningún libro se refiere a la energía en reposo de las partículas o a la de los campos. En algunos casos, se muestra la energía interna como “el contenido energético de un sistema”, “la energía que tienen los cuerpos por encontrarse a una determinada temperatura” o “la energía total del sistema”. Muy pocos textos presentan la energía interna como una función de estado.

Muy pocos libros del nivel 1 (27,3 %) muestran el calor y el trabajo como procesos de transferencia de energía (item 2.4). Este hecho quizás tenga una estrecha relación con la presentación que suelen hacer los libros de los conceptos de calor y trabajo, como se ha indicado en los comentarios de los ítems 2.2 y 2.3. El porcentaje aumenta en los textos de COU hasta alcanzar el 50 %.

En ningún libro se deduce el primer principio de la termodinámica (item 2.5) por medio del teorema de las fuerzas vivas aplicado a un sistema de partículas. Se suele presentar directamente o se obtiene a partir de un razonamiento cualitativo aplicado a sistemas adiabáticos que intercambian energía con el exterior por medio del trabajo. Después se considera que el sistema también realiza una transferencia de energía a través del calor. Aunque este tratamiento supone una visión no mecanicista del primer principio, no se insiste en el carácter de hipótesis verificada por la experiencia que presenta dicho principio.

Item 2.6. Las formas de transferencia de calor aparecen mayoritariamente en los libros de FP (80 %) y, en menor medida, en los de segundo curso de BUP. Resulta particularmente relevante señalar que ningún libro de COU de los analizados recoge dichos mecanismos, cuya presentación se piensa que resultaría conveniente para mostrar con más claridad que el calor es un proceso de transferencia de energía y no una forma de energía.

Sólo uno de los textos examinados señala que el primer principio de la termodinámica, en su formulación tradicional, “es de aplicación general para cualquier transformación: mecánica, térmica, eléctrica, magnética, química, etc.” Por otra parte, tan sólo el 10 % de los textos muestra las limitaciones de la conservación de la energía en termodinámica (ítem 2.7), es decir, que la energía interna no incluye la energía en reposo de las partículas o la del campo libre.

La degradación de la energía aparece aproximadamente en la mitad de los textos analizados (ítem 2.8). Este aspecto de la energía resulta imprescindible en la interpretación de los fenómenos irreversibles, que no pueden ser explicados exclusivamente por la conservación de la energía. Aunque los textos describen mayoritariamente la conversión de la energía en calor (47,1 %), se examina pocas veces (11,8 %) su transformación en energía interna. Este último proceso resulta importante en la interpretación de la degradación de la energía porque constituye un paso previo a la manifestación de las variaciones de temperatura y a la transferencia de energía al entorno por medio del calor. En algunos libros de FP aparece el estudio de las máquinas térmicas, que se realiza generalmente sin tener en cuenta la imposibilidad de la transformación total de calor en trabajo. Si se hace referencia a dicha imposibilidad, no se clarifica su significado. En un caso se llega a invertir el carácter del equivalente mecánico del calor cuando se indica que “la relación entre el calor suministrado a un sistema y el trabajo producido es una cantidad constante”.

La utilización de la degradación de la energía en la explicación de fenómenos de la vida diaria como la crisis energética o el calentamiento global (ítem 2.9) aparece como irrelevante en los libros. El primer fenómeno es recogido sólo en un libro de segundo curso de BUP, mientras que el segundo no aparece en ninguno. Este resultado pone de manifiesto la imagen de la ciencia que presentan algunos libros. Se trata de una ciencia sin ninguna conexión con la vida diaria, que presta escasa atención al análisis de fenómenos cotidianos.

A pesar de que la construcción de cadenas de transformaciones de energía (ítem 2.10) permite interpretar muchos procesos habituales de nuestro entorno, muy pocos libros (5,9 %) consideran este tipo de actividades. De esta forma, se pierde la oportunidad de mostrar un aspecto de la energía, y de utilizar el concepto de energía interna y de calor para analizar fenómenos disipativos, como el rozamiento, que se analizan en la mecánica de una forma poco significativa.

### **Vibraciones y ondas**

La mayor parte de los libros de todos los niveles señalan la transmisión de energía por las ondas pero ninguno explica que dicha energía no se puede localizar en ningún punto concreto del espacio (ítem 3.1). Tampoco se indica que la energía se distribuye de

forma continua por el frente de ondas. Sin embargo, resultaría conveniente que los textos hicieran estas puntualizaciones para poner de manifiesto las características de la transmisión de energía por las ondas como introducción a la radiación.

**Tabla 4.4. Resultados del cuestionario de libros. Vibraciones y ondas**

Items	Nivel 1		Nivel 2		Global	
	%	d.e.	%	d.e.	%	d.e.
3.1. No se clarifica la transmisión de energía por las ondas ni su carácter deslocalizado y continuo.	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0
3.2. No se clarifica la intensidad de las ondas y su dependencia del cuadrado de la amplitud.	81,2	9,8	31,2	10,9	56,2	8,5
3.3. No se presentan los siguientes procesos de amortiguamiento:						
3.3.a. atenuación.	75,0	10,8	50,0	11,8	62,5	8,3
3.3.b. absorción.	87,5	8,3	50,0	11,8	68,7	8,0
3.3.c. dispersión.	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0

Item 3.2. Aunque el concepto de intensidad de las ondas aparece recogido prácticamente en la totalidad de los libros, sólo el 43,8 % lo relaciona con el cuadrado de la amplitud. Este resultado confirma la hipótesis de que la enseñanza de la energía se reduce a la cinética, a la potencial y, en algunos casos, a la interna pero no se considera en otros campos de la física.

Los fenómenos de amortiguamiento (item 3.3) permiten analizar la conservación de la energía en el movimiento ondulatorio y aplicar dicha idea a una rama de la física diferente de la mecánica. Sin embargo, sólo el 37,5 % de los textos recogen la atenuación, mientras que la absorción aparece en el 31,3 % y en ninguno, la dispersión.

## Electromagnetismo

Todos los libros de COU y una gran mayoría (75 %) de los textos de segundo y tercer curso de BUP realizan la deducción de la ley de Ohm generalizada (item 4.1) por medio de la conservación de la energía. Aunque la inducción electromagnética (item 4.2), permite examinar la conservación y transformación de la energía en un contexto diferente al mecánico, sólo el 35,7 % de los libros considera esta posibilidad. Se da la particularidad de que un libro indica que la ley de Lenz “no puede deducirse de otras leyes experimentales, ni siquiera es una consecuencia de la conservación de la energía aplicada a corrientes en campos magnéticos”.

**Tabla 4.5. Resultados del cuestionario de libros. Electromagnetismo**

Items	Nivel 1		Nivel 2		Global	
	%	d.e.	%	d.e.	%	d.e.
4.1. La ley de Ohm no se deduce a partir del principio de conservación de la energía.	50,0	12,5	18,2	9,1	31,6	8,0
4.2. La inducción electromagnética no aparece como un fenómeno en el que se conserva la energía.	90,0	7,5	50,0	11,8	64,3	8,2
4.3.a. No se indica que el campo eléctrico y el magnético poseen energía	100,0	0,0	77,8	9,8	87,9	5,6
4.3.b. No se indica que la energía del campo electromagnético es proporcional al cuadrado de la amplitud del campo	100,0	0,0	66,7	11,1	81,8	6,6
4.4. No se clarifica que la fuerza magnética no es conservativa y que no existe energía potencial magnética.	100,0	0,0	88,2	7,6	93,5	4,2
4.5. No aparece la radiación como una forma de transferencia de energía	92,3	6,7	72,2	10,6	80,6	6,8
4.6. No se diferencia entre la energía del campo electromagnético, la energía de las partículas libres y la energía de interacción entre las partículas y el campo electromagnético.	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0

Item 4.3. Sólo el 12,1 % de los textos señala que el campo eléctrico y el magnético poseen energía. Normalmente, la energía del primero aparece citada cuando se examina un condensador cargado. Sin embargo, ningún libro de FP1 ni de segundo o tercer curso de BUP se refiere a la energía del campo magnético, mientras que únicamente cuatro textos de COU mencionan dicha energía. Consecuentemente con las consideraciones anteriores, en un número muy reducido de textos (19,4 %) se muestra la expresión cuantitativa de la energía del campo electromagnético.

Casi todos los libros de texto tienden a considerar el tratamiento del campo magnético (item 4.4) de una forma muy parcial. Aunque todos analizan las características de dicho campo en términos de polos, líneas de fuerza, etc., muy pocos (sólo dos libros de COU y ninguno de los restantes niveles) se refieren al carácter no conservativo del mismo. Sin embargo, la consideración de que no existe energía potencial magnética tan sólo aparece recogida en un libro.

La radiación como forma de transferencia de energía (item 4.5) es recogida por el 19,4 % de los libros. Aparece fundamentalmente en los libros de COU, dentro del apartado de las ondas electromagnéticas. Sin embargo, un número muy reducido de libros de BUP (alrededor del 10 %) muestran la radiación.

Los resultados anteriores y los que se recogen en el items 4.6 ponen de manifiesto la visión reducida de la energía que se da en los libros de texto. Ningún libro de los examinados hace referencia a la diferencia que existe entre la energía propia del campo, la de las partículas libre y la de interacción entre dichas partículas y el campo, que puede ser o no conservativa (item 4.6).

### Física moderna

La relación entre masa y energía (item 5.1), establecida por Einstein, se suele utilizar en la física nuclear sin haber sido previamente clarificada. En los libros de texto aparecen dos tendencias. Por una parte, no se analiza el significado de la correspondencia entre masa y energía, o se hace de una forma ambigua en términos como los siguientes: “la energía  $Q$  que acompaña a este proceso [reacción nuclear] es el valor del balance masa-energía de la reacción de acuerdo con la ecuación  $E = mc^2$ ”. En otras ocasiones, aparecen errores de interpretación. Entre éstos se puede señalar la *transformación* de la masa en energía, cuando se tratan las reacciones nucleares o las energías de enlace de los nucleones (“Así se explica que existan variaciones de masa entre los elementos que colisionan y los productos de la reacción, *masa que se convierte en energía, o recíprocamente* de acuerdo con la ecuación de Einstein”). El 21,4 % de los libros del nivel 2 muestran el sentido correcto de la relación entre masa y energía.

Aunque la energía de la masa en reposo (item 5.2) también aparece en la discusión de las reacciones nucleares, rara vez se analiza su significado o se presenta como una nueva forma de energía, diferente de la cinética, potencial o de la propia de los campos. De esta forma, en las reacciones nucleares se realizan balances energéticos en los que se unen conceptos mecánicos, como la energía cinética, con conceptos relativistas. Como consecuencia de este tratamiento y de la falsa interpretación de la relación masa/energía, se producen confusiones en la conservación de ambos conceptos. En algunos libros, se niega la conservación de la masa en términos como los siguientes: “*No se conserva*, sin embargo, *la masa*, ya que en toda reacción nuclear la suma de la masa de los reaccionantes no coincide con la suma de las masas de los productos”. Según otros libros, la energía no se mantiene constante: “Debido al defecto de masa existente en el núcleo, en las reacciones nucleares *no se cumple la ley de conservación de la energía*, por lo que aparece en la reacción cierta cantidad de energía”. En otras ocasiones, se indica que se incumple tanto la conservación de la masa como la de la energía. De todo lo anteriormente expuesto se deduce claramente la confusión que existe cuando se trata de

aplicar los principios de conservación de la masa y de la energía a las reacciones nucleares. Seguramente la causa de este problema se encuentra en que muy pocos libros (26,7 %) señalan que la relación entre la masa y la energía supone también la equivalencia entre los principios de conservación de los dos conceptos (ítem 5.3).

**Tabla 4.6. Resultados del cuestionario de libros. Física moderna.**

Items	Nivel 1		Nivel 2		Global	
	%	d.e.	%	d.e.	%	d.e.
5.1. No se clarifica la relación masa/energía.	----	----	78,6	9,7	78,6	9,7
5.2. No se indica que los cuerpos en reposo tienen energía.	----	----	73,3	10,4	73,3	10,4
5.3. No se explica el significado de la conservación de la masa/energía.	----	----	85,7	8,3	85,7	8,3
5.4. No se explicita que las siguientes ecuaciones son consecuencia de la aplicación del principio de conservación de la energía:						
a) ecuación del efecto fotoeléctrico.	----	----	100,0	0,0	100,0	0,0
b) ecuación de Bohr de las frecuencias del espectro del átomo de hidrógeno.	----	----	100,0	0,0	100,0	0,0
c) ecuación del efecto Compton.	----	----	23,1	9,9	23,1	9,9
5.5. No se relaciona que la energía de una onda electromagnética es proporcional a su frecuencia y proporcional al cuadrado del campo.	----	----	93,7	5,7	93,7	5,7
5.6. La radioactividad no se presenta como un proceso en el que se conserva la energía.	----	----	82,4	9,0	82,4	9,0
5.7. La desintegración beta no aparece como un proceso en el que se pone en cuestión la conservación de la energía.	----	----	58,8	11,6	58,8	11,6
5.8. Las reacciones nucleares no aparecen como procesos en los que se conserva la energía.	----	----	62,5	11,4	62,5	11,4
5.9. No se explica la aparente violación del principio de conservación de la energía en la interacción entre dos partículas cargadas como intercambio de fotones.	----	----	90,0	7,1	90,0	7,1

Ítem 5.4. En ningún libro de los analizados se señala que la ecuación del efecto fotoeléctrico es una consecuencia de la aplicación de la conservación de la energía. Lo mismo sucede con la ecuación de las frecuencias del espectro del átomo de hidrógeno, según la interpretación de Bohr. Sin embargo, un 76,9 % de los textos indica la conser-

lación de la cantidad de movimiento y de la energía en el efecto Compton. De nuevo se comprueba que la conservación de la energía no es utilizada por los libros como vínculo unificador de todas las ramas de la física.

Item 5.5. Los libros hacen referencia a la dualidad onda-corpúsculo de la luz y presentan el carácter discreto de su energía por medio de la introducción de los fotones. Sin embargo, sólo un libro considera que la energía de la luz es proporcional a su frecuencia, de acuerdo con el comportamiento corpuscular, y también proporcional al cuadrado de la amplitud del campo, según la teoría electromagnética.

Un número muy escaso de libros (17,6 %) presentan la radiactividad como un fenómeno en el que se conserva la energía (item 5.6). Generalmente los textos muestran un estudio descriptivo de las radiaciones emitidas por las sustancias radiactivas pero no señalan el origen de la energía de dichas radiaciones.

Los primeros estudios de la desintegración beta llevaron a la conclusión de que aparentemente la energía no se conservaba en dicho proceso (item 5.7). El descubrimiento del neutrino supuso la confirmación del carácter universal del principio de conservación de la energía. Más de la mitad de los libros analizados (58,8 %) no recogen estas circunstancias como uno de los problemas que cuestionaron la validez del principio de conservación de la energía en los fenómenos cuánticos.

Como ya se ha señalado en el comentario del item 5.3, el tratamiento que los libros hacen de las reacciones nucleares resulta confuso e incluso aparecen errores de interpretación de los principios de conservación. Un 37,5 % de los textos del nivel 2 señalan que la energía se conserva en las reacciones nucleares (item 5.8), en los términos indicados en el análisis del item 5.3.

Sólo un libro de tercer curso de BUP presenta la explicación de la aparente violación del principio de conservación de la energía en el intercambio de un fotón entre dos partículas cargadas (item 5.9). Este hecho, no explicable por la física clásica, supone una nueva confirmación de la validez del principio de conservación de la energía, interpretado desde el punto de vista de la física cuántica.

### **4.3. Resultados obtenidos en la contrastación de que los profesores enseñan la energía de una forma desestructurada e incompleta**

La opinión de los profesores sobre la enseñanza de la energía se ha analizado a través de la interpretación de las respuestas al cuestionario que han realizado 38 profesores en formación (alumnos del curso de Aptitud Pedagógica) y 22 profesores en activo, pertenecientes a varios institutos.

En la tabla 4.7. se muestran los resultados obtenidos en el cuestionario, expresados como porcentajes (%) de respuestas afirmativas a los enunciados que aparecen en dicho cuestionario. También se indica la desviación estándar (d.e.) de cada uno de los ítems.

**Tabla 4.7. Resultados del cuestionario de profesores**

Ítems	Profesores en activo N = 22		Profesores en formación N = 38		Global N = 60	
	%	d.e.	%	d.e.	%	d.e.
1.a. Se tienen en cuenta las ideas previas.	9,1	6,1	18,4	6,3	15,0	4,6
1.b. Se activan los esquemas de:						
1.b.1. transformación.	36,4	10,3	47,4	8,1	43,3	6,4
1.b.2. transferencia.	9,1	6,1	13,2	5,5	11,7	4,1
1.b.3. degradación.	4,5	4,4	10,5	5,0	8,3	3,6
1.b.4. conservación.	72,7	9,5	63,2	7,8	66,7	6,1
1.c. La conservación de la energía se introduce:						
1.c.1. de forma generalizada.	4,5	4,4	7,9	4,4	6,7	3,2
1.c.2. en forma mecánica.	54,5	10,6	23,7	6,9	41,7	6,4
1.c.3. en forma termodinámica.	9,1	6,1	2,6	2,6	5,0	2,8
2.1. La energía se reduce a cinética y potencial.	40,9	10,5	---	---	40,9	10,5
2.2. Se introducen múltiples formas de energía.	59,1	10,5	---	---	59,1	10,5
2.3. Se introduce la energía de los campos y la de la masa en reposo.	0,0	0,0	---	---	0,0	0,0
3. La conservación de la energía						
3.1. es un principio.	40,9	10,5	10,5	5,0	21,7	5,3
3.2. es un teorema.	9,1	6,1	0,0	0,0	3,3	2,3
3.3. No se diferencia entre principio y teorema	50,0	10,7	89,5	5,0	75,0	5,6

Resulta muy reducido el porcentaje de profesores, tanto en activo (9,1 %) como en formación (18,4 %), que creen conveniente considerar las ideas previas de los alumnos al introducir el concepto de energía (ítem 1).

De los cuatro aspectos fundamentales de dicho concepto, la conservación aparece, para los profesores en activo y en formación, como la más importante (72,7 y 63,2 % respectivamente). La transformación es introducida por el 36,4 y 47,4 % de los profesores. Sin embargo, la transferencia es considerada por un número menor (9,1 y 13,2 %),

mientras que un porcentaje todavía más reducido (4,5 y 10,5 %) propone la degradación de la energía en la introducción de dicho concepto.

En correlación con los resultados del análisis de textos, las cifras anteriores ponen de manifiesto que la energía se enseña fundamentalmente a través de su conservación y transformación. La transferencia se tiene en cuenta en menor medida y la degradación en un grado todavía más pequeño. Las consecuencias de este tipo de enseñanza se manifiestan en una visión de la energía alejada completamente de los fenómenos cotidianos como el consumo de combustibles, la crisis energética, etc., imposibles de explicar por medio de la conservación.

Un reducido número de profesores en activo y en formación (13,6 y 36,8 % respectivamente) propone una enseñanza de la energía de una forma general, partiendo de unas definiciones no mecánicas de energía y trabajo. La relación entre los dos conceptos se realiza por medio de la relación  $W = \Delta E$ .

Resulta elevado el número de profesores en activo (60 %) que, de acuerdo con nuestra hipótesis, introduce la conservación de la energía exclusivamente en mecánica. Contrariamente, sólo el 23,7 % de los profesores en formación presentaría la energía exclusivamente desde la mecánica. Dicha enseñanza es realizada por los procedimientos tradicionales: definición de trabajo, energía cinética y potencial, deducción del teorema de las fuerzas vivas, aplicación de dicho teorema a fuerzas conservativas y, finalmente, a las no conservativas (rozamiento).

La introducción de la energía en termodinámica es aceptada por el 9,1 % de los profesores en activo y por un porcentaje menor en el caso de los profesores en formación. En este caso, se realiza introduciendo el concepto de energía interna y el de calor como transferencia de energía, formulando la conservación como  $\Delta E_{\text{sistema}} = Q + W$ .

En el ítem 2 se espera encontrar, de acuerdo con nuestra hipótesis, que los profesores presenten una visión limitada de las clases de energía. En un caso aparecerán múltiples formas de energía y, en otros, se reducirán a la cinética y potencial. Los resultados indican que el 40,9 % de los profesores en activo piensan que toda la energía puede reducirse a cinética y potencial, sin considerar la energía de los campos y de la masa en reposo. Por otra parte, algunos profesores indican varias formas de energía como la nuclear, calorífica, interna, química, del sonido, solar, eólica, motora o calorífica. Sólo tres profesores hacen referencia a la energía del campo electromagnético.

La mitad de los profesores en activo y el 89,5 % de los profesores en formación encuestados muestran dificultades en diferenciar un principio de un teorema (ítem 3). Con referencia a la conservación de la energía, algunos profesores del primer grupo seña-

lan: “es un principio pero si se comprueba pasa a ser teorema”, “si la energía se conserva es principio y si se transforma, teorema”, etc.

Para el 52,6 % de los profesores en formación, un enunciado se puede determinar como principio o teorema en base a su demostrabilidad, como se pone de manifiesto en las siguientes opiniones: “un principio es algo que se enuncia pero que resulta difícil de demostrar, mientras que un teorema es demostrable”, “un principio es lo que tomamos como un enunciado no experimentado”, “los teoremas son el resultado de una experiencia”, “un teorema es una teoría comprobada”, “un teorema se cumple siempre y ha sido demostrado a partir de la experiencia”. En otros casos (13,2 %), la diferencia entre principio y teorema se encuentra en su grado de cumplimiento: “un teorema se cumple siempre y un principio, no”, “un teorema siempre se cumple, un principio es una teoría”. También se asocian los teoremas a una deducción matemática: “un principio no requiere un desarrollo matemático”. Por último, un profesor en formación indica que “un teorema es una relación entre dos o más magnitudes, mientras que un principio nos dice que existe una relación entre dos o más magnitudes sin decir cómo están relacionadas”.

La conservación de la energía es considerada como principio por el 40,9 % de los profesores en activo y por el 10,5 % de los profesores en formación, mientras que ninguno de éstos reconoce dicha conservación como teorema, frente a un 9,1 % de aquéllos. Resulta destacable señalar que ninguna respuesta de ambos grupos hace referencia al carácter general de la conservación de la energía, aplicable a todos los campos de la física.



## **CAPÍTULO 5**

### **FORMULACIÓN Y FUNDAMENTACIÓN DE LA SEGUNDA HIPÓTESIS**

Los resultados analizados en el capítulo anterior muestran que la presentación que los libros de texto y los profesores hacen de la energía no tiene en cuenta las ideas previas de los alumnos, y no clarifican los límites de su conservación en mecánica y termodinámica. Por otra parte, la enseñanza de la energía se realiza a través de su conservación y transformación y, en mucha menor medida, por su transferencia y degradación. Tampoco se muestra que la conservación de la energía es un principio fundamental de toda la física y, en consecuencia, no se citan las contribuciones al concepto de energía de otros campos de la física, como el electromagnetismo, la relatividad o la física cuántica.

#### **5.1. Formulación de la segunda hipótesis**

A pesar del carácter negativo de los resultados anteriores, creemos que es posible una enseñanza de la energía, que tenga en cuenta y supere las deficiencias observadas. De acuerdo con todo ello, formularemos la segunda hipótesis en los siguientes términos:

**“Es posible realizar una enseñanza de la energía que parta de las ideas alternativas de los alumnos para presentar la energía como un concepto unificador de toda la física, desarrollar su conservación, transformación, transferencia y degradación, mostrar el estatus de principio con respecto a su conservación y señalar las limitaciones de su conservación en las diversas formulaciones que aparecen en mecánica y termodinámica”.**

#### **5.2. Fundamentación de la segunda hipótesis**

Con el objeto de fundamentar la segunda hipótesis se plantearán las bases del constructivismo como modelo de enseñanza/aprendizaje. Dichas bases ya han sido desarrolladas en varios trabajos (Solbes 1986 y 1993, Carrascosa 1987, Lloréns 1987, San-

martí 1989, Azcárate 1990, Payá 1991, Guisasola 1996, Traver 1996, Hernández 1997), convergentes con éste, por lo que nos limitaremos a una presentación breve de las mismas. A continuación, se expondrán los criterios basados en la bibliografía y en la investigación educativa que se han utilizado para desarrollar una propuesta de enseñanza/aprendizaje de la energía dentro del marco del modelo didáctico indicado.

### **5.2.1. La introducción de la energía de acuerdo con el constructivismo**

El análisis crítico de la enseñanza por transmisión oral y las investigaciones sobre las ideas alternativas de los alumnos han tenido como consecuencia la propuesta de un nuevo modelo de enseñanza/aprendizaje. En dicho modelo, denominado constructivista, se recogen las aportaciones indicadas, así como algunos aspectos de la teoría cognoscitiva de Piaget. En concreto, Posner *et al.* (1982) consideran relevante la idea de adaptación, es decir, los cambios que se producen en la estructura cognoscitiva durante las etapas evolutivas. Por otra parte, también se ha integrado en el modelo constructivista el concepto de aprendizaje significativo (Ausubel 1976). En este tipo de aprendizaje los nuevos conceptos se relacionan con otros ya existentes en la persona. Este hecho permite diferenciarlo del aprendizaje memorístico, en el que no se produce ninguna conexión. Como consecuencia, en el primer caso la nueva información tiene significado para el que la recibe pero resulta sin sentido en el segundo.

El modelo constructivista se fundamenta en el principio básico de que el conocimiento se construye en la mente del estudiante. (Driver y Bell 1986). A partir de dicha consideración, el constructivismo señala que:

- el proceso de aprendizaje de nuevos conceptos depende de las ideas previas del estudiante. Estas ideas pueden interferir de forma importante en dicho proceso (Driver y Bell 1986).

- el aprendizaje supone la construcción de significados por parte del estudiante (Driver y Bell 1986). Esta construcción implica que los nuevos conceptos deben relacionarse con los que ya se poseen (Ausubel 1964) así como la creación de relaciones entre ellos (Driver y Bell 1986). Por tanto, el aprendizaje no se produce por la mera presentación de conceptos nuevos (Driver 1988).

- el aprendizaje es un proceso activo en el que continuamente se plantean hipótesis y se revisan durante el proceso de construcción de significados (Driver y Bell 1986).

- una vez contruidos los significados pueden ser rechazados o aceptados (Driver y Bell 1986).

- los estudiantes son los responsables finales de su aprendizaje puesto que ellos dirigen su propia atención a las tareas propuestas para el aprendizaje y construyen significados por sí mismos (Driver y Bell 1986).

Sólo en nuestro país, el modelo constructivista ha dado lugar a una extensa investigación educativa como lo ponen de manifiesto las tesis doctorales realizadas en el campo de la física y la química por Solbes (1986), Carrascosa (1987), Martínez Torregrosa (1987), Lloréns (1987), Sanmartí (1989), Azcárate (1990), Vilches (1993), Guisasaola (1996), Traver (1996) y Hernández (1997).

## **Implicaciones didácticas del constructivismo**

### **Cambio conceptual**

El aprendizaje de nuevos conceptos resulta significativo para los estudiantes cuando se produce el cambio conceptual, es decir, la sustitución de sus ideas previas por otras. Para que esto tenga lugar, no basta con la transmisión oral de nuevos conceptos, tal como se realiza habitualmente en las clases. Por el contrario, los alumnos deben comprender las limitaciones de sus esquemas conceptuales y reconocer la necesidad de ser sustituidos por otros. Normalmente, la insatisfacción con las ideas previas se produce en los alumnos cuando no pueden explicar ciertos fenómenos ni tampoco realizar predicciones correctas.

La orientación del aprendizaje de la ciencia como cambio conceptual se basa en las semejanzas entre el proceso de adquisición de conocimientos por parte de los alumnos y el método seguido en la investigación científica (Posner *et al* 1982, Gil 1983). En los dos casos, los conceptos se construyen a partir de los preconceptos ya existentes y, en ocasiones, contra ellos. Este paralelismo también se puede establecer entre las consecuencias del proceso citado anteriormente. En los alumnos, el resultado es el cambio de un concepto por otro (cambio conceptual), mientras que en la construcción científica se produce la sustitución del modelo o paradigma vigente.

De acuerdo con Posner *et al.* (1982) la sustitución de un concepto por otro no es un proceso fácil. Para que se produzca el cambio, es necesario que el nuevo concepto reúna tres características. En primer lugar debe ser inteligible, es decir, los estudiantes deben entenderlo. El concepto también debe resultar plausible, entendiendo este término como la posibilidad de que los alumnos pueden relacionarlo con sus ideas previas. Por último, el nuevo concepto tiene que explicar otros fenómenos y ser capaz de realizar predicciones.

Dentro del marco general del constructivismo y de la enseñanza como cambio de conceptos, se han propuesto diferentes métodos de aprendizaje. En concreto, Driver y Bell (1986) señalan los pasos que se deberían seguir para conseguir la sustitución de unos conceptos por otros:

- Explicitación por parte de los alumnos de sus ideas previas.
- Presentación de fenómenos para su interpretación por medio de los modelos conceptuales de los estudiantes. Dichos fenómenos deben ser elegidos de forma que cuestionen las ideas alternativas de los alumnos.
- Introducción de nuevos conceptos por medio de actividades que permitan a los alumnos realizar hipótesis o interpretaciones alternativas.
- Utilización de las nuevas ideas en un gran número de situaciones.

### **Cambio metodológico**

La investigación educativa ha demostrado (Engel y Driver 1986, White y Gunstone 1989) que ciertos preconceptos no desaparecen a pesar de la utilización de un proceso constructivista de aprendizaje entendido como cambio conceptual. Este hecho pone de manifiesto la necesidad de analizar con mayor profundidad el modelo constructivista como cambio conceptual, con el objeto de determinar sus carencias.

Gil *et al.* (1991) señalan que, asociado a los esquemas conceptuales de los estudiantes, existe un procedimiento de trabajo que permite la construcción de los preconceptos y las relaciones entre ellos. Dicho método guarda una semejanza muy notable con los procedimientos de la física pregaleiliana, caracterizados por:

- aceptar como ciertas las interpretaciones de fenómenos, sin tener en cuenta otras explicaciones alternativas.
- extraer conclusiones basadas en evidencias, cualitativas y no controladas, del sentido común.
- generalizar las observaciones de una forma incuestionable y aplicarlas incoherentemente a diferentes fenómenos.

Por otra parte, conviene destacar que la transición de la física aristotélica a la galileana supuso la adopción de un método de trabajo diferente al expuesto más arriba. Si se quiere realizar en los alumnos la sustitución de sus preconceptos por conceptos científicos, también ha de producirse en ellos un cambio en el método de trabajo. La transformación de las formas de razonamiento espontáneo de los alumnos, como la causalidad lineal o el razonamiento secuencial, tendrá lugar si se crean situaciones que permitan a los estudiantes la utilización del método propio del trabajo científico. De esta forma, la diferenciación entre actividades de introducción de conceptos, resolución de problemas o trabajos prácticos de laboratorio pierde todo sentido, dado que en todas ellas los estudiantes deben hacer uso de la metodología de la ciencia. Por tanto, en el proceso de aprendizaje, el cambio conceptual en los alumnos supone también un cambio metodológico (Gil y Carrascosa 1985).

La estrategia de enseñanza citada anteriormente (Driver y Bell 1986) presenta un problema fundamental. El hecho de que las respuestas de los estudiantes sean cuestionadas con el objeto de sustituir un conocimiento previo por otro científico, produce efectos negativos. Su utilización reiterada provoca en los alumnos actitudes de inhibición o de rechazo. Por otra parte, crea una visión deformada de la ciencia, dado que los conocimientos científicos no se construyen para cuestionar conceptos. Por el contrario, son consecuencia de la resolución de problemas. Con el objeto de evitar estas dificultades, se ha propuesto (Gil *et al.* 1991) realizar el proceso de aprendizaje por medio de actividades que planteen situaciones problemáticas de interés que los alumnos abordarán siguiendo el método del trabajo científico.

### **Cambio actitudinal**

Solbes y Vilches (1989, 1992, 1997) han puesto de manifiesto que los estudiantes muestran una actitud negativa ante la física y la química así como un desinterés por su aprendizaje. Como causas de estos hechos, los alumnos señalan, entre otras, el método de enseñanza, la realización de pocos trabajos prácticos y la escasa presencia de aspectos técnicos o sociales de la ciencia.

Un cambio actitudinal de los estudiantes supone que éstos muestren ante la ciencia una posición activa, crítica y positiva. Al mismo tiempo, implica la visión de la ciencia como algo accesible, situada en el contexto social. Los investigadores citados anteriormente han demostrado que se produce una importante variación en la actitud de los estudiantes cuando se introducen en la enseñanza actividades que contemplan las relaciones ciencia/técnica/sociedad. Por otra parte, este tipo de actividades también producen una importante mejora en el aprendizaje porque establecen conexiones entre el mismo y los intereses personales de los alumnos (Pope y Gilbert 1983).

### **El programa de actividades**

La enseñanza/aprendizaje de la física a través del modelo constructivista, entendido como cambio conceptual, metodológico y actitudinal, puede realizarse por medio de un programa de actividades. Consiste en una serie de tareas formuladas como situaciones problemáticas de interés (Gil *et al.* 1991) y desarrolladas siguiendo un hilo conductor que da coherencia y unidad al conjunto. Dichas situaciones han de permitir a los alumnos poner en práctica el método del trabajo científico.

El programa de actividades se elabora en base a tres tipos de tareas: iniciales, de desarrollo y finales (Furió y Gil 1978). Las primeras tienen como objetivo introducir a los estudiantes en el tema, conocer sus ideas previas y establecer el hilo conductor. Las

actividades de desarrollo permiten la construcción de conceptos por medio del establecimiento de relaciones cualitativas entre magnitudes, introducción de definiciones operativas y utilización de dichos conceptos. En este grupo también se incluirían los problemas, los trabajos de laboratorio y las actividades que contemplan los aspectos técnicos y sociales de la ciencia. Estas actividades permiten que los estudiantes utilicen los procedimientos del trabajo científico con el fin de producir en ellos un cambio metodológico. Por medio de las actividades finales, los alumnos realizan comparaciones entre conceptos, buscan semejanzas y diferencias y elaboran síntesis.

La aplicación en el aula del programa de actividades supone, como paso previo, la distribución de los estudiantes en pequeños grupos, formados por un número máximo de cinco alumnos. La realización de cada actividad se desarrolla en dos pasos. Durante el primero, los miembros de cada grupo discuten la actividad. A continuación se realiza una puesta en común. Para ello, el portavoz de cada grupo expone sus conclusiones o bien se pide la respuesta de un grupo que es comentada por los demás. El profesor sintetiza, clarifica y completa, en su caso, las conclusiones.

Los programas de actividades que figuran en el capítulo 6 y en el anexo de esta memoria se han desarrollado teniendo como marco de referencia el modelo constructivista y el proceso de aprendizaje como cambio conceptual, metodológico y actitudinal, de acuerdo con las consideraciones expuestas anteriormente.

### **5.2.2. Criterios para el diseño de un curriculum para la enseñanza/aprendizaje del concepto de energía y de su conservación**

En la Enseñanza Secundaria, BUP y Bachillerato, la enseñanza de la energía y de sus aspectos básicos se realiza normalmente a través de la mecánica y, en mucha menor medida, a través de la termodinámica (en realidad, termoquímica). Con el objeto de conocer las características de la forma en que los profesores y los libros abordan dicho concepto, se revisarán y se analizarán los diferentes métodos empleados en el desarrollo del concepto de energía en los dos campos citados.

#### **5.2.2.1. Mecánica**

##### **Leyes de Newton**

Normalmente, las leyes de Newton de la dinámica son consideradas, de manera explícita o implícita, como los principios fundamentales. A partir de ellas, se deducen teoremas como la conservación del momento angular o de la energía, sin señalar sus lími-

tes de validez (determinados por las leyes de las que se obtuvieron) o su carácter de principio general, a pesar de su consideración como teorema.

En nuestro proyecto presentaremos la conservación de la energía mecánica como un teorema pero se mostrará el proceso histórico por el que alcanza el estatus de principio.

## Trabajo y energía

Normalmente el trabajo se introduce por medio de una definición operativa como el producto de una fuerza por el desplazamiento de su punto de aplicación. Sin embargo, se ignoran las relaciones cualitativas entre el trabajo y la energía. De esta forma, no se reconoce el carácter del trabajo como mecanismo de transferencia de energía al sistema (Bauman 1992a). Este hecho ha sido puesto de manifiesto en el análisis de libros de texto de nivel básico realizado por Michinel y D'Alessandro (1994). La primera relación cuantitativa entre el trabajo y la energía se suele establecer posteriormente a través del teorema de las fuerzas vivas.

Las críticas a la energía como capacidad de hacer un trabajo son de varios tipos. Unas se refieren a los límites de validez: la energía, definida de ese modo, sólo puede ser utilizada en Mecánica pero no en Termodinámica (Duit 1981, 1984; Sexl 1981, Kemp 1984). Otros argumentos apuntan a los múltiples significados que el concepto de trabajo tiene en la vida cotidiana, diferentes del concepto utilizado en la física (Duit 1981, Richmond 1982). En otras investigaciones (Shadmi 1984) se señalan objeciones a algunos aspectos del proceso de introducción de la energía: la definición de los conceptos físicos por medio de expresiones matemáticas, sin mencionar primero su significado físico; la extensión de la definición de energía a todas sus formas, incluyendo la energía térmica, o la ruptura entre la enseñanza primaria y secundaria con respecto al concepto de energía.

Frente a las críticas anteriores, Warren (1982, 1986) mantiene que la energía debe ser enseñada de forma rigurosa, con términos científicos y retrasada hasta que los alumnos hayan alcanzado un alto nivel de razonamiento abstracto. Por otra parte, los términos calor y trabajo son fundamentales y están perfectamente definidos (Warren 1986), mientras que el hecho de que la segunda ley de la termodinámica limite el trabajo realizado por una máquina cíclica no se puede considerar como una invalidación del concepto de energía como capacidad para realizar un trabajo (Warren 1982, 1986).

Consideramos que los conceptos de trabajo y de energía se deben introducir simultáneamente, de forma cualitativa. De acuerdo con Maxwell (1877), se podría presentar el trabajo como la transformación de la materia a través de interacciones y la energía

como la capacidad de un sistema para producir transformaciones y, en particular, trabajo. Las definiciones propuestas permitirían llegar fácilmente a la idea de la variación de la energía cuando se produce un trabajo, es decir, a considerar el trabajo como una forma de transferir energía a un sistema. Dicha relación entre trabajo y variación de energía puede establecerse cuantitativamente después de la introducción de una definición operativa de trabajo.

### **Teorema de las fuerzas vivas**

Después de definir el trabajo, los libros de texto parten de la segunda ley de Newton de la dinámica para establecer el teorema de las fuerzas vivas, de la energía cinética o del trabajo-energía, según algunos autores norteamericanos (Resnick y Halliday 1965, Bauman 1992a, Tipler 1995). Dicho principio se puede enunciar de la siguiente forma: el trabajo realizado por la fuerza resultante sobre una partícula es igual a la variación de una magnitud que se denomina energía cinética.

Con respecto al teorema de las fuerzas vivas conviene hacer algunas precisiones. En primer lugar, los alumnos debería tener claro que se trata de un teorema, es decir de una conclusión deducida matemáticamente de una ley que se considera fundamental. También es necesario mostrar las limitaciones de dicho teorema: se aplica en el caso de que un cuerpo sólo pueda experimentar variaciones de energía cinética. Si se utiliza en otras situaciones en las que el cuerpo posee otras clases de energía, se producen errores (Bauman 1992a).

### **Energía cinética y potencial**

En la enseñanza secundaria la energía potencial se introduce normalmente por medio de la gravitatoria. Para ello, se considera el trabajo necesario para elevar verticalmente y con velocidad constante un cuerpo a una altura determinada. Se indica que se transfiere al cuerpo una energía por medio de dicho trabajo y se denomina energía potencial, es decir, energía debida a la posición. En algunos casos se introduce la energía potencial elástica. También es frecuente señalar que las fuerzas gravitatorias y elásticas son conservativas, y que sólo en esta clase de fuerzas se puede definir la energía potencial. Sin embargo, no siempre se pueden encontrar referencias a otros aspectos importantes de la energía potencial; en concreto, los que hacen referencia al nivel u origen de la energía potencial y la asignación de dicha energía al sistema o a los cuerpos que interactúan pero no sólo a uno de ellos.

Con respecto a la elección del origen para el cálculo de la energía potencial, algunos textos universitarios (Alonso y Finn 1976, Feynman 1963, Giancoli 1985, Resnick

y Halliday 1965, Tipler 1995) parten de la expresión  $mgh$  de la energía potencial gravitatoria para demostrar que el valor de dicha energía depende del sistema de referencia elegido pero su variación resulta independiente del mismo. Aunque deducida en un caso particular, esta propiedad de la energía potencial es completamente general. Por otra parte, los alumnos pueden quedar confundidos si no se explicita que las expresiones presentadas de la energía potencial gravitatoria o elástica suponen la elección arbitraria de un origen. Esta confusión se hace patente cuando estudian en el Bachillerato una expresión de la energía potencial gravitatoria diferente de la que aparece en la educación secundaria obligatoria y no se relaciona con la conocida, a través de la consideración del origen de las energías potenciales. También conviene destacar el carácter relativo de la energía cinética (Gil *et al.* 1996) y la importancia de considerar sus variaciones y no su valor en un sistema.

La asignación de la energía potencial al cuerpo situado en el campo gravitatorio creado por otro de masa mucho mayor (normalmente la Tierra) es un error frecuente en los libros de texto. Dicho error ha sido analizado por diversos autores (Poon 1986, McClelland 1989). En algunos casos se asocia la energía potencial con el sistema pero se asigna la variación de la energía a uno de los cuerpos que forman el sistema (McClelland 1989). Algunos libros de texto (Resnick y Halliday 1965, Tipler 1995) analizan el sistema formado por dos cuerpos, siendo la masa de uno de ellos mucho mayor que la del otro. Un ejemplo de este sistema sería el formado por la Tierra y un objeto situado en ella. En este caso, se puede demostrar (Resnick y Halliday 1965) que la transformación de la energía potencial del sistema en energía cinética da lugar a una variación importante de dicha energía en el cuerpo ligero y prácticamente nula en el cuerpo pesado. Por tanto, el movimiento del cuerpo de masa mayor es prácticamente nulo. Sólo en estas situaciones se podría asignar, aunque de forma incorrecta, la energía potencial al cuerpo (Resnick y Halliday 1965, Tipler 1995). En nuestra propuesta didáctica se indica siempre que la energía potencial gravitatoria corresponde al sistema formado por la Tierra y el cuerpo porque creemos que los alumnos deben ser conscientes de que la energía potencial no se puede atribuir a cada uno o a sólo uno de los cuerpos que forman un sistema. Por el contrario, es una propiedad del sistema en conjunto y depende de la configuración del mismo (Resnick y Halliday 1965, Tipler 1995).

Poon (1986) y Bauman (1992a) proponen el análisis de un caso concreto para explicar que la energía potencial se localiza en el campo. Si una persona eleva un cuerpo verticalmente, las fuerzas que actúan sobre él son el peso y la fuerza de la persona. Ambas fuerzas tendrán la misma dirección pero sentidos contrarios. El trabajo total realizado sobre el cuerpo (que se toma como sistema) será cero y no se producirá ninguna transferencia de energía al cuerpo. ¿Por qué razón se dice entonces que la energía potencial del cuerpo ha aumentado? La persona hace sobre el cuerpo un trabajo positivo, lo cual supone una transferencia de energía de la persona al cuerpo. Por otra parte, el campo

gravitatorio realiza un trabajo negativo, es decir, existe una transferencia de energía del cuerpo al campo gravitatorio. En el proceso de subida se está produciendo, por tanto, una transferencia de energía de la persona al cuerpo y de éste al campo. Se puede decir que la altura del cuerpo ha aumentado pero no su energía potencial, que se encuentra almacenada en el campo.

Un aspecto de la energía potencial relacionado con su correcta localización es el de la elección del sistema donde se aplica (Arons 1989, Bauman 1992a). Esta elección resulta particularmente importante por dos motivos. En primer lugar, permite determinar si las fuerzas son externas al sistema para calcular el trabajo realizado por las mismas. Por otra parte, la elección del sistema establece si un término debe ser considerado energía potencial o trabajo externo (Sherwood 1983, Resnick, Halliday y Krane 1992). La falta de claridad en este punto da lugar a que los estudiantes incluyan dos veces el mismo término, con nombres diferentes, en la aplicación del principio de conservación de la energía mecánica (Sherwood 1983). Por ejemplo, si un cuerpo cae desde una altura  $h$  en el campo gravitatorio terrestre, es frecuente escribir  $mgh = \Delta E_c - mgh$ . Este error muestra que se ha elegido como sistema el cuerpo, por lo que la Tierra hace sobre él un trabajo externo,  $mgh$ , que aparece en la parte izquierda de la ecuación. Al mismo tiempo, se considera que el sistema está formado por la Tierra y el cuerpo, por lo que existe una energía potencial  $mgh$  que figura en el segundo miembro de la igualdad.

En nuestro proyecto se presenta la energía potencial gravitatoria a través del análisis de un cuerpo situado en el campo gravitatorio de la Tierra. A continuación, se relaciona la variación de energía potencial con el trabajo realizado por la fuerza gravitatoria. También se consideran dos aspectos relevantes de la energía potencial. En primer lugar, dicha energía aparece como una propiedad del sistema Tierra-cuerpo, la cual no se puede asignar sólo al cuerpo. Después se aborda el carácter relativo de su valor y el absoluto de sus variaciones, de acuerdo con el origen elegido para su cálculo. En el nivel superior se presenta la energía potencial elástica y se relacionan los resultados obtenidos en este apartado con el teorema de las fuerzas vivas.

## **Transformación y transferencia de la energía**

El tratamiento que los libros de texto dan a la energía en mecánica activa en los alumnos los esquemas de su transformación y conservación. Sin embargo, la transferencia y la degradación apenas se utilizan, a pesar de que los cuatro aspectos indicados se consideran necesarios para la comprensión del concepto de energía (Duit 1981, 1984). Una prueba de ello es la escasa utilización de las cadenas de transformación y transferencia de energía (Ellse 1988). Sin embargo, la cuestión de las formas de energía y su transformación ha sido cuestionada (Ellse 1988, Adams 1989). De acuerdo con este planteamiento, la transformación de la energía y la identificación de sus formas propor-

cionan una descripción sencilla pero engañosa de los procesos. Dicha descripción puede ser sustituida por otra centrada en la transferencia, concepto más útil e importante para la comprensión de los intercambios de energía. Esta posición ha dado lugar a un intenso debate (Mace 1988, Taylor 1989a, Ellse 1989, Taylor 1989b) en el que se han analizado los procesos estacionarios de transferencia de energía. Consideramos importante que los alumnos desarrollen los aspectos de transformación y transferencia de energía.

De acuerdo con lo anterior, en nuestro proyecto alternativo de enseñanza de la energía se propondrán actividades de transformación y transferencia de energía así como la realización de cadenas de procesos en los que se identificarán las formas de energía, y el trabajo o el calor como mecanismos de transferencia.

### **Conservación de la energía mecánica**

La conservación de la energía se plantea en la mecánica como un teorema deducido a partir de la segunda ley de Newton, sin indicar que se trata de un principio de toda la física y de todas las ciencias. La secuencia seguida para la introducción de la conservación de la energía mecánica comienza por la definición de un trabajo puramente mecánico, entendido como el producto de la fuerza por la distancia que se desplaza su punto de aplicación. A continuación, se definen las energías cinética y potencial. Por último, se deduce la conservación de la energía a partir de la segunda ley de Newton.

En los sistemas de partículas se llega a una expresión de conservación de la energía por medio de un procedimiento análogo al descrito. Sin embargo, se debe tener en cuenta la tercera ley de Newton como hipótesis complementaria.

La deducción que se hace de la conservación de la energía, tanto para una partícula como para un sistema de ellas, se considera que constituye un error metodológico. Una expresión que se obtiene matemáticamente de un principio, es un teorema. Si la conservación de la energía mecánica se ha derivado de las leyes de Newton, necesariamente tiene que ser contemplada como un teorema pero muchos textos la presentan como un principio. Esta visión de la situación hace que se olvide que, en la física, los nuevos principios son experimentales, es decir, hipótesis verificadas por la experiencia. La conservación de la energía tiene la categoría de principio universal. A partir de él se puede deducir la conservación de la energía en mecánica, pero la operación contraria es imposible. Por otra parte, el principio de conservación de la energía se cumple incluso en los casos en que la tercera ley de Newton no es válida. Por tanto, la conservación de energía en mecánica debe ser contemplada como un caso particular de un principio universal o como un teorema deducible de las leyes de la dinámica pero no como un principio. Por otra parte, el trabajo de rozamiento se define operativamente pero no se relaciona con aspectos del calor o de energía interna. De esta forma, no se clarifican los límites de validez de

la conservación de la energía mecánica ni se muestra la necesidad de un principio más general.

El principio generalizado de conservación de la energía se presenta en muy pocas ocasiones. Unos libros de texto lo hacen por medio de múltiples tipos de energía: mecánica, eléctrica, magnética, térmica, elástica, acústica, luminosa, química, etc. que se transforman entre sí. En otros, se considera que todas las energías son reducibles a dos, la cinética y la potencial, incluyendo en ésta la energía gravitatoria, electromagnética, nuclear, etc. La reducción de la energía a sólo dos clases representa un gran avance didáctico con respecto al planteamiento anterior porque evita la multiplicidad de energías. Sin embargo, revela una concepción mecanicista de la física al olvidar la energía de los campos o la de la masa en reposo. Del mismo modo, no considera que la energía potencial es un caso particular de la energía de interacción entre las partículas y un campo cuando éste es conservativo.

La conservación de la energía mecánica se presenta en nuestro proyecto como un teorema obtenido a partir del teorema de la energía cinética y de la relación entre la variación de energía potencial y el trabajo realizado por las fuerzas conservativas. A continuación, se pide a los alumnos que indiquen situaciones en las que parece que no se conserva la energía mecánica. De esta forma, se analizan dos fenómenos: el movimiento de un cuerpo en un plano inclinado con rozamiento y el choque de una pelota que se mueve verticalmente. Dichas situaciones permiten mostrar que la energía mecánica no se conserva en los procesos que implican una transformación de la energía mecánica en energía interna, como ocurre con los choques inelásticos y las situaciones en las que existe rozamiento. De esta manera, se introduce de forma natural la energía interna y aparece el calor como un proceso de transferencia de energía, diferente del trabajo. Al mismo tiempo, quedan establecidos los límites de validez del teorema de conservación de la energía mecánica y se señala a los estudiantes el carácter de principio que tiene conservación de la energía en todos los campos de la física, a pesar de haber sido derivado como un teorema en el caso de la energía mecánica. También se anuncia a los alumnos que a lo largo del curso que están realizando y del siguiente se mostrarán otros aspectos de la energía, que amplían la visión que tienen hasta el momento de este concepto.

Aunque no se suele introducir la primera ley de la termodinámica en el tema de mecánica, creemos conveniente hacerlo. En el nivel elemental se presenta como  $W_{\text{ext}} + Q = \Delta U$ , donde  $U$  representa la energía interna. Sin embargo, en el nivel superior se utiliza la formulación  $W_{\text{ext}} + Q = \Delta E$ , siendo  $E$  la energía total, es decir, la suma de las energías cinética, potencial e interna. De este modo, los estudiantes puedan analizar situaciones mecánicas en las que parece no conservarse la energía. Previamente a su introducción, se presenta la energía interna desde el punto de vista microscópico, y el calor como mecanismo de transferencia de energía. De la misma forma que se ha hecho en el caso del teorema de la conservación de la energía mecánica, se indica que la primera ley

de la termodinámica, en su formulación tradicional, no es el principio de conservación de la energía de toda la física, aunque su campo de aplicación es mayor que el de la energía mecánica. Se puede adelantar que en el enunciado de la primera ley de la termodinámica no aparecen otros tipos de energía, tales como la energía de los campos y la de la masa en reposo que se estudiarán con posterioridad.

## Sistemas de partículas

En mecánica se obtiene el *teorema de las fuerzas vivas* por integración de la segunda ley de Newton aplicada a una partícula. La expresión obtenida es

$$W_{\text{res}} = \Delta E_c$$

La ecuación anterior será válida para una partícula pero no para sistemas que no se comportan como tal. En concreto, se obtienen resultados incorrectos cuando las partes del sistema no se mueven de la misma forma (sistemas deformables) o en el proceso ocurren transformaciones de energía diferentes de la cinética, dado que ésta es la única que puede tener una partícula (Arons 1999). Si se considera un coche que se mueve con cierta velocidad, choca contra una pared y se detiene, la variación de la energía cinética del coche no es cero pero el trabajo hecho por la pared es nulo. Por tanto, no se cumple el teorema de las fuerzas vivas de una partícula.

Si se tiene un sistema de partículas y se utiliza el mismo procedimiento (Sherwood 1983), se llega a una expresión similar al teorema de las fuerzas vivas

$$\int (\sum \vec{F}_i) \cdot d\vec{r}_{c,cm} = \Delta E_{c,cm}$$

donde *cm* se refiere al centro de masas. Esta expresión se llamará en lo sucesivo *ecuación CM*.

La expresión anterior se parece al teorema de las fuerzas vivas de una partícula pero hay una diferencia fundamental. *El teorema de las fuerzas vivas es una forma del principio de conservación de la energía* para una partícula porque la única forma de energía que puede poseer una partícula es la cinética. Sin embargo, *la ecuación CM no representa un enunciado de la conservación de la energía* por dos razones: el primer miembro no es el trabajo realizado por las fuerzas externas sobre el sistema. En efecto, el trabajo que aparece en dicha ecuación se calcula sumando el producto de cada fuerza por el *desplazamiento del centro de masas*. Por otra parte, el segundo miembro de la ecuación no es igual a la variación de la energía total del sistema. En realidad, la ecuación CM relaciona de forma correcta magnitudes dinámicas del centro de masa (las fuerzas externas y la variación de la velocidad del centro de masas) pero no describe de forma apropiada las transformaciones energéticas del sistema.

Cuando la ecuación CM se aplica en algunos problemas tradicionales de mecánica, no se describen de forma apropiada las transformaciones de energía que tienen lugar (Sherwood 1983, Arons 1989). Por ejemplo, si se arrastra un cuerpo con velocidad constante sobre una superficie horizontal con rozamiento, las fuerzas que actúan son la exterior  $f$  y la del rozamiento  $-f$ . Por tanto, el trabajo resultante es  $fd - fd$ , igual a cero. Si se aplica la ecuación CM se tiene que  $fd - fd = \Delta(1/2Mv^2)$ . Este resultado es coherente porque indica que la variación de la energía cinética es cero. Aunque se sabe que el cuerpo se calienta porque aumenta su energía interna, este hecho no aparece en la ecuación CM, dado que no es una ecuación energética. El resultado anterior se puede generalizar a los problemas en que aparece la fuerza de rozamiento y a otros entre los que figuran los sistemas deformables con fuerzas que no hacen trabajo.

Dado que la ecuación CM es una relación entre variables dinámicas pero no una ley de conservación de la energía, resulta independiente del principio de conservación de la energía en su formulación como primera ley de la termodinámica, teniendo en cuenta que no se debe confundir el término del trabajo que aparece en la misma con el pseudo-trabajo de la ecuación CM. Dada la independencia de las dos ecuaciones, se pueden utilizar simultáneamente en los problemas mecánicos de traslación (Sherwood 1983, Arons 1989, Resnick, Halliday y Krane 1992) y rotación (De Sousa y Pina 1997). Si se considera el ejemplo anterior de un cuerpo que se mueve con velocidad constante sobre una superficie con rozamiento y se utiliza la primera ley de la termodinámica en el sistema formado por el cuerpo y el suelo, se obtiene  $\Delta U = fd$ , es decir, se produce un aumento de la energía interna del sistema. Aunque la utilización simultánea de la ecuación CM y de la primera ley de la termodinámica permite un análisis riguroso de ciertos problemas de mecánica, se considera que esta aproximación es demasiado complicada para alumnos de enseñanza secundaria o de bachillerato. Pensamos que deberían utilizar sólo la primera ley de la termodinámica porque permite una interpretación coherente de situaciones en las que se producen variaciones de energía interna como ocurre en los problemas con rozamientos.

### **Trabajo de rozamiento**

En el caso de los problemas relacionados con el rozamiento, es frecuente considerar que el trabajo realizado por la fuerza de rozamiento es igual al producto de dicha fuerza por el desplazamiento del centro de masas. Algunos autores (Sherwood y Bernard 1984, Arons 1989, Bauman 1992a, Resnick, Halliday y Krane 1992) consideran que dicho cálculo es incorrecto porque el desplazamiento de la fuerza de rozamiento resulta desconocido. Por otra parte, se utilizan expresiones del tipo “el trabajo se transforma en calor” o “el trabajo se disipa” cuando se quieren interpretar las transformaciones de

energía que tienen lugar en problemas con rozamiento (Arons 1989) por medio de la conservación de la energía mecánica.

Para ejemplificar estas consideraciones se puede analizar el caso de un cuerpo que parte del reposo y se mueve con rozamiento sobre una superficie horizontal cuando se le aplica una fuerza exterior.

Si se aplica la ecuación CM al sistema formado por el cuerpo, se obtiene

$$(F - F_{\text{roz}}) \cdot x_{\text{cm}} = \Delta E_{\text{c,cm}} = 1/2mv_{\text{cm}}^2$$

donde  $F$  es la fuerza aplicada,  $F_{\text{roz}}$  la fuerza de rozamiento,  $x_{\text{cm}}$  el desplazamiento del centro de masas e  $\Delta E_{\text{c,cm}}$  la variación de la energía cinética del centro de masas y, en este caso, del cuerpo.

Si se aplica la primera ley de la termodinámica al sistema formado por el cuerpo, aparece un problema. El trabajo realizado por la fuerza de rozamiento no se puede calcular porque su desplazamiento no se conoce. Sin embargo, ese problema no existe cuando se toma como sistema al conjunto del cuerpo y del suelo, puesto que la fuerza de rozamiento es ahora interna. Por aplicación de la primera ley de la termodinámica al sistema indicado, se obtiene

$$\Delta E_{\text{c,cm}} + \Delta U = W; \quad 1/2mv_{\text{cm}}^2 + \Delta U = F x_{\text{cm}}$$

de donde resulta que

$$\Delta U = F x_{\text{cm}} - 1/2mv_{\text{cm}}^2$$

Según la expresión anterior, se ha producido una variación de la energía interna del sistema, comprobable porque aumenta la temperatura del cuerpo y del suelo (posteriormente se produciría una transferencia de calor al exterior del sistema). Dicho aumento es igual a la parte de trabajo realizado por la fuerza  $F$  que no ha servido para producir el aumento de energía cinética. Esta interpretación resulta mucho más detallada que la realizada normalmente: “el trabajo de la fuerza de rozamiento se ha transformado en calor” o bien “el trabajo se ha disipado”.

Si se sustituye el resultado obtenido en la aplicación del CM en la última expresión, se obtiene

$$\Delta U = F_r x_{\text{cm}}$$

Esta expresión se puede interpretar de la siguiente forma: el aumento de energía interna se debe al término  $F_r x_{cm}$ . Si dicho término se identificara con el trabajo realizado por la fuerza de rozamiento, se podría decir que la energía interna ha aumentado porque se ha transferido energía al sistema en una cantidad igual al trabajo de rozamiento. El efecto producido por dicha transferencia sería un aumento de la temperatura del sistema. En nuestra propuesta consideramos dicho término como el trabajo realizado por el rozamiento. Como se ha señalado anteriormente, algunos autores (Sherwood y Bernard 1984, Arons 1989, Bauman 1992a, Resnick, Halliday y Krane 1992) consideran que el término  $F_r x_{cm}$  no representa el trabajo de rozamiento.

### **Degradación de la energía**

La degradación de la energía en mecánica no suele aparecer en los libros de texto de nivel secundario. Para interpretar problemas en los que interviene el rozamiento, se utilizan expresiones del tipo “el trabajo se convierte en calor”, “la energía se disipa” o similares, sin clarificar su significado por medio de la energía interna (Arons 1989). Por otra parte, los medios de comunicación transmiten una idea de consumo de la energía, o de agotamiento o crisis, muy diferente de la idea de conservación que se considera en la ciencia. Es muy difícil, por tanto, entender el concepto de conservación de energía sin conocer su degradación (Duit 1987a, Brook y Wells 1988).

En nuestro proyecto creemos que la degradación de la energía debe ser tratada en mecánica. Para ello, se pueden analizar los procesos irreversibles y la pérdida de utilidad de la energía para realizar trabajo cuando se transforma en ciertas clases. Esto se hace por medio del análisis de fenómenos que no se producen en la naturaleza a pesar de cumplir la primera ley de la termodinámica (Strnad 1984). Aunque la idea de energía en el lenguaje cotidiano coincide con la de “exergía” y “energía disponible” (Ogborn 1986, Ross 1988, Viglietta 1989, 1990), no pensamos que sea necesario introducir dichos términos, dado que no van a ser utilizados con posterioridad.

### **Procedimientos alternativos para la enseñanza de la energía**

Los procedimientos para la enseñanza de la energía han sido analizados por Pri-deaux (1996) desde los puntos de vista psicológico y académico. En este último apartado distingue dos categorías: enseñanza a partir del trabajo y a partir de la conservación. En nuestra revisión consideraremos las siguientes clases:

*1) Proyectos en los que se utiliza una definición de energía que no incluye el concepto de trabajo.*

El proyecto desarrollado por el Science Curriculum Improvement Study (SCIS 1971) considera la energía como “la capacidad de los sistemas materiales para producir cambios en ellos mismos o en su entorno”. En los primeros cursos del proyecto Nuffield (1974) se relaciona la energía con el significado coloquial de combustible (Los combustibles hacen tareas (jobs) útiles). El mismo punto de partida es empleado en el proyecto CLISP (Brook y Wells 1988), mientras que en el proyecto LISP (Energy) (Kirkwood y Carr 1989) se define la energía como “lo que se necesita para hacer cosas”. La propuesta de Pérez Landazábal *et al.* (1995) para el nivel secundario utiliza una definición descriptiva de la energía., mientras que la de Hierrezuelo *et al.* (1995) considera que “la energía es una propiedad de los cuerpos o sistemas materiales en virtud de la cual éstos pueden transformarse, modificando su estado o situación, así como actuar sobre otros originando en ellos procesos de transformación”.

En este apartado se podría incluir una aproximación a la energía en la que, partiendo de la definición de energía cinética y del concepto de sistema termodinámico, se desarrolla el concepto de energía sin hacer uso ni del trabajo ni del calor (Kemp 1984).

### 2) *Proyectos que no definen la energía*

Los autores del proyecto PSSC (1980) no creen necesario partir de una definición concreta de energía para el desarrollo del concepto. De la misma opinión es Viglietta (1989). En otros casos, los alumnos parten de sus marcos conceptuales de energía para generalizarlos y establecer una definición (Trumper 1991) o analizar los intercambios entre un sistema y su entorno (van Huls y van den Berg 1993). Caballer *et al.* (1993) realizan una aproximación cualitativa al concepto de energía por medio de su transferencia, conversión, conservación y degradación.

### 3) *Proyectos que relacionan la energía con aspectos sociales de la misma*

Diversos autores (Conforto 1984, Bastai Pratt *et al.* 1984, Viglietta 1989, 1990) han coincidido en señalar que el concepto de energía que se enseña a los alumnos tiene poca relación con los aspectos de la energía que aparecen en la vida cotidiana o en los medios de comunicación. Para ayudar a los estudiantes en la adquisición de conceptos y herramientas que les permitan el análisis de los problemas energéticos cotidianos, se han desarrollado varios proyectos. Conforto (1984) centra su propuesta en las fuentes alternativas de energías y los métodos para reducir las pérdidas de calor. Viglietta (1989, 1990), por su parte, hace énfasis en el “uso eficiente de la energía” (1989), mientras Bastai Prat *et al.* (1984) lo hacen sobre la producción, distribución y consumo de la energía.

El significado que tiene la energía en la vida cotidiana o en los medios de comunicación no coincide con el que es utilizado por los físicos, sino con el de “energía libre” (Ogborn 1986, Ross 1988). A dicho término se le ha dado también los nombre de “exergía” y de “energía disponible” (Ogborn 1986, Ross 1988, Viglietta 1989, 1990)

cuando se presenta a los alumnos. Los autores citados coinciden en la conveniencia de la utilización de dicho concepto en la enseñanza de la energía.

Entre los proyectos dirigidos a profesores destacaremos el “Curso de Formación de Profesores de Ciencias”, constituido por varios bloques. En el primero, “Comprender y orientar los cambios de materia” (Gil *et al.* 1996), se desarrolla el concepto de energía a través de cinco unidades. La primera (“La energía: invención de un concepto fructífero”) introduce los aspectos generales del concepto de energía. En la segunda, “Cambio de energía de los sistemas”, se ponen de manifiesto los problemas de la conservación de la energía mecánica y los que aparecen en la teoría del calórico. Como consecuencia de los mismos se establecen los conceptos de energía interna y de degradación, llegando a la formulación del primer principio de la termodinámica. La transmisión de la energía por medio de ondas aparece en la unidad 3 (“¿Cómo se transmite la energía? Introducción al estudio de las ondas”). En ella se analizan las ondas mecánicas, a través del sonido, y las electromagnéticas tomando como base la luz. Las relaciones de la energía, la sociedad y el medio ambiente se desarrollan en las unidades 4 (“Papel de la energía en nuestras vidas”) y 5 (“Fuentes de energía: problemas asociados a su obtención y uso”).

#### 4) Otras aproximaciones

La energía es considerada por los físicos como una idea abstracta (Warren 1982) que se conserva (Feynman 1969). A los alumnos de los primeros cursos de la educación secundaria, esta idea les resulta muy alejada de sus experiencias cotidianas y, por tanto, de muy difícil comprensión. A partir de esta consideración, se han diseñado unidades para el aprendizaje de la energía en la que se considera a ésta como una sustancia material que está contenida en los cuerpos y que puede fluir de unos a otros en los procesos de transferencia (Falk y Herrman 1979, Schmid 1982, Falk *et al.* 1983).

La conservación de la energía es considerada como el punto de partida para su enseñanza en varios proyectos (Physical Science II 1969, Sexl 1980), de acuerdo con las ideas de Feynman (1969) desarrolladas en un nivel universitario. Posteriormente, han aparecido otros proyectos (Jung *et al.* 1977, 1978; Orpaz *et al.* 1979) basados en las ideas del Physical Science II. Las investigaciones realizadas sobre los resultados de alguno de los proyectos anteriores (Jung *et al.* 1977, 1978) han demostrado las dificultades que presentan los alumnos de los primeros cursos de educación secundaria, debido seguramente al desarrollo de sus esquemas de pensamiento (Jenelten Allkofer 1979), para entender el concepto de conservación de la energía.

Aunque la introducción de la energía se hace normalmente a través de la mecánica, Viglietta (1990) la realiza por medio de la termodinámica. Considera que la conservación de la energía no se comprende sin la degradación, aspecto contemplado en el segundo principio de la termodinámica. Por tanto, este aspecto de la energía debería ser presentado antes que la conservación (Duit 1984, Solomon 1985, Ross 1988, Brook y

Wells 1988, Viglietta 1989). El proyecto “Energy and Change” parte de la idea de “diferencias”, como calor y frío, que corresponde al concepto físico de energía libre o entropía negativa. Dichas diferencias dirigen los cambios en los sistemas en el sentido de que se produzca una disminución de tales diferencias. De esta manera, la entropía aumenta (Boohan y Ogborn 1996). La aplicación de este proyecto ha sido analizada por Stylianidou 1997. Leff (1996) propone un estudio de la termodinámica en el que se considera que la energía se extiende por el sistema y es compartida por los diferentes modos microscópicos de almacenamiento. En el proyecto de Martínez y Pérez (1997) se construyen los conceptos de energía interna y temperatura como paso previo que conduce a la introducción del calor y del trabajo.

### 5.2.2.2. Termodinámica

Los sistemas termodinámicos están formados por un número de partículas superior a  $10^{23}$  por lo que resulta imposible describirlos de forma microscópica. Dicha descripción supondría conocer las posiciones, velocidades y aceleraciones de cada una de las partículas. La termodinámica utiliza un procedimiento macroscópico para lo cual emplea variables, como la presión, el volumen o la temperatura, que se refieren al sistema pero no a sus partes y que pueden ser medidas.

### Sistema termodinámico

La importancia del concepto de sistema en el contexto termodinámico ha sido señalada por Arons (1989). Otros autores destacan además la relevancia de otros conceptos relacionados como límite, entorno, estado, proceso y sus relaciones (Mak y Young 1987, Moore 1993, Van Roon *et al.* 1994). Aunque se supone que los estudiantes no tendrán dificultades en la elección de un sistema y del entorno en el análisis de un proceso, dado que se trata de una idea utilizada en mecánica (Mak y Young 1987), se han detectado problemas en la utilización de estas ideas. Algunos alumnos universitarios de primer curso no separan el sistema de su entorno, condición necesaria para el análisis de las transferencias de energía al sistema (Van Roon *et al.* 1994), mientras que un grupo de adultos no interpreta correctamente un problema de equilibrio térmico (Arnold 1994) debido a una elección incorrecta del sistema.

Estamos de acuerdo con la propuesta de Mak y Young (1987) en el sentido de que las ideas de sistema, proceso y estado deben ser presentadas de manera informal, y no en términos de variables termodinámicas, a los alumnos de enseñanza secundaria. En este sentido, no se pide a los alumnos que contesten a la pregunta ¿qué es un sistema termodinámico? sino que lo identifiquen correctamente antes de su análisis. También se concede gran importancia a la diferenciación entre estado y proceso, como paso previo

en el establecimiento de la energía interna como una propiedad del estado de un sistema, y del calor y el trabajo como procesos de transferencia de energía.

## Temperatura

Las definiciones del concepto de temperatura que presentan los libros de texto se pueden agrupar en dos categorías que se pueden denominar mecanicista y termodinámica.

De acuerdo con el primer procedimiento, la temperatura aparece como la medida de la energía media de un cuerpo (Tipler 1995). En algunos textos se especifica que se trata de la energía cinética media (Giancoli 1985), mientras que en otros se señala que la energía cinética media se mide en el sistema de referencia del centro de masas (Alonso y Finn 1976).

Este tipo de definiciones ha sido cuestionado (Baierlein 1990a). Las definiciones anteriores tiene el peligro de que los estudiantes piensen erróneamente que la temperatura es una medida de la cantidad de energía de un sistema. Por otra parte, las relaciones entre la energía y la temperatura no pueden expresar el significado de ésta porque no existe una dependencia única entre los dos conceptos; al contrario, dichas relaciones dependen de la naturaleza del sistema. Así, por ejemplo, en un gas ideal, su temperatura significaría la energía cinética media de las partículas; en el caso de un horno, la temperatura sería la raíz cuarta de la densidad de la energía radiante, etc. La idea de temperatura debería diferenciarse de la idea de energía y, especialmente, de la energía media porque no son equivalentes conceptualmente (Baierlein 1990b).

La relación de la temperatura de un sistema con la energía media de las partículas que lo componen ha sido utilizada por Thomaz *et al.* (1995) y defendida por Alonso (1990). A pesar de que la relación anterior depende de la naturaleza del sistema, se advierte que en las definiciones consideradas siempre aparece la palabra “*medir*” pero no “*significar*”. En consecuencia, es correcto decir que la temperatura es un *medida* de la energía de las partículas de un sistema.

Las definiciones termodinámicas de la temperatura se basan en el concepto de equilibrio térmico (principio cero de la termodinámica) (Resnick y Halliday 1965, Sears 1969), o en el de termómetro cuando se indica que la temperatura simplemente es la propiedad de un sistema medida por un termómetro (Bauman 1992b).

Alonso y Finn (1995) han propuesto para el curso introductorio de física en el nivel universitario una solución que se puede considerar como síntesis de las posiciones mecanicistas y termodinámicas. Según dichos autores, la temperatura se puede introducir

en dos etapas. En primer lugar se hace una descripción empírica. De esta manera, se señala que la temperatura mide el grado de calor o frío de un cuerpo, y que algunas propiedades de los cuerpos (longitud, volumen, presión, resistencia eléctrica, etc.) varían con la temperatura. A continuación se redefine la temperatura, desde un punto de vista microscópico, como la medida de la energía media de las partículas de un cuerpo.

En el desarrollo de nuestra propuesta, se considera conveniente definir la temperatura desde un punto de vista termodinámico. De este modo, se evitaría reforzar la confusión entre los conceptos de cantidad de calor y temperatura que muestran los alumnos de enseñanza secundaria (Albert 1978, Erickson 1979, Tiberghien 1980). Esta aproximación permitiría presentar la temperatura, a través del equilibrio térmico, como una variable intensiva y permitiría dar a los alumnos una visión no mecanicista de la termodinámica. Para la interpretación de los fenómenos en los que se produce una disipación de la energía en calor, conviene que los estudiantes conozcan que existe una relación entre el aumento de la temperatura de un sistema y el incremento de la energía interna.

## Trabajo y calor

En termodinámica el concepto de trabajo presenta una diferencia fundamental con respecto al que se desarrolla en la mecánica. Cuando el sistema termodinámico considerado no es una partícula puntual, delimita una región separada del exterior por una frontera. El trabajo representa una transferencia de energía entre el sistema y el entorno *a través* de todo el límite (Arons 1989). Como señala Bridgman (1941) “el cálculo del trabajo exige la colocación de centinelas en todos los puntos de la frontera y la suma de todas sus contribuciones”. Este es el sentido que tienen la idea de trabajo que aparece en la primera ley de la termodinámica. Sin embargo, en la mecánica se consideran que los sistemas son una partícula sin dimensiones o, en algunos casos, un sistema de partículas. En estas situaciones, el trabajo representa, una transferencia de energía entre el exterior y la partícula o el centro de masas, es decir el intercambio de energía entre el entorno y *un punto* que, por su definición, no tiene fronteras. Este hecho da lugar a interpretaciones erróneas del teorema de las fuerzas vivas aplicado a un sistema de partículas, como ya se ha señalado en el apartado de “sistemas de partículas”.

Los libros de texto de nivel secundario y universitario (Giancoli 1985, Alonso y Finn 1976, Tipler 1995) presentan mayoritariamente el trabajo en la termodinámica como el realizado por un gas encerrado en un recipiente con un pistón móvil. De una manera implícita están considerando que el trabajo se realiza a través de la frontera del sistema (en este caso, el pistón no reducible a un punto), de acuerdo con las consideraciones del párrafo anterior, pero no señalan claramente la diferencia con el trabajo mecánico. En otras ocasiones, el trabajo se generaliza y se señala que puede ser eléctrico, magnético, gravitatorio o de otras clase (Resnick y Halliday 1965, Sears 1969). Creemos importan-

te que los alumnos distingan la diferencia entre el concepto de trabajo que aparece en la mecánica (el teorema de las fuerzas vivas de un sistema de partículas) y el que se utiliza en la primera ley de la termodinámica, dado que se pretenden utilizar las dos expresiones en el análisis de los problemas que implican rozamientos o fuerzas que no realizan trabajo (Sherwood 1983, Arons 1989).

Una importante característica del calor y del trabajo, su condición de proceso de intercambio de energía y no de propiedad del sistema (Mak y Young 1987, Arons 1989, Bauman 1992a, van Huls y van den Berg 1993, Van Roon *et al.* 1994, Gil *et al.* 1996), aparece en un número reducido de textos de enseñanza media. No sucede lo mismo en el nivel universitario donde la mayoría de los libros (Resnick y Halliday 1965, Sears 1969, Alonso y Finn 1976, Giancoli 1985) presentan el trabajo como proceso de transferencia de energía. En el nivel indicado, es frecuente mostrar que el valor del calor y del trabajo en un proceso depende del camino seguido (Arons 1989, Van Roon *et al.* 1994). De esta forma, se relacionan con las propiedades de las diferenciales (conocidas por el curso de Cálculo) y se señala que se trata de diferenciales inexactas, frente al carácter de diferencial exacta de la energía interna. En la propuesta alternativa que se presenta, consideramos muy relevante mostrar el calor y el trabajo como procesos de intercambio de energía, cuyo valor depende del camino seguido. Sin embargo, no creemos necesario relacionar dichos conceptos con las diferenciales inexactas.

La introducción del concepto de calor en la enseñanza media presenta múltiples problemas. Además de la identificación del calor con la temperatura, como ya se ha señalado en el apartado anterior, los alumnos tienen una idea material del calor (Engel y Driver 1985) o confunden el calor con la energía interna o la energía química (Mak y Young 1987). A finales de los años 70 y principio de los 80 aparecieron en la Gran Bretaña varias propuestas (Heath 1976; Summers 1982, 1983) para la enseñanza del calor. Se sugería que la palabra 'calor' no se utilizara como sustantivo para evitar que los alumnos identificaran el calor como una sustancia que se encuentra en el interior de los cuerpos. Como alternativa, la palabra 'calor' debía ser sustituida por 'calentar', para hacer énfasis en el proceso de transferencia de energía. Sin embargo, esta propuesta presenta problemas. En efecto, la palabra 'calentar' tiene dos significados: proporcionar energía a un cuerpo o aumentar su temperatura (Bauman 1992). Ambos sentidos no son equivalentes: en el proceso de ebullición, por ejemplo, existe una transferencia de energía pero la temperatura permanece constante (Mak y Young 1987). Otros autores han propuesto la utilización de otros términos en lugar de 'calor'. Mak y Young (1987) introducen 'flujo de calor' para el proceso de transferencia de energía, buscando un paralelismo con la expresión 'trabajo que se hace', empleada en la transferencia de energía por medio del trabajo. Sin embargo, la utilización de 'flujo' puede inducir a que los estudiantes piensen que el calor es una sustancia que fluye. Bauman (1992a) plantea la sustitución de 'calor' por 'transferencia de energía térmica', empleando 'calor' como un término genérico.

Cuando se realiza el aprendizaje de la primera ley de la termodinámica a través de su expresión matemática y no se profundiza en el significado de sus términos, se pueden cometer errores como identificar el calor con la energía interna o con un proceso de transferencia de energía interna (Mak y Young 1987).

En un nivel universitario, Zemansky (1957) propone una definición de calor basada en la primera ley de la termodinámica. Para ello define el trabajo como la transferencia de energía por la acción de una fuerza macroscópica, la energía interna como el trabajo adiabático hecho sobre el sistema y, por último, el calor como la transferencia macroscópica de energía por medios no mecánicos. Su valor es igual a la diferencia entre la energía interna de un sistema y el trabajo que se realiza sobre él. Esta introducción del calor no parece conveniente en la enseñanza media. En ésta, generalmente, se define el trabajo, el calor y la energía interna para establecer la primera ley de la termodinámica, mientras que en la propuesta de Zemansky se sigue el procedimiento contrario.

La forma tradicional de presentar el concepto de calor en los libros de texto de primer curso de nivel universitario se basa en el carácter proceso de transferencia de energía debido a una diferencia de temperaturas o en la consideración del calor como la energía que se transfiere (Tipler 1995, Resnick y Halliday 1965, Giancoli 1985). De acuerdo con los resultados del análisis de textos de enseñanza media, recogidos en el capítulo 2, se puede observar que casi la mitad de éstos también presentan el calor como la energía que se transfiere debido a una diferencia de temperaturas, mientras que muy pocos lo hacen como un proceso.

Alonso y Finn (1976) abordan la idea de calor desde una perspectiva mecanicista, basada en el concepto de trabajo. Para dichos autores, el calor es un trabajo microscópico entre las moléculas del sistema y el entorno, siempre que dicho trabajo no se puede expresar macroscópicamente como fuerza por desplazamiento. Posteriormente (Alonso y Finn 1995), señalan que la definición empírica de calor como “la energía transferida de un cuerpo caliente a otro frío como resultado de una diferencia de temperaturas”, es correcta pero no clarifica la naturaleza del mecanismo por el que se transfiere la energía. Por ello, sintetizan la última definición con la de 1976 y proponen que el calor se defina como “la transferencia de energía a través de la frontera de un sistema por choques elásticos e inelásticos entre las moléculas del sistema y las del entorno cuando las energías medias moleculares (temperatura) del sistema y del entorno son diferentes”. Esta definición hace necesaria la introducción de la radiación como mecanismo de transferencia de energía. De esta manera la primera ley de la termodinámica se formularía como  $-W + Q + R = \Delta E$ , donde R representa la energía transferida por radiación.

## Energía interna y energía térmica

El concepto de energía interna aparece normalmente en los libros de texto de educación secundaria y en los de primer curso de nivel universitario dentro del tema de termodinámica y antes de la presentación de la primera ley.

Se pueden distinguir dos procedimientos generales en la introducción del concepto, que llamaremos mecanicista-microscópico y termodinámico-macroscópico. Por una parte (Giancoli 1985, Tipler 1995, Gil *et al.* 1996), se considera que el sistema está formado por un gran número de partículas, de manera que la energía interna es la suma de las energías cinéticas y potenciales de dichas partículas. Alonso y Finn (1976) aplican el teorema de König al sistema de partículas y distinguen entre *energía propia* (energía cinética y potencial de las partículas), *energía interna* (suma de la energía cinética de las partículas referida al centro de masas del sistema y de la energía potencial de las mismas) y *energía total* definida como la energía propia más la energía potencial externa. Esta definición de energía interna resulta más apropiada, puesto que la energía interna aparece como una propiedad del sistema, independiente del sistema de referencia y distinta de la energía cinética de traslación del sistema.

La definición de energía interna que se ha considerado en el párrafo anterior resulta apropiada, a través de la primera ley de la termodinámica, para el análisis de sistemas termodinámicos pero no para los mecánicos en los que, por ejemplo, se produce una transformación de energía mecánica en energía interna. Con objeto de generalizar la definición indicada de energía interna, algunos autores (Sherwood y Bernard 1984, Arons 1989, Bauman 1992b) incluyen en la misma las energías macroscópicas del sistema, entendiéndose por dicho término las formas de energía que se tienen cuando el sistema se considera como un todo. A pesar de la generalización anterior, en la definición de energía interna no se recogen explícitamente otros tipos de energía fundamentales como la energía de la masa en reposo o la del campo libre.

Alonso y Finn (1995, 1997) han propuesto la adición de un nuevo término en la definición de energía interna (Alonso y Finn 1976) que aparece en su libro de texto. Dicho término, denominado *energía intrínseca o interna de las partículas*, aparece como consecuencia de que las partículas no siempre son estables y pueden cambiar como resultado de procesos que ocurren en el sistema (reacciones químicas y nucleares, desintegraciones radiactivas, etc.). Así pues, la energía intrínseca está asociada con la estructura interna de las partículas e incluiría energías propias de las mismas como la rotacional, vibratoria, etc. También proponen (1997) la sustitución del término *energía potencial de las partículas* por el de *energía interna de interacción*, que incluiría la energía potencial como un caso particular.

La aproximación microscópica y mecanicista a la energía interna parte de la idea de que los alumnos reciben, a través de la enseñanza, una visión fragmentaria de la energía (Alonso y Finn 1995, 1997). Normalmente el concepto de energía aparece por primera vez en la mecánica. Posteriormente, se introduce en la termodinámica como energía interna pero no se establece ninguna relación entre ésta y la energía mecánica. La definición de energía interna a partir de conceptos mecánicos permite establecer la conexión entre la mecánica y la termodinámica.

La aproximación microscópica y mecanicista a la energía interna, tal como aparece en los párrafos anteriores, ha sido cuestionada (Van Roon *et al.* 1994) en los siguientes términos: la termodinámica se ocupa de fenómenos y de observaciones macroscópicas, por lo que su contexto es el macroscópico. Sin embargo, la energía cinética y potencial de las partículas de un sistema pertenecen a un contexto microscópico, diferente, por tanto, del propio de la termodinámica. Alonso y Finn (1995), por su parte, consideran pedagógicamente conveniente que se presente a los estudiantes una descripción empírica del concepto, seguida por una profundización microscópica. Sin embargo, de acuerdo con Zemansky (1970), Warren (1972) y Mak y Young (1987) en nuestra propuesta didáctica adoptaremos una definición microscópica. Esta se presentará en la mecánica, dado que la termodinámica no figura en el curriculum oficial LOGSE y porque dicha aproximación permite correlacionar las variaciones de la energía interna con cambios en las propiedades de las partículas del sistema.

Algunos libros de texto de Física General (Resnick y Halliday 1965) y de Termodinámica (Sears 1969) abordan la definición de la energía interna desde una perspectiva totalmente diferente a las examinadas anteriormente. Se parte de la descripción macroscópica de los sistemas, propia de la termodinámica clásica, y de conceptos de esta disciplina, como la función de estado. De esta forma, se indica que la energía interna de un sistema es una función de estado cuya variación es igual a la suma, prescindiendo del criterio de signos, de las energías transferidas al sistema por medio del trabajo y del calor. Zemansky (1957) utiliza la primera ley de la termodinámica para dar una definición sistemática de la energía interna: su variación es igual al trabajo hecho sobre un sistema adiabático. Aunque esta aproximación es apoyada por van Roon *et al.* (1994) en un nivel universitario, no se recomienda su uso en la educación secundaria (Mak y Young 1987).

Algunos autores norteamericanos (Sherwood y Bernard 1984, Arons 1989, Bauman 1992b) dan el nombre de *energía térmica* a la parte de energía interna de un sistema relacionada con las variaciones de temperatura. Sin embargo, en otras ocasiones se identifica la energía interna con la térmica (Giancoli 1985) o con el calor (Bauman 1992b). En la enseñanza secundaria consideramos una complicación innecesaria la utilización de la energía térmica en el análisis energético de los procesos físicos, puesto que se puede confundir con la interna (Bauman 1992b) y añade un nuevo elemento en la maraña de las definiciones de energía interna.

## Primera ley de la termodinámica

Los libros de texto de enseñanza media suelen presentar la primera ley de la termodinámica, en su formulación tradicional  $\Delta U = Q - W$ , por medio de un razonamiento cualitativo en el que se considera que la energía interna de un sistema aumenta cuando se realiza un trabajo sobre él y se transfiere energía por medio de calor. Sin embargo, no se explicita que se trata de un principio empírico, comprobado por la experiencia, y no deducible de otros.

En los libros de Física General se encuentra una doble tendencia. En unos (Feynman *et al.* 1963, Resnick y Halliday 1965, Giancoli 1985, Tipler 1995, Gettys *et al.* 1993) se parte de las definiciones de trabajo, calor y energía interna para llegar a la expresión conocida, utilizando razonamientos cualitativos, semejantes a los utilizados en los libros de enseñanza media. Este procedimiento es compartido por muchos investigadores educativos (Mak y Young 1987, Arons 1989, Bauman 1992b, Moore 1993).

Otros libros (Alonso y Finn 1976) deducen el primer principio de la termodinámica a partir de la conservación de la energía mecánica. Para ello, se indica que sólo existe la energía mecánica, es decir la cinética y la potencial. Esta reducción permite utilizar la expresión de la energía de un sistema de partículas, deducido a partir del teorema de las fuerzas vivas aplicado a un sistema conservativo y del teorema de König. Se identifica la energía interna del sistema con la energía cinética y potencial internas, y se introduce el calor como una parte del trabajo exterior, debido a los choques moleculares, diferente del trabajo mecánico o termodinámico. Erlichson (1984) ha señalado una inconsistencia que aparece en algunos textos que utilizan este procedimiento. Si se considera que la energía interna es la suma de la energía cinética (referida al centro de masas) y potencial de las partículas que forman el sistema, en la expresión de la primera ley de la termodinámica debe aparecer la energía cinética del centro de masas, es decir:

$$\Delta U + 1/2Mv_{cm}^2 = Q - W$$

De esta forma correcta aparece en varios lugares (Alonso y Finn 1976, Sherwood y Bernard 1983).

Una vez establecido el principio de conservación de la energía bajo la formulación de primera ley de la termodinámica, se observa que los libros de texto no mantienen el mismo criterio de signos con respecto al trabajo (Moore 1993). De esta forma, la primera ley aparece expresada como  $\Delta U = Q - W$  o bien como  $\Delta U = Q + W$ . Si en el libro de texto no aparece explícitamente el criterio de signos utilizado, se crea una nueva confusión en los estudiantes. En algunos casos el trabajo hecho por el sistema sobre el entorno se considera positivo (Zemanski 1957, Resnick y Halliday 1965, Sears 1969, Alonso y Finn 1976, Erlichson 1984, Giancoli 1985, Tipler 1995) y en otros, negativo (Feynman *et al.* 1963, Sherwood y Bernard 1984, Mak y Young 1987, Arons 1989, Bauman 1992b, Moore 1993).

Las expresiones de la primera ley en las formas  $\Delta U = \Delta Q - \Delta W$ ,  $\Delta U = \delta Q - \delta W$  o  $dU = dQ - dW$  no se consideran aceptables (Mak y Young 1987, Moore 1993). De acuerdo con las recomendaciones de la Unión Internacional de Física Pura y Aplicada (1978),  $\Delta x$  representa un *incremento finito* de  $x$ ,  $\delta x$  es una *variación* de  $x$  y  $dx$ , la *diferencial total* de  $x$ . Por dicha razón, tiene sentido expresar que la energía interna  $U$  ha experimentado un incremento finito en un proceso, es decir  $\Delta U = U_{\text{final}} - U_{\text{inicial}}$  pero es absurdo escribir  $\Delta Q = Q_{\text{final}} - Q_{\text{inicial}}$  o bien  $\Delta W = W_{\text{final}} - W_{\text{inicial}}$  para el mismo proceso. En los libros de texto universitarios (Resnick y Halliday 1965, Sears 1969, Alonso y Finn 1976, Tipler 1995) también aparece la expresión diferencial de la primera ley de la Termodinámica. Por regla general, existe un criterio uniforme y se presenta como  $dU = dQ - dW$ , o expresiones equivalentes. Con la notación empleada se quiere hacer énfasis en el hecho de que  $dU$  es una función de estado y, por tanto, una diferencial exacta. Por el contrario, el valor del calor y del trabajo dependen del camino seguido en el proceso, y son diferenciales inexactas. Estas precisiones no se consideran necesarias en el nivel secundario

En la formulación tradicional de la primera ley de la termodinámica sólo se consideran dos mecanismos de transferencia de energía: el calor y el trabajo. Con respecto a la radiación como proceso de transferencia, no existe una opinión uniforme. En algunos casos, se identifica explícitamente la radiación del cuerpo negro con el calor (Sears 1969), mientras que en otros (Bauman 1992a) se indica que es totalmente calor la transferencia de radiación entre un cuerpo y un campo de radiación en equilibrio con el objeto, pero se considera una mezcla de calor y trabajo si no existe equilibrio. Otros autores (Sherwood y Bernard 1984, Tipler 1995) diferencian claramente el calor de la radiación pero no incluyen este término en la expresión de la primera ley de la termodinámica. Por último, Alonso y Finn (1995, 1997) definen la radiación como un intercambio de energía a través de la emisión o absorción de fotones e incluyen dicho término en la expresión de la conservación de la energía, es decir,  $Q - W + R = \Delta E$ .

También creemos muy conveniente en el nivel secundario, la introducción de la energía interna y de la primera ley de la termodinámica en el tema de mecánica (Sherwood 1983, Arons 1989, Hake 1993, Resnick, Halliday y Krane 1992). Como se ha señalado en otro apartado, en dicho tema se analiza la conservación de la energía mecánica, con atención a las fuerzas conservativas y no conservativas. Sin embargo, tales herramientas formales no permiten la interpretación de las transformaciones de energía en problemas mecánicos en los que “el trabajo de rozamiento se disipa en calor” o en los que “actúan fuerzas que no realizan trabajo”. Por otra parte, se favorecería en los alumnos una visión unitaria de la energía (Sherwood 1983), aunque todavía incompleta.

De esta manera, se obtiene un principio de conservación muy restringido. Se puede introducir un principio más general definiendo un trabajo generalizado (Tejerina

1976) que incluya las polarizaciones, imantaciones, etc. Aunque se contemple la introducción de la radiación térmica en el calor, el principio no es completo porque en él no figura la radiación dipolar, la de frenado o sincrotrón. La energía interna no recoge la energía de los campos, la de interacción no conservativa del sistema con el campo o la energía de la masa en reposo. Aunque se han propuesto generalizaciones de la primera ley de la termodinámica (Sherwood 1983, Alonso y Finn 1997), en ellas no aparecen las particularidades que se han mencionado. En un nivel de enseñanza secundaria, pensamos que el análisis energético de los procesos se puede realizar de forma coherente con una formulación del principio de conservación de la energía del tipo (Sherwood 1983):

$$\text{entradas netas externas} = \text{variación de la energía}$$

En el término de la izquierda se incluiría el calor, el trabajo mecánico, las ondas mecánicas y la radiación como mecanismos de transferencia de energía, y en el término de la derecha, la energía interna, cinética, potencial, de los campos y de la masa en reposo, de una manera flexible y según convenga al proceso tratado. Así se realiza en nuestra propuesta para el primer curso de Bachillerato con el objeto de evitar una visión meramente mecánica o termodinámica del principio de conservación de la energía.

Con el objeto de mostrar la energía como un principio unificador de todos los campos de la física y presentar su conservación como un principio general, nuestra propuesta no se limita a la introducción de la energía en un tema de primer curso de Bachillerato, de acuerdo con los criterios señalados anteriormente. Por el contrario, proponemos la presentación de otros aspectos de la energía en los temas de electromagnetismo, relatividad y física cuántica correspondientes al segundo curso de bachillerato (Solbes y Tarín 1996).

### 5.2.2.3. Electromagnetismo

A diferencia de la mecánica y la termodinámica, es muy escasa la bibliografía sobre la energía del campo electromagnético que ha merecido la atención de muy pocos investigadores didácticos. En este apartado se hará referencia a dos aspectos que se consideran fundamentales: la energía del campo electromagnético y su conservación.

En los libros universitarios de Física General (Resnick, Halliday y Krane 1992, Tipler 1995) y algunos de BUP se deduce la energía del campo eléctrico a partir del trabajo necesario para cargar un condensador o un conductor esférico (Alonso y Finn 1976). La expresión obtenida se generaliza para cualquier campo estático y para las ondas electromagnéticas. Aunque los textos de Física General también introducen la energía del campo magnético (Resnick, Halliday y Krane 1992, Tipler 1995, Alonso y Finn 1976), aparece raras veces en los libros de BUP. El procedimiento es análogo al del campo eléctrico: se calcula la energía almacenada en un solenoide cuando la intensidad que lo atraviesa aumenta desde un valor nulo a uno determinado. A continuación, se

generaliza a cualquier clase de campos estáticos o dependientes del tiempo. De esta forma se obtienen expresiones para la energía y la densidad de energía del campo electromagnético. El procedimiento resulta peculiar porque se obtienen unas expresiones correctas para el campo electromagnético libre a partir de unos razonamientos en los que intervienen campos estáticos.

Por otra parte, el campo electromagnético puede interactuar con cargas o corrientes. Este fenómeno da lugar a la energía de interacción que corresponde a la potencial electrostática en el caso de cargas estáticas pero no se puede considerar como energía potencial magnetostática dado que el campo magnético no es conservativo. Por otra parte, la energía de interacción en el caso estático coincide con la del campo libre (Feynman 1967). Estas consideraciones no suelen clarificarse en los libros de física del primer curso universitario ni en los de Bachillerato.

En nuestra propuesta, la energía del campo electromagnético libre se introduce cuantitativamente en el tema de Electromagnetismo que aparece en el segundo curso de Bachillerato. No se sigue el procedimiento señalado anteriormente, dado que el currículum oficial no recoge el estudio de los condensadores. Por ello, se propone a los alumnos que indiquen la dependencia de la intensidad de las ondas electromagnéticas, teniendo en cuenta que ya conocen que la intensidad de una onda mecánica es proporcional al cuadrado de su amplitud. Dado que los alumnos han utilizado en el primer curso de Bachillerato la energía potencial electrostática, el profesor debe indicar explícitamente la diferenciación entre la energía del campo electromagnético libre y la energía de interacción, en base a las consideraciones que se han indicado anteriormente.

Una vez establecida la energía del campo electromagnético, conviene considerar su conservación. Este aspecto fundamental de la energía no se discute en la mayoría de los textos de Física General y tampoco en los de nivel secundario. Dicha conservación se conoce como “teorema de Poynting” y resulta especialmente interesante porque añade un nuevo aspecto a la conservación de la energía tal como aparece en la Mecánica o en la Termodinámica. Dicho aspecto se refiere al carácter “local” de la conservación (Feynman 1969) y, por tanto, a la existencia de una magnitud (el vector de Poynting) que represente la variación del flujo de energía que atraviesa la superficie que encierra el volumen donde se está produciendo la variación de la densidad de energía del campo. Aunque el teorema de Poynting no se utiliza en el Bachillerato, Poon (1986) recomienda su introducción en el último curso. Sin embargo, el teorema de Poynting exige un conocimiento del cálculo integral. Esta circunstancia no se da en los alumnos de segundo curso de Bachiller, que aprenden a realizar integrales en la última parte del curso. Por dicha razón, nuestra propuesta no recoge esa aportación.

Entre todas las implicaciones del teorema de Poynting creemos didácticamente muy interesante la que se refiere a la radiación como mecanismo de transferencia de

energía. Esta forma de transmisión de energía se presenta en nuestra propuesta, junto con la conducción y la convección, como mecanismo de transmisión del calor. Se introduce cualitativamente en el primer curso de Bachillerato cuando se presenta el calor como un procedimiento de transferencia de energía entre sistemas.

Generalmente el vector de Poynting aparece en los textos universitarios de Física General (Resnick, Halliday y Krane 1992, Tipler 1995, Alonso y Finn 1976) en relación con la energía de las ondas electromagnéticas. Una vez definido, se utiliza en el cálculo de la radiación de dipolos o cargas aceleradas (Alonso y Finn 1976). Algunos autores (Jäkel 1990) recomiendan la introducción del vector de Poynting en la enseñanza secundaria superior para analizar los circuitos resonantes o el flujo de energía en circuitos de corriente continua y alterna. La deducción de la ley de Ohm generalizada en los circuitos de corriente continua se debería hacer en nuestra propuesta a través del principio de conservación de la energía pero no mediante el vector de Poynting.

#### 5.2.2.4. Relatividad

La contribución más relevante de la teoría especial de la relatividad al concepto de energía es el de energía en reposo (Okun 1989, Bickerstaff y Patsakos 1995). La mayor parte de libros de texto de bachillerato y de primer curso universitario (Alonso y Finn 1976, Giancoli 1984, Tipler 1995,) introducen dicha energía a partir del teorema de las fuerzas vivas. Para ello, se define la cantidad de movimiento de una partícula libre como

$$\mathbf{p} = m\mathbf{v} = \frac{m_0 \mathbf{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

donde  $m$  es la llamada *masa relativista* y  $m_0$ , *la masa en reposo*, es

decir, el valor de la masa medida desde un sistema de referencia en el que la partícula se encuentre en reposo.

El análisis anterior pone de manifiesto que en la presentación de la relatividad especial en los libros de texto (Sawicki 1996) aparecen dos clases de masas: la relativista y la masa en reposo. La misma circunstancia se da en los libros de divulgación científica (Hoffmann 1985, Gardner 1986, Russell 1989, Farouki 1994) y en algunos artículos de investigación didáctica (Bynon 1994, Ireson 1998). Este hecho contrasta con el tratamiento que hacen los libros de nivel superior (Landau y Lifshitz 1973, Williams 1995). En ellos aparece exclusivamente la masa en reposo. Esta diferencia de tratamiento es reflejo de un debate, que no ha finalizado todavía, sobre la introducción de las masas indicadas anteriormente.

Presentamos, en primer lugar, los argumentos de los detractores de la masa relativista. Algunos autores piensan que en el estudio de la relatividad especial se debe hacer uso de una masa, dado que este concepto es un invariante relativista por lo que su valor

no depende del sistema de referencia elegido. La masa que cumple esta condición es precisamente la masa en reposo. Por otra parte, el concepto de masa relativista no es necesario y puede producir errores conceptuales en los estudiantes. Uno de los más frecuentes es asignar un carácter inercial a la misma. Sin entrar en el problema de las definiciones, que ha sido revisado recientemente (Doménech 1998), por inercial se entiende, al igual que en la mecánica newtoniana, el factor de proporcionalidad entre la fuerza aplicada a un cuerpo y la aceleración adquirida. La consideración de la masa relativista como masa inercial aparece, de manera implícita, en expresiones del siguiente tipo: “cuando aumenta la velocidad de un cuerpo, su masa también aumenta” (Giancoli 1985, Alonso y Finn 1976, Feynman 1969, Peña y García 1996, Candel *et al.* 1989) o en la justificación de la velocidad de la luz en el vacío como un valor límite (Giancoli 1985, Peña y García 1996). En este último caso, se parte de la definición de masa relativista y se indica que dicha masa aumenta a medida que lo va haciendo la velocidad, de manera que su valor sería infinito cuando la velocidad coincidiera con la de la luz. Al razonar de las formas que se acaban de señalar, se está considerando que la masa relativista ofrece una resistencia a la aceleración. Sin embargo, esta afirmación no es correcta dado que la masa relativista aparece en la definición de cantidad de movimiento relativista pero no resulta ser el coeficiente que relaciona la fuerza y la aceleración. Por otra parte, en la relatividad especial se puede obtener una relación entre la fuerza y la aceleración (Adler 1987) que se puede expresar como  $m_t/(1 - v^2 \cos^2\theta/c^2)$  donde  $m_t$  es la masa relativista transversal (que se introducirá más adelante) y  $\theta$  el ángulo que forman la fuerza y la velocidad. Se observa que la masa inercial así definida no es una propiedad del cuerpo (como ocurre en la dinámica de Newton) porque depende del sistema de referencia con respecto al cual se mide la velocidad y de la orientación de la fuerza. Si a un cuerpo se le aplica una fuerza  $\mathbf{F}$ , se puede demostrar (Okun 1989) que ésta y la aceleración producida no tienen la misma dirección. La relación entre ellas viene dada por  $\mathbf{a} = (\mathbf{F} - (\mathbf{F} \cdot \boldsymbol{\beta}))/m\gamma$ , donde  $\boldsymbol{\beta} = \mathbf{v}/c$  y  $\gamma = 1/(1 - v^2/c^2)^{1/2}$ . Sin embargo, existen dos casos particulares en los que es posible definir una masa inercial pero sus valores son diferentes. Si la fuerza que actúa sobre una partícula es perpendicular a su velocidad, se cumple que  $F_t = m_t a$ , donde  $m_t$  representa la *masa relativista transversal*, definida por  $m_t = m_0/(1 - v^2/c^2)^{1/2}$ . De manera análoga, cuando la fuerza que actúa sobre un cuerpo es paralela a su velocidad, se tiene que  $F_l = m_l a$ , siendo  $m_l$  la *masa relativista longitudinal* cuyo valor es  $m_l = m_0/(1 - v^2/c^2)^{3/2}$ . Estos dos conceptos no se suelen utilizar pero todavía aparecen en algunos textos (Alonso y Finn 1976). Aunque el significado físico de las masas relativista y transversal es diferente, la expresión que las relaciona con la masa en reposo es la misma. Por tanto, se podría suponer que se ha utilizado la masa transversal en la interpretación aparecida anteriormente y referida al aumento de la masa con la velocidad. En este caso, la interpretación podría ser correcta puesto que se trata de una masa inercial. Sin embargo, si se analiza la situación cuidadosamente, se observa que la fuerza que actúa sobre el cuerpo tiene, necesariamente, una dirección perpendicular a su velocidad por lo que produciría una variación en la dirección de la velocidad pero no en su módulo. Dicha fuerza no puede, por tanto, aumentar la velocidad. Por otra parte, conviene destacar que si se

tomaran las masas longitudinal y transversal como masas inerciales en la teoría de la relatividad especial, su significado no sería el mismo que tiene la masa inercial en la mecánica newtoniana. En ésta, la masa es una característica del cuerpo, cuyo valor es constante y, por tanto, independiente del sistema de referencia. Sin embargo, las masas relativistas inerciales transversal y longitudinal dependen también de la velocidad del cuerpo, es decir del sistema de referencia elegido.

De acuerdo con los detractores de la masa relativista, un error conceptual asociado al que se acaba de exponer señala que la variación de masa con la velocidad es real como lo prueban los resultados de los experimentos de Kaufmann y Bucherer realizados en 1901 y 1909 respectivamente. En ellos se determinaron los valores del radio de curvatura de una partícula cargada que se mueve en un campo magnético cuando varía la velocidad. Como se cumple que la cantidad de movimiento de la partícula es  $p = RqB$  siendo  $R$  el radio de curvatura de la trayectoria,  $q$  la carga eléctrica y  $B$  el campo magnético, se puede conocer el valor de  $p$  a partir de los datos experimentales. De ellos se deduce que la cantidad de movimiento no es proporcional a la velocidad cuando ésta se aproxima al valor de la velocidad de la luz en el vacío. Como se cumple que  $p = m_0v/(1 - v^2/c^2)^{1/2}$ , y  $m_0$  es una constante, los resultados obtenidos experimentales se pueden interpretar a través de la dependencia del factor  $(1 - v^2/c^2)^{-1/2}$  con la velocidad (Bickerstaff y Pastakos 1995) sin tener que considerar que las variaciones de la masa relativista con la velocidad.

En relación con lo anterior, los detractores de la masa relativista también indican que el gran aumento de energía necesario para acelerar una partícula cuando su velocidad es próxima a la de la luz puede interpretarse considerando la relación entre la energía total ( $E$ ) de la partícula y la velocidad, dada por  $E = m_0c^2/(1 - v^2/c^2)^{1/2}$  (Adler 1987). De esta forma tampoco es necesario considerar que la masa aumenta con la velocidad. También es un hecho conocido que el tiempo, que debe actuar una fuerza aplicada a una partícula para conseguir una determinada aceleración, es mayor a medida que aumenta la velocidad de la partícula. Para explicar este fenómeno no hace falta considerar que la masa de la partícula se incrementa cuando lo hace la velocidad. En un sistema de referencia que se moviera con la partícula, los intervalos de tiempo indicados serían iguales. Sin embargo, un observador situado en un sistema de referencia diferente al anterior, mediría unos periodos de tiempo que aumentan con la velocidad de acuerdo con el factor  $(1 - v^2/c^2)^{-1/2}$  (Adler 1987).

Los detractores de la masa relativista señalan que la utilización de dicha masa puede hacer que los estudiantes lleguen a conclusiones falsas. La expresión de cantidad de movimiento en relatividad especial ( $\mathbf{p} = m_r\mathbf{v}$ ) puede obtenerse a partir de la utilizada en la mecánica clásica ( $\mathbf{p} = m\mathbf{v}$ ) por medio de la sustitución de la masa newtoniana ( $m$ ) por la relativista ( $m_r$ ). De acuerdo con lo anterior, los estudiantes pueden pensar, de manera equivocada, que la energía cinética relativista se deduce aplicando la sustitución

indicada (Sandin 1991, Tipler 1985). Por último, varios autores de textos que desarrollan la relatividad especial por medio de la formulación tetravectorial (Goldstein 1970, Taylor y Wheeler 1966) señalan que las masas relativistas (la propiamente relativista, la longitudinal y la transversal) “ocultan la covarianza de la formulación y oscurecen más que aclaran el aspecto físico de la situación” (Goldstein 1970). Además, si los estudiantes utilizan dichas masas, pueden pensar que algunas de las características (por ejemplo, la masa) de una partícula en movimiento varían de forma real, sin considerar que los efectos observados son debidos a modificaciones en el espacio-tiempo.

Otro aspecto contemplado en el debate sobre la utilización de la masa relativista se refiere a la relación entre la masa y la energía. Los detractores de la masa relativista sólo admiten dicha relación cuando se refiere a la energía y a la masa en reposo, de acuerdo con la ecuación  $E_0 = m_0c^2$ . La masa en reposo de una partícula permanece constante en cualquier sistema de referencia pero el valor de la energía depende del sistema elegido. Por tanto, si la relación entre la masa y la energía es cierta en un sistema de referencia, no se puede cumplir en otros (Hannibal 1991). El sistema de referencia en el que se verifica dicha relación es, precisamente, aquel en el que la partícula se encuentra en reposo (Whitaker 1976).

Si se considera un sistema formado por varias partículas, la energía en reposo del mismo incluye varios términos: la correspondiente energía en reposo de las partículas, así como su energía cinética y la de interacción entre ellas (Landau y Lifshitz 1973). En general, se puede decir que la energía en reposo del sistema comprende la energía en reposo de las partículas y la energía interna. De acuerdo con esta consideración, la energía interna de un sistema contribuye a su energía en reposo y, dado que se cumple  $E_0 = m_0c^2$ , también lo hace a su masa en reposo. Es decir, la masa es una forma de energía (Adler 1987) que se puede transformar en otras (Bikerstaff y Patsakos 1995). De esta forma, se admite que la masa en reposo de un gas aumenta cuando se calienta. Esta variación es producida por el aumento de energía cinética de las partículas que lo forman pero no por un incremento de la masa de las mismas (Adler 1987). Por otra parte, en cinemática relativista se demuestra que los fotones tienen una masa en reposo nula puesto que se mueven con una velocidad igual a la de la luz. Si se aplica la relación  $E_0 = m_0c^2$ , su energía en reposo también será cero y la energía que poseen será puramente cinética. Sin embargo, algunos autores introducen la *masa invariante para un sistema de partículas* dada por

$$M_{inv} = \left[ \left( \sum_i E_i / c^2 \right)^2 - \left( \sum_i \mathbf{p}_i / c \right)^2 \right]^{1/2}$$
 que tiene un valor nulo para un fotón aislado pero que es igual a  $2E/c^2$  en el caso de dos fotones que se mueven en direcciones opuestas (Kolbenstvedt 1995).

De acuerdo con los defensores de la utilización de la masa relativista, la correspondiente a una partícula con masa en reposo  $m_0$  que se mueve con velocidad  $v$  se define

como  $m = m_0/(1 - v^2/c^2)^{1/2}$ . También se puede definir como  $m = E/c^2$  siendo E la energía total de la partícula, es decir, la suma de la energía en reposo y de la cinética. Otra definición equivalente se realiza a través de la cantidad de movimiento relativista, dada por  $\mathbf{p} = m\mathbf{v}$ . El empleo de la masa relativista permite la introducción de conceptos en relatividad especial de una forma que resulta de más fácil comprensión por parte de los alumnos (Sandin 1991).

De esta manera, se puede explicar que sea necesaria una gran cantidad de energía para acelerar una partícula cuando su velocidad es próxima a la de la luz. En esas condiciones, el valor de la masa relativista es muy elevado por lo que su resistencia a la aceleración también será muy grande. La argumentación anterior considera la masa relativista como inercial. Aunque esta consideración no es aceptada por los detractores de la masa relativista, se debe tener en cuenta que la expresión  $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$  sólo es válida cuando m es constante. En efecto, si se parte de la segunda ley de Newton expresada en la forma  $\mathbf{F} = d\mathbf{p}/dt$  y se sustituye en ella la cantidad de movimiento relativista dada por  $\mathbf{p} = m\mathbf{v}$ , se llega a que  $\mathbf{F} = m\mathbf{a} + \mathbf{v} dm/dt$ . Esta relación se transforma en  $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$  sólo cuando la masa m es constante. Por tanto, la medida de la inercia en relatividad no puede venir dada por  $|\mathbf{F}|/|\mathbf{a}|$  puesto que la masa m varía con la velocidad (Sandin 1991).

Los resultados experimentales de Kaufmann y Bucherer, realizados en 1901 y 1909 respectivamente, muestran que la masa relativista m de una partícula cargada aumenta con la velocidad. Si dicha partícula penetra en un campo magnético B y describe una circunferencia de radio R, se cumple que  $m = qRB/v$ . La velocidad v se puede deducir si la partícula se hace pasar por un campo eléctrico E y por uno magnético B que se ajustan para que qE sea igual a qvB. De esa forma se obtiene la expresión  $m = qRB^2/E$  que puede ser calculada porque todos los parámetros son conocidos. Estos valores experimentales se ajustan perfectamente a la relación  $m = m_0/(1 - v^2/c^2)^{1/2}$  (Bikerstaff y Patsakos 1995). Por otra parte, se debe considerar que el aumento indicado de la masa es completamente real. En un sistema de referencia que se mueve con la velocidad de la partícula, se observaría que la masa es constante. Desde otro sistema de referencia, por el contrario, se tendrían valores de la masa que dependerían de la velocidad de la partícula. No se puede afirmar que sólo el primer valor es real porque los resultados de las medidas dependen del sistema de referencia elegido (Sandin 1991).

La utilización de la masa en reposo puede dar lugar a generalizaciones equivocadas. Si decimos que la cantidad de movimiento relativista de una partícula es  $\mathbf{p} = \gamma m_0 \mathbf{v}$ , se podría pensar que la expresión relativista se ha obtenido a partir de la formulación clásica  $\mathbf{p} = m\mathbf{v}$ , sustituyendo la masa newtoniana por  $\gamma m_0$ . Aplicando esta regla se obtendría que la energía cinética relativista es  $E_c = \gamma m_0 v^2/2$  o que la fuerza viene dada por  $\mathbf{F} = \gamma m_0 \mathbf{a}$  pero dichas expresiones, como se sabe, son incorrectas.

Para los partidarios de la masa relativista, la expresión  $E_0 = m_0c^2$  es un caso particular de la más general  $E = mc^2$  en la que  $E$  es la energía total (energía en reposo más cinética) de una partícula libre y  $m$  su masa relativista (Sandin 1991). La última expresión indica la relación entre la energía y la masa siendo la constante  $c^2$  un factor de conversión para las unidades de energía y de masa. El significado de la relación masa-energía ha sido objeto de un completo análisis (Warren 1976, Gil *et al.* 1988, Baumann 1994). También se han investigado las dificultades que presenta su aprendizaje (Gil *et al.* 1986, Solbes 1986, Toledo *et al.* 1997) y se han realizado propuestas para superarlas (Gil *et al.* 1989, Solbes 1986). De acuerdo con Einstein, “un intercambio de energía  $E$  [de un sistema] en cualquiera de sus formas comporta un intercambio de masa, en una cantidad que viene dada por  $m = E/c^2$ ”. Por otra parte, los principios de conservación de la masa y de la energía, que aparecen como independientes en la física clásica, quedan unificados, de manera que la conservación de la energía de un sistema aislado implica la conservación de la masa y viceversa. También se han clarificado (Baierlein 1991) algunas interpretaciones erróneas de la relación  $E = mc^2$ . Dicha ecuación no se puede interpretar como la transformación de energía en materia dentro de un sistema (“materialización”) o como el proceso contrario (“desmaterialización”). “Una reacción nuclear no supone ni pérdida o “defecto” de materia ni creación de energía ... siempre que consideremos un sistema convenientemente aislado, la masa total y la energía se conservan; lo que se produce son transformaciones de unas formas de existencia de la materia en otras, acompañadas también de transformaciones de unas formas de energía en otras” (Gil *et al.* 1988). La aplicación de la ecuación  $E = mc^2$  a los fotones da como resultado que dichas partículas posean una masa  $m = E/c^2$  a pesar de que su masa en reposo sea nula. Si se admite que los fotones tienen masa, se puede explicar fácilmente la desviación de su trayectoria o el desplazamiento hacia el rojo en su frecuencia cuando se mueven en un campo gravitatorio (Sandin 1991).

Bickerstaff y Patsakos (1995) han realizado una aportación que permite superar la controversia masa relativista/masa en reposo. Dichos autores demuestran que las dos masas indicadas son posibles en la teoría de la relatividad especial. Sabemos que la masa es constante en la mecánica newtoniana, es decir, permanece invariante en las transformaciones de Galileo. Por otra parte, las transformaciones de Lorentz se reducen a las de Galileo cuando la velocidad es muy pequeña, comparada con la de la luz. Por tanto, una masa que sea invariante bajo las transformaciones de Lorentz también lo será bajo las de Galileo. Dicha masa corresponde a la *masa en reposo* y coincide con la masa newtoniana. Sin embargo, una magnitud que se transforme bajo las transformaciones de Lorentz como la componente temporal de un tetravector será invariante bajo las de Galileo puesto que el tiempo cumple esa condición. La masa que tiene estas características corresponde a la denominada *masa relativista* y, como resulta fácil comprobar, coincide con la masa en reposo cuando la velocidad de la partícula es cero. De acuerdo con la elección que se haga entre la masa en reposo y la relativista, será distinta la interpretación de diversos aspectos de la relatividad especial como se ha puesto de manifiesto en el

análisis del debate masa relativista/masa en reposo que se ha expuesto anteriormente. Por tanto, más importante que la utilización de una u otra masa es el hecho de que los análisis que se hagan de los fenómenos sean coherentes con el tipo de masa elegido.

El análisis del debate sobre la utilización de la masa relativista pone de manifiesto que la diferencia entre ambos puntos de vista es de interpretación. Evidentemente, la expresión de las leyes es la misma. Donde unos autores utilizan el producto de  $\gamma$  por la masa en reposo ( $\gamma m$ ), otros emplean la masa relativista. En nuestra propuesta alternativa para la enseñanza de la energía hemos optado por un enfoque que haga énfasis en la relación masa/energía. En consecuencia, utilizaremos la masa relativista por razones didácticas. En efecto, dicho enfoque pone de manifiesto, en mayor grado, la ruptura que representó la teoría especial de la relatividad con respecto a la mecánica newtoniana así como el carácter unificador de la ciencia. Elegimos este punto de vista frente al defendido por los detractores de la masa relativista, que destaca los aspectos invariantes de la teoría. Por otra parte, el profesorado que utilizaría los materiales en los grupos experimentales se encuentra más familiarizado con el enfoque que hace uso de la masa relativista.

En nuestra propuesta se introduce la energía en reposo a partir de la variación de la masa con la velocidad y de la relación  $E = mc^2$ . Esta deducción no coincide con la propuesta en algunos textos de Física General (Tipler 1995, Alonso y Finn 1976). Sin embargo, creemos que resulta más importante la presentación de una nueva forma de energía que el proceso de su deducción. De esta manera, se llega la conclusión de que todos los sistemas tienen energía aunque su velocidad sea nula. Desde el punto de vista de la mecánica newtoniana, ya conocida por los alumnos, este resultado es sorprendente. Se debe hacer énfasis y destacar el hecho de que la energía en reposo no tiene ningún equivalente con las formas de energía presentadas hasta ese momento: energía cinética, potencial, interna y de los campos libres. En algunos textos (Beltrán *et al.* 1977) se incluye en la energía interna. Una vez conocida esta nueva forma de energía, los alumnos reconocerán que las formulaciones de la conservación de la energía mecánica o de la primera ley de la termodinámica no son completas porque no recogen la energía en reposo.

A continuación, se debe profundizar en la interpretación de la relación masa/energía, de acuerdo con la ecuación  $E = mc^2$ . En algunos libros de texto se analiza de forma errónea explicando que la masa se puede transformar en energía y viceversa (Warren 1976, Gil *et al.* 1988). Una vez entendida la relación masa/energía, los estudiantes pueden comprender con facilidad que los principios de conservación de la masa y de la energía resultan equivalentes. En nuestra propuesta se introduce la relación masa/energía a partir de la ecuación  $E = mc^2$ , presentado el coeficiente  $c^2$  como un factor de conversión.

### 5.2.2.5. Física cuántica, nuclear y de partículas

La última idea fundamental que recogemos en nuestro programa se refiere a la cuantización de la energía electromagnética. No se parte de la hipótesis de Planck como hacen algunos textos (Resnick, Halliday y Krane 1992, Tipler 1995, Giancoli 1985) porque el físico alemán aceptaba la cuantificación de los osciladores de las paredes de la cavidad llena de radiación pero no admitió la cuantificación como una propiedad fundamental de la radiación electromagnética (Hawes 1981). Tampoco se introduce a partir de la solución de una ecuación de ondas (Alonso y Finn 1976) dado que son necesarios conocimientos matemáticos que no poseen los alumnos de Bachillerato. Otros autores proponen la enseñanza del efecto fotoeléctrico por medio de tutoriales basados en ordenadores (Steinberg *et al.* 1996). La alternativa elegida parte de la imposibilidad de explicar el efecto fotoeléctrico por medio de la teoría electromagnética de Maxwell (Nuffield 1990, entre otros).

Resulta interesante presentar a los alumnos el debate sobre la aparente violación del principio de conservación de la energía que se originó como consecuencia del análisis de la desintegración beta (Ne'eman y Kirsh 1988). Su resolución, por medio de la introducción del neutrino realizada por Fermi, muestra a los estudiantes la importancia de dicho principio en todos los campos de la física, incluso en los más avanzados, así como su cumplimiento en el mundo de los objetos microscópicos.

También proponemos el análisis de la energía del sistema formado por dos partículas que interactúan de acuerdo con el concepto de interacción como intercambio de partículas. De acuerdo con el principio de incertidumbre de Heisenberg, se produce una violación de la conservación de la energía durante el intervalo de tiempo que transcurre entre la emisión y la absorción del bosón intermedio (Giancoli 1985).

Como complemento a las implicaciones del concepto de energía revisadas anteriormente, nuestro proyecto contempla en el segundo curso de Bachillerato los siguientes aspectos:

- el estudio energético de la interacción gravitatoria con referencia a la energía potencial y a la conservación de la energía mecánica en dicho contexto.
- las ondas mecánicas como formas de transmisión de energía, la relación entre su intensidad y el cuadrado de la amplitud, así como la atenuación y la absorción como procesos de conservación y transformación de la energía.
- el estudio energético de la interacción eléctrica.

Finalmente, y con el objeto de mostrar la conservación de la energía como un principio unificador de todos los campos de la física, a lo largo de toda la propuesta didáctica de segundo curso de Bachillerato se presentan situaciones y fenómenos para su

análisis cualitativo o cuantitativo a través de dicho principio. Entre ellos, podemos citar los siguientes:

- movimiento de satélites en órbitas circulares.
- análisis de gráficas de energía potencial y total en un campo gravitatorio y eléctrico.
- inducción electromagnética.
- relación entre la intensidad de las ondas electromagnéticas y el valor del campo eléctrico y magnético.
- efecto fotoeléctrico.
- transiciones de electrones en el átomo de Bohr.
- energía de enlace de nucleones.
- el aparente incumplimiento del principio de conservación de la energía en las desintegraciones  $\beta$  y el descubrimiento del neutrino.
- energía puesta en juego en las desintegraciones  $\alpha$  y reacciones nucleares.
- creación y aniquilación de pares partícula/antipartícula.
- la interacción como intercambio de partículas.

## **CAPÍTULO 6**

### **OPERATIVIZACIÓN DE LA SEGUNDA HIPÓTESIS Y DISEÑOS EXPERIMENTALES PARA SU CONTRASTACIÓN**

En el capítulo anterior se presentaron los fundamentos del constructivismo como un método de enseñanza/aprendizaje que tiene como consecuencias un cambio conceptual, metodológico y actitudinal en los alumnos. Su aplicación a la enseñanza del concepto de energía constituyó la base de nuestra segunda hipótesis.

Después de haberse establecido y fundamentado dicha hipótesis, corresponde extraer de la misma consecuencias verificables experimentalmente y crear los diseños que permitirán su contrastación. En este capítulo se realizará, en primer lugar, la operativización de la hipótesis. A continuación, se describirán los diseños realizados para determinar su certeza o falsedad. Por último, se presentarán los programas de actividades desarrollados como nueva propuesta para la enseñanza de la energía.

#### **6.1. Operativización de la segunda hipótesis**

De acuerdo con la segunda hipótesis establecida en el capítulo anterior “es posible realizar una enseñanza de la energía que parta de las ideas alternativas de los alumnos para presentar la energía como un concepto unificador de toda la física, desarrollar su conservación, transformación, transferencia y degradación, mostrar el status de principio con respecto a su conservación y señalar las limitaciones de su conservación en las diversas formulaciones que aparecen en mecánica y termodinámica”.

De la hipótesis anterior se pueden extraer tres subhipótesis. La primera señala la posibilidad de la enseñanza de la energía por medio de una metodología alternativa a la habitual. La segunda hace referencia a un aprendizaje más significativo del concepto de energía por parte de los alumnos a los que se les ha aplicado la nueva propuesta didáctica. La tercera subhipótesis considera que los profesores valorarán de forma positiva la propuesta alternativa para la enseñanza de la energía.

1) “Es posible plantear una enseñanza de la energía de acuerdo con una metodología, basada en la investigación didáctica, que implica el cambio conceptual, metodológico y actitudinal de los estudiantes”

2) “La enseñanza de la energía de acuerdo con una metodología basada en el cambio conceptual, metodológico y actitudinal de los estudiantes producirá en éstos una mejora significativa en su aprendizaje y un aumento de la valoración de la ciencia y de su aprendizaje”

3) “La propuesta planteada será valorada positivamente por los profesores a los que se les presente dicha alternativa y por los profesores que la pongan en práctica en el aula”.

De cada una de las tres subhipótesis se derivarán unas consecuencias que puedan ser contrastadas experimentalmente. A continuación aparecen las operativizaciones correspondientes.

### **6.1.1. Operativización de la primera subhipótesis**

De acuerdo con la primera subhipótesis, es posible elaborar materiales para la enseñanza de la energía que traten de superar las deficiencias observadas en la enseñanza habitual, tal como se han presentado en el capítulo 3. Dicha propuesta se desarrollará dentro del marco del constructivismo como metodología alternativa.

### **6.1.2. Operativización de la segunda subhipótesis**

La segunda subhipótesis hace referencia, en primer lugar, a un aprendizaje más significativo de la energía por parte de los alumnos que han utilizado la nueva propuesta alternativa. La mejora en el aprendizaje se puede concretar en las consecuencias derivadas contrastables experimentalmente que aparecen a continuación.

“Los alumnos que utilicen la nueva propuesta de enseñanza de la energía:

1. reconocerán la energía como una propiedad de todos los sistemas.
2. diferenciarán las clases de energía y reconocerán la correcta localización de la energía potencial.
3. utilizarán la energía para interpretar fenómenos mecánicos.
4. considerarán la conservación de la energía como un principio y los diversos enunciados en mecánica y termodinámica, señalando los límites de validez de cada uno de ellos.

5. tendrán activados los esquemas de transformación, conservación, transferencia y degradación de la energía.
6. utilizarán el principio de conservación de la energía en otros campos de la física, diferentes de la mecánica y de la termodinámica”.

Por otra parte, la segunda subhipótesis considera que se producirá un cambio actitudinal en los estudiantes que sigan la nueva propuesta de enseñanza de la energía. De acuerdo con ello,

“Los alumnos reconocerán que la nueva propuesta:

1. desarrolla en ellos una actitud positiva hacia la ciencia.
2. favorece la realización de actividades relacionadas con la técnica y con aspectos de la vida cotidiana, y la utilización del método del trabajo científico.
3. tiene en cuenta sus ideas previas y facilita la participación en la clase, el trabajo en grupo y la comprensión de los conceptos.”

### **6.1.3. Operativización de la tercera subhipótesis**

Si una innovación didáctica ha de ser difundida y desarrollada, es necesario contar con el apoyo de los profesores que son los encargados de ponerla en práctica en el aula. Nuestra tercera subhipótesis supone que otros profesores, que conocen la nueva propuesta didáctica y han reflexionado críticamente sobre ella, muestren su acuerdo y la valoren de una manera favorable. También supondremos que los profesores que utilicen la nueva propuesta didáctica, manifestarán un alto grado de satisfacción con su aplicación. Por tanto, la operativización de la subhipótesis indicada se puede hacer en los siguientes términos:

“La valoración positiva de la propuesta alternativa de enseñanza de la energía supondrá que los profesores reconozcan que dicha propuesta, en el aspecto metodológico y actitudinal:

1. presenta actividades sobre las relaciones de la ciencia con la técnica y la sociedad.
2. aumenta las actitudes positivas de los alumnos hacia la ciencia.
3. facilita un cambio conceptual al permitir que los alumnos manifiesten sus ideas a través de la emisión de hipótesis, las contrasten y extraigan conclusiones, de acuerdo con la metodología científica”.

“Los profesores también reconocerán que la propuesta indicada, en el aspecto conceptual:

1. tiene en cuenta las ideas previas de los alumnos.
2. establece relaciones cualitativas entre trabajo y energía.
3. considera conjuntamente los esquemas de transformación, conservación, transferencia y degradación de la energía.

4. introduce la conservación de la energía en mecánica como un teorema y señala que no se trata de un principio.
5. presenta la conservación de la energía en termodinámica como la verificación contrastada de experiencias, y señala que se trata de un caso particular.
6. muestra la conservación de la energía en electromagnetismo.
7. clarifica el principio de conservación de la masa/energía.
8. utiliza la conservación de la energía para explicar fenómenos mecánicos, termodinámicos y de otros campos de la física”.

Una vez deducidas las consecuencias contrastables de las tres subhipótesis se procederá a presentar los diseños que se realizarán para su experimentación.

## **6.2. Diseño para la contrastación de la primera subhipótesis referente a la posibilidad de elaboración de una propuesta alternativa para la enseñanza y aprendizaje de la energía**

De acuerdo con la primera subhipótesis es posible la elaboración de nuevos materiales didácticos y su aplicación en el aula.

La propuesta alternativa para la enseñanza de la energía se basará en los criterios didácticos desarrollados en el capítulo anterior. De esta forma, se desarrollarán dos programas de actividades teniendo como referencia el constructivismo como cambio conceptual, metodológico y actitudinal. El primer programa de actividades se dirige a los estudiantes del nivel 1 (segundo curso de BUP y cuarto curso de ESO) mientras que el segundo está destinado a los alumnos de tercer curso de BUP y primer curso de Bachillerato (nivel 2). También se prepararán actividades relacionadas con la energía para alumnos de segundo curso de Bachillerato, de acuerdo con los contenidos que aparecen en dicho curso.

En la elaboración de los programas de actividades se han seguido varios pasos. En primer lugar, se redactó una versión que fue revisada por profesores universitarios, dada su condición de expertos en el tema. Posteriormente, se presentó a profesores de enseñanza secundaria, BUP y COU para su discusión. A partir de los comentarios realizados se procedió a redactar una nueva versión que recogía las nuevas aportaciones. Por último, se aplicó a alumnos en la clase. Esto dio lugar a una nueva redacción en la que aparecían las modificaciones realizadas en base a las observaciones recogidas en el aula. Por tanto, los programas de actividades que se presentan en este capítulo son el resultado de un proceso de varias revisiones.

### **6.3. Diseño para la contrastación de la segunda subhipótesis referente a los cambios experimentados en los alumnos de los grupos experimentales con respecto al aprendizaje de la energía y a su actitud**

Para validar la subhipótesis operativa referente a la mejora en el aprendizaje de la energía y en la actitud por parte de los alumnos, se utilizarán diseños múltiples y convergentes que permitan analizar la coherencia de los resultados.

La propuesta alternativa de enseñanza/aprendizaje de la energía presentada anteriormente será utilizada con alumnos de nivel 1 (segundo curso de BUP y cuarto curso de ESO) y 2 (tercer curso de BUP, COU, y primer y segundo cursos de Bachillerato). Estos grupos se llamarán experimentales para distinguirlos de los que tomaron parte en la validación de la primera hipótesis (capítulo 3), que se denominarán grupos de control. El programa de actividades será aplicado por el autor de esta memoria. También será utilizado por profesores de diversos Institutos, utilizando la misma metodología. De esta forma, se podrán analizar los resultados obtenidos por los alumnos experimentales, como consecuencia de un cambio conceptual y metodológico, con independencia del profesor que ha desarrollado el tema. Por otra parte, es conocido que los resultados de los grupos experimentales tratados por el autor de una investigación determinada siempre son superiores a los obtenidos por los colaboradores (efecto Hawthorne) (Fox 1981). La utilización de grupos estudiantes procedentes de otros profesores permitirá, por tanto, controlar la variable “autor”.

Los estudiantes de grupos experimentales de segundo curso de Bachillerato y COU también utilizarán actividades incluidas en los programas de actividades correspondientes a dicho nivel (Solbes y Tarín 1996), desarrolladas a partir de otro programa anterior (Solbes y Navarro 1989). Los programas de segundo curso de Bachillerato han sido elaborados siguiendo los mismos criterios utilizados en los materiales indicados anteriormente y contemplan nuevos aspectos de la energía como la del campo electromagnético, la relación masa/energía, la energía de la masa en reposo, la cuantificación de la energía y la conservación de la masa/energía en desintegraciones radiactivas, reacciones nucleares y física de partículas. Por otra parte, en ellos aparecen actividades que permiten que los alumnos utilicen el principio de conservación de la energía en fenómenos diferentes de los mecánicos y termodinámicos. De esta forma, se intenta mostrar la conservación de la energía como un principio de toda la física. En el anexo III se incluyen las actividades relacionadas con la energía.

En otro diseño experimental, el programa de actividades de nivel 1 será utilizado en un grupo de estudiantes de cuarto curso de ESO con el objeto de analizar el cambio experimentado como consecuencia de la aplicación de dicha propuesta alternativa. También se realizarán entrevistas con alumnos de los grupos experimentales para determinar si el cambio observado por medio de la aplicación de los cuestionarios es realmente sig-

nificativo. Por último, se analizarán las actitudes de los estudiantes con respecto a la ciencia y su opinión sobre algunos aspectos de la metodología utilizada. A continuación, se describen los diseños proyectados.

### 6.3.1. Diseño para contrastar que los estudiantes del nivel 1 de los grupos experimentales muestran una mejora en el aprendizaje de la energía

Tres meses después de haber sido aplicado el programa de actividades sobre la energía, se pasará a los estudiantes de los grupos experimentales, tanto del autor como de otros profesores, el cuestionario de alumnos 3.1 que aparece en el capítulo 3. Recordemos que consta de 11 items de respuesta abierta y que ha sido utilizado para detectar las dificultades de los alumnos en el concepto de energía. A continuación, se compararán los resultados obtenidos por los grupos experimentales con los de control. Para determinar si las diferencias son estadísticamente significativas, se utilizará la prueba “t de Student”.

La correspondencia entre las subhipótesis operativas, referentes a los alumnos, de nuestra segunda hipótesis y los items del cuestionario aparece en la siguiente tabla:

Subhipótesis operativas	Items
Reconocer la energía como una propiedad de todos los sistemas	2
Diferenciar las clases de energía y reconocer la correcta localización de la energía potencial	7, 8
Utilizar la energía para interpretar fenómenos mecánicos.	1, 4
Considerar la conservación de la energía como un principio y los diversos enunciados en mecánica y termodinámica, señalando los límites de validez de cada uno de ellos	5
Activar los esquemas de transformación, conservación, transferencia y degradación de la energía	3, 4, 6, 9, 10, 11
Utilizar el principio de conservación de la energía en todos los campos de la física.	1, 4, 9, 10, 11

### 6.3.2. Diseño para contrastar que los estudiantes del nivel 2 de los grupos experimentales muestran una mejora en el aprendizaje de la energía

Para los grupos de nivel 2 el diseño experimental será semejante al utilizado con los alumnos del nivel 1. Únicamente se diferenciará en el cuestionario aplicado. Para ello, se utilizará el cuestionario 3.2 aparecido en el capítulo 3. Dicho cuestionario está formado por 14 preguntas de respuesta abierta. A continuación, y de forma análoga al diseño del apartado anterior, se realizará el análisis de los datos de los grupos experimentales y de control por medio de la prueba “t de Student”.

Subhipótesis operativas	Items
Reconocer la energía como una propiedad de todos los sistemas.	2
Diferenciar las clases de energía y reconocer la correcta “localización” de la energía potencial.	7, 8
Utilizar la energía para interpretar fenómenos mecánicos.	1, 4
Considerar la conservación de la energía como un principio y los diversos enunciados en mecánica y termodinámica, señalando los límites de validez de cada uno de ellos.	5
Activar los esquemas de transformación, conservación, transferencia y degradación de la energía.	3, 4, 6, 9, 10, 11
Utilizar el principio de conservación de la energía en todos los campos de la física.	1, 4, 9, 10, 11, 12, 13, 14

### 6.3.3. Diseño para mostrar los cambios experimentados por los estudiantes de un grupo experimental antes y después del aprendizaje de la energía

El autor presentará a un grupo de alumnos de cuarto curso de ESO el cuestionario de alumnos (en su versión de 11 items), que aparece como 3.1 en el capítulo 3, para ser contestado. Posteriormente, el tema de energía de nivel 1 será impartido por el autor, utilizando el programa de actividades comentado en la introducción general de los diseños experimentales. Tres meses después de haber sido desarrollado el tema, se devolverá a los alumnos el cuestionario que cumplimentaron para que realicen correcciones, de

acuerdo con sus nuevos conocimientos. Los resultados pretest y posttest serán comparados por medio de la prueba “t de Student”.

#### **6.3.4. Diseño para contrastar que las entrevistas con estudiantes de los grupos experimentales muestran que el aprendizaje de la energía ha sido significativo**

Después de que los cuestionarios de alumnos hayan sido cumplimentados, el autor realizará entrevistas con estudiantes de los grupos experimentales de los niveles 1 y 2. Los entrevistados serán elegidos al azar. Como guión de la entrevista se utilizará el propio cuestionario de alumnos. En base al mismo, se harán preguntas, se pedirán aclaraciones a las respuestas escritas o se profundizará en las mismas. Todas las entrevistas serán grabadas para ser analizadas posteriormente y extraer conclusiones.

#### **6.3.5. Diseño para contrastar un cambio positivo en la actitud hacia la ciencia y su aprendizaje de los estudiantes de los grupos experimentales**

La investigación didáctica ha puesto de manifiesto que los alumnos a los que se ha aplicado una metodología de investigación dirigida experimentan un cambio en sus actitudes así como en los conceptos y método de trabajo. Si nuestra propuesta para la enseñanza de la energía se ha desarrollado tomando como base dicho modelo educativo, una de las consecuencias de su aplicación a los estudiantes debe ser el desarrollo en ellos de actitudes positivas hacia la ciencia y su aprendizaje. Con el objeto de determinar si se produce tal cambio actitudinal se ha diseñado el cuestionario 6.1 que aparece a continuación. En él se pide a los estudiantes que valoren, en una escala de 0 a 10, varios aspectos relacionados con el tipo de enseñanza que reciben. Será contestado por estudiantes que siguen la enseñanza tradicional y por los que han aprendido el concepto de energía de acuerdo con nuestra propuesta.

##### **Cuestionario 6.1. Cuestionario de actitudes de los alumnos**

**En este cuestionario encontrarás varias afirmaciones sobre el modo en que tu profesor te enseña la Física y la Química. Te pedimos que valores cada una de ellas entre 0 y 10, según el grado de acuerdo que tengas con ellas. Gracias por tu colaboración.**

Con el método de enseñanza que utiliza mi profesor:

- |   |     |
|---|-----|
| 1. conozco cuáles son mis errores y los corrijo.....  | ( ) |
| 2. utilizo aspectos del trabajo científico (hago hipótesis, diseños para verificarlas, etc.)..... | ( ) |
| 3. entiendo las cosas que me están enseñando.....   | ( ) |
| 4. participo en la clase.....   | ( ) |
| 5. aumenta mi interés por la ciencia.....   | ( ) |
| 6. hago actividades relacionadas con la técnica y con las cosas diarias.....                      | ( ) |
| 7. trabajo en equipo con mis compañeros.....  | ( ) |

La relación entre las subhipótesis operativas y los ítems del cuestionario anterior aparecen en la tabla siguiente.

Subhipótesis operativas	Ítems
Los alumnos a los que se les ha aplicado la propuesta alternativa reconocerán que la misma:	
desarrolla en ellos una actitud positiva hacia la ciencia.	5
favorece la realización de actividades relacionadas con la técnica y con aspectos de la vida cotidiana, y la utilización del método del trabajo científico.	2,6
tiene en cuenta sus ideas previas y facilita la participación en la clase, el trabajo en grupo y la comprensión de los conceptos.	1,3,4,7

#### 6.4. Diseños para la contrastación de la tercera subhipótesis referente a la valoración positiva de la propuesta alternativa que hacen los profesores que la conocen o utilizan

Con el fin de analizar la valoración que hacen los profesores de la propuesta alternativa de la enseñanza de la energía, se ha confeccionado un cuestionario (6.2) que consta de dos partes. En la primera se pide la valoración de aspectos metodológicos de la propuesta, mientras que en la segunda aparecen aspectos relacionados con los contenidos.

**Cuestionario 6.2. Cuestionario de profesores**

**Valora de 0 a 10 los siguientes apartados de la metodología propuesta (el programa de actividades sobre la energía y su conservación):**

- 1.1. Facilita la detección y corrección de errores .....( )
- 2.1. Facilita la adquisición de conceptos científicos .....( )
- 3.1. Familiariza a los alumnos con la metodología científica .....( )
- 4.1. Presenta las relaciones de la ciencia con la tecnología, la sociedad, el medio ambiente, etc. ....( )
- 5.1. Favorece la participación de los alumnos .....( )
- 6.1. Aumenta el interés de los alumnos por la ciencia .....( )

**Si deseas comentar alguna de dichas valoraciones, hazlo a continuación.**

**Valora de 0 a 10 los siguientes aspectos relativos a contenidos de la propuesta:**

- 1.2. Tiene en cuenta las ideas previas de los alumnos sobre trabajo, energía y calor .....( )
- 2.2. No se limita sólo a establecer relaciones cuantitativas entre trabajo y energía, sino que realiza razonamientos cualitativos y basados en la experiencia .....( )
- 3.2. Realiza un análisis crítico de las leyes de conservación, clarificando cuándo se trata de teoremas (el de la conservación de la energía mecánica) o de principios de conservación que se cumplen siempre .....( )
- 4.2. Muestra el principio de conservación de la energía como un principio no sólo de la mecánica y de la termodinámica, sino de toda la física .....( )

**5.2. Activa los esquemas de conversión, transferencia, conservación y degradación de la energía ..... ( )**

**Si deseas comentar alguna de dichas valoraciones, hazlo a continuación.**

**Señala otros aspectos satisfactorios o insatisfactorios que has encontrado en la propuesta.**

**¿Qué actividades suprimirías o cambiarías?**

**¿Qué actividades incluirías (nuevas, en sustitución de las anteriores, etc.)?**

El cuestionario anterior será presentado a los profesores de enseñanza secundaria que asistan a cursos de formación de Física y Química en los que se presenten alternativas de tipo constructivista a la enseñanza habitual de transmisión oral de conocimientos. El cuestionario se contestaría en la última sesión del curso de formación.

Por otra parte, el cuestionario de profesores también podrá ser cumplimentado por profesores que, tras asistir a un curso de formación, hayan decidido utilizar los programas de actividades de enseñanza de la energía con sus grupos de alumnos.

La relación entre los enunciados operativos de la subhipótesis (referente a la valoración positiva por parte de los profesores de los materiales alternativos para la enseñanza de la energía) y los items del cuestionario se muestran en la tabla que aparece a continuación.

Subhipótesis operativas	Items
La propuesta alternativa de enseñanza de la energía, en los aspectos metodológico y actitudinal:	
Presenta actividades sobre las relaciones de la ciencia con la técnica y la sociedad.	4.1
Aumenta las actitudes positivas de los alumnos hacia la ciencia.	5.1, 6.1
Produce un cambio conceptual al permitir que los alumnos manifiesten sus ideas a través de la emisión de hipótesis, las contrasten y extraigan conclusiones,	1.1, 2.1 y 3.1

de acuerdo con la metodología científica.

Tiene en cuenta las ideas previas de los alumnos. 1.2

La propuesta alternativa de enseñanza de la energía, en el aspecto conceptual:

Establece relaciones cualitativas entre trabajo y energía. 2.2

Considera conjuntamente los esquemas de transformación, conservación, transferencia y degradación de la energía. 5.2

Introduce la conservación de la energía en mecánica como un teorema y señala que no se trata de un principio. 3.2

Presenta la conservación de la energía en termodinámica como la verificación contrastada de experiencias, y señala que se trata de un caso particular. 3.2

Clarifica el principio de conservación de la masa/energía. 3.2

Utiliza la conservación de la energía para explicar fenómenos mecánicos, termodinámicos y de otros campos de la física. 4.2

---

## 6.5. Presentación de los programas de actividades

Como se ha indicado anteriormente, han sido confeccionados dos programas de actividades para la enseñanza de la energía, correspondientes a los niveles 1 y 2, así como actividades relacionadas con diversos aspectos de la energía que aparecen en COU y segundo curso de Bachillerato. En la redacción de los programas de actividades se han tenido presentes los principios expuestos en el capítulo 5 (Gil *et al.* 1991).

Cada programa de actividades está formado por un conjunto de tareas que los alumnos deben realizar, numeradas de forma correlativa. También aparecen comentarios, aclaraciones e informaciones suplementarias. En la versión que se presenta a continuación se recogen los comentarios para el profesor, escritos con un tipo de letra diferente para que resulten identificables con facilidad. En dichos comentarios figuran los objetivos

de las actividades, algunas respuestas que suelen dar los estudiantes y los aspectos importantes que el profesor no debe obviar en la síntesis final realizada tras la puesta en común de las respuestas de los diferentes grupos.

A continuación aparece el programa de actividades desarrollado para el cuarto curso de ESO que corresponde al nivel 1. El correspondiente al nivel 2 (primer curso de bachillerato) figura en el anexo II, mientras que las actividades que contemplan aspectos de la energía para COU y segundo curso de bachillerato se han recogido en el anexo III.

## PROGRAMA DE ACTIVIDADES - CUARTO CURSO ESO

### ENERGÍA, TRABAJO Y CALOR

Galileo ya se planteaba el problema de si existe alguna relación entre el desplazamiento experimentado por un cuerpo mientras sobre él actúa una fuerza y el cambio de velocidad que se produce. Esta búsqueda de relaciones directas entre cambios (no sólo de velocidad) o transformaciones de la materia y sus causas condujo, a lo largo de un sinuoso proceso de más de 150 años, a la introducción de nuevas magnitudes físicas -en particular a los conceptos de trabajo, energía y calor- y al establecimiento de relaciones que iban a mostrar una gran potencia explicativa y predictiva.

**A.0.** Cita algún ejemplo de uso de la energía por los seres humanos a lo largo de la historia.

Índice:

1. Conceptos cualitativos de trabajo y energía
  - 1.1. Idea cualitativa de trabajo
  - 1.2. Idea cualitativa de energía
  - 1.3. Formas de energía
2. Profundización en el concepto de trabajo
  - 2.1. Definición operativa de trabajo
  - 2.2. Medida de la eficacia en la realización de trabajo
3. Profundización en el concepto de energía.
  - 3.1. Energía cinética
  - 3.2. Energía potencial gravitatoria

4. Ley de conservación y transformación de la energía
5. Concepción actual de la naturaleza del calor: una transferencia de energía
6. Otras formas de transferencia de la energía. La degradación de la energía.
7. Problemas asociados al uso de la energía y posibles soluciones

**Comentario general**

Antes de abordar las ideas cualitativas de trabajo y energía conviene detenerse para justificar el interés del tema. Para ello, se utilizará la actividad A.0. que permite que los estudiantes reflexionen sobre la importancia de la energía en la sociedad. Señalaremos, a continuación, la dificultad que ofrece la introducción del concepto de energía. No olvidemos que la elaboración de este concepto, hasta llegar a su total comprensión mediante el principio de conservación de la energía, fue un proceso que duró unos dos siglos. Por otra parte, los conceptos de energía y de campo son los más potentes, fructíferos y unificadores de la física clásica. Como dice Holton (1979) "el concepto de energía proporcionó un vínculo unificador de los fenómenos mecánicos y térmicos, el concepto de campo suministró a la electricidad, el magnetismo, la gravedad y la luz un marco común de teorías físicas". Además, el campo y la energía siguen conservando su validez en la física moderna. Todo ello, pone de manifiesto su importancia y, por tanto, la necesidad de introducirlo en la enseñanza secundaria obligatoria. Esto hace que la propia dificultad del concepto se vea agravada por la escasez de tiempo y la falta de herramientas matemáticas.

Como consecuencia de esta dificultad, existe una polémica en la didáctica de las ciencias, sobre la conveniencia de comenzar introduciendo el concepto de trabajo antes del de energía o viceversa. Opinamos que es preferible una introducción prácticamente simultánea de los conceptos de trabajo y energía por lo que introduciremos, en primer lugar, el concepto cualitativo de trabajo y, a continuación, el de energía. El tratamiento cuantitativo de ambas magnitudes se realizará de forma sencilla, sin distinguir entre los distintos tipos de trabajo (conservativo, disipativo, etc.), aspecto que se abordará en el primer curso de Bachillerato. Por tanto, nos limitaremos a mostrar que el trabajo que se realiza sobre un cuerpo puede producir variaciones de energía cinética, potencial o de ambas. Esto, pensamos, puede facilitar la comprensión por el alumnado de la conservación y la variación de la energía.

A lo largo del tema se presentan actividades de repaso y de consolidación. Con ellas se pretende que los estudiantes apliquen de forma reiterada los conceptos que han elaborado en la realización de las actividades. También se incluyen cuadros en los que se presentan aspectos sociales y técnicos, dada la mejora que producen en el aprendizaje al establecer conexiones con los intereses de los alumnos.

A continuación aparecen los objetivos que se pretenden conseguir y las dificultades que se presentan en su consecución.

Objetivos	Dificultades de aprendizaje
Reconocer la energía como una propiedad de todos los sistemas	Asociar la energía sólo a los sistemas en movimiento o con vida.
Identificar el trabajo como un proceso de transferencia de energía	Analizar un fenómeno como una secuencia temporal de acontecimientos sin considerar el sistema de forma global.

Clasificar distintas formas de energía como cinéticas o potenciales.	Identificar las formas de energía con sus fuentes.
Caracterizar el trabajo mecánico como el producto de una fuerza por el desplazamiento que realiza	Identificar el trabajo con el esfuerzo.
Reconocer la energía cinética como la asociada al movimiento	
Asociar la energía potencial gravitatoria a la posición de un objeto sobre la Tierra y atribuirla a la interacción entre el objeto y la Tierra.	Localizar la energía potencial gravitatoria en un objeto.
Reconocer que la energía de un sistema aislado se conserva.	Reconocer el consumo de energía pero no su conservación.
Reconocer que la energía se transforma..	Analizar los fenómenos en términos perceptivos sin considerar la transformación de la energía.
Establecer las limitaciones de la conservación de la energía mecánica.	Desconocer la transformación de energía mecánica en calor.
Reconocer el calor como un mecanismo de transferencia de energía	Identificar el calor con la temperatura
Interpretar el primer principio de la termodinámica y reconocerlo como una generalización de la ley de conservación de la energía mecánica.	No reconocer la degradación de la energía.
Reconocer la degradación de la energía. como la transformación de energía mecánica en calor.	Identificar la transformación de energía mecánica en interna como un gasto de energía.
Utilizar la conservación de la energía en la interpretación de fenómenos de importancia social: crisis de la energía, energías renovables.	Desconocer las relaciones de la ciencia con los fenómenos de la vida cotidiana.
Valorar las consecuencias ambientales de la producción y consumo de la energía.	Desconocer las relaciones de la ciencia con los fenómenos de la vida cotidiana.

## 1. CONCEPTOS CUALITATIVOS DE TRABAJO Y ENERGÍA

### 1.1. Idea cualitativa de trabajo

Un sistema es un cuerpo o conjunto de cuerpos que separamos del Universo para estudiar lo que les sucede. Lo que queda fuera de él se llama entorno o alrededores. Los sistemas físicos interactúan de distintas formas entre sí y estas interacciones producen

cambios en los mismos. Introduciremos a continuación cualitativamente algunos conceptos que nos permitirán estudiarlos.

**A.1.** Considera diversos ejemplos de lo que se entiende por trabajo en la vida corriente y establece a partir de los mismos el concepto cualitativo de trabajo

**Comentarios A.1.**

Digamos, de entrada, que esta actividad permite superar las habituales introducciones puramente operativas, carentes de significado físico. Como en tantos otros casos, la discusión cualitativa permite conectar con las ideas que los alumnos ya tienen. En la exposición de los distintos grupos aparecen las ideas de cambio (transformación) y de fuerza (esfuerzo). Tras la puesta en común, la clase puede llegar así al concepto cualitativo de trabajo como "la transformación de la materia a través de las interacciones, es decir, por la acción de fuerzas", según la clásica definición de Maxwell, que expresa con bastante propiedad una primera idea de trabajo.

Sería didácticamente incorrecto pasar por alto la frecuente confusión entre trabajo y esfuerzo. Se trata de un error conceptual bastante generalizado. Conviene, pues, detenerse en ésta y otras posibles confusiones abordando los ejemplos propuestos por los alumnos. Así, la cuestión "¿Se trabaja cuando se está sosteniendo un objeto?" exige una respuesta matizada. Parece evidente que el objeto (si es indeformable) no sufre transformaciones. Sin embargo, la impresión de estar realizando trabajo que los alumnos tienen no es errada: el propio sujeto que soporta al objeto experimenta transformaciones (su corazón va más deprisa, transpira...).

Por último, hay que insistir en que la comprensión del concepto no puede lograrse sin tener en cuenta sus relaciones con el concepto asociado de energía, al que se refieren también los alumnos desde el primer momento.

## **1.2. Idea cualitativa de energía**

El concepto de energía nos es muy familiar por usarse frecuentemente en el lenguaje cotidiano, pero conviene que nos detengamos para aclarar y profundizar en su significado físico.

**A.2.** Expón las ideas cualitativas que se tengan sobre el concepto de energía

**A.3.** Explica si los siguientes cuerpos tienen energía: a) una persona que camina; b) una botella de agua; c) un coche que se mueve con una velocidad de 120 km/h; d) una persona que está sentada; e) una cacerola con agua hirviendo.

**A.4.** ¿Qué sucede con la energía de un sistema que realiza trabajo? Pon un ejemplo.

El trabajo se nos muestra como una forma de transferencia de energía desde un sistema al exterior o viceversa. Si el sistema realiza trabajo, disminuye su energía. Si se realiza trabajo sobre el sistema, aumenta su energía.

**Comentarios A.2.-A.4.**

Hay que señalar que, en la actividad A.2., la idea de energía como "capacidad de un sistema para realizar trabajo" (o para transformar la materia) surge sin dificultades aparentes.

En la actividad A.3. vemos que los alumnos no reconocen la energía como una propiedad de todos los cuerpos debido a que asocian la energía con el movimiento o con los seres vivos. De acuerdo con dicha concepción, los cuerpos en reposo no poseerán energía. Por su parte, la A.4. conduce a expresar la idea de que, al realizar trabajo, el sistema consume energía, experimenta una variación de energía. Por supuesto, esta idea (que puede concretarse en una hipotética relación entre el trabajo  $W$  y la variación de energía, de la forma  $W = \Delta E$ ) es aún muy imprecisa y habrá de ser profundizada. Pero, de entrada, permite comprender mejor los ejemplos de realización de trabajo en situaciones de la vida práctica considerados en A.1. Así puede entenderse más claramente por qué al sostener un objeto se realiza trabajo (asociado a una disminución de energía del sujeto).

**1.3. Formas de energía**

La importancia de la energía en las sociedades modernas hace que todos los días oigamos hablar de ella, si bien hay que señalar que no siempre el lenguaje ordinario coincide con el científico y ello es fuente de nuevas confusiones que intentamos clarificar en este apartado.

**A.5.** Enumera las distintas formas de energía que conozcáis.

**A.6.** Indica, para cada una de las formas de energía consideradas, en qué se basa su capacidad de realizar trabajo, de transformar la materia.

**A.7.** Elabora una relación de fuentes de energía, indicando su naturaleza, problemas de su utilización, etc.

**A.8.** Sigue en la prensa, durante el tiempo que indique el profesor, todas las noticias relacionadas con la energía. Elabora un dossier con las mismas con el fin de debatir las consecuencias sociales, económicas, medioambientales, tecnológicas, etc., que el uso de la energía genera.

**A.9.** Visita una central de producción de energía (hidráulica, nuclear, térmica, solar, etc.) y realiza un trabajo sobre la misma.

**Comentarios A.5.-A.9.**

En la actividad A.5. los alumnos enumeran toda una serie de formas de energía, mezcla de denominaciones presentes en libros, prensa, etc. Resalta el desorden de esta enumeración, que la actividad A.6. debe contribuir a superar haciendo ver el carácter cinético de algunas denominaciones (energía eólica, ...) y el carácter potencial de las demás (¡no sólo la potencial gravitatoria!). En definitiva ha de

quedar claro que toda la energía o es cinética -asociada al movimiento relativo de unos objetos respecto a otros- o es potencial, es decir, debida a las interacciones de los cuerpos (gravitatorias, eléctricas) y avanzar que, por supuesto, no se debe hablar de energía térmica o calorífica, error conceptual muy frecuente todavía incluso en algunos textos y que es necesario deshacer. También conviene dejar de utilizar la expresión "energía mecánica" (cinética más potencial gravitatoria)

Una vez establecidas las formas de energía es fácil que los alumnos comprendan que la mayor parte de las formas enumeradas en A.5. son fuentes de energía, como podemos ver en A.7. Se puede concretar, realizando un estudio de los tipos de energía consumida en nuestro país. Por último, es conveniente clasificar dichas fuentes atendiendo a su impacto ambiental (duras o blandas), a su carácter renovable, etc. Las actividades A.8. y A.9. son típicas de las relaciones CTS.

El cuadro permite reflexionar a los estudiantes sobre las necesidades que se satisfacen con el consumo de energía. También permite comprobar que el consumo de las energías ha aumentado al evolucionar éstas con el tiempo. Así mismo, se observa el desigual consumo de energía, tanto en las fuentes como en la cantidad, que se realiza en el primer y en el tercer mundo.

### Cuadro 1. EL CONSUMO DE ENERGÍA EN EL MUNDO

El consumo de energía ha ido en aumento constante debido a dos razones: por el crecimiento de población y por el incremento de energía consumida por habitante. Así, en las sociedades cazadoras una persona consumía 20.000 J/día, en las primeras sociedades agricultoras 50.000 J/día, en la sociedad industrial europea hacia 1870, 280.000 J/día y un norteamericano hacia 1970, 1.000.000 J/día. También ha ido variando el tipo de energía consumida mayoritariamente: en la antigüedad, la leña; durante la revolución industrial, el carbón y, en la actualidad, el petróleo.

Sin embargo, las cifras de consumo revelan un abismo que separa los países pobres de los ricos. Los 270 millones de norteamericanos consumen tanta energía -en un 80 % de origen fósil- como los 3.600 millones de habitantes de África, América del Sur y Asia. Así, en el año 1994, un habitante de los EE.UU. consumía por año 8 TEP; uno de la Unión Europea, 3,7 TEP; uno de España, 2,4 TEP; uno de la India, 0,2 TEP (El TEP - tonelada equivalente de petróleo- es la energía obtenida por la combustión de una tonelada (1.000 kg) de petróleo.  $1 \text{ TEP} = 4,18 \cdot 10^{10} \text{ J}$ ).

En cuanto a los tipos de energía consumida en el mundo, las dominantes son las no renovables (un 82 % del total). Éstas se distribuyen en petróleo (36 %), carbón (25 %), gas natural (17 %) y nuclear (4 %). Las energías renovables aportan en la actualidad un 18 % de la energía primaria (un 11 % corresponde a la leña, un 6% a la hidráulica y el 1% restante a diversas energías como la solar -térmica y fotovoltaica-, eólica, etc.).

En esto también hay grandes diferencias entre el mundo desarrollado y el tercer mundo. Un 30 % de la humanidad (1.700 millones de personas) queda excluida de cualquier forma de energía que no sea la que proporciona la biomasa (leña, especialmente). Hay 2.400 millones de personas que no tienen acceso a la electricidad. Por ello, en los porcentajes de consumo de energía primaria en el tercer mundo, la biomasa representa el 35 % del total, el petróleo el 26 %, el carbón el 25 %, el gas natural el 8 %, etc. Por el contrario, en la Unión Europea el consumo de energía renovables sólo representa el 5,38 %, mientras que el 3,25 % corresponde a la biomasa y el 1,91 % a la energía hidroléctrica.

**C1.** ¿Qué necesidades humanas tratamos de satisfacer con el uso de la energía? ¿Cómo están evolucionando dichas necesidades y, en consecuencia, el consumo de energía?

**C.2.** Valora críticamente la distribución del consumo mundial de energía

## 2. PROFUNDIZACIÓN EN EL CONCEPTO DE TRABAJO

### 2.1. Definición operativa de trabajo

Hemos visto que trabajo es el acto de transformar la materia mediante la aplicación de fuerzas. Sin embargo, en física es necesario buscar definiciones que permitan calcular el valor de la magnitud trabajo. Para ello, hay que saber cómo depende de otras magnitudes.

**A.10.** Limitándonos al dominio de las transformaciones mecánicas que hemos estudiado en temas anteriores, propón una definición de trabajo basada en el concepto cualitativo que acabamos de establecer.

**A.11.** La unidad de trabajo en el sistema internacional es el Julio (J). Propón una definición de la misma.

**A.12.** Propón ejemplos de trabajo dando una estimación de su valor en unidades internacionales.

**A.13.** Se eleva una masa de 50 kg a una altura de 12 m con una velocidad constante. ¿Qué trabajo hemos realizado? ¿Que trabajo ha hecho la fuerza peso? ¿Cuál es el trabajo realizado por la fuerza resultante?

**A.14.** Se ha de subir un tonel a un camión desde el suelo. Considera cualitativamente cuándo se realiza más trabajo: al elevar directamente el tonel o al utilizar un plano inclinado.

Comentarios A.10.-A.14.

La definición operativa  $W = F \cdot d$  que los alumnos proponen en la actividad A.10. (y que conviene aceptar inicialmente, pese a sus indudables limitaciones) aparece ahora como consecuencia del concepto cualitativo y así debe ser verbalizado por los alumnos, al menos en lo que se refiere a la inclusión de ambos factores (la fuerza  $F$  y el desplazamiento  $d$ ). Pero la idea de una proporcionalidad directa de ambos factores es una simple hipótesis que debe ser profundizada, evitando así respuestas memorísticas. Se les puede plantear, para ello, que analicen otras expresiones y razonen si pueden ser consideradas como definiciones operativas correctas de la magnitud trabajo, por ejemplo,  $W = F/d$  o  $W = F+d$ .

En la actividad A.11. se debe insistir en la necesidad de evitar definiciones del tipo "1 N x 1m" carentes de todo significado. Al hacerlo, los alumnos llegan a proponer una definición más física como "trabajo que se realiza cuando una fuerza de 1 N se desplaza 1 m".

Insistimos en que estas actividades de "materialización" (como la A.12.) son muy convenientes para familiarizar a los alumnos con estimaciones reales. Situaciones como el trabajo realizado al elevar una maleta a una altura dada o un ascensor a un piso determinado pueden, además, preparar al alumno para entender la relación del trabajo con la energía potencial.

En la actividad A.14. los alumnos responden habitualmente que se hace menos trabajo subiendo el tonel por el plano inclinado, con lo que se pone en evidencia la confusión trabajo/esfuerzo y se puede así insistir de nuevo en el concepto cualitativo de trabajo (¿Acaso la transformación lograda no ha sido la misma?) y en el error de considerar la variación de un único factor ("menos fuerza, menos trabajo") olvidando el otro ("más desplazamiento").

**Cuadro 2. LAS ENERGÍAS RENOVABLES**

Son energías que no agotan recursos y que tienen un bajo impacto ambiental. Las más utilizadas en la actualidad son la biomasa y la hidroeléctrica.

La biomasa es la materia orgánica que directamente o sometida a un proceso de transformación puede ser utilizada como fuente de energía. Muchos autores incluyen en este concepto la leña utilizada como combustible. Pero no hay que olvidar que los árboles tienen un ciclo de renovación largo y que algunas técnicas de explotación forestal (como las cortas a hecho) impiden dicha renovación. Otros incluyen sólo la biomasa destinada directamente a aplicaciones energética (plantaciones de caña de azúcar, sorgo, etc.) y la biomasa residual que incluye residuos forestales y agrícolas, ganaderos (estiércol), residuos sólidos urbanos orgánicos, aguas residuales, etc. Se utilizan directamente como combustible y abono. Por fermentación anaeróbica se puede obtener a partir

de ellos biogás (60 % de metano y 40 % de dióxido de carbono), o bioalcohol a partir de la caña de azúcar. Brasil ha desarrollado un plan de bioalcohol como combustible sustitutivo de la gasolina. China e India son los mayores productores de biogás.

Menos utilizadas son la energía geotérmica, eólica o solar. La geotérmica se basa en el calor procedente de la Tierra, especialmente de zonas volcánicas. Se están realizando investigaciones en las islas Canarias.

La eólica utiliza la energía cinética del viento que mediante molinos, turbinas y generadores se transforma en energía eléctrica. Se utiliza para suministrar electricidad directamente a granjas o aldeas retiradas y, cuando la potencia aumenta, para suministrar energía a la red eléctrica. Hay parque eólicos en la Muela (Zaragoza), Manzanares, As Pontes (Galicia), etc.

La energía solar es un término confuso porque incluye gran cantidad de dispositivos que sólo tienen en común la utilización directa de la luz del Sol. Podemos mencionar los paneles solares (que suministran agua caliente para uso doméstico), la arquitectura solar, los hornos solares (que concentran los rayos solares con espejos para producir elevadas temperaturas), las centrales electrosolares (grandes hornos solares, que calientan un fluido que acciona turbinas y generadores), las células solares fotovoltaicas, construidas a partir de semiconductores, como el silicio, que transforman la luz en electricidad.

**C.1.** Los partidarios de las energías convencionales sostienen que las alternativas son incapaces de solucionar nuestras necesidades y que su rendimiento es muy bajo. Valora críticamente esta afirmación.

**C.2.** ¿Por qué crees que las empresas eléctricas no dejan conectar a la red las pequeñas instalaciones de células fotovoltaicas?

### 2.3. Medida de la eficacia en la realización de trabajo: concepto de potencia

En la vida cotidiana no interesa tanto el trabajo como la eficacia con que éste se realiza, especialmente cuándo hablamos de máquinas (un coche, una grúa, etc.). Abordaremos esta cuestión en las siguientes actividades:

**A.15.** Propón una definición de una magnitud que mida la mayor o menor eficacia con que se realiza el trabajo.

**A.16.** La unidad de potencia en el Sistema Internacional es el vatio (w). Propón una definición de la misma.

**A.17.** Da estimaciones aproximadas del valor de la potencia para algunos ejemplos reales (motor de ascensor, persona subiendo una escalera, ...)

**A.18.** El kw.h (kilovatio-hora) es una unidad de trabajo muy utilizada. Da una definición de la misma y calcular su equivalencia con el julio.

**A.19.** Haz una estimación aproximada del consumo eléctrico de un mes en tu casa (teniendo en cuenta todos los electrodomésticos, bombillas, ...) y compara con los kw.h que indican los recibos de la compañía eléctrica.

Comentarios A.15.-A.19.

En la actividad A.15., aunque la mayor parte de los grupos parten de la idea de que una máquina eficaz es la que realiza mucho trabajo en poco tiempo (lo que conduce directamente a introducir la relación  $W/t$  como medida de la "eficacia"), algunos alumnos o el mismo profesor pueden hacer referencia a que se trata de un planteamiento puramente cuantitativo que deja de lado el aspecto "calidad". Las actividades 17, 18 y 19 son ejemplos de relaciones de la ciencia con la vida cotidiana.

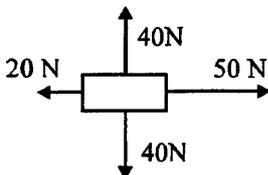
### ACTIVIDADES DE REPASO Y CONSOLIDACIÓN

1. En las situaciones que aparecen a continuación, señala si se realiza o no trabajo: a) Subir un saco a una altura determinada, b) picar una piedra, c) empujar una pared, d) caminar sosteniendo una maleta.

2. Si una persona hace menos trabajo que la energía que adquiere por los alimentos, ¿qué le ocurrirá? ¿Y si hace un trabajo mayor que la energía que ingiere?

3. Una persona arrastra horizontalmente 20 m un saco de 500 N de peso. Luego lo sube a 25 m. Calcula el trabajo total que la persona realiza sobre el saco.

4. Al desplazarse 8 m un cuerpo por un plano horizontal actúan sobre él las fuerzas representadas en la figura. a) Indicar las interacciones que pueden representar dichas fuerzas, b) ¿Cuál es el trabajo realizado sobre el sistema?



5. ¿Qué ventajas presenta un coche de más potencia frente a otro de menos potencia? Explicalo.

### 3. PROFUNDIZACIÓN EN EL CONCEPTO DE ENERGÍA

Hemos visto que la energía es la capacidad de un sistema para realizar transformaciones de la materia, en particular, para realizar trabajo.

#### 3.1. Energía cinética

Como ya sabemos, la experiencia enseña que un cuerpo dotado de movimiento es capaz de realizar trabajo. A este tipo de energía se le llama cinética. A continuación, profundizaremos en ella.

**A.20.** Un coche choca accidentalmente contra una pared. ¿Se realiza algún trabajo? Indica varias situaciones en las que ocurra lo mismo.

**A.21.** Señala, a título de hipótesis, de qué magnitudes dependerá la energía cinética de un cuerpo que se mueve con respecto a otros.

**A.22.** Sobre un cuerpo en reposo se realiza un trabajo para desplazarlo sobre una superficie horizontal. ¿Qué velocidad adquirirá?

**A.23.** Calcula el trabajo necesario para aumentar la velocidad de un cuerpo de 40 kg desde 25 a 50 m/s.

#### Comentarios A.20.-A.23.

Las actividades A.20. y A.21 son una nueva ocasión para la emisión de hipótesis. Conducen a los alumnos a expresar la energía cinética en función de la velocidad y de la masa. El profesor debe hacerles reflexionar sobre el hecho de que las consecuencias de un choque no son proporcionales a la velocidad.

Las actividad A.22. permite, si se ha introducido la expresión  $d = at^2/2$ , deducir que  $W = Fd = ma^2t^2/2$  y sustituyendo  $t = v/a$ , encontramos que  $W = mv^2/2$ . Como, en este caso, la energía cinética inicial es 0, podemos generalizar que  $W = \Delta E_c$ . También se puede resolver mediante consideraciones cualitativas similares a las de la A.9. Para ello, se puede ver que el trabajo produce variaciones en la energía debida al movimiento, es decir, en la energía cinética. La A.23. es un ejercicio de aplicación, sin dificultades, de la relación  $W = \Delta E_c$ .

### 3.2. Energía potencial gravitatoria

En la práctica nos encontramos con sistemas capaces de realizar un trabajo, independientemente de su estado de movimiento. Así, un arco en tensión, un muelle comprimido, dos imanes próximos o un cuerpo situado a una altura sobre la Tierra. Estos sistemas poseen una energía asociada a la posición de sus partes, que se denomina potencial y es debida a la existencia de fuerzas entre dichas partes. De todas las formas de energía potencial consideradas vamos a ocuparnos únicamente de la energía potencial gravitatoria del sistema constituido por la Tierra y un objeto próximo a ella.

**A.24.** Indica de qué factores cabe suponer que dependerá la energía potencial gravitatoria cuando se tiene un cuerpo en las proximidades de la superficie terrestre.

A veces se habla de la energía potencial de un cuerpo, pero esta energía no es una propiedad del cuerpo. En efecto, la energía potencial se debe a la interacción del cuerpo y de la Tierra, es decir, a la interacción del cuerpo con el campo gravitatorio terrestre.

**A.25.** Sobre un cuerpo situado a una altura determinada se realiza un trabajo. ¿Cómo variará su energía potencial?

**A.26.** Un libro de 5 kg se encuentra a 2 m del suelo de una habitación que, a su vez, está a 15 m sobre la calle. Halla la energía potencial referida al suelo de la habitación y al suelo de la calle.

El cuerpo se deja ahora en libertad y cae hasta el suelo de la habitación. Halla la variación de energía potencial utilizando como sistemas de referencia: a) el suelo de la habitación, b) la calle. Comenta los resultados.

#### Comentarios A.24.-A.26.

La actividad A.24. es ocasión de practicar, de nuevo, la emisión de hipótesis. La actividad A.25. pretende que los propios alumnos determinen la relación  $W = Fd = mgh$ , es decir,  $W = \Delta E_p$ . Pueden comprender que, si se realiza un trabajo sobre el cuerpo, la energía potencial gravitatoria aumenta y, por tanto, su variación es positiva. Por el contrario, el trabajo realizado por la fuerza de la gravedad disminuye la energía potencial.

Por último, la actividad A.26. permite a los alumnos constatar el carácter relativo de las energías potenciales (con respecto al nivel tomado como origen de alturas) y el carácter absoluto de las variaciones. Conviene llamar la atención sobre el error cometido en ocasiones por los alumnos, consistente en dar a  $g$  (en la expresión  $mgh$ ) valores negativos o positivos "según el sistema de referencia". Este error proviene, seguramente, de una fijación funcional adquirida en cinemática y que aquí carece de sentido.

**ACTIVIDADES DE REPASO Y CONSOLIDACIÓN**

6. Compara la energía cinética de una bala de 100 g que lleva una velocidad de 360 m/s con la de un camión de 3 Tm que va a una velocidad de 7,2 km/h.
7. Una persona de 80 kg se mueve con una velocidad de 5 m/s. ¿Cuál será su velocidad si sufre un empujón que supone sobre la persona un trabajo de 20 J?
8. Cuando una persona de 70 kg está a cierta altura, la energía potencial es de  $2 \cdot 10^4$  J. ¿A qué altura se encuentra la persona?

**4. LEY DE CONSERVACIÓN Y TRANSFORMACIÓN DE LA ENERGÍA**

En el apartado anterior hemos estudiado las transformaciones que se producen cuando modificamos la posición de un cuerpo o cambiamos su velocidad. En cada caso hemos establecido que el trabajo realizado sobre el cuerpo suponía una variación de energía potencial  $\Delta E_p$  o cinética  $\Delta E_c$ , respectivamente. En general, el trabajo sobre un cuerpo podrá modificar a la vez la posición y la velocidad del cuerpo, cumpliéndose

$$W = \Delta E_c + \Delta E_p$$

**A.27.** Señala qué le ocurrirá a la energía de un sistema que esté aislado del exterior, es decir, que no intercambia energía con su entorno mediante trabajo o cualquier otro proceso de transferencia.

**A.28.** Diseña algún montaje experimental para contrastar la ley de conservación de la energía mecánica en alguna situación particular de fácil realización.

**A.29.** Explica las transformaciones de energía que tienen lugar en los siguientes procesos: a) un coche choca contra un muelle que le hace rebotar; b) una linterna que funciona con pilas; c) un micrófono; d) Un molino de viento mueve una noria que sube agua desde una acequia a otra superior; e) Un molino de agua mueve una dinamo con la que se alimenta una estufa eléctrica.

**A.30.** Desde el suelo se lanza hacia arriba un cuerpo de masa  $m$  con una velocidad  $v$ . Describe cómo varía su energía cinética y potencial hasta llegar al suelo.

**.31.** Un cuerpo cae por la acción de la gravedad de modo que al pasar por un punto situado a 8 m de altura, su velocidad es de 10 m/s. ¿Qué velocidad llevará cuando pase por un punto situado a 2 m de altura?

Por último, es necesario mostrar las aparentes limitaciones de la ley de conservación de la energía mecánica.

**A.32.** Considera situaciones en las que parezca no cumplirse el principio de conservación de la energía.

Comentarios A.27.-A.32.

La actividad A.27. permite deducir fácilmente que en un sistema aislado se tiene que  $W = 0$  y, por tanto, deberá cumplirse que  $\Delta E = \Delta(E_c + E_p) = 0$ , o también,  $E = \text{constante}$ . En la A.28. nos encontramos con un trabajo experimental muy complejo y sujeto a grandes imprecisiones. Los alumnos pueden concebir montajes experimentales relativamente sencillos (como un carrito deslizando con rozamiento despreciable por un plano horizontal, tirado por un cuerpo que pende verticalmente a través de una polea o un péndulo) pero su realización supera sin duda sus posibilidades. Esta puede ser una ocasión para insistir en que no siempre un equipo de investigadores realiza todas las tareas de un proyecto.

La actividad A.29. permite que los estudiantes realicen cadenas de transformación de energía. Las actividades A.30. y A.31. muestra la potencia del nuevo tratamiento. En la A.32. se consideran situaciones en las que interviene la fricción. Con ellas se introduce una aparente limitación a la idea de conservación. Se pospone la clarificación completa de la cuestión al estudio del apartado siguiente.

### Cuadro 3. LA ENERGÍA SOLAR

La casi totalidad de la energía de nuestro planeta procede del Sol. Esta energía se determina a partir de la constante solar, definida como la potencia por unidad de superficie de la luz del Sol que llega a la atmósfera terrestre. Su valor es de unos  $1,395 \text{ kw/m}^2$ . Por tanto, el valor de la energía solar interceptada por la superficie iluminada de la Tierra durante un segundo es de  $173 \cdot 10^{12} \text{ kw}$ . Representa el 99,9 % de la energía en la superficie terrestre. La pequeña parte del total que no es de origen solar procede de la energía del calor interno de la Tierra (volcanes, manantiales calientes, etc.), de la energía de las mareas (debida a la interacción gravitatoria de la Luna, la Tierra y el Sol) y de la energía nuclear (causada por la desintegración de sustancias radiactivas).

Aproximadamente un 30 % de la potencia solar incidente es reflejada directamente al espacio, mientras que el 2 % es absorbido en la capa de ozono. Un 45 % es absorbido por la atmósfera, la superficie terrestre y los océanos y convertido en calor, que es radiado de nuevo (en especial, por la noche) como infrarrojo. El 23 % es consumido en el ciclo hidrológico (evaporación, precipitación y circulación superficial del agua). Un 0,2 % produce vientos, olas y corrientes oceánicas. Por último, el 0,02 % es utilizado en

la fotosíntesis. Para hacernos una idea de lo que esto supone, señalemos que la energía eléctrica consumida en España en 1994 fue 12.490 kTEP.

**C1.** Teniendo en cuenta las horas de insolación, la nubosidad, etc., podemos considerar una potencia por unidad de superficie de  $220 \text{ w/m}^2$  (al nivel del mar). Si ésta se recoge en unas células fotovoltaicas con un 10 % de rendimiento, ¿qué superficie sería necesaria para producir la energía eléctrica consumida en nuestro país? ¿Qué tanto por ciento de la superficie española representa? (Superficie de España =  $504.750 \text{ km}^2$ )

### ACTIVIDADES DE REPASO Y CONSOLIDACIÓN

9. Se lanza hacia arriba un cuerpo de masa  $m$  con una velocidad inicial  $v_0 = 15 \text{ m/s}$ . Aplicando el principio de conservación de la energía, calcula hasta qué altura llegará.

10. Se dispara una bala contra un muro. ¿Qué distancia penetrará?

11. ¿Cómo crees que varía la energía de un cuerpo lanzado verticalmente hacia arriba, a medida que la altura aumenta hasta alcanzar el valor máximo? ¿Y la energía total?

12. Un cuerpo de  $4 \text{ kg}$  cae libremente desde una altura de  $2.000 \text{ m}$ . Si suponemos que  $g$  es constante y despreciable el rozamiento del aire,

a) calcula el tiempo total de caída.

b) calcula, cada dos segundos contados a partir del instante inicial, el valor de la energía potencial y el de la energía cinética (a partir de los valores de  $h$  y de  $v$  obtenidos cinemáticamente). Verifica si la suma de ambas se mantiene constante. Construir una tabla que racionalice los cálculos.

c) representa los valores obtenidos de energía potencial, cinética y total en un mismo diagrama frente al tiempo.

## 5. CONCEPCIÓN ACTUAL DE LA NATURALEZA DEL CALOR: UNA TRANSFERENCIA DE ENERGÍA

Dado que el estudio fenomenológico del calor o calorimetría se ha visto en cursos anteriores, nos limitaremos aquí a una breve revisión.

**A.33.** Recopila los conocimientos de cursos anteriores relativos al calor especificando:

- a) qué ocurre cuando se ponen en contacto dos cuerpos que se encuentran inicialmente a distinta temperatura.
- b) de qué depende la cantidad de calor que absorbe o desprende un cuerpo al variar su temperatura.
- c) qué relación cualitativa guardan las cantidades de calor que ganan o pierden dos cuerpos puestos en contacto y aislados del exterior.
- d) qué ocurre, desde el punto de vista térmico, cuando los cuerpos se golpean o frotan entre sí.

Sabemos que el rozamiento o el choque de los cuerpos produce su calentamiento. En la actividad anterior hemos visto que dichos fenómenos están vinculados a aparentes limitaciones del principio de conservación de la energía. La resolución de este complejo problema, a principios del siglo XIX, por Thomson, Mayer, Joule y otros, permitió integrar el estudio del calor o calorimetría en el dominio de la mecánica.

Thomson escribió: "Estando encargado... del taladro de cañones en la fábrica del arsenal militar de Munich, quedé sorprendido por el grado considerable de calor que adquiere, en un tiempo muy pequeño, una pieza de latón cuando es perforada". El calor engendrado por fricción "parecía no agotarse nunca. Era forzoso concluir que lo que un cuerpo aislado o sistema de cuerpos podía proporcionar de modo continuo, sin limitación, no podía ser una sustancia material, y me parece extremadamente difícil, si no imposible, imaginar algo capaz de ser producido a la manera que lo es el calor en estos experimentos si no es movimiento".

**A.34.** ¿Qué concepción del calor pone en cuestión la experiencia de Thomson? Emite una nueva hipótesis acerca de la naturaleza del calor.

Esto llevó a Joule a diseñar una serie de montajes experimentales para tratar de establecer la equivalencia entre calor y trabajo. En la actividad siguiente podemos estudiar uno de ellos.

**A.35.** Al caer dos pesas, de 30 kg cada una, desde una altura de 2 m, producen, por fricción (a través de un sistema de palas que hacen girar las pesas al ir bajando) una elevación de 0,56 °C en la temperatura de 500 g de agua. Calcula: a) el trabajo realizado a expensas de la energía potencial de las pesas; b) el calor producido; c) el equivalente mecánico del calor, es decir, a cuantas calorías equivale un julio.

La equivalencia entre trabajo y calor pone de manifiesto que éste es otra forma de transferencia de energía que produce transformaciones en los cuerpos.

**A.36.** Enumera cambios que puede producir el calor en los sistemas físicos.

Con el establecimiento de la equivalencia calor/trabajo, el principio de conservación y transformación de la energía adquiere una validez mayor. Mayer y Helmholtz enunciaron dicho principio de una forma más general, denominada primer principio de la termodinámica. Dicho principio nos dice que el contenido energético o energía interna de un sistema puede variar porque se realiza un trabajo -por el sistema o sobre él - o porque el sistema absorbe o cede calor. De esta forma, podemos escribir:

$$Q - W = \Delta E$$

donde Q representa el calor absorbido por el sistema, W el trabajo realizado por el mismo y E su energía interna.

**A.37.** Explica las transformaciones de energía que tienen lugar en los siguientes procesos: a) Un coche choca contra un muro y se para; b) Una persona sopla para hinchar un globo; c) Se calienta una habitación con una estufa eléctrica; d) Se quema leña en una máquina de vapor que hace girar una rueda por medio del cual se sube un cuerpo.

**A.38.** ¿Qué importancia tiene para nuestra sociedad la producción de trabajo a partir del calor?

**Cuadro 4. LAS MÁQUINAS TÉRMICAS  
Y LA PRIMERA REVOLUCIÓN INDUSTRIAL**

Hay muchos antecedentes de la máquina de vapor, como Porta, Papin y Savery. La primera máquina de vapor que funcionó con éxito a partir de 1712 fue la de Newcomen (1664-1729). El retorno del pistón era debido a la presión atmosférica. Se utilizaba para extraer agua de las minas.

La realización de una máquina eficaz, accionada completamente por vapor, fue obra de James Watt (1736-1819) que, al reparar una máquina de Newcomen, tuvo en 1765 la idea de introducir separado el condensador que permanecía frío. Básicamente, la máquina constaba de una caldera, cuyo vapor entra en un cilindro metálico y empuja el pistón hacia fuera. El pistón está conectado a una rueda por una biela que transforma el movimiento alternativo del pistón en movimiento circular. Cuando el pistón alcanza la posición más alejada, se cierra la válvula de entrada, abriéndose la de salida. La inercia de la rueda hace que el pistón se mueva y que el vapor salga por la otra válvula hacia el condensador y la caldera.

Las máquinas de vapor se utilizaron en trenes y barcos, en la maquinaria textil, la

metalurgia, etc. Estas innovaciones técnicas posibilitaron la primera revolución industrial (1760-1870). Los inventos técnicos no fueron obra de científicos, sino de artesanos que estaban al corriente de los procedimientos técnicos en uso y que conocían por la práctica el problema que había de resolverse. Así, Newcomen era herrero y James Watt era constructor de instrumentos de precisión. En resumen, la construcción y utilización de máquinas térmicas es previa al desarrollo de la termodinámica. De la misma forma, las técnicas siderúrgicas, de blanqueo y tinte de tejidos, etc., son anteriores a la química. Pero, a su vez, plantean problemas cuya solución contribuyó al desarrollo de esas ciencias. Hasta mediados del siglo XIX, en pleno desarrollo de la primera revolución industrial, los desarrollos técnicos siguen precediendo a los científicos.

Una buena prueba de las escasas relaciones entre ciencia y técnica durante este período es el hecho de que no exista una correspondencia estrecha entre liderazgo científico e industrial. La ciencia inglesa llegó a un estado de declive en el siglo XVIII postnewtoniano, cuando empezaba su decisivo liderazgo en la energía de vapor y en la industria textil, metalúrgica y minera. El florecimiento de la ciencia francesa en el siglo XVIII y principios del XIX, cuando París era el centro científico del mundo, no estuvo acompañado de un desarrollo comparable al avance industrial. Rusia produjo numerosos científicos e inventores durante el siglo XIX, que ejercieron un impacto insignificante en el desarrollo económico del país. El ascenso de Estados Unidos a una posición de florecimiento de crecimiento económico y liderazgo tecnológico ocurrió durante el siglo XIX, período en el que los logros norteamericanos en la ciencia básica fueron mínimos.

- C1.** ¿Hasta qué punto ha influido la ciencia en estos desarrollos? O, en otras palabras, ¿qué desarrollos se producen en primer lugar, los científicos o los tecnológicos?
- C2.** ¿Ha cambiado esa situación en la actualidad?

**A.39.** Indica otras máquinas térmicas que no sean las de vapor. Busca en la bibliografía su forma de funcionamiento.

**A.40.** Trata de explicar el funcionamiento de un sistema de calefacción central.

**Comentarios A.33.-A.40.**

Este apartado supone que el alumnado ya ha estudiado, en el primer ciclo, los conceptos de trabajo, energía (con un tratamiento más sencillo que el de este programa de actividades) y el de calor, con un tratamiento detallado. Por eso, la A.33. permite revisar el intercambio de calor entre dos cuerpos hasta que se igualan sus temperaturas, llegando hasta la introducción de las ecuaciones  $Q = cm\Delta T$  y  $Q_1 + Q_2 = 0$ . Por tanto, el objetivo básico de este apartado es clarificar

el concepto de calor como trabajo, saliendo al paso de los errores habituales de considerarlo como una sustancia o una forma de energía almacenada en los cuerpos. La actividad A.34. permite criticar la idea de calórico y que aparezca la idea de asociar el calor con la agitación o movimiento de todas las partículas del cuerpo. El profesor puede referirse a las dificultades que encontró Thomson para que su idea fuera aceptada (entre otras razones porque no pudo dar resultados cuantitativos).

El profesor puede describir los trabajos de Mayer, Joule y los resultados obtenidos (Holton 1979). Todos estos trabajos (a los que Joule dedicó su vida como científico aficionado) condujeron a establecer la equivalencia entre el calor y el trabajo. La actividad A.35. permite analizar los resultados de un experimento similar a uno de los realizados por Joule y hace necesario revisar la ecuación de calor absorbido o cedido.

La actividad A.36. permite mostrar la capacidad del calor para producir transformaciones como la dilatación de las sustancias, los cambios de estado, etc. Conviene que el profesor se detenga aquí y (siguiendo, por ejemplo, la explicación dada en el texto de Alonso y Finn) deje muy claro que no hay que concebir el calor como una forma de energía (error muy extendido), sino pura y simplemente trabajo. Un trabajo asociado al desplazamiento de las partículas de un cuerpo y que no puede medirse, por razones obvias de la forma habitual (lo que obligaría a seguir el desplazamiento de cada partícula y medir la fuerza que actúa en cada instante sobre cada una). La magnitud calor aparece así como una globalización estadística del trabajo realizado sobre cada partícula. Un trabajo que se traduce en variaciones de energía cinética de las partículas (agitación que se mide, también estadísticamente, con el concepto de temperatura). Y no puede hablarse de contenido en energía calorífica (a pesar de que se suele hacer) como no puede hablarse de contenido en energía "trabajosa" (cosa que, afortunadamente, nadie hace). La comprensión del calor como forma de trabajo abrió paso al establecimiento del principio de conservación de la energía en una serie de procesos en los que parecía no cumplirse. En la actividad A.37. los alumnos deben indicar las transformaciones de energía que tienen lugar en los procesos propuestos. Las A.38, A.39. y A.40. son ejemplos de actividades de interacción ciencia/técnica/sociedad.

En el cuadro 4 se aprecia claramente cómo los desarrollos técnicos han precedido a los científicos, por lo menos hasta la segunda revolución industrial, a finales del siglo XIX (C.1.). La cuestión C.2. permite mostrar que, en la actualidad, esto no es así, produciéndose una relación más dialéctica entre ciencia y tecnología. Hay avances científicos que originan nuevas tecnologías y desarrollos tecnológicos que plantean nuevos problemas a la ciencia o permiten construir nuevos instrumentos de observación y experimentación que permiten nuevos avances científicos.

Quizá convenga que el profesor clarifique que los desarrollos técnicos son una de las causas de la revolución industrial pero no son la única o la determinante. Pensar lo contrario, sería incurrir en determinismo tecnológico. Los autores, empezando por Marx en su obra "El capital", que han estudiado los orígenes de la revolución industrial en Gran Bretaña, mencionan múltiples cambios que la favorecieron. En primer lugar, las innovaciones agrícolas de finales del XVIII: la sustitución del sistema de rotación trienal (trigo, cebada o avena y barbecho) por el cuatrienal (trigo, cebada o avena, nabos y trébol, que al fijar el nitrógeno aumenta la productividad de la tierra), la introducción de nuevos arados y trilladoras, la ampliación de regadíos, la generalización del uso de abonos, el cercamiento y la concentración parcelaria, etc. Se transforma así la agricultura tradicional en agri-

cultura de mercado y se produce un aumento de población y una disminución de los trabajadores agrícolas, base de la mano de obra industrial. Otros cambios son la mejora en el transporte (especialmente el fluvial) y la ampliación del comercio exterior y, en particular, la inversión del capital acumulado en la industria, pasando el empresario a ser el propietario de los medios de producción y organizándolos para obtener el máximo beneficio. Por ello, la aparición del sistema fabril no es una revolución tecnológica sino un cambio en el control social de la producción; se sustituye el control del obrero en el trabajo a domicilio por el control del capitalista en la fábrica, donde la disciplina y la supervisión consiguen la reducción de costes.

## **6. OTRAS FORMAS DE TRANSFERENCIA DE ENERGÍA. LA DEGRADACIÓN DE LA ENERGÍA**

En este tema hemos visto que si un sistema está aislado su energía se conserva, aunque puede transformarse o convertirse de unas formas a otras. También hemos visto que cuando el sistema no está aislado, transfiere su energía a otros sistemas o viceversa y se produce una variación de la energía del sistema. Los dos mecanismos o formas de transferencia de energía que hemos visto en este tema son el trabajo y el calor.

**A.41.** Enumera situaciones en las que se propague energía de un lugar a otro. Dichas situaciones no deben estar producidas por un desplazamiento neto de materia ni por una diferencia de temperaturas.

Sin embargo, con las propiedades de transformación, conservación y transferencia no está completa nuestra descripción de la energía, como se puede apreciar en las siguientes actividades.

**A.42.** Si lanzamos un bloque deslizándose sobre el suelo o ponemos dos cuerpos en contacto a diferente temperatura, ¿qué sucede?

**A.43.** Con relación a la actividad anterior, no observamos que pase calor del suelo al bloque ni que éste se ponga en movimiento. Por otra parte, si dos cuerpos se encuentran a diferentes temperaturas y se ponen en contacto, tampoco observamos que pase calor neto de uno a otro. ¿Crees que se cumple la conservación de la energía en dichos procesos?

Lo que sucede es que tras cada transformación de la energía, ésta pierde calidad, es menos útil, se degrada. Por eso, en la naturaleza hay procesos que se realizan en un sólo sentido, en los cuales la calidad de la energía se reduce. Dichos procesos se denominan irreversibles.

Así, la energía cinética, la potencial gravitatoria o el trabajo, pueden transformarse completamente en energía interna o calor, pero el calor sólo puede transformarse en trabajo (por ejemplo, en las máquinas térmicas) si hay diferencias de temperatura, y, además, dicho calor no puede transformarse completamente en trabajo. Por ello, todas las máquinas y motores tienen rendimientos inferiores al 100 %.

Comentarios A.41.-A.43.

La actividad A.41. permite mostrar que, además del trabajo y del calor, existen otras formas de transferencia de energía, como las ondas. Las acústicas y las radiaciones electromagnéticas tienen una relevancia especial por su capacidad de transmitir información. Además, estas últimas constituyen el principal mecanismo de transferencia en el Universo. Las estrellas, como el Sol, irradian así su energía.

En las actividades A.42. y A.43. vemos que el objeto que se desliza acaba parándose y que las temperaturas acaban equilibrándose. Pero el proceso inverso nunca se observa en la naturaleza, aunque no implique el incumplimiento de la conservación de la energía. Esto pone de manifiesto la necesidad de un nuevo principio de degradación de la energía, que impide que la energía degradada (la interna) se transforme en energía cinética.

## 7. PROBLEMAS ASOCIADOS AL USO DE LA ENERGÍA Y POSIBLES SOLUCIONES

Una vez estudiada la energía podemos abordar los principales problemas ligados al crecimiento de su consumo, que han dado lugar a la llamada crisis energética.

**A.44.** Explica cuáles son los principales problemas asociados a la obtención y consumo de energía.

A continuación pasaremos a profundizar brevemente en dichos problemas.

**A.45.** Se estima que el consumo anual de petróleo es  $2,9 \cdot 10^9$  TEP, el de carbón  $2,4 \cdot 10^9$  TEP y el de gas natural de  $1,6 \cdot 10^9$  TEP y que las reservas de petróleo son de  $122 \cdot 10^9$  TEP, las de carbón de  $535 \cdot 10^9$  TEP y las de gas  $97 \cdot 10^9$  TEP. Calcula en cuántos años se producirá el agotamiento de los combustibles fósiles suponiendo que el consumo se mantenga constante. ¿Qué validez piensas que debe tener esta suposición?

**A.46.** La Unión Europea emite a la atmósfera  $2,8 \cdot 10^9$  toneladas de  $\text{CO}_2$ , el 13 % de la producción mundial, un 80 % de las cuales proviene de la producción, transformación y consumo de energía, que son a su vez responsables de 67 % de las emisiones de  $\text{SO}_2$  y del 27 % de  $\text{NO}_x$ . ¿Qué problemas originan estas emisiones?

**A.47.** ¿Cuáles son las posibles soluciones a los problemas vistos en las actividades anteriores producidos por la obtención y consumo mundial de energía?

**A.48.** Haz propuestas para resolver las necesidades humanas que permitan un desarrollo sostenible.

Comentarios A.44.-A.48.

La actividad A.44. permite reflexionar sobre las principales consecuencias: el impacto ambiental (por ejemplo, las mareas negras), el agotamiento de combustibles (y, en general, de recursos porque la utilización de la madera está produciendo deforestación en muchos países) y el mantenimiento de la desigualdad (ya que el consumo de energía es diferente en los distintos países, como vimos en el Cuadro 1). La A.45. muestra que las reservas de petróleo pueden durar unos 40 años; las de gas, 60 y las de carbón, unos 220 años. Hay previsiones que alargan el plazo del petróleo unos 10 o 20 años más porque consideran que existen más reservas, pero dichas previsiones suponen que el consumo de energía se mantendrá constante, lo cual es poco probable si se tiene en cuenta el mayor desarrollo de países como China o los de Latinoamérica. En la A.46. vemos que los problemas de las emisiones son el efecto invernadero (asociado al cambio climático global), la lluvia ácida (formada al reaccionar los óxidos de azufre y nitrógeno con agua y producir ácido sulfúrico y nítrico) que produce deforestación y mal de piedra, el "smog" en las grandes ciudades, etc.

En la actividad A.47. vemos que la solución es reducir el consumo (y, en consecuencia, reducir las emisiones) pero esto no se puede pedir a los países del tercer mundo porque impediría su desarrollo. Por todo ello, hay que insistir en la reducción de la contaminación cuando se usa energía (mediante la eliminación de impurezas en el carbón utilizado en las centrales térmicas, el uso de catalizadores en los coches, ecopetroleros de doble casco, etc.), en la utilización de energías renovables y no contaminantes (solar, eólica, geotérmica, etc.) y en el aumento de eficiencia en el uso de la energía (bombillas de bajo consumo, transporte público, bicicletas en lugar de coches, etc.). Hay que insistir en la importancia de las "pequeñas" acciones individuales (en casa, en el Instituto) que responden al planteamiento de pensar globalmente y actuar en un nivel local. A este respecto es muy instructivo el libro "50 cosas sencillas que tú puedes hacer para salvar la Tierra", The Earth Works Group, 1992, La Caixa.

El concepto de desarrollo sostenible, que se aborda en la actividad A.48., fue introducido en el informe Brundtland "Nuestro futuro común" (1987), que intenta hacer compatibles desarrollo y ecología. Este informe se basa especialmente en una ecología de la pobreza, es decir, en una serie de medidas internacionales para favorecer el desarrollo sostenible del tercer mundo. Entre dichas medidas se pueden indicar el aumento de la ayuda económica de los países avanzados (el 0,7 % de su PIB), la transferencia de tecnologías modernas y eficientes energéticamente (en lugar de las tecnologías contaminantes y obsoletas que se transfieren en la actualidad), cambiar la deuda exterior del tercer mundo (que absorbe buena parte de sus recursos) por medidas ecológicas; sustitución de los monocultivos, controlados por las multinacionales, por cultivos propios, etc. Estas medidas se deben complementar con otras para los países avanzados: reforma de los sistemas de contabilidad para que incluyan la merma de capital natural, hacer pagar a las empresas el coste de restauración del aire, agua, suelo, etc. que deterioran, es decir, internalizar las externalidades por medio de un impuesto o tasa ecológica; elaboración de leyes que incentiven a las empresas y a los ciudadanos en el uso de energías renovables, a utilizar más eficientemente la energía y los recursos propios, a limitar la contaminación, a reciclar los residuos, a proteger los es-

pacios naturales y a recuperar los degradados, etc. No sólo basta con medidas proteccionistas o conservacionistas. Se necesitan también cambios en el modelo económico del primer mundo. Es necesario reducir la producción y el transporte (reducir, reciclar, reutilizar), consumir menos, etc. También es necesario que todo esto no se haga a expensas de los más débiles (por ejemplo, incrementando el paro) sino distribuyendo más equitativamente el trabajo y los beneficios.

### ACTIVIDADES DE REFUERZO Y DE AMPLIACIÓN

13. En numerosas ocasiones, la fuerza que actúa sobre un cuerpo no lleva la dirección del desplazamiento. Considera algunos ejemplos en que ocurra y discute si la definición operativa de trabajo introducida es válida en esos casos o debe ser modificada.

14. Un niño arrastra un trineo por el hielo mediante una cuerda que forma un ángulo de  $60^\circ$  con la horizontal. Si la tensión de la cuerda es 50 N, ¿qué trabajo realizará al desplazarlo 8 m?

15. Una máquina eleva una masa de 200 kg a una altura de 15 m en 8 s. ¿Qué potencia desarrolla? Da el resultado en kw y CV.

16. La fuerza resultante que actúa sobre un cuerpo de 30 kg ha realizado sobre él un trabajo de 2.500 J. Si inicialmente la velocidad era de 8 m/s, ¿cuál será la nueva velocidad después de haberse realizado el trabajo?

17. Se deja una masa de 10 kg en el punto A de una montaña rusa (sin rozamiento). a) ¿Hasta donde llegará deslizándose libremente? b) ¿Cuál será su energía potencial y cinética en los puntos B y C? (La altura en el punto A es 40 m; en el B, 20 m y en el C, 5 m)

18. Realiza un trabajo sobre el aislamiento térmico, su importancia y formas de conseguirlo.

19. Diseña un modelo elemental de turbina de vapor y constrúyelo.



## **CAPÍTULO 7**

### **PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LOS DISEÑOS REALIZADOS PARA LA CONTRASTACIÓN DE LA SEGUNDA HIPÓTESIS**

De acuerdo con nuestra segunda hipótesis, es posible conseguir un cambio significativo en el aprendizaje de la energía, de modo que se considere su conservación, transferencia, transformación y degradación así como el carácter de principio de toda la física en su conservación. La contrastación de dicha hipótesis se realizará mediante un conjunto de diseños convergentes, elaborados a partir de las tres subhipótesis expuestas en el capítulo 6. El análisis de los resultados de los diferentes diseños permitirá constatar el grado de correlación y coherencia entre ellos.

Recordemos que las tres subhipótesis derivadas señalan que es posible la elaboración de materiales alternativos para la enseñanza de la energía cuya aplicación supondrá en los alumnos una mejora en el aprendizaje de la energía y un cambio de actitud hacia la ciencia y su aprendizaje. Dicha propuesta será valorada positivamente por parte de los profesores que la conocen o la han puesto en práctica. En este capítulo se procederá al análisis de los resultados obtenidos por aplicación de los diseños correspondientes a las tres subhipótesis indicadas.

En la realización de los diferentes diseños experimentales han participado 324 estudiantes de grupos de control y 284 de grupos experimentales. También se ha contado con la participación de 33 profesores en activo de Física y Química.

#### **7.1. Resultados referentes a la posibilidad de elaboración de materiales alternativos para la enseñanza y aprendizaje de la energía**

La contrastación de la primera subhipótesis se ha realizado por medio de la elaboración de nuevos materiales. Para ello, se han desarrollado dos programas de actividades. El primero está destinado a estudiantes de cuarto curso de ESO y segundo de BUP (nivel 1), mientras que el segundo se dirige a alumnos de primer curso de Bachillerato y tercero de BUP (nivel 2). También se han utilizado actividades relacionadas con la ener-

gía procedentes de un texto de segundo curso de Bachillerato (Solbes y Tarín 1996). Las características de estos materiales se han descrito en el capítulo 6 donde también se presentó el programa de actividades de nivel 1. Por otra parte, en los anexos II y III aparecen las actividades correspondientes al nivel 2 y al segundo curso de Bachillerato.

## **7.2. Resultados referentes al cambio en el aprendizaje de los estudiantes de los grupos experimentales y en sus actitudes**

Para la constatación de la segunda subhipótesis referente a la mejora en el aprendizaje del concepto de energía por parte de los estudiantes se han realizado cuatro diseños convergentes. En el primero se comparan los resultados obtenidos en el cuestionario de estudiantes por el grupo de control (presentados en el capítulo 3) y el experimental de nivel 1. También se ha realizado una comparación semejante entre los estudiantes de los grupos de control y experimental de nivel 2. El grupo experimental de nivel 1 está formado por 153 alumnos. En él se han incluido los estudiantes de segundo curso de BUP y de cuarto curso de ESO. Un total de 131 alumnos de tercer curso de BUP, COU y primer y segundo cursos de Bachillerato integran el grupo experimental de nivel 2.

En el tercer diseño se han examinado las diferencias en las respuestas que un grupo de estudiantes ha dado a un mismo cuestionario, aplicado antes y después de haberse impartido un tema referente a la energía. Por último, se han realizado entrevistas con alumnos.

Recordemos que el cuestionario cumplimentado por los estudiantes en los diseños primero y segundo está formado por 11 ítems en los que se recogen aspectos fundamentales del concepto de energía. Los alumnos que han participado en el segundo diseño han contestado tres ítems complementarios referentes a aspectos de la energía que no se tratan en el primer cuestionario.

En cada uno de los tres primeros diseños se presentará una tabla de resultados y una gráfica comparativa para proceder después a un análisis detallado de los resultados de cada uno de los ítems. En la comparación de los resultados obtenidos por los grupos de control y experimentales se ha utilizado la prueba *t de Student* con objeto de determinar si las diferencias son significativas desde el punto de vista estadístico.

### 7.2.1. Resultados obtenidos en la contrastación de que los estudiantes de nivel 1 de los grupos experimentales muestran una mejora en el aprendizaje de la energía

El grupo experimental de nivel 1 está formado por 153 alumnos. De ellos, 108 proceden de tres Institutos diferentes y 45 han sido tratados por el autor, de acuerdo con la siguiente distribución:

NIVEL	Número de grupos	Número de alumnos	Instituto
ESO-4 curso	1	22	Instituto A
BUP-2 curso	1	35	Instituto B
BUP-2 curso	2	51	Instituto C
ESO-4 curso	2	45	Instituto del autor

En la tabla 7.1 aparecen los porcentajes (%) de respuestas correctas correspondientes al cuestionario de alumnos de nivel 1. Se muestran por separado los resultados de los grupos de control y de los tratados por el autor y por otros profesores. También se recoge la desviación estándar (d.e.) y se indica si la diferencia entre los resultados de los grupos de control y experimentales (del autor y de otros profesores) es significativa de acuerdo con la prueba *t de Student*.

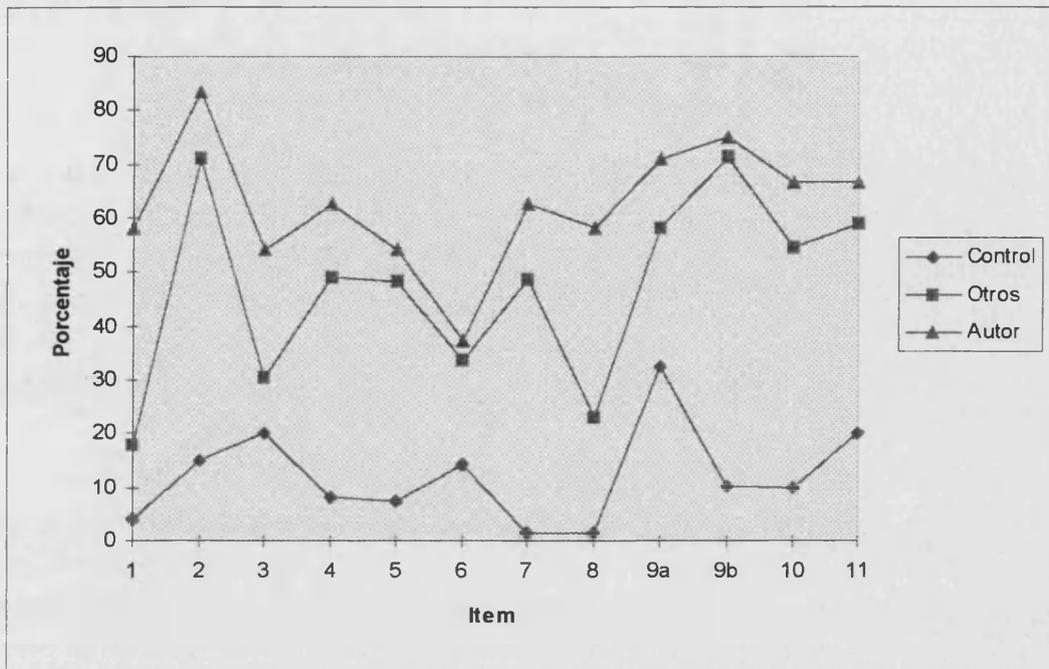
Tabla 7.1. Resultados comparativos del cuestionario de alumnos. Nivel 1

Item	Control N = 156		Otros N = 108		Dif. sign.	Autor N = 45		Dif. sign.
	%	d.e.	%	d.e.	$\alpha < 0,01$	%	d.e.	$\alpha < 0,01$
1. En la figura aparece una bola que se mueve por un riel. Si no existe rozamiento y se deja caer desde el punto indicado, señala con una cruz el punto que alcanzará.	4,1	1,6	17,8	3,7	Sí	58,3	7,3	Sí
2. Cita tres ejemplos de sistemas con energía y tres de sistemas sin energía.	15,0	2,9	71,2	4,4	Sí	83,3	5,6	Sí
3. Indica fenómenos que puedan ser explicados por el principio de conservación de la energía.	20,3	3,2	30,3	4,4	No	54,2	7,4	Sí
4. Se deja caer una pelota de tenis sobre un suelo duro y se observa que rebota como se ve en la figura. ¿Se	8,2	2,2	49,0	4,8	Sí	62,5	7,2	Sí

conserva la energía mecánica en el sistema formado por la pelota y el suelo?								
5. La conservación de la energía, ¿es un principio o un teorema?	7,3	2,1	48,1	4,8	Sí	54,2	7,4	Sí
6. Se lanza verticalmente y hacia arriba una piedra con una determinada velocidad inicial. Si se utiliza el principio de conservación de la energía se puede calcular la altura que alcanza. ¿Cómo se podría calcular la velocidad que tiene en cualquier punto de la trayectoria?	14,1	2,8	33,7	4,5	Sí	37,5	7,2	Sí
7. ¿Crees que la energía es sólo cinética o potencial?	1,3	0,9	48,6	4,8	Sí	62,5	7,2	Sí
8. Un cuerpo de 25 kg situado a una altura de 30 m se dice que tiene una energía potencial de 7500 J. ¿Dónde crees que está esa energía potencial?	1,4	0,9	23,0	4,0	Sí	58,3	7,3	Sí
9.a. Un trozo de hierro se calienta al rojo vivo y se deja enfriar. ¿Se conserva la energía en el sistema formado por el aire y el trozo de hierro?	32,7	3,8	58,2	4,7	Sí	70,8	6,8	Sí
9.b. Indica los mecanismos por los que se transfiere la energía que tiene el trozo de hierro.	10,3	2,4	71,2	4,3	Sí	75,0	6,5	Sí
10. Explica las transformaciones de energía que tienen lugar desde que el agua contenida en un pantano produce electricidad hasta la utilización de dicha electricidad para hervir agua en una cocina.	9,8	2,4	54,4	4,8	Sí	66,7	7,0	Sí
11. Si la energía se conserva, ¿por qué se habla de crisis energética?	20,0	3,2	58,8	4,7	Sí	66,7	7,0	Sí

El gráfico 7.1 muestra los porcentajes de respuestas correctas que los grupos de control y de los experimentales tratados por el autor y por otros profesores han obtenido en cada uno de los ítems del cuestionario de alumnos de nivel 1.

Gráfico 7.1. Resultados comparativos del cuestionario de alumnos. Nivel 1



Los alumnos de grupos tratados por otros profesores presentan en el ítem 1 un porcentaje de aciertos (17,8 %) superior a los del grupo de control (4,1 %), aunque bastante inferior a los grupos tratados por el autor (58,3 %). Las respuestas dadas por los alumnos son, normalmente, de tipo cuantitativo, explicando correctamente la altura alcanzada por medio de expresiones tales como “toda la energía potencial que tenía al principio se ha ido convirtiendo en energía cinética y después en una cantidad de energía potencial igual a la inicial” o “si el rozamiento es despreciable, no se puede perder energía por esa parte y alcanzará la misma altura hasta que la energía potencial vuelva a ser la del principio porque la energía se conserva”.

En el ítem 2 un porcentaje muy elevado de alumnos tratados por otros profesores (71,2 %) y por el autor (83,3 %) indican explícitamente que todos los sistemas poseen energía “aunque esté degradada y no se pueda utilizar” porque cualquier sistema “está formado por átomos en movimiento” y “tiene masa”. También cabe resaltar el hecho de que los alumnos indican como ejemplos de sistemas con energía algunas situaciones mecánicas (“movimiento de un cuerpo en un plano inclinado”, “movimiento de un coche”, etc.) y termodinámicas (“radiador calentado por agua caliente”) pero también las de tipo eléctrico (“circuito eléctrico con generador”, “motor eléctrico”, “placa solar”, “bombilla eléctrica”) y químico (“una persona bien alimentada”).

Con respecto al ítem 3, los alumnos tratados por el autor (54,2 %) y por otros profesores (30,3 %) señalan como ejemplos de fenómenos explicables por el principio de

conservación de la energía los relacionados con la electricidad (“dínamos”, “turbinas”, “luz producida en una bombilla”, transformación de energía electromagnética en eléctrica en una placa solar). También son frecuentes los fenómenos de tipo químico o biológico tales como “la respiración”, “comer alimentos” o “ir en bicicleta”.

Frente a un 8,2 % de respuestas correctas del ítem 4 en los grupos de control, los estudiantes tratados alcanzan un 62,5 % en los grupos del autor y un 49 % en los de otros profesores. Los alumnos de los grupos experimentales señalan mayoritariamente que en el sistema que aparece en el ítem “la energía mecánica no se conserva porque en cada bote se pierde energía” y “... que se transforma en energía interna”. Algunos añaden que “la energía que pierde la pelota se transfiere al suelo” y que “la energía se conserva pero no en la forma de energía mecánica sino que se transforma en energía interna que es adquirida por el suelo”.

Aproximadamente la mitad de los estudiantes de los grupos tratados (54,2 % en los grupos del autor y 48,1 % en los de otros profesores) indican que la conservación de la energía es un principio (ítem 5). Estos resultados contrastan con los obtenidos en los grupos de control (7,3 %). Los estudiantes tratados también explican las razones por las que la conservación de la energía es un principio en términos como los siguientes: “es un principio porque no se deriva de ninguna ley mientras que si fuera un teorema se derivaría de algún principio”, “es un principio porque se cumple en todo el Universo”, “es un principio porque se ha comprobado que se cumple siempre”.

Los estudiantes tratados han respondido correctamente el ítem 6 en un porcentaje sensiblemente mayor ( 37,5 % en los grupos del autor y 33,7 % en los de otros profesores) que el correspondiente a los grupos de control (14,1 %). En las respuestas correctas aparece la aplicación del principio de conservación de la energía en dos puntos: el intermedio y, generalmente, otro situado en el suelo. En muchos casos, se escriben las expresiones matemáticas correspondientes y se calcula el valor de la velocidad indicada.

El ítem 7, referente a las formas de energía, ha sido contestado correctamente tan sólo por el 1,3 % de los estudiantes del grupo de control. En los grupos tratados el porcentaje de las respuestas correctas se eleva al 62,5 % (grupos del autor) y 48,6 % (grupos de otros profesores). Con respecto a las energías cinética y potencial, los estudiantes tratados diferencian entre las múltiples fuentes de energía y sus formas o tipos en respuestas como la siguiente: “hay muchas fuentes pero pocas formas de energía” o “no se han de confundir las formas de energía con las fuentes”. Por otra parte, también reconocen que la energía cinética y potencial no son las dos únicas clases de energía y citan la electromagnética (“de la luz”, “de las ondas electromagnéticas”), la nuclear (“que depende de la energía de la masa”) o la interna.

Al comparar los porcentajes de respuestas correctas (ítem 8) dadas por los estudiantes tratados (58,3 % en el grupo del autor y 23 % en los de otros profesores) con los obtenidos en los grupos de control (1,4 %) se aprecia un aumento muy significativo. Los estudiantes tratados señalan la necesidad de dos cuerpos para que la energía potencial gravitatoria tenga porque “sin la Tierra no habría atracción y no habría energía potencial”. También indican que la energía potencial “no está en el cuerpo solo o en la Tierra sola” sino “en el sistema formado por el cuerpo y la Tierra”. Esta afirmación se justifica porque “la energía potencial es debida a la atracción de la Tierra sobre los objetos”.

En el ítem 9 más de la mitad de los estudiantes de los grupos tratados (70,8 % en el grupo del autor y 58,2 % en los de otros profesores) contestan correctamente que la energía se conserva en el sistema indicado. Las explicaciones son de varios tipos:

- a) Conservación de la energía por transferencia de energía: “aunque el trozo de hierro pierde energía, no se pierde para siempre sino que se transfiere al aire” “hasta que las temperaturas se igualan”.
- b) Utilización de la energía interna: “la energía se conserva en el aire como energía interna” o “la energía interna del hierro pasa al aire”
- c) Interpretación microscópica de la conservación de la energía: “los átomos del hierro se mueven a más velocidad y chocan con los del aire haciendo que se muevan más rápidamente, modificando su temperatura. La energía se traspassa al chocar los átomos pero no se pierde”.

Casi las dos terceras partes de los estudiantes tratados (75 % en el grupo del autor y 71,2 % en los de otros profesores) citan los mecanismos de transferencia de energía por medio del calor. Estos resultados contrastan con el 10,3 % de respuestas correctas de los grupos de control. Aunque no se pide la explicación de los citados mecanismos, en algunas respuestas aparece una descripción detallada. Resulta muy probable que el conocimiento de los mecanismos de transferencia del calor facilite a los alumnos la interpretación correcta de la situación planteada en el ítem 9a.

Las respuestas correctas dadas en el ítem 10 por los estudiantes del grupo del autor y de otros profesores (66,7 % y 54,4 % respectivamente) suponen un gran contraste con las del grupo de control (9,8 %). Dichas respuestas aparecen en forma esquemática como una cadena de transformaciones de la energía o bien como una explicación de las transformaciones que tienen lugar. Un ejemplo del primer tipo sería “ $E_p$  (agua del pantano)  $\rightarrow E_c$ (agua en las turbinas)  $\rightarrow E_p$  (eléctrica)  $\rightarrow E_c$  (átomos)  $\rightarrow U$  (agua)”. Al segundo tipo de respuestas pertenecería la siguiente: “El agua que está en el pantano tiene energía potencial que se transforma en cinética cuando baja por las tuberías y en cinética de rotación cuando gira las turbinas, ...”.

En el ítem 11, las respuestas correctas de los alumnos de los grupos tratados (66,7 % en los del autor y 58,8 % en los de otros profesores) triplican las correspondien-

tes a los grupos de control (20 %). Los estudiantes responden a la cuestión planteada utilizando aspectos claves del concepto de energía tales como la transformación, la degradación así como su utilidad, de acuerdo con el grado de degradación: “la energía se degrada, es decir, la energía de calidad (capaz de realizar trabajo) se transforma en energía de baja calidad y esta energía no se puede utilizar para hacer ningún trabajo”. En algunos casos, las respuestas se completan en base al carácter no renovable de algunas fuentes de energía: “la crisis se debe al agotamiento de las energías de mayor calidad”.

### 7.2.2. Resultados obtenidos en la contrastación de que los estudiantes de nivel 2 de los grupos experimentales muestran una mejora en el aprendizaje de la energía

La muestra experimental correspondiente al nivel 2 la integran un total de 131 estudiantes. De ellos, 74 cursan sus estudios en tres Institutos, mientras que el autor ha aplicado la propuesta alternativa a 57. En la tabla siguiente aparece los detalles de grupos y procedencias:

NIVEL	Número de grupos	Número de alumnos	Instituto
Bachiller.-1 curso	1	24	Instituto D
BUP-3 curso	1	35	Instituto E
COU	1	15	Instituto C
Bachiller.-1 curso	1	24	Instituto del autor
Bachiller.-2 curso	1	33	Instituto del autor

Los porcentajes de respuestas correctas de los grupos de control y de los tratados por el autor y por otros profesores aparecen en la tabla 7.2. En ella también se recoge la desviación estándar (d.e.) de los porcentajes de cada ítem. Cuando es significativa la diferencia entre los resultados del grupo de control y los de los grupos tratados por el autor o por otros profesores, aparece la palabra “Sí”.

Tabla 7.2. Resultados comparativos del cuestionario de alumnos. Nivel 2

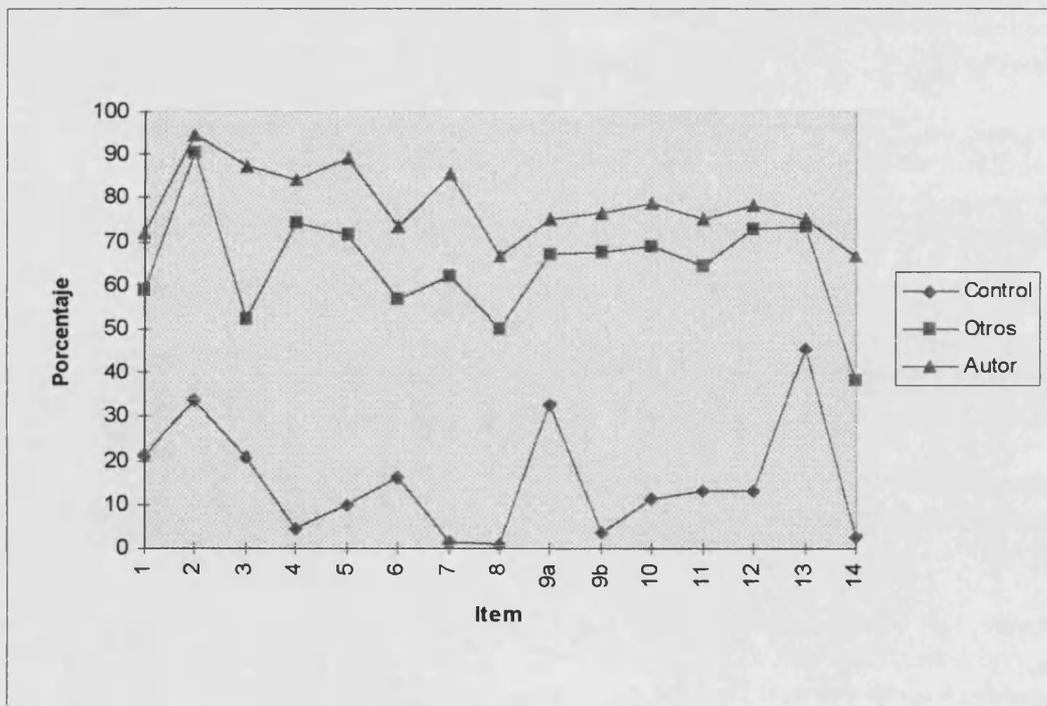
Ítem	Control N = 168		Otros N = 74		Dif. sign. $\alpha < 0,01$	Autor N = 57		Dif. sign. $\alpha < 0,01$
	%	d.e.	%	d.e.		%	d.e.	
1. En la figura aparece una bola que se mueve por un riel. Si no existe rozamiento y se deja caer desde el punto indicado, señala con una cruz el punto	21,1	3,1	58,9	5,7	Sí	71,9	5,9	Sí

que alcanzará.								
2. Cita tres ejemplos de sistemas con energía y tres de sistemas sin energía.	33,6	3,6	90,5	3,4	Sí	94,7	3,0	Sí
3. Indica fenómenos que puedan ser explicados por el principio de conservación de la energía.	20,8	3,1	52,2	5,8	Sí	87,5	4,4	Sí
4. Se deja caer una pelota de tenis sobre un suelo duro y se observa que rebota como se ve en la figura. ¿Se conserva la energía mecánica en el sistema formado por la pelota y el suelo?	4,6	1,6	74,3	5,1	Sí	84,2	4,8	Sí
5. La conservación de la energía, ¿es un principio o un teorema?	9,8	2,3	71,6	5,2	Sí	89,1	4,1	Sí
6. Se lanza verticalmente y hacia arriba una piedra con una determinada velocidad inicial. Si se utiliza el principio de conservación de la energía se puede calcular la altura que alcanza. ¿Cómo se podría calcular la velocidad que tiene en cualquier punto de la trayectoria?	16,0	2,8	56,8	5,8	Sí	73,2	5,9	Sí
7. ¿Crees que la energía es sólo cinética o potencial?	1,3	0,9	62,2	5,6	Sí	85,7	4,6	Sí
8. Un cuerpo de 25 kg. situado a una altura de 30 m se dice que tiene una energía potencial de 7500 J. ¿Dónde crees que está esa energía potencial?	0,7	0,6	50,0	5,8	Sí	66,7	6,2	Sí
9.a. Un trozo de hierro se calienta al rojo vivo y se deja enfriar. ¿Se conserva la energía en el sistema formado por el aire y el trozo de hierro?	33,1	3,6	67,1	5,5	Sí	75,0	5,7	Sí
9.b. Indica los mecanismos por los que se transfiere la energía que tiene el trozo de hierro.	3,6	1,4	67,7	5,4	Sí	76,6	5,6	Sí
10. Explica las transformaciones de energía que tienen lugar desde que el agua contenida en un pantano produce electricidad hasta la utilización de dicha electricidad para hervir agua en una cocina.	11,2	2,4	69,0	5,4	Sí	78,9	5,4	Sí

11. Si la energía se conserva, ¿por qué se habla de crisis energética?	13,1	2,6	64,4	5,6	Sí	75,4	5,7	Sí
12. ¿Por qué las ondas electromagnéticas que se emiten desde una emisora de televisión pueden producir imágenes y sonidos en tu televisor?	13,1	2,6	73,1	5,2	Sí	78,2	5,5	Sí
13. Cuando alguien grita, el sonido sólo puede ser oído hasta una determinada distancia. ¿Quiere esto decir que no se conserva la energía?	45,5	3,8	73,2	5,1	Sí	75,0	5,7	Sí
14. Algunos autores dicen que, según Einstein, la materia se transforma en energía. ¿Pone esto en cuestión el principio de conservación de la energía?	2,9	1,3	38,3	5,7	Sí	66,7	6,2	Sí

Los porcentajes de los diversos grupos de la tabla anterior se muestran representados en el gráfico 7.2.

**Gráfico 7.2. Resultados comparativos del cuestionario de alumnos. Nivel 2**



Los resultados de los grupos de nivel 2 tratados resultan superiores, como era de esperar, a los correspondientes del nivel 1, excepto en el ítem 9b. El porcentaje de respuestas correctas de los grupos de nivel 1 tratados por profesores diferentes al autor es ligeramente superior (71,2 %) al del nivel 2 de la misma categoría (67,7 %).

También se observa una mejora muy significativa en los resultados de los grupos tratados cuando se comparan con los grupos de control. Las mayores diferencias corresponden a los ítems 13, 3, 9a (grupos tratados por otros profesores), y 13, 9a, 6 (grupos tratados por el autor) mientras que las menores pertenecen a 4, 2, 9b (grupos tratados por otros profesores), y 7, 5, 2 (grupos tratados por el autor).

Por otra parte, en todos los ítems es significativa, con un nivel de error del 1 %, la diferencia de las medias entre los grupos de control y los tratados.

En el ítem 1 las respuestas correctas de los estudiantes de los grupos tratados (71,9 en los grupos del autor y 58,9 % en los de otros profesores) prácticamente triplican a las correspondientes de los grupos de control (21,1 %). En general, las respuestas son de tipo cuantitativo, es decir, se plantea la igualdad entre las energías mecánicas totales en los puntos inicial y final de cada caso. A partir de dicha igualdad se deduce matemáticamente que la altura final es igual a la inicial.

Los resultados correctos del ítem 2 siguen la misma tendencia que los del anterior: 94,7 % en los grupos del autor y 90,5 % en los de otros profesores frente a un 33,6 % de respuestas correctas en los grupos de control. Los alumnos señalan explícitamente que “no hay ningún sistema existente sin energía” porque “cualquier sistema tiene, como mínimo, energía interna”. Con respecto a las respuestas de sistemas con energía, se observa una mayor variedad en los alumnos de nivel 2 con respecto a los de nivel 1. Además de los ejemplos mecánicos y termodinámicos esperados, se citan situaciones de otros campos de la Física que muestran los conceptos adquiridos. De esta forma, aparecen sistemas relacionados con el campo gravitatorio (“los planetas”, “un satélite meteorológico que gira alrededor de la Tierra”), el movimiento ondulatorio (“las olas de la playa tienen energía porque pueden mover una tabla de surf”), la energía de enlace (“los protones y los neutrones de los núcleos de los átomos”).

Algunos alumnos generalizan la respuesta del ítem 3 en la forma “todos los fenómenos que tengan lugar en un sistema aislado, es decir, en el que no hay transferencias de energía desde el exterior, se pueden explicar por el principio de conservación de la energía”. En otros casos, se citan fenómenos mecánicos (“una bala que choca y se incrusta con un bloque”, “un saltador de pértiga transforma su energía cinética de carrera en energía potencial elástica al doblar la pértiga”) que reflejan los nuevos conceptos adquiridos (choques inelásticos, energía potencial elástica). De la misma forma, aparecen ejemplos de otros apartados de la física como el campo gravitatorio (“para calcular la

velocidad de escape de un satélite se utiliza la conservación de la energía”), el movimiento ondulatorio (“la suma de la energía mecánica de un muelle que oscila es constante”), física cuántica (“cuando deduces la fórmula del efecto fotoeléctrico, estás utilizando el principio de conservación de la energía”) o física nuclear (“la energía de enlace de los nucleones”). El porcentaje de respuestas correctas de los grupos experimentales del autor y de otros profesores (87,5 y 52,2 % respectivamente) resultan muy significativo con respecto al de los grupos que sirven de control (20,8 %).

El ítem 4 es contestado correctamente por un número muy elevado de alumnos de los grupos tratados (84,2 % por el autor y 74,3 % por otros profesores) si se tiene en cuenta el bajo porcentaje obtenido en los grupos de control (4,2 %). Aunque las respuestas correctas coinciden prácticamente con las del nivel 1, se aprecian aspectos que muestran la aplicación de conocimientos nuevos al análisis de la situación planteada. De esta forma, se indica que “una parte de la energía mecánica se transforma en energía interna y una parte se pierde en la deformación de la pelota al rebotar”, “la energía se transforma y al final está en formas no medibles”, “una parte de la energía se transforma en el sonido que hace la pelota al rebotar”.

En el ítem 5 también se aprecia una diferencia considerable entre el número de respuestas correctas de los alumnos del grupo de control (9,8 %) y el de los grupos tratados (89,1 % en los grupos del autor y 71,6 % en los demás). Las contestaciones correctas hacen las mismas consideraciones que aparecen en el nivel 1. Sin embargo, un elevado número de estudiantes completa sus respuestas haciendo referencia a la conservación de la energía mecánica en términos semejantes a los siguientes: “la conservación de la energía mecánica es un caso particular del principio de conservación de la energía”, el cual “se demuestra a partir del teorema de las fuerzas vivas y por eso es un teorema”.

El análisis de la situación planteada en el ítem 6 se hace mayoritariamente a partir de las expresiones de la energía cinética, potencial y de la conservación de la energía mecánica, llegando a una expresión de la velocidad pedida. En muchos menos casos, los alumnos hacen consideraciones escritas sin la utilización de símbolos matemáticos, a diferencia de las respuestas obtenidas en el nivel 1. El número de respuestas correctas es aproximadamente cuatro veces superior en los alumnos tratados (73,2 % en los grupos del autor y 56,8 % en los grupos de otros profesores) al de los grupos de control (16 %).

La energía interna es la que aparece con mayor frecuencia en las respuestas del ítem 7. En segundo lugar, se cita la energía electromagnética y, por último, la energía nuclear fuerte y débil. La energía de la masa en reposo aparece muy pocas veces. Este hecho se podría relacionar con el grado de familiarización que los alumnos tienen con los conceptos. La energía interna se utiliza con frecuencia en el análisis de situaciones mecánicas y en termodinámica, mientras que la energía nuclear y la de la masa en reposo se tratan con mayor profundidad sólo en los temas finales del segundo curso de Bachillera-

to. El 85,7 % de los alumnos tratados por el autor y el 62,2 % de los estudiantes de otros profesores responden correctamente el ítem 7 frente al 1,3 % de los grupos de control.

El porcentaje de respuestas correctas en el ítem 8 (66,7 % en los grupos tratados por el autor y 50 % en los tratados por otros profesores) es, junto con el del ítem 14, el más bajo de todo el cuestionario. Esta circunstancia también se repite en los grupos de control (0,7 %), lo cual conduce a la conclusión de que los estudiantes tienen serias dificultades en entender dónde se localiza la energía potencial. La mayoría de las respuestas correctas señalan el hecho de que un cuerpo aislado no tienen energía potencial y hacen referencia al sistema cuerpo-Tierra o a la interacción de esos dos cuerpos. Sin embargo, muy pocas indican que la energía potencial se encuentra en el campo gravitatorio.

Los resultados del ítem 9 ponen de manifiesto un aumento significativo en el número de respuestas correctas de los estudiantes tratados por el autor (75 %) y por otros profesores (67,7 %) con respecto a los estudiantes del grupo de control (33,1 %). En la mayor parte de las contestaciones se hace referencia explícita al aumento de “la energía interna del aire”. Sin embargo, los estudiantes correspondientes al segundo nivel tratados por profesores diferentes al autor citan los mecanismos de conducción del calor en un porcentaje inferior (67,7 %) a los del primer nivel (71,2 %). Entre todos los ítems del cuestionario de alumnos, esta circunstancia sólo se ha producido en dicho ítem. En consecuencia, se debería revisar la propuesta alternativa del segundo nivel de manera que presentara actividades relativas a los mecanismos de conducción del calor.

El número de alumnos tratados que indican correctamente las transformaciones de energía en los procesos señalados en el ítem 10 resulta ser siete veces superior (78,9 % en los grupos del autor y 69,9 % en los de otros profesores) al de estudiantes de los grupos de control (11,2 %). Aunque las respuestas correctas recogen las mismas transformaciones de energía que las citadas por los alumnos tratados de primer nivel, en algunos casos se puede constatar la utilización de conceptos físicos más avanzados y estudiados en el segundo nivel. Entre ellos se podría citar el trabajo eléctrico, en respuestas como “la electricidad que llega a la casa es una energía porque tiene la capacidad de hacer un trabajo  $W = V.I.\Delta t$ ”.

Los alumnos tratados contestan correctamente el ítem 11 en un porcentaje significativamente superior (75,4 % en los grupos del autor y 64,4 % en los de otros profesores) al conseguido por los grupos no tratados (13,1 %). Al igual que ocurría en el ítem 10, se aprecia la utilización de conceptos físicos más avanzados como la irreversibilidad o la entropía en respuestas como “aunque es cierto que la energía se conserva, ésta se transforma en otras formas de energía que no pueden aprovecharse para producir trabajo, por tanto, la entropía del Universo aumenta” o “si una copa cae y se rompe, la energía interna de la copa rota no es capaz de transformarse en potencial y subirla a la mesa”.

Frente a un 13,1 % de respuestas correctas de los grupos de control en el ítem 12, los alumnos tratados alcanzan unos porcentajes mayores (78,2 % en los grupos de autor y 73,1 % en los de otros profesores). En las respuestas correctas se interpreta el fenómeno en base a las transformaciones de la energía como se indica en la siguiente: “cuando las ondas llegan a la antena, la energía electromagnética se transforma en eléctrica”. En otros casos, también aparece la degradación de la energía cuando se explica la función de los amplificadores del receptor de televisión (“los amplificadores tratan de evitar las pérdidas de energía en el aire (degradación)”).

Aunque los grupos de control alcanzan en el ítem 13 el máximo porcentaje de respuestas correctas (45,5 %), los estudiantes tratados obtienen resultados superiores (75 % en los grupos del autor y 73,2 % en los grupos de otros profesores). En dichas respuestas se hace referencia a la atenuación y a la absorción como los dos mecanismos de amortiguamiento de las ondas, en términos como “el sonido se transmite por ondas cada vez más grandes. Como la energía siempre es la misma, se reparte en las ondas y en cada trozo hay cada vez menos energía” o bien “la energía de la onda se convierte en energía interna del aire debido al rozamiento”.

Si se compararan los resultados de todos los ítems del cuestionario, el 14 es contestado correctamente por el menor número de estudiantes tratados, tanto en los grupos del autor (66,7 %) como en los de otros profesores (38,3 %). A pesar de esta circunstancia, los porcentajes citados representan un aumento considerable con respecto a los obtenidos por los grupos de control (2,9 %). Los resultados citados ponen de manifiesto que la correcta interpretación de la relación masa/energía resulta de difícil comprensión para los alumnos. Este concepto es introducido con mayor detalle en el último trimestre del segundo curso de Bachillerato, en el tema de Física Relativista. Por otra parte, sólo es utilizado en el último tema, referente a la energía nuclear. Como consecuencia de lo anterior, los estudiantes aplican dicho concepto de una forma muy limitada.

### **7.2.3. Resultados obtenidos en la contrastación de los cambios observados en los estudiantes de un grupo experimental antes y después del aprendizaje de la energía**

El análisis de los cambios en las ideas sobre energía que se producen en un grupo de alumnos después de aplicar el proyecto alternativo se ha realizado a través de un grupo de cuarto curso de ESO, formado por 22 alumnos y en el que da clase el autor de la memoria. Para ello, los alumnos cumplimentaron en dos ocasiones el cuestionario de 11 ítems utilizado en el primer diseño. La primera aplicación tuvo lugar a mediados del mes de octubre y la segunda un mes después de haber concluido el tema de energía del proyecto alternativo.

Los resultados de la tabla 7.3 muestran la situación inicial de los estudiantes del grupo con referencia a sus conocimientos sobre la energía. De acuerdo con dichos resultados, ningún estudiante reconoce que la energía es una propiedad de todos los sistemas (ítem 2). Tampoco se tiene un sentido dinámico de la conservación de la energía (ítem 6), no se conocen los mecanismos de transmisión del calor (ítem 9b) ni se pueden realizar cadenas de transferencia de energía (ítem 10). Sólo el 4,5 % de alumnos pueden interpretar fenómenos en base a la conservación de la energía (ítems 1 y 4), conocen la degradación como una de las características de la energía (ítem 11), señalan fenómenos no mecánicos ni termodinámicos en los que se conserva la energía (ítem 3) o diferencian entre las fuentes y las clases de energía (ítem 7). La localización correcta de la energía potencial gravitatoria (ítem 8) y el reconocimiento de la conservación de la energía como un principio (ítem 5) aparece en el 10 % de las respuestas. Por último, más de la cuarta parte de los alumnos interpretan correctamente una situación en la que se produce una transferencia de energía en forma de calor (ítem 9a).

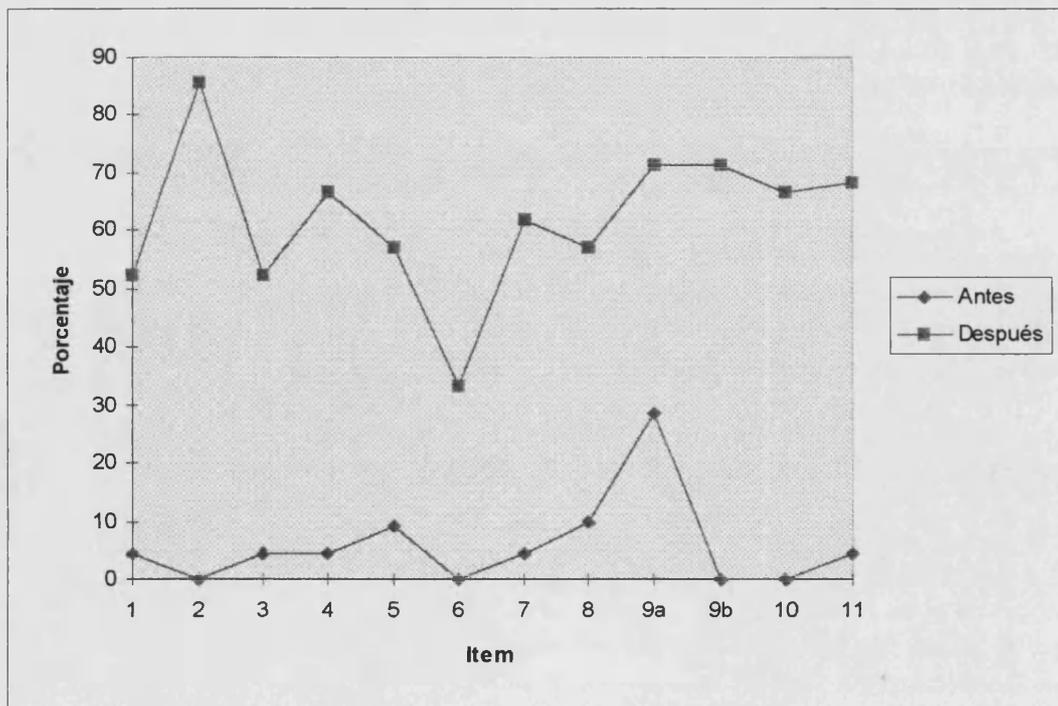
**Tabla 7.3. Resultados del cuestionario de alumnos. Antes/Después**

Item	Antes N = 22		Después N = 21		Dif. sign. $\alpha < 0,01$
	%	d.e.	%	d.e.	
1. En la figura aparece una bola que se mueve por un riel. Si no existe rozamiento y se deja caer desde el punto indicado, señala con una cruz el punto que alcanzará.	4,5	4,4	52,4	10,9	Sí
2. Cita tres ejemplos de sistemas con energía y tres de sistemas sin energía.	0,0	0,0	85,7	7,6	Sí
3. Indica fenómenos que puedan ser explicados por el principio de conservación de la energía.	4,5	4,4	52,4	10,9	Sí
4. Se deja caer una pelota de tenis sobre un suelo duro y se observa que rebota como se ve en la figura. ¿Se conserva la energía mecánica en el sistema formado por la pelota y el suelo?	4,5	4,4	66,7	10,3	Sí
5. La conservación de la energía, ¿es un principio o un teorema?	9,1	6,1	57,1	10,8	Sí
6. Se lanza verticalmente y hacia arriba una piedra con una determinada velocidad inicial. Si se utiliza el principio de conservación de la energía se puede calcular la altura que alcanza. ¿Cómo se podría calcular la velocidad que tiene en cualquier punto de la trayectoria?	0,0	0,0	33,3	10,3	Sí

7. ¿Crees que la energía es sólo cinética o potencial?	4,5	4,4	61,9	10,6	Sí
8. Un cuerpo de 25 kg situado a una altura de 30 m se dice que tiene una energía potencial de 7500 J. ¿Dónde crees que está esa energía potencial?	10,0	6,4	57,1	10,8	Sí
9.a. Un trozo de hierro se calienta al rojo vivo y se deja enfriar. ¿Se conserva la energía en el sistema formado por el aire y el trozo de hierro?	28,6	9,6	71,4	9,9	Sí
9.b. Indica los mecanismos por los que se transfiere la energía que tiene el trozo de hierro.	0,0	0,0	71,4	9,9	Sí
10. Explica las transformaciones de energía que tienen lugar desde que el agua contenida en un pantano produce electricidad hasta la utilización de dicha electricidad para hervir agua en una cocina.	0,0	0,0	66,7	10,3	Sí
11. Si la energía se conserva, ¿por qué se habla de crisis energética?	4,5	4,4	68,4	10,1	Sí

Las diferencias de los porcentajes de cada uno de los items, antes y después del proceso de aprendizaje, se pueden visualizar en el gráfico 7.3.

**Gráfico 7.3. Resultados del cuestionario de alumnos. Antes/Después**



Después de aplicar a los estudiantes del grupo indicado el tema que se incluye en el capítulo 6 y en el que se presenta el concepto de energía, se ha producido un incremento en el número de respuestas correctas. De acuerdo con la prueba *t de Student*, las diferencias en los porcentajes obtenidos antes y después de la aplicación del tratamiento didáctico son significativas en todos los ítems del cuestionario con un nivel de confianza del 1 %.

El mayor aumento se ha producido en varios ítems referentes a aspectos fundamentales de la energía tales como su transferencia y transformación (ítems 10 y 9b), degradación (ítem 11) o como propiedad de todos los sistemas (ítem 2). Las variaciones menores corresponden a la localización de la energía potencial gravitatoria (ítem 8), la interpretación de un fenómeno de transferencia de energía en forma de calor (ítem 9a) y la consideración dinámica de la conservación de la energía (ítem 6).

#### **7.2.4. Resultados obtenidos en la contrastación que las entrevistas con estudiantes de los grupos experimentales muestran que el aprendizaje de la energía ha sido significativo**

Se han realizado 13 entrevistas con alumnos de los grupos experimentales. De ellas, 6 corresponden a estudiantes de cuarto curso de ESO (nivel 1) y 7 a alumnos de nivel 2 (primer y segundo curso de bachillerato). Pertenecen a grupos donde el autor de esta memoria ha desarrollado la nueva propuesta de enseñanza de la energía. Los alumnos fueron seleccionados al azar. Para la realización de las entrevistas se siguieron las normas utilizadas con los grupos de control y presentadas en el capítulo 3. A continuación, se analizan los resultados de dichas entrevistas.

#### **Ideas previas**

##### **1. ¿Todos los cuerpos tienen energía? La energía se asocia al movimiento y a los seres vivos**

Un gran número de alumnos entrevistados piensa que la energía es una propiedad de todos los cuerpos, independientemente de su estado de movimiento o de reposo, o de su carácter de ser vivo o inerte.

Alumno/a: *Cualquier cosa tiene energía.*

Entrevistador: *¿Y si está parada?*

A: *Si no tiene cinética (que es de movimiento), tiene potencial, de la posición que ocupa. Todas las cosas tienen energía.*

Los alumnos de nivel 2 utilizan con mayor frecuencia que los de nivel 1 el concepto de energía interna.

E: *¿Y esta carpeta que no se mueve?*

A: *Tiene energía potencial porque está sobre la mesa.*

E: *¿Y si la pongo en el suelo? Entonces la energía potencial es cero.*

A: *Sí, pero si la pones en el suelo tiene energía.*

E: *¿Por qué?*

A: *Tiene la energía interna porque la forman átomos y moléculas.*

## 2. Múltiples clases de energía

Muchos estudiantes del nivel 1 piensan que muchas formas de energía se pueden reducir a cinética y potencial. También saben que las diferentes fuentes de energía no se deben identificar con nuevas clases de energía.

E: *Entonces, ¿la energía del viento es otra clase de energía?*

A: *No.*

E: *¿Puedes explicarlo?*

A: *La energía que tiene el viento es de movimiento, cinética.*

E: *¿Y la que tiene el agua cuando está en un pantano? ¿Es la energía hidráulica?*

A: *No es la energía hidráulica, es la potencial porque [el agua] está colocada en lo alto.*

Algunos estudiantes de nivel 2 también indican que existe la energía del campo electromagnético.

A: *Hay otro tipo de energía.*

E: *¿Cuál es?*

A: *El de las radiaciones.*

E: *¿Qué quieres decir con radiaciones?*

A: *La energía que tienes dentro de un microondas porque no puede ser cinética ni potencial.*

## 3. Localización de la energía potencial

Con referencia a la localización de la energía potencial cuando un cuerpo se encuentra a una altura sobre la superficie de la Tierra, los estudiantes de los dos niveles señalan que la energía no se puede asignar sólo al cuerpo, sino al conjunto formado por éste y la Tierra.

E: *Si la energía potencial no está en el interior del cuerpo, ¿dónde está?*

A: *Tú no puedes decir que la energía potencial está en el cuerpo porque te olvidas que el cuerpo tiene energía potencial porque está subido a una altura. Además está la Tierra.*

E: *¿Puedes explicar eso?*

A: *Si la Tierra no está, el cuerpo no tiene energía potencial porque no lo atrae nada. Hace falta la Tierra. Por eso, la energía es del cuerpo y de la Tierra.*

#### 4. La conservación de la energía, ¿principio o teorema?

Las respuestas de los alumnos de nivel 1 y 2 indican que, en general, reconocen las diferencias entre los principios y los teoremas.

E: *¿Tienes alguna idea de lo que es un principio y un teorema?*

A: *Sí. Un teorema es una cosa muy concreta y un principio es más general.*

Los estudiantes también señalan que los teoremas son deducciones que se obtienen a partir de enunciados más generales y que los principios son hipótesis validadas por la experiencia.

E: *¿Tú crees que los teoremas se demuestran?*

A: *Al final te sacan los teoremas.*

E: *¿Qué quieres decir con eso?*

A: *Que te hacen una demostración con fórmulas*

E: *¿Y los principios?*

A: *Te los dicen desde un principio.*

E: *¿Y no se demuestran?*

A: *Sí, pero de otra manera.*

E: *¿Cómo?*

A: *Porque se sabe que son verdad pero no hacen demostraciones con fórmulas.*

Las respuestas también muestran que los alumnos saben que los teoremas tienen unos campos de validez en su aplicación y que los principios son generales en su cumplimiento.

E: *¿Tú crees que los principios y los teoremas se cumplen siempre?*

A: *Si lo dicen, verdad será.*

E: *¿Puedes explicar eso un poco más?*

A: *Los teoremas no sirven para todo. Hay casos en que no. Si coges el teorema de Pitágoras sólo te sirve para unos triángulos y para otros, no.*

E: *¿Y los principios?*

A: *Sí, porque sirven para todos los casos.*

Por último, un elevado número de alumnos opinan que la conservación de la energía es un principio general de toda la física.

E: *¿Tú crees que la conservación de la energía es un principio o un teorema?*

A: *Un principio.*

E: *¿Por qué?*

A: *Porque es verdad, se cumple siempre. Por ejemplo, en la moto la energía se va transformando.*

## **Conservación, transformación, transferencia y degradación de la energía**

### **5. Conservación de la energía (1)**

El análisis de la disminución de la altura de los botes de una pelota que se lanza al suelo es realizado por un gran número de alumnos aplicando los esquemas de conservación y transferencia de la energía. En algunas respuestas correspondientes al nivel 2 también se cita la transformación en energía interna.

A: *[La pelota] va perdiendo energía.*

E: *¿Y esa energía dónde pasa?*

A: *Al suelo.*

E: *¿La energía se conserva o se pierde?*

A: *Se conserva.*

A: *Al principio tiene energía potencial más grande y a medida que va tomando contacto con el suelo la fuerza de rozamiento hace que la energía potencial disminuya.*

E: *¿Y la energía que tenía al principio y la energía que tiene en un bote y la que ha perdido por rozamiento son iguales?*

A: *Será igual.*

E: *¿Y por qué?*

A: *Por la conservación de la energía, la energía que pierde la pelota aumenta la energía interna del suelo.*

### **6. Conservación de la energía (2)**

Los alumnos explican el proceso de enfriamiento de un cuerpo caliente como una transferencia de energía del cuerpo al ambiente, tomando como sistema el conjunto e indicando que la energía se mantiene constante en el sistema.

A: *[El cuerpo] caliente tiene más energía que frío.*

E: *Y eso, ¿por qué crees que es?*

A: *Porque lo tocas y te quemas.*

E: *Si luego tiene menos energía, esa energía que tenía al principio y que ahora ya no tiene, ¿dónde está?*

A: *La energía ha desaparecido, se ha ido.*

E: *Pero, ¿estará en algún sitio?*

A: *Sí. Estará en el agua o en el aire.*

E: *¿Se conserva la energía?*

A: *Sí porque la que pierde el cuerpo pasa al aire y, en total, es la misma.*

## 7. Transformación de la energía

Las transformaciones de energía que se producen en los procesos encadenados que tienen lugar en una central hidroeléctrica son reconocidas por la mayor parte de los alumnos.

A: *El río, si baja de una montaña, tendrá una energía potencial. A medida que va bajando, va perdiendo la energía potencial y ganando en cinética por la velocidad que tiene el río cuando está en descenso. Al pasar el agua por las tuberías poco a poco se va transformando en energía eléctrica y en calor.*

E: *O sea que tenemos...*

A: *Primero energía potencial, luego cinética y al pasar por las turbinas se transforma en electricidad.*

E: *¿Quieres decir energía eléctrica?*

A: *Bueno, es energía potencial eléctrica.*

## 8. Transferencia de la energía

Los estudiantes entrevistados reconocen el trabajo y el calor como mecanismos de transferencia de energía.

E: *¿Cómo puedes pasar energía de un cuerpo a otro?*

A: *Cuando le das a una pelota con una raqueta. Según el cordaje le das más o menos energía a la pelota. Cuando estás levantando las pesas, estás pasando energía a las pesas.*

E: *¿Puedes explicar cómo estas pasando la energía?*

A: *Tú haces una fuerza para levantar las pesas y además las mueves. Por eso estás haciendo un trabajo.*

A: *Calentando agua.*

E: *¿Qué ocurre?*

A: *La energía de la cocina pasa al agua.*

E: *¿Y cómo sabes que ha pasado energía al agua?*

A: *Porque la tocas y te quema.*

También pueden citar explícitamente la conducción, la radiación y la convección como formas de transferencia de energía.

E: *¿Sabes cómo puede transmitirse energía de un cuerpo caliente a otro frío?*

A: *Cuando tocas un cuerpo caliente pasa energía a tu mano.*

E: *¿Cómo se llama esa forma de transmisión?*

A: *Conducción*

E: *¿Se puede transmitir energía sin que los cuerpos se toquen?*

A: *¿Sin tocarse?*

E: *Sí. ¿Puedes dar algún ejemplo?*

A: *Cuando tomas el Sol, te da calor pero no te toca. Es la radiación.*

E: *Entonces, ¿cómo se calienta el aire de una habitación en la que hay una estufa?*

A: *Pues que el aire caliente pesa menos y sube.*

E: *¿Y qué pasa?*

A: *Que se forman unas corrientes de aire.*

E: *¿Cómo se llama esa forma de calentar?*

A: *Creo que es la convección.*

## **9. Degradación de la energía**

Con referencia a la degradación de la energía un gran número de estudiantes entrevistados explica correctamente que consiste en la transformación a otras formas que son menos utilizables. Un alumno de nivel 2 se refiere al segundo principio de la termodinámica y a la entropía.

A: *La energía puede que se transforme en energía que es menos utilizable. Por eso decimos que hay crisis de energía.*

E: *Pero siempre hay la misma.*

A: *Sí. La energía siempre hay la misma pero se transforma en otras clases de energía que para ti son menos utilizables.*

A: *Es por el segundo principio de la termodinámica, el de la entropía que dice que la energía conforme se gasta va perdiendo la calidad y aumenta el desorden. Conforme vamos gastando las fuentes de energía, éstas se van convirtiendo en inútiles para su utilización.*

## **10. Conservación de la energía en ondas mecánicas**

La mayor parte de los alumnos de nivel 2 entrevistados conocen la atenuación y la absorción como mecanismos de disminución de la intensidad de las ondas mecánicas.

A: *El chillar se transmite por ondas y esas ondas aumentan de tamaño y se distribuyen en un espacio más grande y van perdiéndose.*

E: *Pero la energía, ¿es la misma?*

A: *Sí, pero se reparte en ondas más grandes.*

E: *¿Y por qué no nos llegan las ondas?*

A: *Porque hay otros factores, el aire, el rozamiento, que hace que no nos lleguen.*

E: *Pero la energía del sonido de la persona tiene un valor. Y después, ¿ese valor disminuye?*

A: *Sí, porque la energía de las ondas se va transformando y pasa al aire.*

### 11. Conservación de la energía en ondas electromagnéticas

Un gran número de alumnos entrevistados de segundo curso de Bachillerato conocen que las ondas electromagnéticas de televisión transportan energía que se transforma en imágenes y en sonido cuando llegan a los receptores.

A: *Las ondas que salen de la emisora de televisión llevan energía.*

E: *¿Qué ocurre cuando llegan a tu televisor?*

A: *El televisor las convierte en impulsos eléctricos que forman lo que vemos y oímos.*

### 12. Relación masa/energía

Dado que no todos los alumnos de nivel 2 entrevistados pertenecen al segundo curso de Bachillerato, el número de estudiantes que conocen la relación masa/energía es reducido. A continuación aparece un fragmento de la entrevista realizada con un alumno especialmente brillante.

E: *¿Puedes explicar la relación que hay entre la masa y la energía?*

A: *Yo pienso que si hacemos una reacción nuclear, es verdad.*

E: *Si yo tengo, por ejemplo, 5 g de materia y después de hacer una reacción nuclear veo que la masa es 4,999 g, se han perdido 0,001 g de materia. ¿Estás de acuerdo?*

A: *No, porque tú tienes al principio 5 g de materia y al final también. O también puedes decir que tienes  $5c^2$  de energía y luego también.*

E: *Pero la masa de los reactivos no es 5 g sino 4,999 g.*

A: *Pero es que tú no tienes al final 4,999 g. Tú tienes que la masa final es 5 g y la energía  $5c^2$  pero  $0,001c^2$  de energía se han transformado en otra forma de energía cuya masa es 0,001 g. Por eso tú tienes 4,999 g de productos y una energía de 0,001 g masa que da 5 g.*

La comparación de los contenidos de las entrevistas anteriores con las que se analizaron en el capítulo 4 muestra que se ha producido un cambio relevante en los alumnos que han seguido la propuesta alternativa de enseñanza de la energía. Este hecho es coherente con los resultados de los cuestionarios de alumnos presentados anteriormente.

### 7.2.5. Resultados obtenidos en la contrastación de un cambio positivo en la actitud hacia la ciencia y su aprendizaje en los estudiantes de los grupos experimentales

El cuestionario 6.1, presentado en el capítulo 6, tiene como objetivo valorar las actitudes de los alumnos frente a la metodología utilizada por sus profesores. Consta de 7 items que se valoran entre 0 y 10, según el grado de acuerdo con el aspecto recogido en cada item. Dicho cuestionario ha sido aplicado a dos grupos de cuarto curso de ESO (grupos de control), formados por 26 y 28 alumnos, que pertenecen al Instituto del autor de esta memoria y han recibido una enseñanza de Física y Química de tipo tradicional por parte de otros profesores. El mismo cuestionario ha sido contestado por un total de 51 alumnos distribuidos en dos grupos de cuarto curso de ESO (grupos experimentales) de 21 y 30 estudiantes respectivamente. El autor ha desarrollado en estos grupos la nueva propuesta de enseñanza de la energía.

En la tabla 7.4 aparecen los resultados de la aplicación del cuestionario de actitudes al grupo de control y al experimental. En cada item figura la valoración media ( $\bar{x}$ ) y la desviación estándar (d.e.) de los dos grupos señalados. También se recogen los valores calculados y críticos del parámetro t correspondiente a la prueba *t de Student*. Dicha prueba se ha aplicado para comprobar si las diferencias de puntuación del grupo de control y experimental son significativamente diferentes con un error no superior al 1 %.

**Tabla 7.4. Resultados comparativos del cuestionario de actitudes de alumnos**

Items	Control N = 54		Experiment. N = 51		t		Dif. sign. $\alpha < 0,01$
	$\bar{x}$	d.e.	$\bar{x}$	d.e.	t <sub>calc</sub>	t <sub>crit</sub>	
Con el método utilizado por mi profesor:							
1. conozco cuáles son mis errores y los corrijo.	2,8	2,7	7,5	1,4	11,4	2,6	Sí
2. utilizo aspectos del trabajo científico (hago hipótesis, diseños para verificarlas, etc.).	1,2	1,6	7,7	1,6	21,1	2,6	Sí

3. entiendo las cosas que me están enseñando.	3,0	3,0	7,0	1,3	9,1	2,6	Sí
4. participo en la clase.	3,2	2,7	7,2	1,2	9,8	2,6	Sí
5. aumenta mi interés por la ciencia.	3,5	2,6	7,4	1,4	9,8	2,6	Sí
6. hago actividades relacionadas con la técnica y con las cosas diarias.	1,7	1,3	7,1	1,4	21,0	2,6	Sí
7. trabajo en equipo con mis compañeros.	0,6	0,9	5,6	2,2	15,2	2,6	Sí

Se observa que es muy bajo el grado de satisfacción de los alumnos del grupo de control con los aspectos indicados en el cuestionario. Ningún ítem alcanza una nota media superior o igual a 5. Las máximas calificaciones corresponden al aumento del interés por la ciencia (ítem 5), la participación en clase (ítem 4) y la comprensión de los nuevos conceptos (ítem 3) con unas valoraciones medias comprendidas entre 3,5 y 3 puntos. Conviene destacar el gran valor de la desviación estándar del ítem 3 que refleja una gran diversidad de puntuaciones. De acuerdo con las valoraciones de los estudiantes, no recogidas en la tabla, el 25,9 % le asigna puntuaciones entre 5 y 10. El conocimiento por parte de los estudiantes de sus errores y su corrección (ítem 1) sólo alcanza una calificación de 2,8 puntos.

Los aspectos menos desarrollados por la enseñanza habitual, de acuerdo con la opinión de los alumnos, se refieren a la realización de actividades ciencia/técnica/sociedad (1,7 puntos), la utilización del método del trabajo científico (1,2) y el trabajo en equipo (0,6). Por otra parte, estos aspectos han sido calificados por los estudiantes con valoraciones semejantes como lo indican los valores mínimos de la desviación estándar. Los resultados anteriores son coherentes con las características de la enseñanza habitual, de acuerdo con el análisis realizado en el capítulo 5.

La tabla 7.4 muestra un aumento en las puntuaciones medias del grupo experimental con respecto a las de control. De esta manera, los valores asignados por el grupo experimental a los ítems varían entre 5,6 y 7,7 mientras que las del grupo de control oscilan entre 0,6 y 3,5. Por otra parte, la aplicación de la prueba *t de Student* indica que las variaciones son estadísticamente significativas en todos los aspectos analizados.

Las mayores diferencias corresponden, como era de esperar, a los aspectos menos valorados por el grupo de control y no contemplados por la enseñanza habitual. De esta manera, la realización de actividades ciencia/técnica/sociedad (ítem 6), la utilización de la metodología científica (ítem 2) y el trabajo en equipo (ítem 7) alcanzan los máximos valores del parámetro *t*. Sin embargo, este ítem ha alcanzado la mínima puntuación me-

dia (5,6). Este valor refleja, seguramente, las dificultades encontradas por los alumnos en desarrollar el trabajo en grupo, dada su inexperiencia en esta forma de desarrollar una clase. Por otra parte, el valor de la desviación estándar de este ítem (2,2) es el máximo, lo cual indica la dispersión de las opiniones. El cambio metodológico de los alumnos se pone especialmente de manifiesto al examinar los resultados del ítem 2, referente al empleo del método de trabajo científico. Mientras los estudiantes del grupo de control califican este aspecto con una nota media de 1,2, la puntuación del grupo experimental es seis veces superior, alcanzando un valor de 7,7.

También resulta notable la diferencia de puntuaciones registrada en el ítem 1 referente a la atención que la metodología alternativa presta a las ideas alternativas de los alumnos. Este aspecto tampoco es tenido en cuenta, en general, por la enseñanza habitual. Los alumnos de los grupos experimentales muestran mayor interés por la ciencia (ítem 5) que los de los grupos de control como lo indican la puntuación de 7,4 frente a 3,5. El resto de ítems, referentes a la comprensión de los nuevos conceptos (ítem 3) y la participación en clase (ítem 4), registra puntuaciones que duplican los valores del grupo de control.

### **7.3. Resultados referentes a la valoración positiva de la propuesta alternativa de enseñanza/aprendizaje de la energía que hacen los profesores que la conocen o la utilizan**

El cuestionario de profesores ha sido cumplimentado por 33 profesores de Física y Química en activo. Dichos profesores han puesto en práctica la propuesta alternativa o han participado en cursos de formación en los que se ha presentado el proyecto y ha sido analizado críticamente. En este último caso, los profesores han asistido a cursos de formación en didáctica de la Física y Química realizados en el CEP de Valencia. Dichos cursos han tenido una fase intensiva de 50 horas, que se desarrolló en el mes de julio, sobre ideas previas, trabajos prácticos, resolución de problemas, relaciones ciencia/técnica/sociedad y evaluación. La fase de seguimiento tuvo lugar a lo largo del curso siguiente. En ella se discutió y reelaboró en grupo una unidad didáctica centrada en el tema de la energía. Los profesores utilizaron dicha unidad en sus clases y el asesor de Física y Química del CEP asistió cada curso a las clases de tres profesores elegidos al azar para observar su trabajo y, en caso necesario, realizar sugerencias de mejora.

Los resultados obtenidos en la aplicación del cuestionario de profesores se ofrecen en la tabla 7.5. En cada ítem aparece la media aritmética y la desviación estándar de las puntuaciones. Por otra parte, dichas puntuaciones se han agrupado en tres clases (de 0 a 4 puntos, de 5 a 6, y de 7 a 10). La tabla recoge el porcentaje correspondiente de cada una de ellas.

Tabla 7.5. Resultados comparativos del cuestionario de profesores (N = 33)

Item	Media	d.e.	Valoración (%)		
			1 a 4	5 a 6	7 a 10
<b>La propuesta alternativa:</b>					
1.1. Facilita la detección y corrección de errores	7,7	1,0	0,0	9,1	90,9
1.2. Favorece la adquisición de conceptos científicos	8,0	1,1	0,0	9,1	90,9
1.3. Familiariza con la metodología científica	7,0	2,3	12,5	21,9	65,6
1.4. Presenta las relaciones de la ciencia con la tecnología, la sociedad y el medio ambiente	7,9	1,6	0,0	24,2	75,8
1.5. Favorece la participación de los alumnos	7,6	2,1	12,1	12,1	75,8
1.6. Aumenta el interés de los alumnos por la ciencia	7,4	1,5	0,0	30,0	70,0
2.1. Tiene en cuenta las ideas previas de los alumnos sobre trabajo, energía y calor	8,4	1,4	4,5	4,5	91,0
2.2. Establece relaciones cualitativas y basadas en la experiencia entre el trabajo, la energía y el calor.	8,2	1,3	0,0	9,1	90,9
2.3. Realiza un análisis crítico de las leyes de conservación	8,0	1,3	0,0	15,2	84,8
2.4. Muestra el principio de conservación de la energía como un principio de toda la física	8,6	1,3	0,0	9,1	90,9
2.5. Activa los esquemas de conversión, transferencia, conservación y degradación de la energía	7,7	1,8	12,5	9,4	78,1

Los profesores han valorado el ítem 1.1 con una nota media de 7,7. Sólo un 9,1 % de ellos lo califican entre 5 y 6 mientras que el 90,9 % restante lo sitúan en la franja comprendida entre 7 y 10. Los resultados del ítem 1.2 son muy semejantes a los obtenidos en el ítem anterior, aunque la valoración media (8,0) resulta ligeramente superior. Sólo el 65,6 % de los profesores valoran el ítem 1.3 entre 7 y 10, mientras que un 12,5 % le asigna puntuaciones entre 1 y 4. Este resultado es coherente con la valoración media obtenida (7,0) que resulta ser la menor de todas las correspondientes al apartado

metodológico. A diferencia del ítem anterior, el 1.4 consigue una media de 7,9 y un importante porcentaje de profesores (75,8 %) lo califican entre 7 y 10. Los resultados de los ítems 1.5 y 1.6 son semejantes, tanto en la valoración media (7,6 y 7,4 respectivamente) como en el porcentaje de profesores que lo sitúan en la franja superior (75,8 y 70,0). Sin embargo, para el 12,1 % de los encuestados, el ítem 1.5 merece una calificación comprendida entre 5 y 6.

Las máximas medias obtenidas (8,4 y 8,6) en el apartado conceptual del cuestionario corresponden a los ítems 2.1 y 2.4. Estos resultados son coherentes con los porcentajes de profesores que los valoran entre 7 y 10 (91,0 y 90,9 % respectivamente). Sin embargo, un 4,5 % de los profesores no creen que la propuesta alternativa tenga en cuenta las ideas previas de los alumnos (ítem 2.1). Por consiguiente, el número de profesores que valoran ambos ítems entre 5 y 6 es superior en el segundo caso (9,1 %) frente al primero (4,5 %).

Los resultados obtenidos (8,2 de media) en el ítem 2.2 confirman que los profesores piensan que la propuesta establece relaciones cualitativas entre el trabajo y la energía. Esta circunstancia también se manifiesta en el 90,9 % de los profesores que valoran el ítem entre 7 y 10.

Los ítems 2.3 y 2.5 contrastan con los anteriores en el hecho de que las valoraciones medias son iguales o inferiores a 8 (8,0 y 7,7 respectivamente). Sin embargo, el 84,8 % de los profesores califican el primer ítem entre 7 y 10, mientras que se acusa un descenso porcentual de 6 en el segundo (78,1 %). Este resultado pone de manifiesto que un 12,5 % de los profesores opina que la propuesta no desarrolla en los alumnos la conservación, transformación, transferencia y degradación de la energía.

### **Aspectos satisfactorios**

Los profesores señalan como aspectos satisfactorios “la consideración de las ideas previas de los alumnos” así como “la introducción simultánea de los conceptos de trabajo y energía” y de actividades de ciencia/técnica/sociedad. También indican que “se renuncia a definiciones muy exactas pero excesivamente abstractas”. La presentación de los conceptos de trabajo, energía y calor “no quedan reducidos a una parcela de la física, sino que se generalizan”. El tema presenta “un enfoque histórico” y “un orden lógico en su desarrollo”.

Con respecto al aspecto metodológico, algunos profesores destacan el hecho de que la propuesta alternativa ofrezca a los estudiantes la posibilidad de “familiarizarse con el método científico y lo utilicen” a través de “pequeños problemas en las cuales el alumno puede emitir hipótesis, valorar sus resultados, etc.” y “extraer sus propias conclusiones. De esta forma, “los estudiantes desarrollan sus ideas”. Otros profesores también valoran positivamente la utilización de una metodología activa que evita un aprendizaje

memorístico dado que “los conceptos no quedan reducidos a simples expresiones matemáticas y unos conceptos nos llevan a otros”.

Los profesores indican que sería conveniente ampliar la propuesta por medio de la introducción actividades complementarias para reforzar los conceptos de conservación, transformación, transferencia y degradación de la energía. Otro aspecto que aparece poco desarrollado en la propuesta se refiere a la energía no mecánica. Algunos profesores sugieren que “se hable más sobre energías no mecánicas” y que se presenten actividades relacionadas con dichos tipos de energía. También se recomienda aumentar el número de actividades relacionadas con las interacciones ciencia/técnica/sociedad, dada la importancia de la energía en la vida diaria. Algunos profesores encuentran insuficiente las actividades de aplicación numérica de conceptos, mientras que otros señalan algunos aspectos de maquetación de la propuesta como la escasez de imágenes. El problema de la falta de tiempo para desarrollar la metodología propuesta en los materiales alternativos es planteado por un número reducido de profesores, mientras que otros se refieren a la falta de formación del profesorado en la nueva metodología “lo que genera la necesidad de “enseñar” al propio cuerpo de profesores (cursos, charlas, etc.)”. Por último, un profesor manifiesta que “me satisfacen más otros planteamientos con los que llego a conectar mejor con los alumnos”.

Ninguno de los profesores encuestados cree que se deban suprimir actividades de la propuesta. Sin embargo, uno de ellos afirma de forma genérica que “la motivación, interés y respuesta de los alumnos serán la razón que hará modificar, ampliando, reduciendo o sustituyendo alguna de las actividades”.

Con referencia al cambio de actividades, los profesores no señalan modificaciones substanciales en la propuesta. Un profesor propone la sustitución del apartado 5 (Concepción actual de la naturaleza del calor y primer principio de la termodinámica) del nivel 2 por un estudio de la calorimetría. En este apartado se incluirían los conceptos de calor, temperatura y calor específico así como “los factores de los que depende el calor y su expresión cuantitativa”. En otros casos, se plantea una variación en el orden de las actividades. Particularmente, se sugiere que las actividades A.5. (sobre producción y consumo de energía en España) y A.6.(sobre energías renovables) se integren en el cuadro 1 “Energía y futuro”. Por último, se sugieren cambios en la redacción de algunas actividades. En concreto, “en la actividad A.39. sustituiría el término de “sistema” por un caso real: gas encerrado en un recipiente con émbolo”. La utilización de la palabra “eficacia” en la actividad A.18. ha sido criticada porque “puede inducir a una cierta confusión con términos como “rendimientos”, “aciertos”, etc. Además creo que no se hace hincapié en la relación trabajo/tiempo”.

La mayoría de los profesores encuestados están de acuerdo en que la propuesta debería ser ampliada. Para ello, proponen nuevas actividades relacionadas con las ideas

previas de los estudiantes y los trabajos prácticos de laboratorio que “podrían ser de fácil ejecución, sin demasiada complejidad de preparación, utilizando pelotas de goma y muelles”. También se proponen “más actividades similares a las planteadas”, “sobre unidades”, “de cálculo numérico”, “que muestren el carácter escalar del trabajo, la potencia y la energía” o “de relaciones entre magnitudes”. Como se ha indicado anteriormente, algunos profesores sugieren que se realicen más actividades “sobre la transformación, conservación, transferencia y degradación de la energía” o sobre energías no mecánicas. En otros casos, se indica que “después de los conceptos añadiría actividades cuantitativas”, o bien que la propuesta debería incluir “más actividades subiendo el nivel progresivamente”.

También se proponen actividades del tipo ciencia/técnica/sociedad. En algunos casos, se presentan como debates que abordan aspectos sociales: “plantear un diálogo sobre energía y desarrollo, energía y contaminación, y ahorro energético”, “medidas que se pueden plantear a nivel individual y social para un ahorro energético”. En otras ocasiones, las actividades se realizan en pequeños grupos como “el análisis de las consecuencias si mañana desapareciera la corriente eléctrica” o “la toma de conciencia ante el problema energético en nuestro país a través de la valoración de datos sobre los rendimientos en los procesos de transformación de energía asociados a la producción de electricidad, motores de combustión, etc.”.

Otro grupo muy numeroso de actividades se refieren a aspectos cotidianos de la energía como se pone de manifiesto en las siguientes: los alumnos “buscan los kw.h que gastan los utensilios eléctricos”, “determinan la potencia a contratar con la compañía eléctrica en función de los aparatos existentes en una casa” o analizan un “recibo de la luz”. Por último, algunos profesores plantean actividades de tipo interdisciplinar. En la que aparece a continuación se analiza la conservación de la energía en Biología: “a partir de datos sobre producción de biomasa en un bosque o por el plancton marino, poner de manifiesto la importancia de la bioconservación de la energía”.

Como consecuencia de las consideraciones anteriores, se puede concluir que los profesores han valorado de forma positiva la propuesta alternativa de enseñanza de la energía, tanto en sus aspectos conceptuales como metodológicos. También conviene destacar el gran interés mostrado en la cumplimentación de los cuestionarios como se pone de manifiesto en el elevado número de comentarios y sugerencias que han hecho.

## CAPÍTULO 8

### CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

En la primera parte de esta memoria se ha analizado la enseñanza que se hace del concepto de energía de acuerdo con el método habitual de transmisión oral de conocimientos. De acuerdo con las conclusiones obtenidas se formuló la primera hipótesis en los siguientes términos:

**“La mayor parte de los estudiantes a los que se presenta el concepto de energía, de acuerdo con el modelo de la enseñanza habitual, continuarán utilizando sus preconceptos y adquirirán unos conocimientos escasamente significativos”.**

Con objeto de contrastar esta primera hipótesis se realizó un diseño múltiple y convergente. En primer lugar, se examinaron las respuestas de 320 alumnos a un cuestionario escrito y se analizaron las entrevistas realizadas a 15 estudiantes. También se revisó la forma en que la enseñanza por transmisión oral y los libros de texto presenta el concepto de energía. Para ello se analizaron 34 libros de texto y se recogió la opinión de 22 profesores en activo y de 38 en formación.

Posteriormente se revisaron las bases del constructivismo como nueva metodología y se aplicaron para el proceso de enseñanza/aprendizaje del concepto de energía. A partir de las mismas y del análisis de la literatura didáctica sobre el concepto de energía, se formuló la segunda hipótesis:

**“Es posible realizar una enseñanza de la energía que parta de las ideas alternativas de los alumnos para presentar la energía como un concepto unificador de toda la física, desarrollar su conservación, transformación, transferencia y degradación, mostrar el estatus de principio con respecto a su conservación y señalar las limitaciones de su conservación en las diversas formulaciones que aparecen en mecánica y termodinámica”.**

Para la contrastación de la segunda hipótesis se elaboraron materiales didácticos alternativos para la enseñanza de la energía. Dichos materiales fueron presentados a 33 profesores que asistieron a diversos cursos de formación y se aplicaron a 284 estudian-

tes. A continuación, se recopilaron las respuestas de los estudiantes tratados con la propuesta alternativa de enseñanza y se compararon con las obtenidas en los grupos de control. Por otra parte, se entrevistó a 13 alumnos y se analizaron las actitudes ante la ciencia y su aprendizaje de 51 estudiante. También se reunieron las opiniones de 33 profesores sobre los nuevos materiales de enseñanza.

En este capítulo se presentarán las conclusiones finales referentes a las dos hipótesis anteriores y se señalarán algunas vías de investigación que pueden desarrollarse a partir de dichas conclusiones.

## 8.1. Conclusiones

De acuerdo con los datos presentados y analizados en los capítulos 4 y 7, como resultado de la aplicación de los diseños experimentales, se pueden exponer las siguientes conclusiones:

**I. La mayor parte de los estudiantes a los que se presenta el concepto de energía, de acuerdo con la enseñanza habitual, continúan utilizando sus preconceptos, no comprenden la conservación, transformación, transferencia y degradación de la energía; no tienen claro si la conservación de la energía es un principio o un teorema, y no usan el principio de conservación de la energía para explicar fenómenos de todos los campos de la física.**

a) Los alumnos mantienen sus ideas alternativas sobre la energía. De acuerdo con ellas, asocian la energía con los sistemas en movimiento (76 %), localizan la energía potencial gravitatoria en el cuerpo situado en el campo (98,9 %), confunden las clases de energía con las fuentes (98,7 %) o piensan que la energía se consume (83,5 %).

b) Aunque la enseñanza que han recibido se basa fundamentalmente en la conservación de la energía, no suelen utilizar este aspecto para interpretar fenómenos mecánicos o termodinámicos. La transformación y la degradación de la energía se emplean con una frecuencia muy pequeña (10,5 y 16,5 % respectivamente). Entre los fenómenos físicos no mecánicos ni termodinámicos que los estudiantes explican por medio del principio de conservación de la energía se pueden citar la energía de las ondas electromagnéticas (13,1 %) y mecánicas (45,5 %), y la relación relativista entre la masa y la energía (2,9 %).

c) El 71,3 % de los estudiantes no conocen la diferencia entre principio y teorema por lo que no pueden identificar la conservación de la energía como un principio general de toda la física.

**II. La energía se introduce en la enseñanza habitual de una forma poco clarificadora, sin tener en cuenta las dificultades de los alumnos y sin mostrar que la conservación de la energía es un principio de toda la física.**

a) El 78,8 % de los libros analizados no consideran las ideas previas de los alumnos sobre trabajo. Los porcentajes que se refieren a la energía y al calor resultan ligeramente superiores a los anteriores. Tampoco tienen en cuenta las dificultades de los alumnos. En este sentido, la energía potencial es atribuida al cuerpo por el 78,6 % de los libros mientras que el 88 % no clarifica el trabajo de rozamiento y el 62,5 % no presenta el trabajo como proceso de transferencia de energía.

b) Sólo el 47,4 % de los libros indica que la conservación de la energía es un principio fundamental de toda la física. La conservación de la energía en mecánica se deduce como un teorema en un 66,7 % de los textos pero sólo el 59,3 % indica los límites de validez y clarifica que se trata de un caso particular de un principio universal. En termodinámica se da una situación similar. El 90 % de los libros no señalan las limitaciones del primer principio ni generalizan la conservación de la energía.

c) La enseñanza de la energía se realiza fundamentalmente a través de su conservación (90 % de los libros) y, en menor medida, por la transformación (36,7 %), transferencia (30 %) y degradación (6,7 %).

d) Los aspectos de la energía relacionados con campos de la física diferentes de la mecánica y de la termodinámica aparecen en un porcentaje pequeño de libros. De esta forma, el 43,8 % clarifican la intensidad de las ondas mecánicas y muestran su dependencia con el cuadrado de la amplitud, mientras que el 12,1 % señalan que los campos eléctricos y magnéticos tienen energía pero ninguno diferencia entre la energía de las partículas libres, la del campo electromagnético y la de interacción. En la física moderna la situación es similar. La energía en reposo y el significado de la relación entre la masa y la energía son mostrados por menos del 30 % de los textos (26,6 y 21,4 % respectivamente).

e) El principio de conservación de la energía se utiliza raras veces en la interpretación de fenómenos distintos a los mecánicos o termodinámicos. Aunque la ley de Ohm es deducida por medio de dicho principio en más de la mitad de libros (68,4 %), no ocurre lo mismo con los fenómenos de la física moderna. La radiactividad o las reacciones nucleares se presentan como procesos en los que se conserva la energía en menos del 40 % de los textos (17,6 y 37,5 % respectivamente).

**III. Los profesores enseñan habitualmente la energía sin partir de las ideas alternativas de los estudiantes y fundamentalmente por medio de su conservación. Se presenta fundamentalmente en mecánica y en termodinámica, sin clarificar si su conservación es un principio o un teorema. No se consideran aspectos de la energía de otros campos de la física.**

Los profesores que parten de las ideas previas de los alumnos para la enseñanza de la energía se reducen al 15 %. La enseñanza es realizada a través de la conservación (66,7 %) y, en menor medida, por la transformación (43,3 %), transferencia (11,7 %) y degradación (6,3 %), de forma coherente con el tratamiento que hacen los libros. Un elevado número de profesores en activo y en formación muestran dificultades en diferenciar un teorema de un principio (50 y 89,5 %) por lo que la conservación de la energía es presentada como principio por un 21,7 % de profesores y como teorema por el 3,3 %.

Los resultados anteriores confirman nuestra primera hipótesis. Por tanto, la enseñanza habitual presenta, en general, la energía sin tener en cuenta las ideas y las dificultades de los estudiantes, no clarifica si su conservación en mecánica y en termodinámica es un principio o un teorema y no señala el campo de validez en cada caso. Tampoco aparece la conservación de la energía como un principio unificador de toda la física.

A continuación se muestran las conclusiones relacionadas con nuestra segunda hipótesis.

**IV. Es posible plantear una enseñanza de la energía de acuerdo con una metodología basada en el constructivismo y que presente su conservación como un principio unificador de toda la física.**

Para ello se han elaborado varios programas de actividades que corresponden al nivel 1 (cuarto curso de ESO) y al nivel 2 (primer curso de Bachillerato). El primero aparece en capítulo 6 y el segundo en el anexo II. En el III se ofrecen actividades relacionadas con la energía y correspondientes al segundo curso de Bachillerato.

**V. La propuesta alternativa de enseñanza de la energía es valorada positivamente por los profesores a los que se les ha presentado dicha alternativa y por los profesores que la han puesto en práctica en el aula.**

a) La propuesta metodológica alternativa para la enseñanza de la energía ha sido valorada por los profesores con una calificación global de 7,6 (en una escala de 0 a 10) en el apartado metodológico y de 8,2 en el conceptual. Los profesores destacan con sus valoraciones las siguientes aspectos de la propuesta: favorece la adquisición de conceptos científicos (calificación media de 8,0), presenta las relaciones de la energía con la

tecnología, la sociedad y el medio ambiente (7,9), y facilita la detección y corrección de los errores de los alumnos (7,7). Por otra parte, las máximas puntuaciones en el apartado conceptual corresponden a la presentación de la conservación de la energía como un principio universal (8,6), a la consideración de las ideas previas de los alumnos (8,4) y al establecimiento de relaciones cualitativas entre la energía, el trabajo y el calor (8,2).

**VI. La enseñanza de la energía, de acuerdo con una metodología basada en el constructivismo, produce en los estudiantes una mejora significativa en su aprendizaje y un aumento de su valoración de la ciencia y de su aprendizaje.**

a) Como ponen de manifiesto los resultados de las tablas 7.1 y 7.2 presentadas en el capítulo 7, se ha producido una mejora en el aprendizaje de los estudiantes que han seguido la nueva propuesta de enseñanza de la energía frente a los alumnos que han aprendido el concepto de acuerdo con la metodología de transmisión oral. Dicha mejora ha tenido lugar tanto en los grupos de nivel 1 como en los de nivel 2. En todos los ítems de los cuestionarios de alumnos utilizados se ha producido un aumento considerable en el número de respuestas correctas. De este modo, las respuestas correctas varían entre el 17,8 y el 71,2 % en los grupos experimentales de nivel 1 tratados por profesores diferentes al autor. Aunque el primer dato es un número pequeño, se debe indicar que resulta cuatro veces superior al obtenido por los grupos de control (4,1 %). En los grupos de nivel 2 de características semejantes, los porcentajes oscilan entre el 38,3 y el 90,5 %. Todas las diferencias, excepto una, de los resultados obtenidos por los dos grupos de control y experimentales resultan significativas estadísticamente con un nivel de confianza del 1 %.

b) El análisis de los datos obtenidos en un grupo de cuarto de ESO antes y después de haberse procedido al aprendizaje del concepto de energía también muestra un incremento en el número de respuestas correctas, variando entre el 33,3 y el 85,7 %. Dichos datos aparecen en la tabla 7.3. y, de acuerdo con ella, todas las diferencias producidas son significativas con un error menor de 1%.

c) Las entrevistas con alumnos tratados indican que el aprendizaje de la energía que han realizado es significativo en el aspecto conceptual, en coherencia con los resultados obtenidos en los cuestionarios de alumnos.

d) El análisis comparativo de los resultados obtenidos en la aplicación a estudiantes de un cuestionario de actitudes muestra que la valoración media de los ítems que han realizado los grupos de control varía entre 0,6 y 3,5 en una escala de 0 a 10. Sin embargo, la puntuación media del grupo experimental oscila entre 5,6 y 7,7. Por tanto, se ha producido en éste una mejora actitudinal. Por otra parte, las diferencias en las valoracio-

nes de los grupos de control y experimental resultan estadísticamente significativas con un error que no supera el 1 %.

De acuerdo con las conclusiones IV, V y VI se puede afirmar que nuestra segunda hipótesis queda validada. Es posible, por lo tanto, la enseñanza de la energía de forma que se presente la conservación de la energía como un principio de toda la física, clarificando sus enunciados en mecánica y termodinámica, y se desarrolle su transferencia, transformación y degradación. Dicha enseñanza produce en los estudiantes un cambio conceptual y metodológico, es valorada positivamente por los profesores y aumenta el interés de los estudiantes por la ciencia.

## 8.2. Perspectivas

Cuando se consolide la integración en los Institutos de Educación Secundaria del primer ciclo de ESO, sería interesante investigar las ideas que los alumnos de dicho nivel tienen sobre la energía. De esta forma, se ampliaría el campo de estudio del concepto de energía a los estudiantes de 12 y 13 años, dado que esta memoria se ha ocupado de estudiantes de segundo ciclo de ESO, Bachillerato, segundo y tercer cursos de BUP, y COU. Por otra parte, la asignatura optativa "Física aplicada", de segundo curso de Bachillerato, incluye en su programa un tema sobre termodinámica. En el caso de que dicha asignatura se afiance en la Comunidad Valenciana, se podría analizar la utilización que hacen los estudiantes del concepto de energía en el campo indicado.

El debate entre los partidarios de la utilización de la masa relativista y los que se oponen no está cerrado. Como consecuencia, parece conveniente que se realice una profundización en dicho tema y se sigan con atención las implicaciones didácticas de las nuevas contribuciones que se hagan en ese sentido.

El análisis del proceso de enseñanza/aprendizaje del concepto de energía realizado hasta aquí también puede ser continuado en el nivel universitario. De esta forma, se ampliaría el ámbito de investigación en un doble aspecto. Por una parte, se podrían examinar aspectos de la energía que no se contemplan en un nivel secundario, tales como su conservación en electromagnetismo por medio del vector de Poynting o las energías de interacción de cargas eléctricas con campos no conservativos como el magnético. También resultaría conveniente la investigación de la enseñanza de la energía en otros campos de la física como la cosmología, la física cuántica y la de altas energías. En segundo lugar, se podría abordar la relación entre las simetrías, las invarianzas y los principios de conservación tal como aparecen en el teorema de Noether. Esto supone un nuevo avance en el tema de las unificaciones. Si el principio de conservación de la energía se presenta en la enseñanza media como un principio unificador de todos los campos de la física, el

teorema de Noether implica la unificación de dicho principio con los de conservación de la cantidad de movimiento y del momento angular.

Los resultados presentados en esta memoria se han obtenido con alumnos a los que se les ha aplicado la propuesta de enseñanza de la energía durante un periodo muy reducido de tiempo. El seguimiento de los mismos a lo largo de otros cursos permitiría comprobar si se mantienen los cambios conceptuales, metodológicos y actitudinales conseguidos o, por el contrario, son el resultado transitorio de una novedad ocasional.

En ciencias diferentes a la física también aparece el concepto de energía. Si se pretende mostrar el carácter unificador y universal de su conservación, resultaría conveniente abordar el análisis de su enseñanza en otras ciencias como la química, la biología o la geología.

Por último, los principios de conservación de la cantidad de movimiento y del momento angular forman junto con el de conservación de la energía, un conjunto de principios unificadores de fenómenos aparentemente inconexos. La revisión crítica de su enseñanza puede ser el objetivo de nuevas líneas de investigación.



## ANEXO I

### RESÚMENES DE ARTÍCULOS

**Título:** An Integrated Approach to Thermodynamics in the Introductory Physics Course

**Autor:** ALONSO, M. y FINN, E. J.

**Revista:** The Physics Teacher, 33, 296-310

**Año:** 1995

El principal objetivo del artículo es ilustrar cómo se pueden combinar la aproximación empírica de la termodinámica clásica con la estructural de la mecánica estadística. Se considera pedagógicamente conveniente que se presente a los estudiantes una descripción empírica de un concepto, seguida de una profundización usando la mecánica estadística. Este procedimiento se utiliza con la presión y también se podría hacer con la temperatura. De forma fenomenológica se dice que la temperatura indica el grado de calor o de frío de un cuerpo y se mide con el termómetro. A continuación se explicaría que “es una medida de la energía media de las partículas de un cuerpo”.

Se indica que “la termodinámica trata de las relaciones entre temperatura, calor, trabajo y energía interna de la materia” o bien que “la termodinámica trata de los cambios de energía entre las partículas de un sistema compuesto por un número muy grande de unidades y las partículas del entorno”. Las evidencias experimentales señalan que los intercambios de energía entre un sistema y su entorno pueden agruparse en tres categorías: trabajo, calor y radiación, a cada uno de los cuales le corresponde un mecanismo específico de transferencia de energía.

Es deseable que la termodinámica que se presenta en el primer curso universitario se base en la mecánica. Los alumnos saben que, para una partícula, se cumple que  $\Delta E_c = W$ . Cuando la fuerza es conservativa, existe una energía potencial, de forma que la energía total de la partícula es  $E_c + E_p$  y la ecuación anterior se convierte en  $E_c + E_p = \text{constante}$ .

Todo lo que sucede en el mundo se puede reducir a intercambios de cantidad de movimiento y de energía. La energía cinética de un sistema de partículas (energía cinética interna) se define como la suma de las energías cinéticas de las partículas relativas al centro de masas del sistema. Sólo en este caso la energía cinética es una propiedad del sistema, independiente del observador y distinta de la energía cinética de traslación del sistema. La energía potencial interna del sistema se asocia con las fuerzas internas. La

energía interna de las partículas del sistema será  $U = E_{c,int} + E_{p,int}$ . Se debe tener en cuenta que las partículas no tienen estructura interna, es decir son masas puntuales. Si se tiene un sistema formado por muchas partículas no puntuales (iones, átomos, moléculas, núcleos) existirá una energía interna de las partículas, relacionada con su estructura (energía rotacional, vibratoria, electrónica, etc.). La energía interna del sistema es  $U = E_{c,int} + E_{p,int} + E_{part}$ . Cuando un sistema de partículas no está aislado, las fuerzas externas pueden cambiar la energía interna del sistema por medio del trabajo y se cumple  $\Delta U = W_{ext}$ .

El trabajo mecánico ( $W$ ) es “la energía transferida a un sistema desde el entorno (o al revés) como resultado de un cambio o modificación de la configuración o forma del sistema por la acción de fuerzas externas actuando sobre el sistema”. Dicho trabajo se puede expresar en términos de parámetros macroscópicos. Sobre el sistema se pueden hacer trabajos externos sin modificar la forma o configuración del sistema. Por ejemplo, las fuerzas externas eléctricas o magnéticas pueden actuar sobre el cuerpo (conducción eléctrica, polarización eléctrica de un dieléctrico, presión de radiación, compresión magnética de un plasma, inducción magnética, etc.). El calor ( $Q$ ) se define empíricamente como “la energía transferida de un cuerpo caliente a otro frío como resultado de la diferencia de temperaturas, sin hacer necesariamente ningún trabajo”. La definición anterior no explica la naturaleza del mecanismo de transferencia de la energía. Por tanto, el calor “corresponde a una transferencia neta de energía a través del límite del cuerpo por choques elásticos e inelásticos entre las moléculas del cuerpo y las del entorno cuando son diferentes las energías moleculares medias (temperaturas) del cuerpo y del entorno”. La transferencia de energía por calor es un proceso que tiene lugar en el límite del sistema. La radiación ( $R$ ) se debe distinguir del calor. La radiación “se refiere al intercambio de energía entre un sistema y su entorno a través de la emisión o absorción de fotones por las partículas del sistema, dando como resultado un cambio de la energía interna del sistema, un proceso que puede tener lugar en todo el sistema”. Por tanto, la primera ley de la termodinámica se puede expresar como  $\Delta U = W + Q + R$ .

Para la introducción del equilibrio térmico se sugiere partir de los estados de energía de una partícula y distinguir entre los estados macroscópicos y microscópicos. A continuación se presenta la noción de multiplicidad y se define el equilibrio estadístico. Las transformaciones reversibles e irreversibles se analizan desde el punto de vista macroscópico y microscópico.

La presentación de la probabilidad termodinámica puede hacerse de una forma cualitativa reconociendo que es proporcional a la multiplicidad de un estado. A continuación, se puede introducir el factor de Boltzmann o seguir un procedimiento más elaborado. De acuerdo con éste, se discute cómo calcular la multiplicidad de un estado en la estadística de Maxwell-Boltzmann, se introduce la función de partición  $Z$  y se demuestra que dicha función está relacionada con la energía interna y la entropía del sistema.

En la introducción de la entropía se utiliza normalmente la definición de Clausius, referida a una transformación reversible. A los estudiantes les resulta muy difícil este

procedimiento porque tienen que aceptar que la entropía se define por un cambio, sin saber qué es realmente. Por otra parte, deben entender que es una variable de estado sin conocer su relación con la estructura interna del sistema. Por ello, se propone que la entropía se presente por medio de un procedimiento estadístico, a partir de la probabilidad termodinámica del estado del sistema.

Las definiciones de Kelvin-Planck y Clausius de la segunda ley de la termodinámica no se relaciona, normalmente, con el resto de dicha ciencia. Se propone que la segunda ley se enuncie de la siguiente forma: “En un sistema aislado compuesto por subsistemas 1, 2, 3, ... con temperaturas  $T_1, T_2, T_3, \dots$ , si existe una transferencia de calor  $Q_1, Q_2, Q_3, \dots$  entre ellos sin que cambien apreciablemente sus temperaturas, se cumple la relación  $\sum Q_i / T > 0$ ”. Esta definición se puede completar con una aproximación estadística indicando que “en un sistema aislado que no está en equilibrio, el proceso más probable que puede ocurrir es el que hace que aumente la entropía del sistema”.

Se considera impropio decir que un sistema aislado tiende al estado de máximo desorden o que la entropía es una medida del grado de desorden de un sistema. La estructura de un sistema aislado en equilibrio térmico es el resultado de un equilibrio entre la energía de movimiento y la potencial de las partículas. Un sistema aislado lejos del equilibrio térmico parece desordenado pero pueden aparecer subsistemas ordenados por medio de la “autoorganización”. Estos estados no suponen una violación de la segunda ley de la termodinámica.

Se incluyen cuatro notas finales en las que se desarrolla un análisis estadístico de la primera ley de la termodinámica; la entropía de un gas ideal en equilibrio estadístico; los enunciados de Clausius y Kelvin, la desigualdad de Clausius y los teoremas de Carnot, y la organización y el equilibrio estadístico.

**Título:** On the notion of internal energy

**Autor:** ALONSO, M. y FINN, E.J.

**Revista:** Physics Education, 32 (4), 256-264

**Año:** 1997

En el primer curso universitario de física, los estudiantes adquieren una visión fragmentaria de la energía. Primero aprenden la energía cinética y potencial de una partícula. Después comprueban que el concepto de energía se extiende a sistemas formados por muchas partículas, para los cuales es esencial el concepto de energía interna. Por otra parte, cuando no se conocían bien ciertos procesos en términos de interacción entre partículas y sus estructuras, y el papel de la energía interna no estaba claro, se inventaron varias formas de energía (química, térmica) para explicarlos. Cuando los estudiantes comprenden el concepto de energía interna, comprueban que las anteriores energías empíricas están relacionadas con energías de las partículas ya

conocidas.

La mayor parte de los sistemas de la naturaleza (gases, líquidos, sólidos, plasmas, además de moléculas, átomos, núcleos y hadrones) están compuestos por “partículas” que interactúan. Las “partículas” son las unidades que forman el sistema y pueden tener estructura interna. Es importante que los estudiantes sepan que las partículas pueden ser estables o cambiar como resultado de procesos que ocurren en el sistema (p. ej. reacciones químicas y nucleares) o que están relacionados con la estructura interna de las partículas (p. ej. desintegración radiactiva).

Para entender la dinámica de un sistema de partículas se introducen varios conceptos: la energía cinética interna ( $E_c(i)$ ), la energía interna de interacción ( $E_{int}(ij)$ ) (en algunos casos puede ser la “energía potencial interna”), la energía intrínseca de la partícula ( $E_{part}(i)$ ) y la energía interna ( $U$ ), cumpliéndose que  $U = \sum E_c(i) + \sum E_{int}(ij) + \sum E_{part}(i)$ , o bien  $U = E(k) + E(I) + E(P)$ . Cualquiera de estas dos expresiones se llamará “ecuación para todo”. Una vez establecida la ecuación, se discuten los valores de las energías definidas para sistemas formados por átomos, moléculas, núcleos y hadrones.

Un problema muy importante de la física es relacionar los cambios de la energía interna de un sistema (generalmente son variaciones de los tres términos de la ecuación de la energía interna) con los intercambios de energía con otros sistemas (como el entorno). Si la variación de energía interna de un sistema se representa por  $\Delta U$  y los intercambios de energía con otro sistema por  $E_{interc}$  (energía intercambiada), la conservación de la energía exige que  $\Delta U = E_{interc}$ . Los estudiantes aceptan esta última relación sin muchas dificultades. A continuación, se explica que es conveniente explicitar los procedimientos para intercambiar energía. Si  $Q$  es el calor absorbido por el sistema,  $W$  el trabajo hecho sobre el sistema y  $R$  la radiación (fotones) absorbida por las partículas del sistema, se puede poner  $\Delta U = Q + W + R$ . Esta ecuación es la expresión de la primera ley de la termodinámica. Se debe hacer notar que el término de la radiación aparece pocas veces en los libros de texto. Normalmente  $Q$  se asocia con el cambio de energía cinética de las partículas,  $W$  con la variación del valor del término de interacción y  $R$  con el cambio en el término de energía de la partícula (por absorción o emisión de fotones). La ecuación obtenida se aplica a varios procesos (emisión o radiación por un átomo, la emisión láser, el efecto fotoeléctrico y varios fenómenos termodinámicos).

A los estudiantes se les dice normalmente que un sistema está en equilibrio estadístico (o térmico) cuando los parámetros macroscópicos (temperatura, presión, densidad, etc.) están bien definidos y permanecen constantes. Es más informativo decir que, en un sistema en equilibrio estadístico, no ocurre ningún intercambio de energía interna y, por tanto, los tres términos de la “ecuación para todo” permanecen constantes de una forma estadística, experimentando fluctuaciones muy pequeñas. Esto quiere decir que la media de cada uno de los tres términos de la ecuación es cero. De esta forma, los estudiantes entienden que el equilibrio es dinámico, tal como ocurre con la radiación electromagnética atrapada en una cavidad.

Puede ocurrir que un sistema se encuentre en equilibrio y se produzca un cambio

en su estado. Los estudiantes deberían reconocer que un sistema aislado, que no está en equilibrio, lo alcanza como resultado de ajustes internos entre las tres clases de energía de la “ecuación para todo”. Cuando se llega el equilibrio, los tres términos de la ecuación tienen los valores ‘óptimos’ compatibles con la composición del sistema y con la energía interna. Este es el significado real de la segunda ley de la termodinámica. Un sistema aislado evoluciona hacia la configuración más probable u óptima, que corresponde al estado de máxima entropía. A menudo se dice incorrectamente que el sistema evoluciona hacia el estado más desordenado.

La relación entre las energías cinética y de interacción en la formación de estructuras en un sistema puede expresarse por el “factor de estructura de interacción” (F), definido como el cociente entre la media de la energía de interacción entre pares de partículas y la energía cinética media de las partículas del sistema. Los sistemas ideales son aquellos en los que  $F = 0$ , es decir, la media de la energía de interacción entre las partículas es cero. Estos sistemas no muestran ninguna estructura. Cuando F aumenta, los sistemas empiezan a mostrar algún grado de correlación entre los movimientos de sus partículas y si F es muy grande, el movimiento de las partículas está muy correlacionado y aparecen estructuras estables. También se introduce el “factor de estructura de una partícula” (F’) definido como  $F' = \langle \Delta E_{\text{part}(i)} \rangle_{\text{mínimo}} / \langle \Delta E_c(i) \rangle_{\text{medio}}$ , donde el numerador es la energía mínima necesaria para modificar la estructura interna de las partículas del sistema.

Los autores esperan que la discusión sobre la energía interna de los sistemas de partículas sirva para destacar la importancia de la “ecuación para todo” y el papel de las interacciones y de las energías internas de las partículas en los procesos físicos. La metodología empleada debe ayudar a los estudiantes a analizar y explicar situaciones físicas y procesos de diversos campos de la física. De esta forma, los alumnos llegarán a adquirir la unificación conceptual de la física.

**Título:** Physics that Textbooks Writers Usually Get Wrong-I. Work

**Autor:** BAUMAN, R.P.

**Revista:** The Physics Teacher, 30, 264-269

**Año:** 1992

Se examinan algunos problemas que aparecen en la definición y discusión del concepto trabajo. En primer lugar, se indica que la definición de trabajo incluye dos partes: 1) el trabajo es un modo de transferir energía, 2) el trabajo se calcula como “la integral del producto escalar de una fuerza ejercida en un sistema por un agente del entorno y el desplazamiento del punto de aplicación de la fuerza”. Se debe definir con claridad el sistema antes de considerar el trabajo realizado y las transferencias de energía. Después se analiza el teorema trabajo-energía. La definición que se utiliza normalmente (“el trabajo que se hace sobre un objeto es igual a la variación de su energía cinética”)

introduce errores. Para ello, considera cuatro ejemplos y comprueba que en ellos no coincide el trabajo con la variación de la energía cinética. En realidad, el teorema trabajo-energía indica que se cumple  $W = \Delta E_c$  sólo si se transfiere energía a un objeto por medio de un trabajo y si en el cuerpo sólo se puede producir una variación de energía cinética.

“Si un objeto no se mueve, no se hace trabajo”. Esta afirmación no es válida siempre. Para ello, se examina el caso de un cuerpo que se mueve sobre una superficie horizontal con rozamiento. Se demuestra que el suelo no se mueve pero se ha realizado un trabajo sobre él. De manera análoga, si un cuerpo que se desliza por un plano inclinado con rozamiento, se hace un trabajo sobre el plano a pesar de que no se mueve. En los dos casos, la energía transferida no es igual a  $\int f dx$ , siendo  $f$  la fuerza ejercida por el cuerpo sobre el plano y  $dx$  la variación del cuerpo porque el desplazamiento de la fuerza de rozamiento no se conoce. Por tanto, el trabajo no se puede definir operativamente cuando existen fuerzas de rozamiento.

Con respecto a la radiación, la emitida por un objeto caliente no se transfiere como trabajo sino como calor o, mejor, como transferencia de energía térmica  $Q$ . Cuando la transferencia de radiación se realiza entre un objeto y un campo de radiación en equilibrio con el objeto (radiación o absorción del cuerpo negro), la radiación es totalmente calor. Si la transferencia de radiación se hace entre un campo de radiación y un objeto que no está en equilibrio con el campo (como la radiación solar sobre una superficie fotovoltaica o una emisión láser), la radiación puede ser una mezcla de calor y trabajo. Como consecuencia, el trabajo tampoco está definido operativamente cuando existen transferencias de energía por medio de radiación.

Para analizar el problema de la localización de la energía potencial se presentan varios situaciones que son tratadas incorrectamente en algunos libros. En primer lugar, se considera este razonamiento:  $E_c + E_p = \text{constante}$ ;  $W = \Delta E_c$ ; por tanto,  $W = -\Delta E_p$ . La última ecuación dice que la energía transferida al sistema como trabajo, disminuye la energía del sistema. Sin embargo, según la primera ecuación no hay transferencias de energía, de forma que  $W = 0$ . Por otra parte, la segunda ecuación no está bien aplicada porque la variación de energía del sistema puede ser tanto de energía cinética como de potencial, y no sólo de cinética.

Si se sube verticalmente un cuerpo con velocidad constante, sobre el cuerpo actúan dos fuerzas iguales: el peso y la fuerza que hace, por ejemplo, la mano. Por tanto, la fuerza resultante es cero y el trabajo realizado sobre el cuerpo, también. En este caso, la mano transfiere energía al cuerpo ( $W > 0$ ) y el cuerpo transfiere energía al campo ( $W < 0$ ). La energía se almacena en el campo.

Si se tiene un cuerpo a una altura y se deja caer verticalmente, el campo hace una fuerza sobre el cuerpo y, por tanto, un trabajo. No es correcto calcular ese trabajo y escribir  $W = \Delta E_c$  porque también existe una variación de energía potencial.

Por último, se indica que algunas ideas equivocadas sobre el trabajo tienen su origen en la identificación de este término con el de fuerza. Las fuerzas son libres y se pueden ejercer durante cualquier tiempo sin ningún coste de energía. En cambio, la energía se transfiere, sólo cuando se mueve el punto de aplicación de una fuerza.

También se revisa un artículo de Sherwood y Bernard sobre el pseudotrabajo y la ecuación CM.

**Título:** Physics that Textbooks Writers Usually Get Wrong-II. Heat and Energy

**Autor:** BAUMAN, R.P.

**Revista:** The Physics Teacher, 30, 353-356

**Año:** 1992

Los conceptos de temperatura, calor y energía térmica son interpretados de maneras diferentes por los libros de texto. El autor adopta la siguiente terminología. La propiedad leída por un termómetro se llamará temperatura. La energía del interior de un cuerpo, responsable de la temperatura, será la energía térmica. La transferencia de energía, como consecuencia de una diferencia de temperaturas, se llamará transferencia de energía térmica y se representará por  $Q$ . La palabra calor es un término genérico que resulta útil cuando no es necesario distinguir entre significados y procesos. Con respecto a la energía térmica, su definición es difícil. Algunos autores afirman que no se puede definir, pero luego esos mismos autores usan el término calor para representar dicha magnitud, sin dar ninguna definición.

Otro concepto que es origen de interpretaciones equivocadas es el de energía y, en concreto, su conservación. Esta palabra tiene dos significados en los libros de ciencia. Por una parte, la conservación indica una propiedad de un sistema que no varía, es una "constante del movimiento". Por otra, la conservación no indica ni creación ni pérdida, pero limita los cambios en el sistema. Cuando se habla de "leyes de conservación" se debe entender que se refiere al segundo significado. Sin embargo, en la mayoría de los libros de texto, se utiliza el primero.

A veces, las leyes de conservación se expresan para un caso muy particular. Por ejemplo, la ley de conservación de la energía se enuncia como "La energía de un sistema aislado es constante". Esta formulación presenta varias dificultades importantes. En primer lugar, no se pueden realizar experimentos en sistemas aislados. Por otra parte, si se define un sistema aislado, entonces el calor y el trabajo son nulos. Otra forma, menos común, de presentar la conservación de la energía es la expresión  $\oint dE = 0$ . Esta igualdad es válida e ilustra el hecho de que la energía es una función de estado pero no tiene mucha relación con la conservación de la energía. La integral anterior también se cumple con la temperatura o con la entropía y esas magnitudes no se conservan. Finalmente, se explica que la masa y la energía son equivalentes en la teoría de la relatividad y, por dicha razón, se conservan ambas. Sin embargo, la masa en reposo no lo cumple.

En termodinámica el autor establece una diferencia entre la primera ley y la ecuación de la primera ley. Esta última se expresa como  $\Delta E = Q + W$ , donde  $Q$  es la transferencia de energía térmica para el sistema y  $W$  es el trabajo. Para relacionar esta ecuación con la primera ley son necesarios tres pasos: 1) Demostrar que  $Q_{\text{sistema}} = -$

$Q_{\text{entorno}}$  y  $W_{\text{sistema}} = -W_{\text{entorno}}$ ; 2) Demostrar que  $Q$  y  $W$  están siempre definidos, sin importar la naturaleza del proceso; 3) Demostrar que no existe otra forma de transferencia de energía. Normalmente los libros presentan implícitamente la parte 1) pero no las partes 2) y 3) porque  $Q$  y  $W$  no se pueden definir operativamente en muchos procesos (como los de rozamiento). Además existen muchas situaciones en las que los mecanismos de transferencia de energía no son ni  $Q$  ni  $W$ , como en el caso de la evaporación del agua de un recipiente. Los estudiantes se enfrentan con otra dificultad cuando se trata del término  $\Delta E$  en la expresión  $\Delta E = Q + W$ . Se dice que  $E$  es la energía interna. Si esa expresión se tiene que relacionar con la primera ley de la termodinámica,  $E$  tiene que representar la energía total del sistema y no la interna. Por otra parte, algunos autores no distinguen entre energía interna y energía térmica. La primera incluye formas de energía como la química. La segunda es la parte de la energía interna que cambia reversiblemente con los cambios de temperatura.

En resumen, los libros de texto presentan aspectos del calor y de la energía que pueden confundir a los estudiantes. Concretamente, la terminología del calórico todavía se encuentra en algunos libros cuando el término "calor" aparece como un fluido identificable (a menudo representado por  $Q$ ) que se mueve de un cuerpo a otro. Con relación a la energía, se producen confusiones entre leyes de conservación, constantes de movimiento y funciones de estado. La "ecuación de la primera ley",  $\Delta E = Q + W$ , se confunde con la primera ley de la termodinámica. Se identifica la energía total  $E$  con la energía interna y la energía interna se confunde con la energía térmica.

**Título:** Students' use of the principle of energy conservation in problem situations

**Autor:** DRIVER, R. y WARRINGTON, L.

**Revista:** Physics Education, 20, 171-176

**Año:** 1985

Se presenta un estudio realizado con 28 estudiantes de nivel secundario sobre la conservación de la energía. En primer lugar, se realizaron entrevistas con los alumnos. En ellas se mostraban cuatro aparatos y se pedían detalles sobre su funcionamiento. Las respuestas contenían, en general, muy pocas referencias explícitas a la idea de energía. Muchas respuestas se referían a aspectos perceptivos del sistema analizado o a sus partes internas. Un número muy reducido de estudiantes intentaron utilizar términos físicos pero sus explicaciones resultaron confusas o incorrectas. Por otra parte, se detectó que algunos estudiantes identificaron la fuerza con el trabajo. Los resultados anteriores se pueden explicar teniendo en cuenta que los conceptos de trabajo y energía no tienen en la vida cotidiana el mismo significado que en la física. Además, su significado científico no tiene ningún atributo inmediato que se pueda percibir.

En la segunda parte de la investigación, se presentaron dos problemas escritos que contenían datos redundantes. Las respuestas mostraron que los estudiantes no

analizaban los sistemas desde el punto de vista de la energía. La causa de este hecho se debe, seguramente, a la introducción de la energía a través del trabajo. Si se realiza de esta manera, puede resultar que los estudiantes analicen los fenómenos en términos de características observables, como la fuerza y el desplazamiento, en lugar de utilizar la conservación de la energía.

Los resultados de la investigación demuestran que los estudiantes interpretan los fenómenos como una serie temporal de acontecimientos. Sin embargo, el análisis de un sistema en términos de energía es más difícil. Se sugiere que se consideren las situaciones desde un punto de vista de sistemas, describiendo y cuantificando las entradas y salidas de energía.

**Título:** Understanding Energy as a Conserved Quantity-Remarks on the Article by R. U. Sexl

**Autor:** DUIT, R.

**Revista:** European Journal of Science Education, 3 (3), 291-301

**Año:** 1981

Según Sexl, la enseñanza de la energía en el nivel medio debe hacerse partiendo de su conservación. Sin embargo, este procedimiento presenta dos dificultades. En el uso que se hace en la vida cotidiana de la palabra energía no se recoge su conservación sino su consumo y su gasto. Por otra parte, la idea de conservación aparece muy tarde en el desarrollo cognitivo de los estudiantes.

Algunos proyectos parten de definiciones de energía tales como: "La energía es la capacidad para hacer un trabajo", "Si se hace un trabajo, se debe hacer energía" y la que relaciona la energía con los combustibles, los cuales pueden hacer un trabajo útil. Las definiciones anteriores presentan varios problemas porque utilizan una descripción semántica que se puede interpretar como una definición operativa y dan un concepto de la energía muy restrictivo. Los proyectos que utilizan dichas definiciones desarrollan la transformación y la transferencia de energía, mientras que la conservación se introduce con posterioridad.

Otros proyectos, como los de Jung y Orpaz, enseñan la energía partiendo de su conservación, a través de pequeñas experiencias y su generalización. Se ha comprobado que dichos proyectos causan serios problemas de aprendizaje.

La enseñanza de la energía presenta dificultades porque no tiene sentido analizar por separado su conservación, transformación, transferencia y degradación. Por otra parte, los estudiantes tienen ideas previas sobre la energía que no coinciden con las de la física. En concreto, el significado de la palabra energía en el lenguaje coloquial no se relaciona con su conservación. Otra dificultad fue detectada por Jenelten-Allkofer. Descubrió la existencia en alumnos de 10 a 12 años de esquemas de pensamiento que les permiten entender la multiplicidad de la energía así como su convertibilidad y su

transferibilidad pero no su conservación. Este hecho ha sido comprobado por numerosas investigaciones posteriores. A pesar de lo anterior, el autor cree que los estudiantes de los grados 5 a 10 pueden llegar a entender la conservación de la energía. Para ello, propone que se parta de una definición no operativa (“La energía es necesaria cuando se quiere poner algo en movimiento, aumentar su velocidad, levantar, iluminar o calentar, y en otros muchos procesos”). Por medio de pequeños ejemplos se puede desarrollar la conservación que será generalizada posteriormente.

**Título:** Learning the energy concept in school-empirical results from The Philippines and West Germany

**Autor:** DUIT, R.

**Revista:** Physics Education, 19, 59-66

**Año:** 1984

La educación en la energía es importante porque se pretende que la enseñanza proporcione a los estudiantes conocimientos, habilidades y procedimientos para vivir en un mundo enfrentado a la crisis energética. Para ello, se deben analizar los aspectos del concepto físico de energía que faciliten el entendimiento de los problemas energéticos de la sociedad y comprobar cuáles son los problemas que plantea su aprendizaje. Estos son los objetivos de una investigación que se desarrolló en Filipinas y Alemania Occidental con estudiantes pertenecientes a los grados 6 a 10.

Para la comprensión del concepto de energía se deben considerar cinco aspectos: el propio concepto, su transferencia, transformación, conservación y degradación. Con respecto al primer aspecto, algunos investigadores consideran que la energía es un concepto abstracto mientras que otros le asignan una naturaleza material. Por otra parte, el autor la define como la precondition para hacer un trabajo, algo que produce cambios o una clase especial de combustible.

Para que los alumnos comprendan los problemas energéticos del mundo que les rodea, no conviene partir de la definición de energía como “capacidad para hacer un trabajo”. Dicha definición está limitada a la mecánica. También se necesitan los conceptos de transferencia y transformación de la energía. El concepto de conservación es importante porque la idea contenida en él conduce al hecho de que no nos podamos liberar de la energía (en su mayor parte calor). Este hecho puede tener efectos medioambientales negativos. La degradación de la energía permite explicar que la energía se conserva pero pierde la cualidad para transformarse en otras utilizables.

En la investigación sobre la enseñanza tomaron parte estudiantes comprendidos entre 11 y 16 años, procedentes de Filipinas y Alemania Occidental. Para su desarrollo se utilizó un cuestionario dividido en dos partes. La primera consta de cuatro tareas y la segunda, de dos. Las cuatro primeras tareas son ejercicios de asociación, definición, ejemplos y descripción de un proceso mecánico. En las tareas 5 y 6 se pide el análisis del

movimiento de una bola que se mueve por un carril.

Los resultados demuestran que la enseñanza de la física no ha tenido mucho éxito en el aprendizaje del concepto de energía. Cuando los estudiantes deben explicar un proceso mecánico, la mayoría no utiliza la palabra energía. Lo hacen con palabras del lenguaje coloquial. Tampoco hacen referencia a la conservación de la energía. Solomon y Watts han detectado también problemas semejantes en el aprendizaje de la conservación. La degradación de la energía no aparece en ninguna respuesta. Se debe indicar que este aspecto no se discute en el curso de física. En resumen: la contribución de la física a la comprensión de los problemas energéticos de la sociedad es muy pequeña. Por tanto, la enseñanza de la energía no debería estar ligada al trabajo sino a otras nociones más comprensibles. La degradación de la energía debería enseñarse previamente a la conservación porque este principio contradice la experiencia diaria.

**Título:** Should energy be illustrated as something quasi-material?

**Autor:** DUIT, R.

**Revista:** European Journal of Science Education, 9 (2), 139-145

**Año:** 1987

Según Feynman, la energía es una magnitud abstracta. Las fórmulas matemáticas definen las diferentes formas de energía. Por el contrario, Falk y Herrmann, y Schmid piensan que la energía es una magnitud de tipo sustancia, que puede almacenarse en un sistema o fluir de un sistema a otro. El flujo de energía está acompañado por el de otra magnitud de tipo sustancia que se llama transportador de energía (energy carrier). Mientras que Rogers sostiene que dicha aproximación puede conducir a una noción vaga del concepto de energía y la admite a causa de sus ventajas, Warren la rechaza.

Aunque la concepción cuasi-material de la energía tuvo un papel relevante en la física de la primera mitad del siglo XIX (como lo demuestra el desarrollo de la teoría del calórico y sus aplicaciones), en la segunda mitad del siglo citado fue rechazada categóricamente por la mayoría de los científicos. Por otra parte, dicha concepción resulta compatible con el concepto de energía en la teoría clásica de campos pero no en relatividad ni en física cuántica, dado el carácter no localizado de la energía. A pesar de estas limitaciones, la analogía de la energía con la materia ayuda a que un concepto abstracto pueda ser comprendido en términos concretos.

Con respecto a las implicaciones didácticas de la concepción cuasi-material de la energía, las investigaciones empíricas realizadas por Duit y Watts señalan que la palabra energía se usa en el lenguaje corriente con un significado completamente diferente del que tiene en la física. Cuando se aprende el concepto de energía, existe el riesgo de que se atribuya una concepción cuasi-material al concepto físico abstracto, a causa del significado cotidiano. Por tanto, la concepción citada debe contribuir a una ilustración más concreta del concepto abstracto de energía. Se adapta a la tendencia de la mente

humana a interpretar como concretas las ideas abstractas. Sin embargo, esa identificación será un obstáculo en el aprendizaje si el objetivo es familiarizar al alumno con un concepto abstracto de la energía. Una posición intermedia viene representada por la analogía entre la energía y el dinero, utilizada en el siglo XIX. Esta analogía combina una concepción cuasi-material (las monedas y los billetes) con una noción abstracta (el dinero).

Como resumen, se señala que la idea de la energía como algo cuasi-material no debe ser rechazada totalmente porque no contradice el concepto de energía de la física clásica, aunque no se puede utilizar en relatividad y física cuántica. Aunque la noción más general de la naturaleza del concepto de energía en física es la de Feynman (la energía no es algo concreto, sino una magnitud abstracta cuya esencia no se agota en sus fórmulas), no se puede rechazar la idea cuasi-material de la energía porque no esté de acuerdo con una concepción abstracta. Por último, la concepción cuasi-material hace posible que el concepto abstracto de energía se explique de una forma más tangible y que se entienda más fácilmente por los alumnos. El concepto abstracto de energía no puede ser comprendido por los estudiantes más jóvenes.

**Título:** Transferring not transforming energy

**Autor:** ELLSE, M.

**Revista:** School Science Review, 69, 427-437

**Año:** 1988

Cuando se examinan los libros de texto de los niños de 11 a 13 años, llama la atención el número de formas de energía que aparecen. Para cualquier fenómeno que tenga asociada una energía, se introduce un tipo de energía. Por otra parte, al describir los procesos que implican calor o trabajo, los alumnos centran su atención en las formas de energía y en las transformaciones que ocurren. Este énfasis en las formas de energía tiene como consecuencia que se considere, en menor medida, la transferencia de energía, concepto más fácil, más útil y más importante. Además, el estudio temprano de las formas de energía hace que no se definan cuidadosamente términos como energía mecánica o energía de enlace, de forma que los alumnos del "A-level" no los usan correctamente.

En la enseñanza de la física existen dos tendencias. Para algunos profesores, no se debería enseñar a los alumnos nada que fuera erróneo. El autor del artículo no está de acuerdo con este punto de vista. Cree que se pueden enseñar descripciones aproximadas de conceptos físicos si son útiles para los alumnos que no continuarán estudiando física. Otros profesores piensan que en el desarrollo del curriculum se pueden introducir una gran cantidad de errores. De esta forma los estudiantes sentirán la emoción de ser físicos verdaderos. El autor no está de acuerdo. Se puede dar esa emoción con descripciones seguras de conceptos simples en vez de descripciones aproximadas de conceptos

difíciles. La posición del autor con respecto a esta controversia es intermedia. En ocasiones se pueden incorporar a la enseñanza descripciones aproximadas si son útiles para la mayoría de los estudiantes pero se evitarán los errores innecesarios.

En la enseñanza de la energía se distingue entre los alumnos que no continuarán los estudios de física y los que sí que lo harán. Los primeros necesitan tener algunos conocimientos sobre el concepto de energía. En la vida cotidiana se encontrarán con facturas de luz, gas, etc.; relacionarán el precio de los electrodomésticos con su consumo; deberán decidirse por el gas o la electricidad, etc. Sin embargo, no se piensa que dicho conocimiento deba partir del concepto de trabajo, de la unidad "julio" y de la energía como capacidad para hacer un trabajo. Por otra parte, en la vida diaria la energía se utiliza más para calentar que para realizar un trabajo. Por eso, para muchos estudiantes no es fácil la introducción de la energía a partir del concepto de trabajo. Les resultan difíciles las operaciones matemáticas (como multiplicar una fuerza por un desplazamiento) pero pueden identificar la energía. A ellos se les puede enseñar que las fuerzas sin desplazamiento no están utilizando energía; no hay desplazamientos sin una fuerza; se necesita energía para aumentar la temperatura de un cuerpo; cuanto mayor sea el incremento de temperatura, más energía se requiere; se necesita energía en los cambios de estado. Todo lo anterior son logros conceptuales útiles e importantes para los alumnos. Además esos logros se han aprendido sin necesidad de una definición formal de energía. Por el contrario, los alumnos que piensen seguir estudios de física aprenderán el concepto de energía a partir del concepto de trabajo.

Algunos planteamientos actuales de la enseñanza de la energía se centran más en las transformaciones de energía que en sus transferencias. Se suele suponer, erróneamente, que lo característico de un trabajo es la transformación de la energía pero no la transferencia. Cuando se hace trabajo, se transfiere energía de un sistema a otro pero la energía no transforma necesariamente.

Después de revisarse el concepto de calor como forma de transferencia de energía, se analizan las diferencias entre energía eléctrica y trabajo eléctrico. Se señala que éste no se suele utilizar en la enseñanza y se propone su introducción como el proceso por el cual una corriente eléctrica que pasa por un cuerpo transfiere energía a un sistema sin hacer trabajo mecánico ni producir un aumento de temperatura.

Se propone la reformulación de cuestiones de transformación de energía en otras sobre transferencias así como la realización de cadenas de transferencia de energía dado que los estudiantes comprenden mejor los cuerpos y aparatos que aparecen en ellas (objetos concretos) que las formas de energía (magnitudes abstractas).

**Título:** The concept of energy without heat or work

**Autor:** KEMP, H.R.

**Revista:** Physics Education, 19 (3), 234-240

**Año:** 1984

La definición de la energía como capacidad de realizar un trabajo presenta varios problemas. En primer lugar, el trabajo máximo que puede realizar un sistema viene limitado por el segundo principio de la termodinámica. Por otra parte, los conceptos de trabajo y de calor causan dificultades y es mejor evitarlos.

Para desarrollar el concepto de energía, sin utilizar los de calor y trabajo, se parte de la noción de "estado termodinámico" y de la definición normal de energía cinética de una partícula. Por otra parte, se indica que "la variación de energía potencial de un sistema aislado de cuerpos es igual a la energía cinética que se pierde cuando los cuerpos cambian de posición sin que ocurra ningún cambio en el estado termodinámico". La elevada masa de la Tierra permite asignar la variación de energía potencial al cuerpo considerado. Como la idea de energía potencial se utiliza sólo para los campos gravitatorios y eléctricos, la energía elástica sería una energía interna pero no potencial. Si se define la energía mecánica de la forma normal, se llega a la conclusión de que dicha energía no se conserva en general pero sí en el caso en que no varíe el estado termodinámico. Los cambios en la energía interna se pueden definir en términos de la energía mecánica: para un sistema dado que evoluciona de un estado termodinámico a otro, la diferencia en la energía interna  $\Delta U$  es la cantidad de energía mecánica necesaria para producir dicha evolución. La energía total de un sistema es la suma de la energía interna y de la mecánica.

Después de definir los diferentes tipos de energía, se introduce su conservación. Para ello, se consideran tres aspectos:

a) La variación de la energía interna de un sistema está fijada cuando los estados termodinámicos inicial y final también están fijados.

b) La energía total de un sistema formado por varias partes es la suma aritmética de las energías totales de cada parte.

c) la suma aritmética de la variación de la energía total de un sistema y de la variación de la energía total del entorno es cero.

El enunciado c) es conocido normalmente como principio de conservación de la energía. El b) se asume tácitamente y el a) se conoce como ley de Hess y se considera como un corolario de c). A continuación, se desarrollan varios casos de aplicación de la formulación anterior de conservación de la energía.

Para evitar la utilización del calor, se define la energía térmica como la energía interna que es función de la temperatura.

Por último, se analizan las restricciones en las transformaciones de energía. De este modo, las energías cinética, potencial y elástica se pueden convertir completamente unas en otras, y cada una de ellas se puede convertir en energía térmica. La conversión de energía interna en mecánica está limitada por dos razones: 1) no se puede conocer el valor absoluto de la energía interna de un cuerpo; 2) la primera ley de la termodinámica no puede predecir la cantidad de energía interna que se puede convertir en otras. La energía térmica se puede convertir en energía mecánica por medio de un gas encerrado en un cilindro con un pistón. La capacidad de un sistema para producir energía mecánica

en un cambio dado de un estado termodinámico a la misma temperatura que el entorno viene dada por la energía libre de Helmholtz. La energía mecánica máxima que se puede obtener de una pila electroquímica por medio de un motor, en un cambio dado de un estado termodinámico, viene dada por la variación de la energía libre de Gibbs. Como conclusión de estos aspectos, el autor indica que la energía no puede definirse de una manera satisfactoria como la capacidad para producir energía mecánica (o hacer trabajo). Tal definición es vaga e incompleta a menos que se explique cómo se puede realizar el trabajo.

**Título:** Misconceptions in the teaching of heat

**Autor:** MAK, S-Y. y YOUNG, K.

**Revista:** School Science Review, 68, 464-470

**Año:** 1987

Históricamente, la palabra “calor” ha tenido varios significados no bien definidos. Ahora se sabe que los conceptos de temperatura, energía interna y calor son diferentes. El origen de la confusión se debe a la teoría del calórico. Algunos de sus términos, como capacidad calorífica y calor latente, se usan todavía. Las expresiones “calor ganado” y “calor perdido” pueden confundir a los estudiantes porque dan la impresión de que los cuerpos tienen calor.

Los conceptos físicos se pueden definir de dos maneras: formal y operativa. De acuerdo con la primera, el nuevo concepto se define en términos de otros conceptos o con relación a otros conceptos. En la definición operativa se hace uso de objetos concretos para producir, medir o reconocer casos del término definido. La dificultad que presenta el concepto de calor en el nivel medio es que no existe una definición operativa simple de dicho concepto. Por una parte, resulta muy problemático utilizar los efectos del calor para definirlo. El flujo de calor produce normalmente un aumento de la temperatura o de la energía interna pero la relación de estos dos conceptos con el de calor no es trivial. Por otra, se podría definir el calor a partir de la primera ley de la termodinámica pero ésta siempre se enseña después del concepto de calor.

Algunos autores han propuesto que no se utilice la palabra calor como nombre y que, en su lugar, se use el verbo calentar para resaltar que el calor es un proceso de transferencia de energía. Esta propuesta presenta un problema fundamental: el peligro de referirse al calor como energía interna o como transferencia de energía interna, cuando se sabe que los conceptos de calor y energía interna son diferentes. El objetivo de este artículo es demostrar que la diferencia entre los dos conceptos se aprecia mejor si se tiene claro lo que es un sistema, el estado de un sistema y el proceso por el que el sistema pasa de un estado a otro.

La energía interna se puede expresar macroscópicamente como una función de estado. Microscópicamente, la energía interna incluye la energía cinética aleatoria y la

potencial eléctrica de todas las moléculas del sistema. El calor y el trabajo no son propiedades del sistema sino que están relacionados con procesos (el trabajo hecho y el flujo de calor) que se hace sobre un sistema para producir cambios en sus propiedades. Como ambos procesos implican transferencias de energía, se producirá un cambio en la energía interna, de acuerdo con primera ley de la termodinámica. Esta ley es utilizada por Zemansky para definir macroscópicamente la energía interna y el calor pero no se recomienda este procedimiento para el nivel medio.

El error de considerar el calor como energía interna o como transferencia de energía interna se debe seguramente al hecho de considerar la primera ley de la termodinámica como un conjunto de símbolos relacionados algebraicamente, ignorando los conceptos físicos que existen más allá de los símbolos. Los autores analizan un caso en el que no existe variación de energía interna pero se produce una transferencia de calor.

En el primer ciclo del nivel secundario no se recomienda utilizar los conceptos de calor y trabajo. La energía interna, cinética y potencial se podrían definir operativamente de la siguiente forma: "Un cuerpo que se mueve tiene energía cinética, un cuerpo que se eleva tiene energía potencial y un cuerpo caliente tiene energía interna". En el segundo ciclo de enseñanza secundaria el calor se puede definir de la siguiente forma: "el flujo de calor es el proceso por el cual se produce una transferencia de energía como resultado de una diferencia de temperaturas. El calor es la energía transferida en el proceso". Algunos autores utilizan el verbo calentar para describir el proceso. Esta palabra no es completamente satisfactoria porque tiene dos significados en el lenguaje ordinario (el proceso de flujo de calor y el aumento de la temperatura) y éstos no son equivalentes como se pone de manifiesto en la expansión adiabática o en la vaporización. Con respecto a la energía interna, en los dos ciclos del nivel secundario se entiende mejor desde un punto de vista microscópico. En el primer ciclo se puede pensar que las variaciones de la energía interna se deben a los efectos del flujo de calor y del trabajo realizado. Los conceptos de estado y proceso se explicarían informalmente y no en términos de variables termodinámicas. Los estudiantes no deben tener muchas dificultades en identificar los sistemas porque esa habilidad también se exige en la mecánica. Las experiencias con calorímetros proporcionan ejercicios adecuados para la identificación de los sistemas.

Cuando se enseña la primera ley de la termodinámica en el segundo ciclo se debe insistir en el significado físico de los símbolos y en que los estudiantes no la recuerden como una relación algebraica. Se deben dar ejemplos concretos para ilustrar su aplicación. Los cambios de energía que tienen lugar en la ebullición del agua son un ejemplo adecuado de la interrelación entre calor, energía interna y trabajo. También se recomienda que la expresión de la primera ley se escriba de forma que, en una parte aparezca la variación de la energía interna y en la otra, los procesos ( $Q$  y  $W$ ). Por otra parte, las notaciones  $\Delta Q$  e  $\Delta W$  no son satisfactorias. El símbolo  $\Delta$  (o  $\delta$ ) significan "variación de" o "un poco de" pero el único cambio que se produce es de energía interna, y no de  $Q$  o  $W$ .

Como resumen, se indica que el concepto de calor es diferente de la energía interna o de su transferencia. El término calor es adecuado si se tiene en cuenta que no es algo almacenado en el sistema. El término “transferencia de energía por calentamiento” tiende a que se confunda la absorción de calor (un significado de “calentar”) con el aumento de temperatura (otro significado del mismo verbo). Se debería insistir en definir el sistema considerado y diferenciar entre estado y proceso.

**Título:** General, restricted and misleading forms of the First Law of thermodynamics

**Autor:** MOORE, G.S.M.

**Revista:** Physics Education, 28 (4), 228-237

**Año:** 1993

Después de introducir los conceptos de sistema, entorno y límites así como los de trabajo y calor, se presentan dos formas de la primera ley de la termodinámica. La general se escribe como  $\Delta E = Q - W$ , donde E es la energía almacenada. La forma restringida aparece como  $\Delta U = Q - W$  siendo U la energía interna. La energía almacenada E se define como la suma de la energía interna U, las energías macroscópicas cinética y potencial, la energía almacenada eléctricamente, magnéticamente, etc. La energía interna U es la forma de energía almacenada que puede ser directamente influenciada por una transferencia de calor. La forma general de la primera ley de la termodinámica se aplica al análisis de una bola que cae verticalmente en el interior de un frasco de Dewar. Después se analizan dos recipientes llenos de gas, uno rígido y el otro deformable, que se introduce en un recinto caliente.

Con relación al significado del calor y del trabajo como procesos, se indica que el signo incremento  $\Delta$  está mal utilizado en las expresiones  $\Delta Q$  o  $\Delta W$ .  $\Delta U$  significa un incremento finito de U que puede ser expresado como la diferencia entre el valor final e inicial de U: Sin embargo, no tiene ningún sentido el valor inicial o final del trabajo o del calor. Por otra parte, se explica que las diferenciales del calor y del trabajo son inexactas y no se deben escribir como  $dQ$  o  $dW$ . Por último, se presentan 24 ejemplos de aplicación de la forma general de la primera ley de la termodinámica.

**Título:** Teaching field concept and potencial energy at A-level

**Autor:** POON, C.H.

**Revista:** Physics Education, 21 (5), 307-316

**Año:** 1986

Aunque en la enseñanza de la física, el concepto de campo aparece en gravitación y electromagnetismo, no se profundiza en su significado físico. Por otra parte, es necesario su conocimiento para comprender el sentido de la energía potencial. Los

alumnos conocen los campos electromagnéticos dependientes del campo, como la propagación de las ondas electromagnéticas o el calentamiento de comida en un microondas. Sin embargo, la realidad de los campos eléctricos estáticos les resulta menos familiar. Las ecuaciones de Maxwell, que explican la propagación del campo electromagnético, también describen la electrostática y la magnetostática. El desplazamiento Lamb es un ejemplo de la realidad del campo coulombiano microscópico puesto que se deriva de las interacciones que implican las fluctuaciones del vacío del campo electromagnético incluyendo la polarización del vacío.

Cuando una fuerza actúa sobre un objeto y se produce un desplazamiento, de forma que se hace un trabajo, se transfiere energía al cuerpo desde el agente que mantiene la fuerza. En particular, si un cuerpo cae libremente por la acción de la gravedad, se realiza un trabajo sobre él. Por otra parte, cuando algunos libros tratan la misma situación, se dice que la energía cinética del cuerpo aumenta cuando la potencial disminuye, dado que la segunda se transforma en la primera. En esta situación el cuerpo aparece como si hubiera almacenado energía potencial en su posición inicial, transformándola en cinética. Se comprueba que existe una inconsistencia en dos explicaciones anteriores. La paradoja anterior se puede resolver por medio del campo gravitatorio. Cuando cae un cuerpo sobre la Tierra, la fuerza gravitatoria hace un trabajo positivo sobre el cuerpo por lo que se transfiere energía al cuerpo desde el campo. Esa energía aumenta la energía cinética del cuerpo. Si un cuerpo asciende con velocidad constante, se hace sobre el cuerpo un trabajo externo positivo. La fuerza gravitatoria realiza un trabajo negativo sobre el cuerpo. Se transfiere energía al cuerpo desde el exterior y el cuerpo transfiere esa energía al campo. El cuerpo sólo ha ganado altura pero no energía.

Para comprender el concepto de energía potencial y su almacenamiento en el campo se puede utilizar la analogía del dinero. Esta analogía sugiere que el término energía potencial puede aplicarse a la energía almacenada en el campo o bien a la “energía disponible” del cuerpo.

Con el objeto de aplicar las consideraciones anteriores al campo electrostático, se consideran dos situaciones. En la primera, una carga positiva que se mueve con velocidad constante en dirección opuesta a la de un campo eléctrico. En la segunda, dos cargas positivas se mueven hacia su encuentro. Por aplicación del teorema de Poynting se demuestra que la energía potencial eléctrica se almacena en el campo.

Aunque la energía potencial es una propiedad del sistema formado por los cuerpos que interactúan, se puede considerar la energía potencial de un cuerpo cuando uno de ellos es mucho mayor que el otro, como ocurre con la Tierra. En este caso, el autor llama “energía del campo” a la almacenada en el mismo y “energía potencial” a la que se asigna a un cuerpo. De esta forma, se demuestra la conservación de la energía y se obtiene la expresión conocida en mecánica. También se propone una definición de energía potencial que tiene en cuenta el papel del campo.

Se aplican las ideas de campo para analizar un circuito eléctrico formado por una pila y una resistencia y se indica que la “ecuación del circuito” es una consecuencia del

carácter conservativo del campo eléctrico establecido en el circuito por la fuerza electromotriz. Del mismo modo, se analizan los flujos de energía de campos electromagnéticos dependientes del tiempo. Para ello, se presenta la inducción electromagnética y los transformadores.

**Título:** Energy and its carriers

**Autor:** SCHMID, G.B.

**Revista:** Physics Education, 17(5), 212-218

**Año:** 1982

En Karlsruhe se ha desarrollado un nuevo curriculum de física para niños de 10 a 12 años. La energía se introduce como magnitud primaria, no derivada de otras fundamentales. Se considera la energía como una magnitud de tipo sustancia, entendiendo dicho término como cualquier magnitud física para la que se puede definir una densidad, es decir, cualquier magnitud de la que se puede pensar que está distribuida en el espacio y que puede fluir a través de él. La idea fundamental del curso es el flujo de energía, de acuerdo con las siguientes reglas: “Algo sucede cuando la energía fluye” y “el flujo de energía está siempre acompañado por el flujo de, por lo menos, otra magnitud de tipo sustancia”.

Todos nosotros tenemos ideas inmediatas y directas sobre la energía: la energía es lo que conseguimos cuando comemos, lo que se gasta después de un ejercicio. La energía es lo que mide el contador de la luz de nuestras casas, lo que se necesita para que funcione un tren o un coche, o para calentar una casa. Cuando la energía fluye, algo fluye al mismo tiempo, algo transporta la energía. Nuestra experiencia nos dice que es imposible que algo reciba energía si no es transportada por un “transportador de energía” (energy carriers). Para viajar en coche es necesario un tipo de combustible. Esto demuestra que algo está contenido en el combustible. Ese algo se llama energía. La energía es “transportada” por el combustible. El combustible será un transportador de energía. Por otra parte, el flujo de energía empieza en una región. El aparato donde tiene lugar se llama fuente de energía. El flujo de energía termina en una región. El aparato donde tiene lugar se llama receptor de energía.

Existen dos clases de transportadores de energía: los de retorno y no retorno. Un mismo transportador de energía se puede cargar con más o menos energía. Los transceptores de energía (energy transceivers) son las fuentes o receptores de energía que pueden funcionar de ambas formas, mientras que los contenedores de energía (energy containers) son las fuentes de energía que se pueden vaciar. La conservación de la energía se introduce a partir de los conceptos anteriores. Si la energía es una sustancia que fluye, se puede esperar que se conserve. Sin embargo, se observa que algunos transceptores no dan toda la energía que reciben. Esta pérdida de energía se transfiere al entorno y se llama calor. A continuación, se aplica la metodología revisada a seis casos.

Como conclusión, se puede señalar que los ejemplos utilizados en el curso indicado proceden del entorno inmediato tanto natural como tecnológico: máquinas, aparatos y procesos familiares de la vida diaria. A los estudiantes les resulta fácil realizar experimentos en sus casas, con aparatos corrientes. Y, por último, la metodología indicada prepara el camino para la introducción del potencial químico, que marca la dirección de los procesos químicos.

**Título:** Some Observations Concerning the Teaching of the Energy Concept

**Autor:** SEXL, R.U.

**Revista:** European Journal of Science Education, 3 (3), 285-289

**Año:** 1981

El operativismo, propuesto por Bridgeman en 1927, señala que todas las magnitudes físicas deben ser definidas por un procedimiento operativo que especifique la unidad, la igualdad y la multiplicidad. Aunque en física existen teorías que incluyen conceptos no observables (mecánica cuántica de Heisenberg, teoría de Einstein del movimiento browniano), la enseñanza de la energía en el nivel medio se realiza de forma operativa. Normalmente se siguen dos procedimientos. De acuerdo con el primero, se da una definición operativa de trabajo para llegar a la relación entre dicho concepto y la variación de energía. También se obtienen expresiones para el cálculo de la energía en función de magnitudes observables. Posteriormente, se demuestra su conservación en un sistema aislado. Sin embargo, no se puede dar una definición operativa de energía porque no se puede definir la igualdad de energías de dos sistemas. La segunda aproximación define operativamente la energía como “la capacidad de un sistema para hacer un trabajo”. Esta definición presenta limitaciones porque no puede usarse en termodinámica dado que es imposible que la energía interna se transforme totalmente en trabajo.

Según la teoría de los dos lenguajes de Carnap, en la física existen dos: el teórico y el observacional. La energía pertenece a la primera categoría porque no es calculable por medio de operaciones de medida. Sin embargo, a partir del concepto teórico de energía se pueden predecir relaciones empíricas que son comprobables de forma experimental. Por otra parte, la energía de un sistema aislado permanece constante aunque sufra modificaciones internas. Este importante hecho es el que motiva la introducción del concepto. Dado el carácter teórico de la energía, el autor del artículo propone que se introduzca a partir de su conservación, partiendo de un caso muy simple (la caída libre de un cuerpo) y generalizando las conclusiones a todos los sistemas físicos. A continuación, se presentaría el trabajo como mecanismo de transferencia de energía de unos sistema a otros.

**Título:** Pseudowork and real work

**Autor:** SHERWOOD, B.A.

**Revista:** American Journal of Physics, 51 (7), 597-602

**Año:** 1983

El objetivo del artículo es resolver las ambigüedades y profundizar en el entendimiento de algunos problemas que aparecen en los libros de texto relacionados con el trabajo y la energía. Cuando un coche acelera desde el reposo, parece que la energía cinética es igual al trabajo hecho por la fuerza de rozamiento actuando a través del desplazamiento del coche. Pero la fuerza de rozamiento no hace trabajo y la energía cinética del coche procede de la combustión de la gasolina y no de la carretera. En el caso de un bloque que se desliza por un plano inclinado con rozamiento, se dice que la energía cinética es igual al trabajo hecho por la gravedad menos el trabajo hecho por la fuerza de rozamiento pero se sabe que el bloque se calienta y este calentamiento no aparece en la ecuación trabajo-energía. Estos problemas mecánicos son representativos de situaciones en las que un sistema no puede ser tratado como una partícula puntual. La solución propuesta en este artículo puede clarificar tales situaciones y mejorar las conexiones entre la mecánica y la termodinámica.

Erichson y Penchina han observado que normalmente no se distingue entre la ecuación trabajo-energía (o teorema trabajo-energía) de la mecánica y una forma integral de la segunda ley de Newton para un sistema de partículas:

$$\sum \left( \int \mathbf{F}_{i,\text{ext}} \cdot d\mathbf{r}_{\text{cm}} \right) = \Delta \left( \frac{1}{2} M v_{\text{cm}}^2 \right)$$

El término de la izquierda se llama “pseudotrabajo” y no es igual al trabajo hecho sobre el sistema porque las fuerzas han sido multiplicadas por el desplazamiento del centro de masas (CM) y no por los desplazamientos individuales. La expresión de la parte derecha no es, en general, igual a la variación de energía cinética del sistema porque aparece sólo la velocidad del CM. A dicho términos se le llama “energía cinética del CM”. La expresión anterior se llama “ecuación pseudotrabajo-energía” o “ecuación CM”. En el caso de partículas puntuales, el pseudotrabajo es igual que el trabajo porque  $d\mathbf{r}_i = d\mathbf{r}_{\text{cm}}$ . Además la energía de una partícula puntual es sólo cinética, de forma que las ecuaciones CM y trabajo-energía son equivalentes sólo en dicha situación. A continuación, se aplica la ecuación CM y el teorema trabajo-energía a un cilindro que rueda sin deslizar por un plano inclinado con rozamiento. Dicha aplicación permite llegar a la conclusión de que es importante definir el sistema con claridad para determinar cuáles son las fuerzas externas.

Se establece la ecuación general de la energía de la forma siguiente: “entradas externas netas en el sistema (trabajo mecánico, transferencia de calor, transferencia de masa, radiación, etc.) = cambio de energía del sistema (energía cinética, potencial gravitatoria, química, etc.)”. Por razones históricas, esta ecuación se llama “primera ley de la termodinámica” y no se puede derivar de las leyes de Newton, aunque contiene el teorema trabajo-energía. Se podría denominar ecuación de la energía. Sin embargo, la

expresión “ecuación trabajo-energía” se aplica indiscriminadamente en los cursos de mecánica a la ecuación CM y al teorema trabajo-energía, las cuales son muy distintas. Por dicha razón, parece conveniente no utilizar el término “ecuación trabajo-energía” y usar dos nuevos términos: “ecuación CM” y “primera ley de la termodinámica”. Estas dos ecuaciones se aplican a cinco casos.

Se señala la importancia de elegir claramente el sistema cuando se aplica la expresión de la energía potencial. En el caso de una roca que cae verticalmente, algunos alumnos escriben  $mgh = \Delta E_c - mgh$ . Esta expresión es incorrecta porque el término  $mgh$  se ha escrito dos veces: El estudiante ha mezclado dos sistemas diferentes: la roca (sobre la cual la Tierra hace el trabajo externo  $mgh$ ) y el universo (en el cual hay una variación de la energía potencial gravitatoria  $-mgh$ ).

Ha sido una práctica muy extendida no mencionar la primera ley de la termodinámica en los cursos de mecánica. El teorema trabajo-energía se trata en un nivel puramente mecánico. Esta aproximación presenta serias dificultades porque resulta muy formal para el curso introductorio de mecánica, no permite la aplicación de relaciones energéticas a problemas muy comunes y produce una separación innecesaria entre la mecánica y la termodinámica. Por el contrario, la utilización conjunta del teorema trabajo-energía y de la primera ley de la termodinámica permite abordar muchos problemas en los que hay transformación de energías en energía interna.

El autor admite que su intento de tratar el trabajo y la energía globalmente no ha tenido un éxito completo. Los estudiantes encuentran que el tema es difícil. Se ha observado que la primera ley de la termodinámica no da lugar a muchas dificultades conceptuales, pero la ecuación CM aparece ante los estudiantes como algo misterioso. Quizás se deba a que la segunda ley de Newton para un sistema de partículas ( $\Sigma \mathbf{F}_{\text{ext}} = M \mathbf{a}_{\text{cm}}$ ) es, de hecho, misteriosa porque relaciona el movimiento del CM con fuerzas aplicadas en puntos quizás lejanos del CM. Existe una falta de infraestructura (libros de texto, métodos de enseñanza de los profesores) para apoyar el tratamiento revisado del trabajo y la energía.

**Título:** Work an heat transfer in the presence of sliding friction

**Autor:** SHERWOOD, B.A. y BERNARD, W.H.

**Revista:** American Journal of Physics, 52 (11), 1001-1007

**Año:** 1984

Se plantea que la resolución de problemas con rozamiento, de acuerdo con el procedimiento habitual, da lugar a paradojas. Para ello, se examina el caso de un bloque que se arrastra con velocidad constante por una superficie horizontal con rozamiento. En esta situación se demuestra que el trabajo total es cero. Por otra parte, el bloque se calienta debido al rozamiento y su aumento de energía térmica se puede medir con un calorímetro. Sin embargo, en la resolución anterior no aparece ningún término que

represente dicho aumento de la energía interna.

La clave para resolver la paradoja anterior se encuentra en la diferencia entre dos ecuaciones: la verdadera ecuación de la energía (llamada por razones históricas “primera ley de la termodinámica) y la ecuación “pseudotrabajo-energía” o “centro de masas” (CM). Ésta se obtiene a partir de la segunda ley de Newton aplicada a un sistema de partículas. Es una integral realizada a lo largo del desplazamiento del centro de masas:

$\sum \left( \int \mathbf{F}_{i,\text{ext}} \cdot d\mathbf{r}_{\text{cm}} \right) = \Delta E_{\text{c,cm}}$ . Esta igualdad parece una ecuación de energía pero no incluye la energía de rotación o de vibración. Tampoco incluye otras formas de energía no mecánica como la térmica o la química. La paradoja queda resuelta considerando que la ecuación aplicada al bloque no es una ecuación de energías sino la ecuación CM. Esta ecuación es equivalente a la segunda ley de Newton aplicada al proceso  $\mathbf{f} - \mathbf{f} = 0 = M\mathbf{a}_{\text{cm}}$ . Como consecuencia de que la ecuación CM se deriva de la segunda ley de Newton, su aplicación al bloque no da ninguna información sobre el aumento de su energía térmica ni sobre la transferencia de calor entre el bloque y el entorno. Para describir estos aspectos energéticos del proceso, se debe utilizar la primera ley de la termodinámica.

A continuación, se utiliza la ecuación CM y la primera ley de la termodinámica para analizar el problema de dos bloques iguales, situado uno sobre otro que se mueven horizontalmente con velocidad constante. Se demuestra que el desplazamiento  $d_{\text{eff}}$  que se utiliza para calcular el trabajo de rozamiento es la mitad del desplazamiento de los bloques. A continuación, se analiza otros casos semejantes y se llega a la conclusión de que el desplazamiento  $d_{\text{eff}}$  nunca es igual al desplazamiento de los bloques.

Para el movimiento de rotación existe una ecuación CM análoga a la de traslación que se deduce. Después se aplica al caso de una rueda que gira a causa de un motor externo con rozamiento. A continuación, se obtiene una expresión invariante para la primera ley de la termodinámica:  $\sum (\int \mathbf{F}_{i,\text{ext}} \cdot d\mathbf{R}_i) + Q = \Delta E_{\text{interna}}$ , donde  $\Delta E_{\text{interna}}$  representa la energía macroscópica y microscópica en el sistema de referencia donde se encuentra en reposo el sistema. Se le llama energía en reposo del sistema y sus cambios son independientes del sistema de referencia.  $Q$ , que también es un término invariante, representa la transferencia de calor y otras transferencias de energía (que no hacen trabajo) a través de la frontera del sistema, como la radiación o la transferencia de masa. Se propone que la integral de la ecuación invariante anterior se llame “trabajo invariante”, de manera semejante a la integral de la ecuación CM que se llama “pseudotrabajo”. Por aplicación de la ecuación invariante se analiza el problema de un patinador que hace fuerza sobre una pared.

**Título:** Learning about energy: how pupils think in two domains

**Autor:** SOLOMON, J.

**Revista:** European Journal of Science Education, 5 (1), 49-59

**Año:** 1983

Los alumnos tienen ideas previas sobre algunos conceptos de la ciencia. Su origen se encuentra en las opiniones que existen en la sociedad, en las conversaciones y en los medios de comunicación. Los estudiantes deberían ser conscientes de que piensan y operan en dos dominios diferentes de conocimiento: el de las nociones de todos los días y el de las explicaciones científicas. Estos dos dominios son diferentes tanto en su génesis como en su modo de operar. En el dominio “normal” se tiende a categorizar la experiencia de una manera laxa para que pueda ser absorbida en las “estructuras de significado”. Dichas estructuras se caracterizan por ser fragmentarias, no integradas lógicamente en otras y ligadas al tipo de experiencia que las impulsa. Además, son reforzadas por la intercomunicación y el lenguaje que les da valor social y persistencia. En el dominio “científico”, desarrollado en la escuela, se llegan a aprender otros sistemas interpretativos de conocimiento y se forman “universos simbólicos” de conocimiento. Sin embargo, las estructuras del primer dominio no desaparecen porque las interpretaciones aprendidas son extrañas a la actitud natural y resultan más frágiles. Por otra parte, su valor social es menor porque están restringidas a un grupo especializado y al horario escolar. El paso de un dominio a otro implica una discontinuidad de pensamiento muy grande y la facilidad de movimiento de uno a otro no es simétrica. Las consideraciones anteriores han sido analizadas exhaustivamente por Schutz y Luckmann.

Se informa sobre una investigación de la enseñanza de la energía que tiene lugar en tres clases de alumnos con edades comprendidas entre 14 y 15 años. Los diseños experimentales incluyen grabaciones de las discusiones que se hacen en la clase, tests realizados como deber para casa y preguntas de un examen final. Las discusiones en clase muestran que los alumnos, a diferencia de la conservación de la energía, no tienen dificultades en el aprendizaje de su transformación y en la realización de cadenas de conversión. Con respecto a la cuestión “¿Qué transformaciones de energía tienen lugar en un taladro que se utiliza para hacer un agujero en un trozo de madera?” las respuestas de los estudiantes incluyen términos del dominio “cotidiano”. El análisis de dichas respuestas pone de manifiesto que los términos referentes a la energía en el dominio “simbólico” tienen una función selectiva y de clasificación. Además, ambos dominios poseen redes explicativas. En el dominio “cotidiano” se habla de causas (la electricidad es la causa de que gire el taladro, etc.) mientras que el dominio “simbólico”, en este caso, no es tan causal. Por último, se produce una transferencia de pensamientos de un dominio a otro. Para entender el concepto de energía es necesario realizar un proceso continuado de paso del mundo cotidiano al de la abstracción y de éste al primero.

De la teoría de Schutz y Luckmann se pueden deducir dos hipótesis. Según la primera, se utiliza el dominio cotidiano, si es muy grande el intervalo de tiempo transcurrido entre el aprendizaje de un concepto en la escuela y la contestación de un test referente a dicho aprendizaje y si no ha existido refuerzo del conocimiento simbólico. De acuerdo con la segunda, el paso de un dominio a otro obtiene peores resultados que el desarrollo de operaciones en un solo dominio. Para comprobar las dos hipótesis indicadas se diseñan dos experimentos con tres grupos de alumnos. Se propone una cuestión en la que se deben explicar las transformaciones de energía que tienen lugar en

un modelo de máquina de vapor que mueve una turbina. Los resultados obtenidos confirman las dos hipótesis.

Se analizan resultados de una investigación didáctica de Viennot con el objeto de comprobar si se cumplen las hipótesis de la teoría de Schutz y Luckmann. Se constata que el porcentaje de estudiantes que contestan correctamente cierta cuestión disminuye de acuerdo con los años transcurridos desde que se aprendió en la escuela. Por otra parte, la respuesta a otra cuestión implicaba realizar un razonamiento en el dominio abstracto, sin tener que pasar al cotidiano. Los resultados positivos de dicha pregunta fueron muy altos. También se examinan algunos resultados de una investigación de Duit sobre enseñanza de la energía. Las respuestas a una pregunta, que implica que los alumnos deben pasar del dominio abstracto al cotidiano, fueron erróneas en un porcentaje muy alto.

Como conclusiones finales, se señala que los problemas de física se suelen situar en un contexto familiar con los estudiantes porque se supone que la situación será más fácilmente comprensible y más interesante. Por otra parte, también se piensa que los problemas serán más sencillos de conceptualizar por encontrarse en el dominio cotidiano. Los resultados presentados en este artículo no están de acuerdo con la última afirmación.

**Título:** The presentation of energy and fields in physics texts-a case of literary inertia

**Autor:** STRUBE, P.

**Revista:** Physics Education, 23, 366-371

**Año:** 1988

En el artículo se analiza el lenguaje utilizado por los libros de física cuando presentan los conceptos de energía y de campos. La energía es concepto organizativo y explicativo muy importante en la física y en la química. Sin embargo, se trata de un término teórico difícil de explicar. Su presentación se puede hacer empíricamente, a través de trabajos experimentales o por medio de situaciones de la vida cotidiana. Sin embargo, el concepto de campo es explicativo. Se introdujo en electromagnetismo como un modelo para explicar la acción a distancia.

Después de la revisión de varios libros de texto, se concluye que la energía aparece en ellos como algo que un objeto puede poseer, aunque no queda claro que tenga la misma realidad que otras propiedades de los cuerpos. En casi todos los libros analizados se define como la capacidad de hacer un trabajo. Normalmente los textos parten de ejemplos sencillos hasta llegar a un formalismo matemático. También se observa en los textos una evolución del concepto de energía desde una magnitud poseída por los cuerpos hasta un principio abstracto organizativo.

El concepto de campo se introduce en algunos libros por medio del comportamiento de una aguja imantada en un campo magnético con lo cual se produce una circularidad dado que un campo magnético se detecta con una aguja imantada. La

acción a distancia se explica en un libro a través de “influencias magnéticas”, lo cual no explica en absoluto la acción de las fuerzas. Las definiciones deben ser usadas no sólo para presentar los conceptos sino para darles también significado. Un libro introduce el campo como un medio para describir, pero no para explicar, lo que sucede.

El análisis de los libros muestra que el lenguaje no ha variado desde comienzos de siglo. No se ha desarrollado la utilización de un lenguaje figurativo, ni el uso de modelos ni la introducción de citas de científicos. Las explicaciones tienen la forma de argumentos inductivos/deductivos. El papel del laboratorio es secundario, reducido a la comprobación de los conceptos. El lenguaje resulta formal y didáctico, presentando las conclusiones y sin ninguna guía para la indagación personal. Como aspecto positivo se puede señalar que aparecen muchos ejemplos del mundo de los lectores y de los científicos.

El autor concluye indicando que no existe interacción entre el lector y los autores de los textos, en el sentido de que no se ofrece al primero ninguna justificación de la secuenciación de los contenidos ni del desarrollo del tema. Además, los autores no manifiestan ninguna duda en la habilidad del lenguaje para expresar el significado de los conceptos. Tampoco diferencian entre las categorías de cosas, propiedades y conceptos ni muestran las actividades de la ciencia. Por todo ello, se recomienda la búsqueda de un estilo que sea apropiado para el desarrollo conceptual del lector y la exposición de los conceptos por medio de aproximaciones que conduzcan al punto de vista científico.

**Título:** An attempt to overcome alternative conceptions related to heat and temperature

**Autor:** THOMAZ, M.F., MALAQUIAS, I.M., VALENTE, M.C. y ANTUNES, M.J.

**Revista:** Physics Education, 30 (1), 19-26

**Año:** 1995

En el artículo se describe y analiza un proyecto alternativo para la enseñanza del calor y de la temperatura destinado a estudiantes portugueses de nivel secundario. Dicho proyecto se ha desarrollado dentro del marco del constructivismo.

De acuerdo con estudios previos sobre calor y temperatura, se puede señalar que muchos estudiantes creen que el calor es una sustancia que se encuentra en el interior de los cuerpos. Confunden el calor y la temperatura, asocian diferentes sensaciones con diferentes temperaturas y no comprenden el concepto de equilibrio térmico. También creen que calentar un cuerpo significa aumentar su temperatura y piensan que la temperatura de una transición de fase es la máxima que un cuerpo puede alcanzar. Como consecuencia de esta situación, se desarrolla una investigación en tres fases. Durante la primera, dos profesores asisten a la universidad para recibir información sobre las ideas alternativas de los estudiantes. En la segunda fase, se elabora un cuestionario y se aplica a 92 estudiantes. A partir de los resultados obtenidos se desarrolla un modelo de enseñanza del calor y la temperatura que es impartido a los alumnos, los cuales contestan

un nuevo cuestionario. Los resultados se discuten y se analizan. A lo largo de la tercera fase tiene lugar un nuevo ciclo.

Los primeros resultados de la investigación mostraron que los alumnos tenían grandes dificultades en la comprensión del equilibrio térmico. Este concepto es clave en el estudio del calor y la temperatura, dado que estos conceptos se definen tomando como base el equilibrio térmico y en los siguientes términos: “la temperatura es una magnitud macroscópica relacionada con la energía cinética media de cada partícula que determina si dos o más objetos se encuentran o no en equilibrio térmico”; “el calor es la energía que se transfiere de un objeto a otro que tiene una temperatura inferior hasta que se alcanza el equilibrio térmico”. Como consecuencia de lo anterior, se decidió considerar el equilibrio térmico como el concepto central de la nueva propuesta.

Después de exponer las bases del constructivismo, los autores presentan la estrategia de enseñanza y los resultados obtenidos por los estudiantes como consecuencia de haber desarrollado con ellos el nuevo proyecto. Dichos resultados indican que la gran mayoría de los alumnos ha comprendido el concepto de equilibrio térmico. También ha disminuido el número de estudiantes que piensa que el calor es una sustancia que se encuentra en los objetos. Por el contrario, en la clase de control aumentaron el número de alumnos con ideas equivocadas sobre la temperatura después de recibir enseñanza de tipo tradicional sobre el tema. Sin embargo, a los grupos experimentales les resulta más difícil el concepto microscópico de temperatura que el de calor. Por tanto, se puede concluir señalando que el proyecto de enseñanza ha tenido éxito en cambiar las ideas de muchos estudiantes sobre calor y temperatura. Por último, se incluye un apéndice donde figuran algunas de las cuestiones que se plantearon a los estudiantes antes y después de haberse desarrollado con ellos el nuevo proyecto.

**Título:** Teaching energy: a system approach

**Autor:** VAN HULS, C. y VAN DEN BERG, E.

**Revista:** Physics Education, 28, 146-153

**Año:** 1993

Se propone un nuevo método de enseñanza de la energía a alumnos de 15-16 años. Dicho método parte del concepto de sistema. Para ello, se elige un sistema y sus límites. Se aplica la primera ley de la termodinámica, enunciada de la siguiente forma: “la diferencia entre las energías de entrada y de salida es igual al cambio de la energía interna total del sistema ( $\Sigma U_{in} - \Sigma U_{out} = \Delta U_i$ ). También se utiliza el teorema del trabajo-energía cinética escrito como  $\Sigma W_{in} - \Sigma W_{out} = \Delta U_k$ , donde  $\Sigma W_{in}$  es el trabajo total positivo hecho sobre el sistema (energía transferida al sistema),  $\Sigma W_{out}$  es el trabajo total negativo hecho por el sistema (energía transferida desde el sistema) e  $\Delta U_k$  es la energía cinética total. Por último, se identifican las entradas y salidas del sistema, y la energía interna. Como entradas y salidas se consideran el calor, el trabajo, la radiación, la energía eléctrica y la

energía de las partículas. En el término de energía interna se incluyen la térmica, química, cinética, gravitatoria y elástica. El procedimiento indicado se aplica a cuatro casos: un circuito eléctrico, el calentamiento del agua, un trineo y un cuerpo que cae libremente.

Como aspectos positivos del método se puede señalar que su aplicación hace que los estudiantes se plantean cuestiones interesantes que normalmente no aparecen con una enseñanza de tipo tradicional. Por otra parte, los alumnos no suelen tener problemas cuando eligen el sistema. Sin embargo, las dificultades aparecen cuando se determinan las entradas, las salidas y la energía interna. Otros problemas que se plantean en su aplicación se refieren al calor como mecanismo de transferencia de energía. ¿El símbolo  $Q$  se debe utilizar para los tres modos de transmisión del calor: conducción, convección y radiación? ¿Se debe utilizar  $Q$  sólo para la conducción y  $U_{\text{rad}}$  para la radiación? ¿Se debe diferenciar entre  $U_{\text{rad}}$  y  $U_{\text{luz}}$ , o bien  $U_{\text{rad}}$  incluye  $U_{\text{luz}}$  y  $Q$  (radiación térmica)? Con respecto a la energía interna, al principio se utilizó dicho término como sinónimo de energía térmica. Como los estudiantes se confundían, se decidió usar energía térmica en lugar de energía interna. Otro problema que se plantea se refiere a la identificación de calor y trabajo. Los alumnos no diferencian la energía y el trabajo porque en este método el trabajo es una clase de energía de entrada o salida.

En el último apartado del artículo se analizan algunos aspectos de la energía. En primer lugar se discute sobre la consideración del trabajo como una forma de energía o como un proceso de transferencia. También se indica que la primera ley de la termodinámica no puede deducirse del teorema trabajo-energía de la mecánica. El cálculo del trabajo interno en un sistema autopropulsado representa un problema cuando se utiliza el método de sistemas porque no se define dicho término. Por último, se presenta el caso de la caída libre de un cuerpo considerando dos sistemas diferentes: el cuerpo aislado, y la Tierra y el cuerpo.

**Título:** 'Work' and 'Heat': on a road towards thermodynamics

**Autor:** VAN ROON, P.H., VAN SPRANG, H.F. y VERDONK, A.H.

**Revista:** International Journal of Science Education, 16 (2), 131-144

**Año:** 1994

En este artículo se describe la primera parte de un estudio empírico sobre la enseñanza y el aprendizaje del trabajo y el calor en el contexto básico de la termodinámica. Dicho contexto debe contener, además de los conceptos de trabajo, calor y energía interna, los de sistema termodinámico, entorno, frontera, proceso, estado y sus interrelaciones. Se piensa que la energía interna debe introducirse macroscópicamente porque la termodinámica clásica se ocupa de fenómenos y observaciones macroscópicas por lo que su contexto es macroscópico.

Se revisa la primera ley de la termodinámica y los conceptos asociados, como sistema, estado de equilibrio, entorno, frontera y funciones de estado. También se

consideran el calor y el trabajo. Se llama calor (o intercambio de calor) a la interacción que es sólo el resultado de una diferencia de temperaturas entre el sistema y el entorno. Todas las demás clases de interacciones (adiabáticas) se llaman trabajo. Puesto que en la termodinámica clásica no se consideran las variaciones de energía interna que son el resultado de la radiación o de reacciones nucleares, el calor y el trabajo son dos formas complementarias de interacción entre el sistema y el entorno, acompañadas por variaciones de la energía interna del sistema. El calor y el trabajo no son funciones de estado. Se trata de magnitudes de procesos, que sólo tienen significado en el estado de equilibrio.

El estudio analizado en este artículo se ha realizado como consecuencia de una serie de síntomas que se detectaron en los alumnos del curso introductorio de química física en la Universidad de Utrecht. Los estudiantes tenían problemas con los conceptos básicos de calor, trabajo, energía interna y entalpía. Tampoco sabían aplicar conceptos de termodinámica a situaciones que se presentaban en el laboratorio de química en cursos más avanzados. Como consecuencia de lo anterior, los autores diseñaron un procedimiento para la enseñanza del calor y del trabajo en el contexto básico de la termodinámica, para ser desarrollado por los mismos estudiantes tomando su propio contexto (o contextos) como punto de partida. La investigación se dividió en dos fases. En la primera, se recogieron las ideas de los estudiantes sobre trabajo y calor. Para ello, se escucharon y se grabaron las discusiones de algunos grupos de estudiantes. En la segunda, se prepararon algunos ejercicios especiales sobre el significado en termodinámica del trabajo y del calor. Luego se registraron las discusiones de grupo y las reacciones por medio de un observador.

Las conclusiones obtenidas indican que los estudiantes utilizan el trabajo como un concepto mecánico y lo relacionan con el calor por medio de la conversión de la energía. La concepción mecánica del trabajo está “contaminada” por elementos de la vida ordinaria. Por otra parte, el concepto de calor es energético porque utilizan la conservación del calor y la energía calorífica. Se observa que “el calor es una forma de energía” así como la conversión de la energía. Los alumnos también tienen problemas en la “sistematización de la realidad”, es decir el procedimiento para “trasladar la realidad” a uno o más sistemas, de forma que permanecen en el contexto de la vida ordinaria: sus sistemas son objetos materiales. Se llega a la conclusión general de que el contexto de los estudiantes se caracteriza como termoquímico, dados los paralelismos existentes entre los dos. Se entiende por contexto termoquímico el que considera el calor y el trabajo como dos formas de energía que pueden transformarse entre sí. El calor y la energía están relacionados en un contexto común. Dicho contexto es precisamente el de la termoquímica calorimétrica, predecesora de la termodinámica.

Las implicaciones para la enseñanza del trabajo y del calor que se deducen de la investigación realizada señalan que se debería empezar por una descripción termodinámica de la realidad, es decir, entendiendo el significado científico de sistema a través de objetos (calorímetros, células electroquímicas, etc.). Un segundo procedimiento, paralelo al anterior, sería el paso desde los objetos termoquímicos a los

sistemas termodinámicos. Se podría empezar pidiendo a los estudiantes que describieran propiedades de los objetos (termoquímicos) para separar después las propiedades relevantes de las irrelevantes. Otro camino posible relacionaría el calor y el trabajo con el concepto de sistema termodinámico. Para ello, se partiría de un sistema adiabático en el que se realizarían diferentes combinaciones de trabajo, de forma que cada una llevara al sistema desde el mismo estado inicial al mismo estado final. En ese momento, se introduciría el concepto de energía interna. Como dicha energía está relacionada sólo con el trabajo, todavía se está en un contexto termoquímico. A continuación, se demostraría que es posible partir de un estado y llegar a otro, por calentamiento del sistema y haciendo un trabajo, es decir, la energía interna se relaciona con el calor y el trabajo. Esta propuesta no puede ser realizada sólo a través de la clase oral. Se deben hacer discusiones en los grupos de estudiantes para que den sus propios puntos de vista y discutan los de los demás, y el investigador pueda saber, observando sus discusiones, si se están produciendo en los estudiantes un cambio contextual.

**Título:** Il II principio della termodinamica in un corso de Fisica a livello di scuola secondaria superiore: una approccio macroscopico

**Autor:** VIGLIETTA, L.

**Revista:** La fisica nella scuola, 22, 5-43

**Año:** 1989

La segunda ley de la termodinámica resulta a los alumnos más intuitiva que la primera porque forma parte de sus conocimientos cotidianos. Dicha ley desempeña un papel fundamental en la comprensión del concepto físico de energía. Por otra parte, resulta pedagógicamente inoportuno y físicamente equivocado dar una definición general de la energía habiendo tratado sólo la energía mecánica. En muchos libros de texto se define la energía como "la capacidad de hacer un trabajo". Por el contrario, la enseñanza de la energía debería comenzar por el concepto de disipación, o bien simultáneamente con el de conservación.

Se desarrolla una nueva propuesta de enseñanza de la energía en la que aparece el concepto de energía disponible como una de sus bases fundamentales. Dicha propuesta se considera fenomenológica y macroscópica. Este tipo de aproximación puede considerarse estática, en el sentido de que los principios fundamentales, asumidos como postulados, son considerados leyes inmutables de la naturaleza, fundados sobre la experiencia y no en hipótesis teóricas.

Después de exponer el temario y de indicar los prerrequisitos que deben reunir los alumnos para afrontar el curso, se analizan algunos conceptos. Con respecto a la energía, se considera que es algo que no se puede ver o sentir. Si se conocen ciertos parámetros como la masa, temperatura, velocidad, etc. es posible aplicar fórmulas y calcular su valor. La energía es una magnitud que los físicos han inventado porque se ha

mostrado muy útil en la descripción de los fenómenos. Al hacer un estudio de la energía y de sus leyes conviene definir alguna forma particular de la misma haciendo uso del concepto de trabajo. Se debe diferenciar la energía que posee un sistema (que es una variable de estado) y la energía en transferencia entre dos sistemas (que es una variable del proceso). Un cuerpo o sistema puede tener energía potencial (de tipo gravitatorio, eléctrico, etc.) y energía cinética, observables a nivel macroscópico. Otras formas de energía dependen del estado interno del sistema como la energía química, nuclear y molecular. También conviene recordar que las variaciones de energía, y no su valor, son las que resultan importantes en la práctica y en la técnica. Cuando no intervienen fenómenos químicos y nucleares, se considera que la energía interna es la debida a las fuerzas de enlace intermoleculares y a la energía cinética de las moléculas. En este caso, a la energía interna también se le denomina energía térmica.

La conservación de la energía es para los físicos la propiedad fundamental de este concepto. La conservación permite hacer un balance en el sistema y, por ello, la energía es un instrumento privilegiado en el análisis de los fenómenos. Por otra parte, la conservación no puede ser comprendida sin la disipación. En todos los procesos reales siempre se tiene energía disipada. En la propuesta los dos aspectos son tratados al mismo tiempo.

El trabajo describe lo que realiza una fuerza sobre un cuerpo que se mueve bajo su acción. El trabajo puede ser mecánico, eléctrico, magnético, según la naturaleza de la fuerza que lo realiza. Aunque el calor se confunde habitualmente con la energía interna, es una forma de transferencia de energía. La temperatura se define como la magnitud medida por el termómetro. A continuación, se analiza con detalle el equilibrio termodinámico, los procesos reversibles e irreversibles, las máquinas, el ciclo de Carnot, la bomba de calor, la disponibilidad de energía, la exergía y su aplicación a casos concretos, el rendimiento y la eficacia, y los sistemas que producen electricidad como efecto colateral del calentamiento.

**Título:** The nature of energy

**Autor:** WARREN, J. W.

**Revista:** European Journal of Science Education, 4 (3), 295-297

**Año:** 1982

En la enseñanza de la energía hay dos tendencias, denominadas materialista y conceptualista. De acuerdo con la primera, la energía es una sustancia que tiene existencia objetiva. Los niños tienen experiencia de ella en su vida cotidiana por lo que pueden reconocerla y entenderla. Por tanto, la función de la enseñanza es extender y formalizar las ideas que ya poseen los estudiantes. Según los conceptualistas, la energía es una idea abstracta inventada por los científicos para ayudar en la investigación cuantitativa de los fenómenos. Se define como "la capacidad de hacer un trabajo" y

resulta importante porque se conserva en todos los procesos. La palabra "energía" se usa en la vida cotidiana con un significado diferente al de la ciencia por lo que los estudiantes no tienen ideas correctas del concepto. El significado científico del término debe aprenderse por medio de una instrucción sistemática a partir de conceptos difíciles como son los de fuerza, trabajo y conservación.

En el materialismo la energía aparece como un fluido que recorre aparatos, tal como se presenta en las cadenas de transformación. En ocasiones extremas, se encuentra almacenada en combustibles y alimentos. Sin embargo, no se considera la conservación por lo que los estudiantes encontrarán serias dificultades con dicho aspecto de la energía. Por el contrario, el conceptualismo considera que se debe enseñar el concepto de forma lógica a estudiantes con conocimientos previos y en una edad conveniente, diferenciando el sentido que tiene en el lenguaje cotidiano y en el científico.

El autor cree que no es correcta la crítica de Sexl a la definición de energía como capacidad de hacer un trabajo. La afirmación de que la energía interna de un sistema no puede convertirse íntegramente en trabajo es cierta sólo en los procesos cíclicos pero no en otros como la expansión de aire comprimido.

El trabajo y la energía no deben confundirse. El primero es un proceso por el que se transmite la energía entre dos sistemas, mientras que el segundo es una medida cuantitativa de la condición de un sistema. La energía no puede transformarse en trabajo. El calor representa también un proceso de intercambio de energía pero, en este caso, como resultado de una diferencia de temperaturas. De igual forma que el trabajo y la energía se identifican erróneamente, también se confunde el calor con la energía interna.

El autor señala que el aprendizaje de la energía se debería realizar en la enseñanza media a través del concepto de trabajo, mientras que en el nivel elemental no se tendría que presentar de ninguna manera.

**Título:** At what stage should energy be taught?

**Autor:** WARREN, J. W.

**Revista:** Physics Education, 21, 154-156

**Año:** 1986

La energía es un ejemplo avanzado de las numerosas magnitudes que los científicos han inventado para el estudio sistemático del mundo físico. A tales magnitudes se les da el nombre de "magnitudes físicas" y se definen para representar cuantitativamente los resultados de las medidas científicas.

En la enseñanza de la física las ideas deben ser presentadas de forma clara, explícita y precisa. La vaguedad, ambigüedad o contradicciones producen muchas dificultades. Con respecto a la energía, ésta es una abstracción del concepto de trabajo. Así pues, sólo se puede entender la energía cuando se entiende el trabajo. Por su parte, el trabajo es una abstracción de las magnitudes desplazamiento y fuerza, mientras que la

fuerza es una abstracción muy difícil que sólo se puede enseñar a partir de bases axiomáticas. Por tanto, no es posible aprender sobre la energía sin haber aprendido primero los conceptos de fuerza y de trabajo.

El concepto de energía se debe enseñar de manera que los estudiantes sepan cómo usarlo. Si los estudiantes no utilizan dicha idea o lo hacen incorrectamente, no han aprendido qué es la energía. Muchos profesores se quejan de que la definición de energía como la capacidad de hacer un trabajo no quiere decir nada a los estudiantes. La definición no está equivocada, sino la forma en que se enseña. Las definiciones deben mostrar que tienen significado por el uso que se hace de ellas. Para la enseñanza de la energía se debe partir de la definición general indicada anteriormente. A continuación, se definen las clases de energía en términos del trabajo que puede ser hecho sobre un sistema o por un sistema. Por generalización de los resultados obtenidos en procesos sencillos, los alumnos llegan fácilmente a entender que la energía se conserva.

Se ha aceptado la creencia absurda de que la energía puede ser entendida por niños pequeños. La energía no es un objeto tangible sino una abstracción matemática. Los niños no pueden tener experiencia de ella como la tienen de un caballo o de una mesa. Sólo se puede llegar a entenderla por medio de un pensamiento disciplinado. Sin embargo, muchas de las personas con responsabilidades educativas no lo han aprendido por lo que se debería, en principio, reeducar a los educadores.



## ANEXO II

### PROGRAMA DE ACTIVIDADES PRIMER CURSO DE BACHILLERATO

#### LA ENERGÍA Y SU TRANSFERENCIA: TRABAJO Y CALOR

El estudio del movimiento realizado hasta aquí lo hemos basado en el uso combinado de las ecuaciones de la dinámica y de la cinemática, que permiten determinar posiciones y velocidades en función del tiempo.

Esta búsqueda de relaciones directas entre fuerzas, desplazamientos, condujo, en un largo proceso de más de 200 años, a la introducción de nuevas magnitudes físicas como el trabajo y la energía y su conservación. El concepto de energía y su conservación ha resultado ser uno de los más potentes y fructíferos de la física clásica. En primer lugar, proporcionó un vínculo unificador de los fenómenos mecánicos y térmicos. Además, estos conceptos siguen conservando su validez en la física moderna y son muy importante en otras disciplinas científicas (química, biología, geología, astrofísica). Por último, es un concepto con gran importancia social (fuentes de energía, crisis energética) y, por ello, muy utilizado en medios de comunicación, el lenguaje cotidiano, etc.

Desarrollaremos este tema de acuerdo con el siguiente índice:

1. Conceptos cualitativos de trabajo y energía
2. Concepto de trabajo
  - 2.1. Definición operativa de la magnitud trabajo
  - 2.2. Cálculo del trabajo en diferentes situaciones
  - 2.3. La eficacia en la realización de trabajo: Potencia
3. Concepto de energía.
  - 3.1. Energía cinética. Teorema de la energía cinética
  - 3.2. Fuerzas conservativas y energía potencial
4. Ley de conservación de la energía mecánica
5. Concepción actual de la naturaleza del calor y primer principio de la termodinámica.

## 6. Principio de conservación de la energía. Degradación de la energía.

### Comentario general

Queremos empezar señalando, en primer lugar, las dificultades que ofrece la introducción del concepto de energía. Como hemos visto en el tema, la elaboración de este concepto, hasta llegar a su total comprensión mediante el principio de conservación de la energía, fue un proceso de más de dos siglos de duración. Por otra parte, el análisis de su evolución en los programas oficiales franceses (Bécu Robinault y Tiberghien 1999) muestra el distanciamiento progresivo entre el desarrollo de los conocimientos científicos y los que se presentan a los alumnos.

Sin embargo, los conceptos de energía y campo son los más potentes, fructíferos y unificadores de la física clásica. Como dice Holton (1979) "el concepto de energía proporcionó un vínculo unificador de los fenómenos mecánicos y térmicos, el concepto de campo suministró a la electricidad, el magnetismo, la gravedad y la luz un marco común de teorías físicas". Si a ello, añadimos su importancia en otras ciencias, en la vida diaria, etc., se hace evidente la necesidad de introducirlo en la enseñanza secundaria obligatoria y de profundizarlo en el Bachillerato, pese a las dificultades.

Sin embargo, como se ha puesto de manifiesto en investigaciones recientes (Solbes y Tarín 1998), se suele realizar una introducción que:

- no tiene en cuenta las ideas previas de los alumnos sobre trabajo, energía y calor,
- se limita a establecer sólo relaciones cuantitativas entre trabajo y energía, pero no hay razonamientos cualitativos y basados en la experiencia,
- no realiza un análisis crítico de las leyes de conservación, clarificando cuándo se trata de teoremas (el de conservación de la energía mecánica) o de principios de conservación que se cumplen siempre, porque los nuevos principios son experimentales, es decir, son hipótesis verificadas por la experiencia y los experimentos conocidos hasta ese momento.
- no muestran el principio de conservación de la energía como un principio no sólo de la mecánica y la termodinámica sino de toda la física.

Es particularmente significativo que en el tema de la energía, no se tengan en cuenta en los textos las ideas previas de los estudiantes, sus dificultades porque, la importancia, tanto científica como tecnológica, del concepto de energía, ha producido una notable investigación didáctica a partir de los años 80 y una controversia sobre la conveniencia de comenzar introduciendo el concepto de trabajo antes que el de energía o viceversa, que aún no se han interrumpido (Duit 1981, Warren 1982, etc.). Entre las dificultades detectadas podemos mencionar las siguientes:

- La confusión entre trabajo y esfuerzo o considerar sólo uno de los factores que intervienen en el trabajo olvidando el otro.
- Identificar fuerza y energía.
- Asignarle un cierto carácter material a la energía o asociarla al movimiento o la actividad.
- Considerar que la energía puede gastarse, dado que el lenguaje cotidiano está impregnado de expresiones como "consumo de energía", "crisis energética", etc.
- Confundir las formas de energía con las fuentes de energía
- Atribuir la energía potencial al cuerpo y no a la interacción entre los cuerpos.
- Asignarle un carácter sustancial al calor o considerarlo como una energía calorífica o térmica.

- Cambiar la forma en que se analizan los procesos: no se estudian tanto los cambios como lo que ocurre entre dos estados, prestando menos atención al proceso en sí.
- Activar los esquemas de conversión, transferencia, conservación y degradación de la energía, sin los cuales no se puede comprender dicho concepto ni el principio de conservación.

Respecto al debate de si es más conveniente comenzar el tema por el concepto de trabajo o por el de energía, opinamos que es preferible una introducción prácticamente simultánea de los conceptos de trabajo y energía (Calatayud *et al.* 1988). Empezaremos pues, revisando la introducción cualitativa del trabajo y la energía realizadas el curso anterior. Se profundizará el tratamiento cuantitativo del trabajo con el uso de vectores y del producto escalar. Dado que, como en el tema anterior, estamos realizando el estudio de un cuerpo, sometido a interacciones, distinguiremos si éstas son conservativas o disipativas. Por último, para establecer el primer principio de la termodinámica, introduciremos las nociones de sistema, energía interna, etc.

## 1. CONCEPTOS CUALITATIVOS DE TRABAJO Y ENERGÍA

Los conceptos de trabajo y energía nos resultan familiares por usarse frecuentemente en el lenguaje común. Comenzaremos, pues, revisando la introducción cualitativa de estas magnitudes realizada el curso anterior.

**A.1.** Considerar diversos ejemplos de lo que se entiende por trabajo en la vida corriente y establecer, a partir de los mismos, el concepto cualitativo de trabajo.

**A.2.** Exponer las ideas cualitativas que se tengan sobre el concepto de energía.

Comentarios A.1. y A.2.

Las actividades A.1. a A.3. son una revisión de las vistas en cursos anteriores y permiten superar las habituales introducciones carentes de significado físico y prestar atención a las ideas previas de los alumnos.

En la A.1. aparecen las ideas de cambio o transformación, de fuerza y esfuerzo. Tras la puesta en común, la clase puede llegar así al concepto cualitativo de trabajo de Maxwell: "la transformación de la materia a través de las interacciones, es decir, por la acción de fuerzas".

También puede aparecer la confusión entre trabajo y esfuerzo. Se trata de un error conceptual bastante generalizado. Conviene, pues, detenerse en ésta y otras posibles confusiones abordando los ejemplos propuestos por los alumnos. Así, la cuestión ¿se trabaja cuando se está sosteniendo un objeto? exige una respuesta matizada que, entre otras cosas, clarifique el sistema al que se están refiriendo. Parece evidente que el objeto (si es indeformable) no sufre transformaciones. Sin embargo, la impresión de estar realizando trabajo que los alumnos tienen no es errada: el propio sujeto que soporta al objeto experimenta transformaciones (su corazón va más deprisa, transpira, etc.)

Por último, hay que insistir en que la comprensión del concepto no puede lograrse sin profundizar más en el mismo y sin tener en cuenta sus relaciones con el

concepto asociado de energía, al que se refieren también los alumnos desde el primer momento.

En la A.2. la idea de energía como "capacidad de un cuerpo para transformar la materia o para realizar trabajo" surge sin dificultades aparentes. Algunos autores han señalado que esta idea no es correcta porque todos los sistemas tienen energía y, sin embargo, no todos pueden realizar trabajo (por ejemplo, muchos sistemas tienen sólo energía interna, pero como están a la misma temperatura que el exterior, no pueden producir transformaciones). Esto les ha llevado a definir la energía como una propiedad de los sistemas que sólo cambia cuando se producen interacciones, lo cuál es cierto, pero no suficiente, porque esto se puede afirmar de otras magnitudes que se conservan en los sistemas: la cantidad de movimiento, el momento angular, etc. Mejorar esto afirmando que la energía es la magnitud que se conserva debido a la invarianza de las leyes de la física respecto a traslaciones temporales nos llevaría demasiado lejos. Por ello, pensamos que hay suficientes razones, tanto científicas como didácticas, para continuar utilizando la idea de energía expresada anteriormente.

**A.3.** Partiendo del concepto cualitativo de energía sugerir qué relación cabe esperar entre el trabajo realizado por un cuerpo y la energía de que éste dispone.

Comentario A.3.

La actividad A.3 conduce a la relación entre energía y variación de energía. Cuando se realiza un trabajo sobre un cuerpo, éste experimenta una variación de energía. Esta idea puede concretarse en una hipotética relación entre el trabajo  $W$  y las variaciones de energía  $\Delta E$ :  $W = \Delta E$ . Es decir, el trabajo aparece como un proceso de transferencia de energía desde el cuerpo al exterior o viceversa. Esta idea es aún muy imprecisa y se tendrá que profundizar en ella. Pero, de entrada, permite comprender mejor los ejemplos de realización de trabajo en situaciones de la vida práctica considerados en A.1. Así puede entenderse más claramente por qué al sostener un objeto se realiza trabajo (asociado a una disminución de energía del sujeto).

**A.4.** Enumerar las distintas formas de energía que se conozcan e indicar, para cada una de ellas, en qué está basada su capacidad de realizar trabajo, de transformar la materia.

Comentario A.4.

Los alumnos enumerarán toda una serie de formas de energía, mezcla de denominaciones presentes en libros, prensa, etc. La actividad debe contribuir a superar esta confusión haciendo ver el carácter cinético de algunas denominaciones (energía eólica), que la mayoría de las restantes son debidas a interacciones entre los cuerpos, como las gravitatorias, eléctricas, etc., aunque no todas ellas se puedan expresar como energías potenciales (como sucede en las interacciones magnéticas y nucleares) y por último que algunas, como la energía luminosa, son energía del campo electromagnético. Por supuesto, no se debe hablar de energía térmica o calorífica, error conceptual muy frecuente que clarificaremos en el penúltimo apartado del tema. En resumen, no hay tantas energías como los estudiantes y algunos textos dicen, ni tan pocas como otros afirman (sólo cinética y potencial). Hay que distinguir entre energía de los campos libres (como la energía luminosa), energía de las partículas libres (la cinética y la de su masa en reposo) y la energía de las interacciones entre partículas y campos (que es potencial en

los campos conservativos). En las situaciones que aborda la mecánica, la afirmación de que toda la energía es cinética y potencial es cierta, si los campos son conservativos y las velocidades pequeñas.

La discusión sobre el consumo energético, su control, la investigación en energías renovables, que se propone en las siguientes actividades, es de gran interés para comprobar las complejas relaciones entre la ciencia, la técnica y la sociedad en la actualidad y a lo largo de la historia de la humanidad, lo que nos permitirá comprender mejor cómo se ha ido construyendo la ciencia, por qué se ha optado por un determinado modelo de desarrollo y como ello condiciona los problemas científicos que se investigan.

**A.5.** La situación de producción y consumo internos de energía en nuestro país en 1992 viene dada en  $10^3$  TEP (tonelada equivalente de petróleo =  $10^{10}$  cal =  $4,18 \cdot 10^{10}$  J) por el siguiente cuadro del Ministerio de Industria, Comercio y Turismo:

	Petróleo	Carbón	Nuclear	Gas natural	Hidráulica
Consumo	50.077	19.191	14.437	5.851	1.601
Producción	1.085	10.785	14.537	1.140	1.601

Por otra parte, la evolución de la energía total consumida y producida en los últimos años viene dada por:

Energía ( $10^3$ TEP)	1988	1990	1992
Consumo	79.156	87.541	91.257
Producción	29.390	30.059	29.148

La primera tabla es muy significativa porque el porcentaje de las distintas fuentes energéticas en producción y consumo apenas ha variado en los últimos años. Calcularlo para el año 1992. Observar qué fuentes son las que más contribuyen a la producción y el consumo y dar vuestra opinión al respecto.

La segunda tabla nos permite dar respuesta a las siguientes cuestiones. ¿Cómo evolucionan el consumo y la producción de energía? ¿Cuál es nuestro nivel de dependencia?

**A.6.** Clasificar las distintas fuentes de energía atendiendo a su impacto ambiental, carácter renovable, etc. Razonar por qué ni las empresas energéticas ni los diferentes estados favorecen el uso de energías no contaminantes y renovables. Valorar, así mismo, lo paradójico que resulta que en nuestro país, con tantas horas de insolación, "disfrutemos" de los inconvenientes de ésta (la sequía) pero no de sus ventajas (la energía solar apenas se usa, cuando nuestra factura energética, como hemos visto, es deficitaria).

A.7. Comentar el siguiente editorial publicado en el periódico "El País" (26 de septiembre de 1992):

### Cuadro 1. ENERGÍA Y FUTURO

"Es notorio que el consumo de energía, cuya relación con el bienestar humano es innegable, se ha venido incrementando sistemáticamente con el paso del tiempo, llegando hoy a niveles claramente excesivos en algunas regiones del planeta.

Pero es también notorio que no hay producción y consumo de energía sin impacto medioambiental, y que la distribución del consumo per capita está muy lejos de ser equitativa, reflejando quizá más que ningún otro indicador, las desigualdades sociales y regionales presentes en nuestro mundo.

Sobre los problemas energéticos han reflexionado los asistentes al XV Congreso del Consejo Mundial de la Energía, celebrado en Madrid. Las consecuencias medioambientales del consumo energético han sido, probablemente, el aspecto más novedoso de sus deliberaciones, sin duda como consecuencia de la vigorosa conciencia desarrollada en los últimos tiempos en torno a la conservación de la naturaleza, lo que no ha evitado que las organizaciones ecologistas criticaran ácidamente su desarrollo y conclusiones.

Es obvio que en el mundo desarrollado se despilfarra energía de un modo difícilmente tolerable, especialmente en un marco de agresión al medio, de agotamiento previsible de los recursos energéticos y de desigualdad. En ese sentido, cualquier medida persuasiva, disuasiva u obligatoria cuyo objetivo sea disminuir el exceso será bienvenida. Pero también es cierto que, aun cuando el consumo de energía se redujera considerablemente en los países ricos, el problema principal de la mayoría de la población sobre el planeta es la escasez y no la sobreabundancia de energía, crucial para la satisfacción de necesidades vitales.

Así, resulta difícilmente concebible una disminución en el consumo global de energía, aun cuando sea imperioso un cambio en su distribución. Lo cual implica que es preciso considerar, con sensatez, pero también con imaginación, las distintas fuentes de energía disponibles hoy y en el futuro, sus posibilidades y su impacto ecológico, a fin de alcanzar un equilibrio entre el bienestar material de los pueblos y el daño medioambiental que la manipulación energética lleva consigo necesariamente.

No es razonable, desgraciadamente, confiar en milagros o en soluciones simplistas, más basadas en el voluntarismo que en el rigor, ni tampoco el atolondramiento irres-

ponsable de quienes no consideran el impacto sobre el medio porque no lo perciben inmediatamente.

Resulta urgente avanzar más en el conocimiento científico del problema energético, fomentando la investigación en todas las disciplinas relacionadas con él. Sólo una combinación de medidas políticas y sociales -tendientes a evitar los excesos y a acabar con las desigualdades- y de medidas científicas y tecnológicas -tendientes a poner a punto nuevas fuentes de energía más limpias y seguras- servirá para progresar válidamente.

Se entiende, en este contexto, la preocupación puesta de manifiesto en el congreso, por la superpoblación que aflige principalmente a los países más pobres. El exceso de población se convierte en una presión permanente sobre los recursos naturales, contribuyendo a su agotamiento, al tiempo que propicia la miseria y la escasez. Lo que ya se entiende menos es la ilimitada confianza en los mecanismos del mercado, eficaces en muchos aspectos, pero normalmente insensibles a los problemas del deterioro medioambiental a largo plazo o de falta de equidad en el disfrute de los recursos naturales.

#### Comentarios A.5.-A.7.

Estas actividades nos parece imprescindibles y creemos conveniente situarlas al principio porque pueden motivar a los alumnos y ayudarles a comprender mejor el mundo que les rodea. Se trata, en definitiva, de comprender cuestiones de actualidad sobre las que deberán opinar, dar respuestas, como futuros ciudadanos inmersos en una sociedad marcada sobremanera por el gran desarrollo científico y técnico de las últimas décadas. Permiten ver como muchas de las formas enumeradas en A.5 son, en realidad, fuentes energéticas. Pero, sobre todo, permiten tratar aspectos de la energía como su consumo, su aprovechamiento para aumentar la calidad de vida, los problemas que plantean los distintos tipos de centrales, el carácter contaminante o no, renovable o no, de las distintas fuentes energéticas. Así mismo, ver los intereses subyacentes a determinadas opciones energéticas.

## **2. CONCEPTO DE TRABAJO**

### **2.1. DEFINICIÓN OPERATIVA DE LA MAGNITUD TRABAJO**

En el apartado anterior hemos visto el trabajo como un proceso de transformación de la materia mediante interacciones o, lo que es lo mismo, como un proceso de transferencia de energía entre un sistema y el exterior. En este apartado vamos a realizar un tratamiento cuantitativo del trabajo en las transformaciones más sencillas que puede experimentar un sistema: los cambios de posición de un cuerpo (sin transformaciones

internas). En estas circunstancias, como ya hemos visto en temas anteriores, podemos considerar puntual dicho cuerpo.

**A.8.** Limitándonos al dominio de las transformaciones mecánicas que venimos estudiando, proponer una definición operativa de trabajo.

**A.9.** Una fuerza constante actúa sobre un cuerpo desplazándolo de la posición  $r_1$  a la  $r_2$ . Representar gráficamente el valor de la fuerza  $F$  en función de la posición. Calcular el valor del trabajo.

**A.10.** Definir la unidad internacional de esta magnitud y proponer ejemplos de trabajo dando una estimación de su valor en unidades internacionales en diversas situaciones (levantar una silla, empujar un armario, etc.).

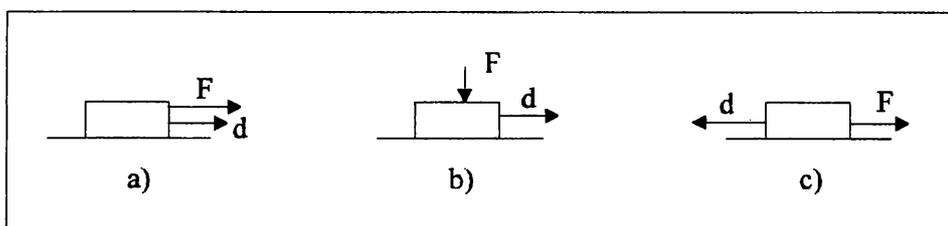
**Comentarios A.8.-A.10.**

El objetivo de la actividad A.8. es favorecer la operativización del concepto de trabajo. La introducción de vectores permite abordar las situaciones en las que la fuerza no tiene la dirección del movimiento. Conviene expresar el trabajo como producto escalar. La actividad A.9. permite introducir el trabajo como el área comprendida bajo la gráfica  $F = F(r)$  en el intervalo  $\Delta r$ . Dicha gráfica puede servir para que los estudiantes comprendan que las expresiones introducidas sólo son válidas para fuerzas constantes y para facilitar el estudio de las situaciones en que la fuerza varía, que se realizará posteriormente. Con la actividad A.10. se pretende evitar definiciones del tipo "1 N x 1m" carentes de todo significado. Los alumnos llegan a proponer una definición más física como "trabajo que se realiza cuando una fuerza de 1 N se desplaza 1 m". Favorece también el ejercicio de estimar órdenes de magnitud, muy conveniente para familiarizar a los alumnos con situaciones reales (como, por ejemplo, el trabajo de levantar un objeto o de empujar un armario).

**2.2. CÁLCULO DEL TRABAJO EN DIFERENTES SITUACIONES**

Propondremos ahora algunos ejemplos de utilización de esta magnitud en diversas situaciones con objeto de facilitar su correcta comprensión y profundización.

**A.11.** Calcular el trabajo realizado por la fuerza  $F$  (de 10 N) en cada uno de los casos representados en la figura adjunta para un desplazamiento de 2 m. Analizar los resultados.



**A.12.** Estimar el trabajo realizado durante el giro de la Luna alrededor de la Tierra (suponiendo que la trayectoria es circular).

Comentarios A.11.-A.12.

La actividad A.11. produce algunas discusiones interesantes en torno a cuestiones como "¿tiene sentido un trabajo negativo?" o "¿cómo puede ir el cuerpo hacia delante si la fuerza actúa hacia atrás?" que revelan el peso de los preconceptos. La consideración cualitativa de lo que ocurre con la energía (que el profesor puede solicitar si no surge espontáneamente) puede ayudar a entender el resultado. De este modo, los alumnos comprenden que el trabajo sea nulo en el caso b), no sólo por razones operativas sino por considerar que el objeto no se acelera y, por tanto, no hay variación de energía. Más aún, pueden asociar el resultado negativo del trabajo en c) con la disminución de energía que implica. La actividad A.12. se introduce para afianzar, una vez más, la relación cualitativa entre trabajo y energía (que, por supuesto, no varía durante el giro de la Luna) y, al propio tiempo, insistir en que las fuerzas no realizan trabajo si son perpendiculares a la trayectoria.

**A.13.** Se lanza un cuerpo de 2 kg hacia arriba, sube 20 m y cae. Calcular el trabajo realizado por la fuerza peso: a) durante la subida; b) durante la bajada; c) en el trayecto total. Interpretar los resultados.

**A.14.** Se ha de subir un tonel a un camión desde el suelo. Considerar cuándo se realiza más trabajo: al elevar directamente el tonel o al utilizar un plano inclinado.

**A.15.** Un cuerpo se desplaza desde el punto A al B (separados 3 m), sometido a una fuerza de fricción de 14 N y regresa después al punto de partida (sometido a la misma fricción). Calcular el trabajo realizado: a) en el trayecto de A a B; b) en el trayecto de regreso; c) en el trayecto total. Interpretar los resultados.

Comentarios A.13-A.15.

La interpretación de los resultados de las actividades 13, 14 y 15 permite la introducción de los conceptos de fuerzas conservativas y no conservativas o disipativas y mostrar que el trabajo resultante sobre un cuerpo es igual al trabajo de las fuerzas conservativas más el trabajo de las fuerzas no conservativas  $W_{\text{res}} = W_c + W_{\text{nc}}$ .

No basta con introducir el trabajo de rozamiento operativamente, eludiendo sus complejidades (ver Tipler 1995). Por lo menos, se debe clarificar que  $F_r \cdot \Delta x$  no es un trabajo que el sistema realiza sobre el exterior, sino que es el trabajo realizado por la fricción sobre el cuerpo más el trabajo realizado sobre la superficie. Esta dificultad hace que un estudio energético del problema no pueda aislar el cuerpo y deba incluir en el sistema también la superficie, encontrándose que la disminución de la energía cinética del cuerpo es igual al incremento de la energía interna del cuerpo y de la superficie, es decir,  $-\Delta E_c = \Delta U_c + \Delta U_s$ . Como las variaciones de energía interna son muy difíciles de determinar, la aproximación del trabajo  $-F_r \cdot \Delta x = \Delta E_c$  es muy útil porque permite hacer cálculos. Aunque el razonamiento an-

terior no se realice con los estudiantes, se debe relacionar el trabajo de rozamiento con la variación de energía interna del cuerpo y de la superficie, lo cual nos permitirá después clarificar los límites de validez de la conservación de la energía mecánica y la necesidad de un principio de conservación de la energía más general.

En la actividad A.14 los alumnos responden habitualmente que se hace menos trabajo subiendo el tonel por el plano inclinado, con lo que se pone en evidencia nuevamente la confusión trabajo/esfuerzo. Si efectúan los cálculos correspondientes, encontrarán que el trabajo realizado por fuerzas conservativas entre dos alturas es independiente de la trayectoria (de hecho, sólo depende de la posición inicial y final).

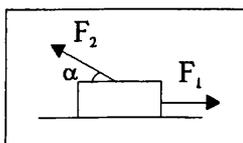
Estas actividades permiten constatar las diferencias entre los resultados correspondientes a las fuerzas gravitatorias y a las de fricción. Esto permite distinguir entre **fuerzas conservativas** (el trabajo sólo depende de la posición inicial y final y, por tanto, en una trayectoria cerrada es nulo) y **no conservativas** o **disipativas** (el trabajo depende de la trayectoria y, por ello, aunque ésta sea cerrada, no es nulo). Además, dichas fuerzas conservativas se caracterizan porque pueden devolver la totalidad del trabajo realizado para vencerlas. Podemos decir que dicho trabajo no se pierde sino que permanece acumulado en el sistema.

Esta distinción será útil para la comprensión de las relaciones trabajo/energía, dado que el trabajo resultante sobre un cuerpo es igual al trabajo de las fuerzas conservativas más el trabajo de las fuerzas no conservativas  $W_{\text{res}} = W_c + W_{\text{nc}}$ .

Como ejemplos de fuerzas conservativas, además de las gravitatorias, se pueden mencionar las eléctricas y las elásticas (que dependen todas de la posición). De no conservativas, además del rozamiento entre superficies de sólidos (que dependen del sentido del movimiento), tenemos otras que dependen de la velocidad (por ejemplo, el rozamiento con el aire depende del cuadrado de la velocidad  $v^2$ ; el rozamiento de Stokes de sólidos con fluidos o la fuerza de Lorentz dependen de la velocidad  $v$ , etc.).

Hasta aquí nos hemos planteado el cálculo del trabajo cuando está actuando una sola fuerza. Veamos ahora un ejemplo en que actúan más de una.

**A.16.** Dos fuerzas  $F_1$  y  $F_2$  (de 100 N y 40 N respectivamente) actúan sobre un cuerpo en



la forma indicada en el gráfico adjunto. Calcular el trabajo realizado cuando el cuerpo se desplaza 20 m en la dirección de  $F_1$  si el ángulo  $\alpha$  es  $60^\circ$ .

**Comentario A.16.**

Esta actividad es resuelta por algunos grupos calculando el trabajo de cada fuerza y sumando algebraicamente el resultado, mientras otros calculan el trabajo de la fuerza resultante. La identidad de los resultados obtenidos permite insistir en el carácter escalar, algebraico de la magnitud trabajo.

A continuación trataremos el trabajo realizado por fuerzas variables. Analizaremos el caso más simple, es decir, el trabajo realizado por fuerzas elásticas.

**A.17.** Calcular, mediante la representación gráfica de la fuerza  $F$  en función de la posición  $x$ , el trabajo realizado al separar de su posición  $x_0$  a otra posición  $x$ , un cuerpo sujeto a un muelle y colocado sobre un superficie horizontal.

**Comentario A.17.**

Con esta actividad se pretende que el alumno dibuje la fuerza en función del desplazamiento y calcule el trabajo, es decir, el área entre  $x_0$  y  $x$ . Como se trata de un trapecio dicha área será  $(kx_0 + kx)(x - x_0)/2$ . Por tanto  $W = kx^2/2 - kx_0^2/2$

**2.3. EFICACIA EN LA REALIZACIÓN DE TRABAJO. POTENCIA**

En la vida cotidiana no interesa tanto el trabajo como la eficacia con que éste se realiza. Abordaremos esta cuestión en las siguientes actividades:

**A.18.** Proponer una definición operativa de una magnitud que mida la mayor o menor eficacia con que se realiza el trabajo.

**A.19.** Definir la unidad internacional de la nueva magnitud introducida y comparar la potencia para algunos ejemplos reales (una motocicleta, una persona subiendo escalera, un coche, ...).

**A.20.** Calcular la fuerza de rozamiento que se opone al movimiento de un vehículo que alcanza una rapidez de 100 km/h cuando el motor desarrolla una potencia de 50 CV.

**Comentarios A.18.-A.20.**

En la actividad A.18. la mayor parte de los grupos parten de la idea de que una máquina eficaz es la que realiza mucho trabajo en poco tiempo. Este razonamiento conduce directamente a introducir la relación  $W/\Delta t$  como medida de la "eficacia". La A.19. pretende que el alumno estime órdenes de magnitud y favorece la introducción del  $1 \text{ CV} = 736 \text{ w}$ , dado que la potencia de los coches y motores se expresa normalmente en dichas unidades. La A.20. facilita la introducción de  $P=F.v$ .

### 3. CONCEPTO DE ENERGÍA

#### 3.1. ENERGÍA CINÉTICA. TEOREMA DE LA ENERGÍA CINÉTICA

Es evidente, a partir de nuestra experiencia cotidiana, que los cuerpos en movimiento tienen capacidad para realizar trabajo. Podemos, pues, asignar una energía a ese movimiento que denominaremos **energía cinética**.

**A.21.** Señalar, a título de hipótesis, de qué factores dependerá la energía cinética de un cuerpo que se mueve con respecto a otros.

**A.22.** Calcular el trabajo resultante  $W_{res}$ , teniendo en cuenta que  $W_{res} = F_{res} \cdot \Delta r$ , siendo  $F_{res}$  la fuerza resultante en la dirección del movimiento.

El resultado obtenido se conoce como **teorema de la energía cinética o de las fuerzas vivas** (denominación que Leibniz aplicó a la energía cinética).

**A.23.** Calcular la energía cinética adquirida por un cuerpo de 2 kg sobre el que actúa una fuerza horizontal de 20 N, desplazándose 3 m sobre una superficie horizontal ( $\mu = 0,2$ ).

Comentario A.21.-A.23.

La actividad A.21. es una ocasión para ejercitar a los alumnos en un aspecto tan importante del trabajo científico como es la emisión de hipótesis y les conduce a expresar la energía cinética en función de la velocidad y de la masa. En la A.22. se trata de utilizar la relación cinemática  $v^2 - v_0^2 = 2a\Delta r$  expresando  $W_{res} = ma\Delta r = mv^2/2 - mv_0^2/2$ , lo que conduce a la expresión del teorema de la energía cinética  $W_{res} = \Delta E_c$ . La actividad A.23. es una aplicación numérica de dicho teorema.

Conviene recordar aquí que tanto la posición como la velocidad de una partícula se definen para un sistema de referencia (SR) dado, y tendrán valores diferentes si éste cambia. Evidentemente, la energía cinética tendrá valores diferentes según el SR elegido. No tiene sentido hablar de valores absolutos de la energía cinética. Sin embargo, lo que se mide siempre son variaciones de energía cinética.

#### 3.2. FUERZAS CONSERVATIVAS Y ENERGÍA POTENCIAL

Hay casos en los que el trabajo realizado sobre un sistema no da lugar a un cambio de energía cinética del sistema, por ejemplo, al comprimir un muelle o levantar una pesa. En estos casos, en los que las fuerzas que actúan son conservativas, el trabajo queda acumulado en el sistema, como hemos visto anteriormente. También se puede decir que hay una **energía potencial** asociada a la posición relativa de los cuerpos que consti-

tuyen el sistema. Ahora bien, para que diferentes posiciones impliquen diferentes energías, es necesario que actúen ciertas fuerzas sobre las partículas o cuerpos en cada posición. Así, si no existiera el campo gravitatorio sería indiferente la altura de la pesa y, si el muelle no fuera elástico, su deformación no iría acompañada de variaciones de energía.

De todas las formas de energía potencial, vamos a ocuparnos aquí, en primer lugar, de la energía potencial debida a la **interacción gravitatoria** entre la Tierra y un cuerpo próximo a ella.

**A.24.** Indicar de qué factores puede depender dicha energía.

**A.25.** Expresar el trabajo realizado por la interacción gravitatoria, calculado en la A.13., en función de las variaciones de energía potencial gravitatoria.

**Comentario A.24. y A.25.**

Los estudiantes establecen sin dificultad que la energía potencial gravitatoria depende, en relación directa, de la masa del cuerpo, de su altura y de la intensidad del campo gravitatorio. De esta manera llegan a la expresión, ya conocida de cursos anteriores,  $E_p = mgh$ . La actividad A.25. pretende que los propios alumnos a partir de los resultados de A.13.,  $W = mg(h_1 - h_2)$  y de la definición de energía potencial gravitatoria de la actividad anterior  $E_p = mgh$ , obtengan que el trabajo de la fuerza gravitatoria al dejar caer un cuerpo una altura  $h$  es  $W_c = -\Delta E_p$ , expresión que puede generalizarse para cualquier fuerza conservativa (y que puede considerarse como otra posible definición de ésta). En otras palabras, en un proceso espontáneo disminuye la energía potencial. Es conveniente que el profesor plantee qué sucede con la variación de la energía potencial si actúa una fuerza aplicada.

Llegados a este punto, es necesario que el profesor aborde uno de los problemas de la energía potencial. Muchos textos y estudiantes (Solbes y Martín 1991) consideran que la energía potencial es una propiedad del cuerpo de masa  $m$ . Pero, en realidad, es debida a la interacción del cuerpo y la Tierra o, mejor, a la interacción del cuerpo con el campo gravitatorio. Es una situación análoga a la de dos cuerpos unidos por un muelle. Nadie localiza la energía potencial elástica en uno de los cuerpos, sino en el muelle. Pero cuando se trata de campos, hay resistencias a localizar en ellos la energía porque se consideran artificios matemáticos y no entes físicos o formas de existencia de la materia.

Aunque, al igual que en la dinámica, nos estamos centrando en uno de los cuerpos que interaccionan, es decir, estamos en mecánica del punto, la energía potencial no es una propiedad del cuerpo de masa  $m$ . Es debida a la interacción del cuerpo y la Tierra o, en otras palabras, a la interacción del cuerpo con el campo gravitatorio terrestre.

**A.26.** Un cuerpo de 10 kg se encuentra a 1.5 m del suelo de una habitación que, a su vez, está a 20 m sobre la calle. El cuerpo se deja caer hasta el suelo de la habitación. Ha-

llar la variación de energía potencial utilizando como sistemas de referencia el suelo de la habitación y el de la calle. Comentar los resultados.

**Comentario A.26.**

La actividad A.26. permite tratar, de forma muy sencilla, otro aspecto importante de la energía potencial. Los alumnos constatan fácilmente el carácter relativo de las energías potenciales (respecto al nivel tomado como origen de alturas) y el carácter absoluto de las variaciones. Conviene llamar la atención sobre el error cometido en ocasiones por los alumnos, consistente en dar a  $g$  (en la expresión  $mgh$ ) valores negativos o positivos "según el sistema de referencia" (fijación funcional adquirida en cinemática y que aquí, por supuesto carece de sentido).

La actividad anterior permite constatar, fácilmente, el carácter relativo de las energías potenciales (respecto al nivel tomado como origen de alturas) y el carácter absoluto de sus variaciones.

A continuación nos ocuparemos de la **energía potencial elástica**.

**A.27.** A partir del trabajo de la fuerza de Hooke calculado en A.17. justificar que ésta es conservativa y obtener la expresión de la energía potencial elástica.

**Comentario A.27.**

En la A.27. vemos que el trabajo de la fuerza aplicada es igual y de signo contrario al trabajo de la fuerza elástica, que es conservativa porque sólo depende de la posición inicial y final, por lo que tenemos que  $W_c = -\Delta E_p$ , siendo  $E_p = kx^2/2$

Llegados a este punto es conveniente relacionar los principales resultados introducidos hasta aquí mediante la siguiente actividad.

**A.28.** Teniendo en cuenta que las fuerzas resultantes pueden ser conservativas y disipativas, aplicar la relación  $W_c = -\Delta E_p$  al teorema de la energía cinética y analizar el resultado obtenido.

**Comentario A.28.**

Esta actividad se plantea para un sistema de muy pocas partículas, como los que normalmente se abordan en mecánica. En este caso, resulta más sencillo clasificar todas las fuerzas como conservativas y no conservativas que tratar de identificar las internas y las externas. De esa forma, los alumnos obtienen la expresión  $W_{nc} = \Delta E_c + \Delta E_p$  a partir de  $W_{res} = \Delta E_c$  y  $W_c = -\Delta E_p$ .

Si el sistema está formado por muchas partículas, como nuestro sistema planetario o un átomo con pocos electrones, entonces puede resultar más conveniente introducir el teorema de la energía propia de un sistema de partículas  $W_{ext} = \Delta(E_{c,cm} + E_{c,int} + E_{p,int})$  que se ha deducido a partir del teorema de las fuerzas vi-

vas. Como  $W_{\text{res}} = \Delta E_c$ , suponiendo que las fuerzas internas son conservativas ( $W_{\text{int}} = -\Delta E_{p,\text{int}}$ ) y aplicando el teorema de König tenemos que la energía cinética del sistema es igual a la energía cinética del centro de masas (CM) más la energía cinética de las partículas respecto al CM ( $E_c = E_{c,\text{cm}} + E_{c,\text{int}}$ ). Se puede precisar más, distinguiendo si las fuerzas exteriores son o no conservativas pero este tratamiento resulta muy complejo para el primer curso de bachillerato, donde sólo se van a tratar sistemas con muy pocos cuerpos.

#### 4. LEY DE CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA MECÁNICA

Todo el mundo conoce, llegado a este nivel educativo, la existencia de la ley de conservación de la energía. Resulta, sin embargo, interesante profundizar en las razones que lo avalan, más allá de la simple aceptación de lo que hemos visto escrito o se nos ha presentado como hecho incuestionable.

**A.29.** Considerar situaciones en las que parezca cumplirse la ley de conservación de la energía y otras en que no.

**A.30.** Las relaciones trabajo/energía estudiadas hasta aquí han sido:  $W_{\text{res}} = \Delta E_c$ ,  $W_c = -\Delta E_p$  y  $W_{\text{nc}} = \Delta E_c + \Delta E_p$ . Señalar razonadamente cuál o cuáles llevan implícita una ley de conservación y transformación de la energía.

**A.31.** Explicar las transformaciones de energía que tienen lugar en los siguientes procesos: a) Un molino de viento mueve una noria que sube agua desde una acequia a otra superior; b) La corriente de un río hace girar una rueda cuyo eje coincide con el de un dinamo que se utiliza para encender una bombilla; c) Una persona da vueltas a un torno con el que se sube un saco.

##### Comentario A.29.-A.31.

No tendría sentido que los alumnos de este nivel emitieran hipótesis acerca de la conservación de la energía, dado que ésta ha sido introducida reiteradamente, por lo cual dicho principio es enunciado habitualmente como algo obvio. Por ello, creemos conveniente solicitar contraejemplos, como se hace en la actividad A.29., es decir, situaciones en las que interviene la fricción, colisiones inelásticas, etc., que introducen una aparente limitación a la idea de conservación. Con ello se intenta evitar una utilización no significativa de esta ley. Además, se muestra al alumno la necesidad de una generalización. Se puede posponer la clarificación completa de la cuestión al estudio de la energía interna y el calor.

No debe sorprendernos que la ley de conservación de la energía mecánica no se cumpla siempre. Se trata de un teorema (el de las fuerzas vivas, especificando si las fuerzas son o no conservativas), deducido a partir de la segunda ley de Newton, y no un principio. Incluso sus generalizaciones, para un sistema de partículas y un sólido rígido, siguen siendo teoremas, deducidos en estos casos a partir de la segunda y tercera leyes de Newton. En estos sistemas más complejos son válidos porque cumplen la ley de acción-reacción. Por otra parte, tampoco se

puede sostener que la ley de conservación de la energía mecánica sea equivalente a la segunda ley de Newton integrada con respecto a la posición, para eliminar la dependencia temporal, dado que se trata de conceptos cualitativamente diferentes (la energía se conserva pero no las fuerzas).

La actividad A.30. permite hacer ver como en la expresión  $W_{nc} = \Delta E$  está implícita la ley de conservación (y transformación) de la energía de un sistema. Lo mismo ocurre con  $W_{res} = \Delta E_c$ . En efecto, si el sistema está aislado de las fuerzas de rozamiento y aplicadas, el trabajo  $W_{nc}$  es nulo,  $\Delta E = 0$  y, por ello,  $E = cte$ . En la actividad A.31. los alumnos deben señalar las transformaciones de energía que tienen lugar en los procesos indicados.

## Cuadro 2. HACIA LA LEY DE CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA MECÁNICA

Los resultados anteriores, que hemos obtenido con aparente sencillez, fueron el resultado de más de siglo y medio de trabajo científico. Galileo (1564-1642), en el *Diálogo de la dos nuevas ciencias* (1638), se planteó la existencia de alguna relación entre el desplazamiento experimentado por un cuerpo mientras actúa una fuerza sobre él y el cambio de velocidad que se produce.

Otro problema planteado es el de las variaciones de movimiento que tienen lugar cuando unos cuerpos chocan con otros. Huygens (1629-1695) propuso en 1669 que la suma de la magnitud  $mv^2$  (producto de la masa por el cuadrado de la velocidad) de todos los cuerpos permanece constante antes y después del choque. A dicha magnitud le dio el nombre de "vis viva" y fue utilizada por Leibniz como base de las teorías mecánicas.

La conservación de la energía mecánica, no formulada claramente, es utilizada por Huygens para resolver el problema del péndulo y por Daniel Bernouilli (1700-1782) en su estudio de los fluidos en movimiento.

Hay que esperar casi medio siglo para que la conservación de la energía de un sistema mecánico sea establecida por J. L. Lagrange (1736-1813) en su *Mecánica Analítica* (1788). Se sabe que la energía cinética es la mitad de la "vis viva" pero aún no se utiliza el concepto de energía potencial sino la "función de la fuerza".

Con los problemas que siguen se pretende mostrar la potencia de la ley de conservación de la energía y su coherencia con el tratamiento cinemático/dinámico.

**A.32.** Se deja caer un objeto. ¿Con qué velocidad llegará al suelo?

**A.33.** Determinar energéticamente la constante elástica del muelle.

**A.34.** ¿Con que velocidad hay que lanzar una bola para que suba a la cúspide de un montículo?

Comentario A.32.-A.34.

En las actividades A.32., A.33. y A.34. se plantea la resolución de problemas como investigación. Los alumnos deben comenzar analizando cualitativamente el problema, acotándolo. Así, por ejemplo, en A.32. pueden considerar despreciable el rozamiento con el aire. El siguiente paso es la emisión de hipótesis. Pueden señalar que la velocidad dependerá de la altura (algunos también pueden sugerir la masa). En tercer lugar, hay que elaborar una estrategia de resolución a partir de los conocimientos que se tienen. Una posible solución se obtendría utilizando las ecuaciones de un MRUA. Otra, utilizando el principio de conservación de la energía (dado que al no existir rozamiento, se cumple que  $W_{nc} = 0$ ). Como la energía cinética inicial y la energía potencial final son nulas, tendremos que  $mgh = mv^2/2$ . De donde,  $v = (2gh)^{1/2}$ . Por último, conviene que los alumnos analicen los resultados. Este paso es muy importante, tanto en los problemas abiertos como en cualquier tipo de problemas. Comprobarán así que la velocidad depende de la altura y de  $g$  (pero no de la masa) y que cuanto mayores sean, mayor será la velocidad. También se pueden analizar los casos límites. Por ejemplo, si  $g = 0$  o  $h = 0$ , entonces la velocidad es cero. Cuando se haya finalizado el problema, es conveniente suministrar datos reales.

También podemos aplicar la expresión  $W_{nc} = \Delta E$  al problema del muelle y del plano inclinado. En el problema del muelle, los estudiantes se limitan a igualar la energía potencial inicial con la elástica final,  $mgx = kx^2/2$ , lo que les lleva a  $k = 2mg/x$ . Se les puede hacer notar que este resultado es diferente del obtenido aplicando un método dinámico. En éste se llega a la expresión  $mg = kx$ . Esta aparente contradicción se resuelve si se tiene en cuenta que, para llegar a la posición final de equilibrio, el muelle ha oscilado y disipado energía. Por lo tanto, si queremos realizar un estudio energético del muelle hay que comparar la energía potencial inicial con la energía elástica en la posición de elongación máxima. Dado que el bloque ha caído una distancia  $2x$ , tenemos que  $mg(2x) = k(2x)^2/2$ , es decir,  $k = mg/x$ .

Alguna de las situaciones en las que no se cumple la conservación de la energía mecánica puede ser analizado mediante la expresión  $W_{nc} = \Delta E$ . Veámoslo en las siguientes actividades.

**A.35.** Un bloque de masa 0,5 kg asciende por un plano inclinado  $30^\circ$  sobre la horizontal bajo la acción de una fuerza tangencial de 40 N. Calcular la velocidad que lleva el bloque cuando ha recorrido 2 m sobre el plano ( $\mu = 0,2$ ).

**A.36.** Una pelota de 0,5 kg cae desde 10 m de altura, llega al suelo y rebota hasta una altura de 8 m. Analizar el proceso y compararlo con la situación anterior.

Comentario A.35. y A.36.

La actividad A.35. permite aplicar la expresión  $W_{nc} = \Delta E$ . En este caso, las fuerzas no conservativas son dos: la de rozamiento y la fuerza constante aplicada (puesto que depende de la trayectoria). La A.36. muestra un caso en el que tampoco se conserva la energía mecánica y no hay un trabajo de rozamiento entre superficies, lo que obliga a introducir la energía interna y el calor.

Es conveniente señalar a los estudiantes que las relaciones trabajo/energía se pueden aplicar a muchas situaciones que también pueden resolverse cinemática/dinámicamente y que aparecen en los temas de dinámica. En general, las estrategias de resolución con este nuevo instrumento son más sencillas, lo que es una prueba más de la importancia del concepto de energía.

Algunos textos finalizan en este punto el tratamiento del tema sobre trabajo y energía. Sólo en algunos casos se introduce un principio generalizado de conservación de la energía. Para ello, algunos textos introducen múltiples tipos de energía: magnética, química, luminosa, mecánica, térmica, acústica, eléctrica, elástica, etc. que se transforman entre sí. En otros casos, se adopta una posición reduccionista y se señala que todas las energías son cinéticas y potenciales, aunque esta última no es sólo gravitatoria, sino electromagnética, nuclear, etc. Aunque didácticamente esto es un progreso porque evita que se hable de una gran multitud de energías, como ya hemos mencionado, revela una concepción mecanicista de la física, que parece limitar ésta al estudio de partículas en movimiento, olvidando la energía de los campos (y por tanto que éstos son entidades físicas tan reales como las fuentes que los crean) y la energía de la masa en reposo. Es decir, el principio de conservación de la energía generalizado no se introduce para superar las limitaciones de la conservación de la energía mecánica, que no se explicitan como tales, sino para presentar más formas de energía.

## 5. CONCEPCIÓN ACTUAL DE LA NATURALEZA DEL CALOR Y PRIMER PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA

Sabemos que el rozamiento y el choque de los cuerpos produce su calentamiento. Por otra parte, hemos visto en actividades anteriores cómo estos fenómenos están vinculados a aparentes limitaciones de la ley de conservación de la energía.

Comentario general

El primer principio de la termodinámica sólo aparece en aquellos textos en los que hay algún tema de dicha ciencia. Generalmente no se relaciona con las limitaciones de la conservación de la energía en mecánica y con los problemas de la teoría del calórico. Se enuncia de una forma muy restringida a los sistemas termodinámicos:  $W + Q = \Delta U$ , donde el trabajo es  $W = P \cdot \Delta V$ .

En la introducción del primer principio de la termodinámica se siguen dos procedimientos. La mayoría de los textos definen, en el tema correspondiente, un trabajo puramente mecánico. Más adelante, en el tema de termodinámica, aparece el calor como la transferencia de energía debido a una diferencia de temperaturas, mientras que la energía interna  $U$  se limita a la  $E_{c,int} + E_{p,int}$ . A veces se de-

fine un trabajo generalizado que incluye polarizaciones  $D \cdot dP$ , imantaciones  $H \cdot dM$ , etc. También aparece, en algunas ocasiones, un calor que comprende todos los procesos de transferencia de energía debidos a una diferencia de temperaturas, incluida la radiación de origen térmico. A pesar de las generalizaciones citadas, no quedan incluidas las transferencias de energía por radiación dipolar (antenas), de frenado y sincrotrón. La energía interna  $U$  tampoco recoge la energía de los campos y la de la masa en reposo.

La otra posibilidad (Alonso y Finn 1976), menos frecuente, es el intento de deducir el primer principio de la termodinámica a partir del teorema de la energía propia de un sistema de partículas  $W_{\text{ext}} = \Delta (E_{c,\text{cm}} + E_{c,\text{int}} + E_{p,\text{int}})$ . Se introduce un trabajo exterior debido a los choques moleculares, que no se puede expresar como  $F \cdot dr$  (o  $P \cdot dV$ ), y se identifica con el calor. Se considera que nos encontramos en el sistema de referencia CM ( $E_{c,\text{cm}} = 0$ ) y se identifica la energía interna  $U$  con  $E_{c,\text{int}} + E_{p,\text{int}}$ , con lo cual se deduce  $W + Q = \Delta U$ . Con esto se está dando una definición tan limitada de calor y de energía interna como en el caso anterior y, además, creemos que se está cometiendo un error metodológico. Una expresión que se deduce matemáticamente de otra (de un principio, por ejemplo) no es un nuevo principio sino un teorema. Se puede tomar ese teorema como principio, pero entonces el antiguo principio puede convertirse en un teorema. En física, los nuevos principios son experimentales, es decir, son hipótesis verificadas por la experiencia.

Dado que la programación, por evidentes razones de falta de tiempo, no incluye un tema sobre el calor, nuestra propuesta parte de las limitaciones de la conservación de la energía en mecánica y de los problemas de la teoría del calórico, para introducir el primer principio de la termodinámica.

**A.37.** Diseñar algún montaje experimental para tratar de establecer la equivalencia entre calor y trabajo.

**A.38.** Al caer dos pesas de 30 kg cada una desde una altura de 2 m producen, por fricción (a través de un sistema de palas que hacen girar las pesas al ir bajando) una elevación de  $0,56^\circ\text{C}$  en la temperatura de 500 g de agua. Calcular: a) el trabajo realizado a expensas de la energía potencial de las pesas; b) el calor producido; c) el equivalente mecánico del calor, es decir, a cuántas calorías equivale un Julio.

Comentario A.37. y A.38.

En la actividad A.37. se pueden describir las experiencias de Thomson, Mayer, Joule y los resultados obtenidos (Holton 1979), que condujeron a establecer la equivalencia entre el calor y el trabajo, y el primer principio de la termodinámica. Conviene que el profesor deje muy claro que no hay que concebir el calor como una forma de energía (error muy extendido), sino simplemente como un proceso de transferencia de energía, como el trabajo. Y no puede hablarse de contenido en energía calorífica (a pesar de que se suele hacer) como no puede hablarse de contenido en energía "trabajosa" (cosa que, afortunadamente, nadie hace).

La actividad A.38. permite analizar los resultados de un experimento similar a uno de los realizados por Joule. La comprensión del concepto de calor como for-

ma de trabajo abrió paso al establecimiento del principio de conservación de la energía en toda una serie de procesos en que parecía no cumplirse.

### **Cuadro 3. MAYER, JOULE, HELMHOLTZ Y LA CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA**

Durante el siglo XVIII se desarrollaron la termometría y la calorimetría. Estas ciencias, que no tienen ninguna relación con la mecánica, fueron la obra del escocés Black (1728-1796), el sueco Wilcke (1732-1796), y los franceses Lavoisier (1743-1794) y Laplace (1749-1824). Se basan en la teoría del calórico, que considera el calor como una sustancia material. Esta teoría fue aplicada por Fourier (1768-1830) a la conducción del calor y por Carnot (1796-1832) al estudio de las máquinas térmicas. Este último considera que el calor se conserva en la generación de trabajo mecánico en las máquinas térmicas. Sin embargo, la doctrina del calórico fue criticada por B. Thompson (Conde Rumford) (1753-1814), que había observado que en la perforación de cañones se produce calor indefinidamente, cosa difícil de aceptar si el calor es una sustancia. Por esa razón, defendió la tesis de que el calor es movimiento.

La resolución de estos dos complejos problemas (la aparente no conservación de la energía mecánica y la producción ilimitada de calórico) sólo pudo ser realizada a mediados del siglo XIX por Mayer (1814-1878), Joule (1818-1889) y Helmholtz (1821-1894), al establecer un principio de conservación de la energía válido para toda la física conocida y no sólo para las transformaciones mecánicas: el denominado primer principio de la termodinámica. Dicho principio pretende, incluso, ser un principio de toda la ciencia. Esto puede ser así porque es enunciado en un periodo en el que aparecen fenómenos y experimentos mecánicos, térmicos, eléctricos, químicos, biológicos, etc. (como los de Volta, Oersted, Faraday, Seebeck, etc.) que relacionan y unifican las distintas ramas de la física y otras ciencias.

El principio de conservación de la energía fue aplicado a múltiples fenómenos por diversos investigadores. Mayer lo empleó en la fisiología y en la expansión de los gases, mientras que Joule lo utilizó en el calentamiento de un líquido por fricción o por corriente eléctrica. Con estos métodos, Joule obtuvo para el equivalente mecánico del calor un valor muy próximo a los 4,18 J por caloría. Helmholtz aplicó el principio de conservación de la energía a la fisiología (la oxidación de los alimentos explica el calor corporal y la acción muscular), a las colisiones inelásticas, los fenómenos térmicos y eléctricos (corriente, inducción electromagnética), etc. Estableció la primera formulación matemática del principio (el cambio de fuerza viva en un cuerpo sobre el que actúa una fuerza central, se mide por el cambio de la fuerza de tensión  $\Delta E_c = -\Delta E_p$ , es decir, la suma de

fuerza viva y de tensión es constante) y recalcó su papel unificador.

Dado que estos trabajos fueron realizados por Mayer en 1842, por Joule entre 1843 y 1848 y por Helmholtz en 1847, hubo disputas de prioridad. En la actualidad se reconoce a Mayer sus consideraciones teóricas, a Joule su trabajo experimental y al físico Helmholtz el haber enunciado claramente el principio.

A la luz de lo visto en las actividades anteriores sobre la concepción actual de la naturaleza del calor, podemos profundizar en el mecanismo de transferencia de energía entre el exterior y un cuerpo en el que se producen transformaciones internas. En este caso, deberemos tener en cuenta las partículas que lo forman. Para ello, podemos considerar un sistema de partículas, por ejemplo un gas contenido en un cilindro con un émbolo.

**A.39.** Indicar a qué puede deberse el contenido energético del sistema anterior.

**A.40.** Un sistema puede intercambiar energía con el exterior. ¿De qué formas puede hacerlo?

**A.41.** Señalar diversos mecanismos de transferencia del calor.

**A.42.** Enunciar el principio de conservación y transformación de la energía en la forma más general posible. Considerar las siguientes situaciones: a) el calor ( $Q$ ) absorbido por el sistema y el trabajo ( $W_{\text{ext}}$ ) realizado sobre el sistema; b) el calor, como en el caso anterior, y el trabajo ( $W_{\text{sist}}$ ) realizado por el sistema.

**A.44.** Hallar la variación de energía interna de un sistema en cada uno de los siguientes casos: a) El sistema absorbe 500 cal y realiza 400 J de trabajo; b) el sistema absorbe 300 cal y se realiza un trabajo de 419 J.

**A.45.** Explicar las transformaciones de energía que tienen lugar en los procesos siguientes: a) Una persona dispara con un arco una flecha que se clava en una diana; b) Un molino de agua mueve una dinamo con la que se alimenta una bomba que introduce aire en un globo; c) Con los rayos del Sol se calienta el agua de una máquina de vapor que mueve un torno por medio del cual se sube un saco; d) La explosión de una bomba nuclear.

#### Comentario A.39.-A.45.

En la actividad A.39. los alumnos pueden indicar fácilmente que la energía del sistema incluirá la energía cinética y la energía potencial macroscópicas y la

energía interna  $U$  de todas las partículas que lo constituyen (sus energías cinéticas, las debidas a sus interacciones, etc.). La A.40. pretende que los alumnos señalen que un cuerpo constituido por partículas puede intercambiar energía en forma de calor y de trabajo. Es interesante pedirles que establezcan un criterio de signos:  $W_{\text{ext}} > 0$ ;  $W_{\text{sist}} < 0$ ;  $Q_{\text{absorbido}} > 0$ ;  $Q_{\text{cedido}} < 0$ . Con la actividad A.41. se introducen los tres mecanismos de transferencia de calor: la conducción, la convección y la radiación térmica. Los dos primeros casos están asociados con las vibraciones y el desplazamiento neto de las partículas de un sistema. El tercer mecanismo se relaciona con la emisión de ondas electromagnéticas por el cuerpo debido a su temperatura. Si el cuerpo se encuentra a la misma temperatura que su entorno, emite y absorbe radiación al mismo ritmo. Por razones obvias, el calor no puede medirse como el trabajo (lo que obligaría a seguir el desplazamiento de cada partícula y medir la fuerza que actúa en cada instante sobre cada una de ellas). La magnitud calor aparece así como una globalización estadística de procesos microscópicos que se traduce en variaciones de temperatura (concepto que mide, también estadísticamente, la agitación de las partículas del sistema). Esto permite obtener, en A.42, el primer principio de la termodinámica con un enunciado muy general como  $W_{\text{ext}} + Q = \Delta E$ , donde la energía total es  $E = E_c + E_p + U$ . La ecuación más análoga a ésta obtenida en un sistema de partículas, es  $W_{\text{ext,nc}} = \Delta(E_{c,\text{cm}} + E_{p,\text{ext}} + E_{c,\text{int}} + E_{p,\text{int}})$  pero, como ya hemos señalado, de la expresión anterior no se puede deducir el primer principio. En los sistemas termodinámicos usuales (un gas en un émbolo, una reacción química, etc.) la energías cinéticas y potenciales globales son despreciables (o no es necesario tenerlas en cuenta) con lo cual obtenemos la expresión  $W_{\text{ext}} + Q = \Delta U$ . El apartado b) permite la obtención de la forma más utilizada en termodinámica,  $\Delta U = Q - W_{\text{sist}}$ . La actividad A.43. es una aplicación numérica que permite el uso de los criterios de signos descritos en la A.40., mientras que la A.44. permite que los estudiantes construyan cadenas de transferencia de energía.

La revolución industrial del siglo XIX está asociada, en cierto modo, a la construcción y utilización de las llamadas máquinas térmicas, dispositivos que transforman calor en trabajo. En este siglo siguen jugando un papel determinante.

**A.45.** Citar las máquinas térmicas que se conozcan, explicando su funcionamiento, tipo de combustible y su impacto ambiental.

Comentario A.45.

En esta actividad nos referiremos no sólo a las máquinas de vapor, sino también a las máquinas de combustión interna (motores de explosión interna y Diesel), determinantes de nuestra civilización contemporánea y cuyo impacto ambiental es sobradamente conocido. Esto contribuirá a conocer las relaciones entre lo estudiado, el desarrollo tecnológico y sus implicaciones en la sociedad y la naturaleza. Como ha puesto de manifiesto la investigación didáctica, este tipo de actividades contribuye en gran medida a aumentar el interés del alumnado y mejorar su aprendizaje.

## 6. EL PRINCIPIO DE CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA. LA DEGRADACIÓN DE LA ENERGÍA

Como hemos visto, el principio de conservación fue introducido por Mayer, Joule y Helmholtz con vocación de ser un principio de toda la física. Pero la física ha evolucionado mucho desde 1847 hasta la actualidad. La introducción del concepto de campo electromagnético por Faraday y Maxwell, su confirmación experimental por Hertz, y la teoría especial de la relatividad de Einstein, temas que estudiaremos el próximo curso, han producido nuevos problemas en la energía y su conservación. Para solucionar estos problemas ha sido necesario introducir la energía de los campos y la equivalencia masa/energía, como podrás ver en el siguiente curso.

Todo este proceso nos ha ido acostumbrando a pensar en la energía como una magnitud que se conservaba de forma general. Por ello, **el principio de conservación de la energía se puede enunciar en general diciendo que la energía total de un sistema aislado se conserva**. Por **sistema aislado** entendemos aquél en el que no hay intercambios o **transferencias** de energía con su entorno mediante trabajo, calor, ondas mecánicas o electromagnéticas o cualquier otro proceso de transferencia.

Para determinar la **energía total** hay que identificar los tipos de energía del sistema. En general, podemos encontrar con energía de las partículas libres (la cinética y la de su masa en reposo), energía de los campos libres (la energía de la radiación electromagnética), la energía de las interacciones entre partículas y campos (que es potencial si los campos son conservativos). Cada una de estas contribuciones a la energía total del sistema puede variar con el tiempo **transformándose** en una de otro tipo, pero su suma no cambia, **se conserva**.

Sin embargo, con las propiedades de transformación, conservación y transferencia no está completa nuestra descripción de la energía, como podemos ver en la siguiente actividad.

**A.46.** En la naturaleza, un objeto que se desliza sobre una superficie acaba parándose, una pelota que cae rebota a una altura menor, etc., pero no se observa que un objeto pesado empiece a moverse o que una pelota rebote cada vez más alta. ¿Alguno de estos procesos incumple la ley de conservación de la energía?. Tratar de establecer la causa de que unos procesos se realicen en la naturaleza y otros no.

### Comentario A.46.

En esta propuesta se considera el primer principio de la termodinámica como un paso más hacia el establecimiento de un principio de conservación de la energía válido para toda la física. Para ello, es necesario presentar nuevos aspectos de la física: la energía de los campos, la energía de la masa en reposo, la desintegración beta, etc. Se indicará a los alumnos que dichos aspectos se estudiarán

con más detalle en el segundo curso de bachillerato. Con todo esto se han activado en los estudiantes los esquemas de transformación, de conservación y de transferencia de energías, pero no el de degradación. Estos esquemas resultan muy importantes ya que sin ellos no es posible la comprensión del concepto de energía.

La presentación de la degradación de la energía se puede hacer a través de la introducción explícita de la entropía y del segundo principio de la termodinámica. También pueden utilizarse simulaciones informáticas (Bellomonte y Sperandeo Mineo 1997). En nuestra propuesta se realiza una discusión que muestra la degradación de la energía a partir de la imposibilidad de convertir completamente la energía interna o el calor en trabajo, y de la existencia de procesos irreversibles, como se muestra en A.44.

En la naturaleza hay procesos que evolucionan en un sólo sentido. Dichos procesos se denominan **irreversibles**, debido a la **degradación** de la energía.

#### **Cuadro 4. HACIA EL SEGUNDO PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA**

La termodinámica se desarrolla como una ciencia aplicada a gases, máquinas térmicas, reacciones químicas, etc. La descripción termodinámica se basa en la medida de variables como la presión  $P$ , el volumen  $V$ , la temperatura  $T$ , el número de moles  $n$ , etc., y es la apropiada si no se pueden hacer medidas de variables dinámicas.

Poco tiempo después del establecimiento del primer principio de la termodinámica Thomson (Lord Kelvin) y Clausius detectaron que éste no era suficiente para explicar la evolución o transformaciones de los sistemas. Entre 1847 y 1849 Thomson planteó claramente el problema: hay una contradicción entre la idea de Carnot de que el calor se conserva en la generación de trabajo mecánico en las máquinas térmicas, y la equivalencia entre calor y trabajo establecida por Joule, que explica que el calor debe consumirse en la generación de trabajo como se pone de manifiesto en todas las máquinas térmicas.

En 1850, Clausius enunció el segundo principio de la termodinámica en el artículo *Sobre la fuerza motriz del calor*. Con respecto a dicho principio escribió: "es bastante posible que en la producción de trabajo se pueda consumir una cierta parte de calor, y que una parte adicional sea transmitida de un cuerpo caliente a uno frío, y ambas partes pueden guardar una cierta relación definida con la cantidad de trabajo producida"

## ANEXO III

### ACTIVIDADES DE SEGUNDO CURSO DE BACHILLERATO RELACIONADAS CON LA ENERGÍA

#### PRIMERA PARTE. EL TRIUNFO DE LA MECÁNICA

#### TEMA 1. INTERACCIÓN GRAVITATORIA

[...]

##### 5. Estudio energético de la interacción gravitatoria

Los conceptos de trabajo y energía van a permitir abordar las manifestaciones energéticas de la interacción gravitatoria, es decir de la relación entre el trabajo que se realiza al desplazar una masa en un campo gravitatorio y las variaciones de energía que se producen.

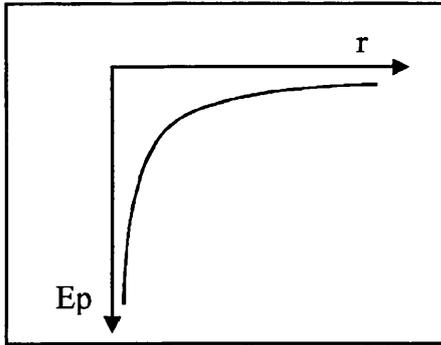
**A.28.** Calcular el trabajo realizado por las fuerzas gravitatorias cuando un cuerpo de masa  $m$  se desplaza desde  $r_1$  a  $r_2$  en el campo creado por otra masa  $M$ . Dar la variación de la energía potencial del sistema que tiene lugar.

**A.29.** Obtener la expresión de la energía potencial gravitatoria en un punto cualquiera del campo creado por  $M$  sobre  $m$ , tomando como origen de la energía potencial la separación infinita de las masas ( $E_p(r \rightarrow \infty) = 0$ ).

Con referencia a la **energía potencial** es necesario realizar dos puntualizaciones: el **origen de potencial** puede ser asignado al punto que se desee. Así, en la conocida expresión  $E_p = mgh$ , se toma como origen la superficie de la Tierra ( $E_p(h = 0) = 0$ ). Este hecho no influye en los resultados físicos, por ejemplo, en el trabajo, porque se calculan variaciones de energía potencial. Así, en ambos casos, y esto es lo que verdaderamente importa, cuando se aleja un cuerpo de la Tierra, la energía potencial aumenta.

Por otra parte, la **energía potencial no es una propiedad del cuerpo de masa  $m$** . En efecto, en la expresión aparece la masa  $M$  del cuerpo con el que interactúa. Es decir, la energía potencial es debida a la interacción entre las masas, o en otras palabras, al campo gravitatorio. De hecho la energía potencial se asigna a los puntos del espacio que rodea a  $M$ , es decir, al campo creado por  $M$ .

A.30. La siguiente gráfica muestra la variación de la energía potencial del sistema



formado por dos masas en función de la distancia que existe entre ellas. Analizar dicha gráfica. Señalar en qué condiciones dos masas podrán formar un sistema ligado. ¿Cuándo pueden considerarse libres?

[...]

Comentarios A.28.-A.30.

En la actividad A.28 y en las siguientes se realiza una revisión de lo visto el curso anterior, profundizando en el aparato matemático, en las representaciones gráficas, etc. Así, se puede calcular el trabajo integrando las fuerzas gravitatorias:

$$W = \int_{r_1}^{r_2} \frac{GMm}{r^2} dr = -\frac{GMm}{r_2} - \left( -\frac{GMm}{r_1} \right) = -\Delta E_p$$

Es decir, cuando el trabajo realizado depende únicamente de la posición de las partículas y no de la trayectoria, las fuerzas son conservativas. En estos casos podemos introducir una energía potencial asociada a la posición de las partículas que cumple  $W_{\text{cons}} = -\Delta E_p$ . Esta expresión nos dice que en una evolución espontánea del sistema, en la que sólo actúan las fuerzas conservativas del campo gravitatorio, se produce una disminución de la energía potencial. Evidentemente si la trayectoria es cerrada,  $W_{\text{cons}} = 0$ . Si en la actividad A.29 se toma  $E_p(r \rightarrow \infty) = 0$ , se puede definir la energía potencial del sistema formado por las masas  $M$  y  $m$  como  $E_p = -Gmm/r$ . La interpretación de la representación gráfica de  $E_p(r)$  (una hipérbola negativa), propuesta en la actividad A.30., tiene interés para evitar que el análisis de gráficas se reduzca a la cinemática. Como la energía total  $E$  se conserva, se representa mediante una línea horizontal. La energía cinética será  $E_c = E - E_p$ . Evidentemente, cuando la energía potencial  $E_p$  aumenta, la energía cinética  $E_c$  disminuye. Por otra parte, si  $E < E_p$ , entonces  $E_c < 0$ , lo cual es imposible. Por ello, la región a la derecha de la hipérbola  $E_p(r)$  se denomina clásicamente prohibida. Si  $E_c < |E_p|$ , entonces  $E < 0$  y tenemos un sistema ligado, ya que la masa  $m$  sólo puede moverse desde la superficie de  $M$  hasta  $r$ . Se trata en este caso de trayectorias cerradas: elipses, circunferencias. Si  $E_c \geq |E_p|$ , entonces  $E \geq 0$  y el sistema es libre, ya que  $m$  puede moverse desde la superficie hasta el infinito. Se trata de trayectorias abiertas: parábolas ( $E = 0$ ) e hipérbolas ( $E > 0$ ). También se puede representar gráficamente  $E_p(r)$  de la actividad A.27., encontrándose que existe una barrera de potencial entre la Tierra y la Luna.

[...]

## 6. Movimiento de planetas y satélites

Vamos a aplicar algunas de las ideas estudiadas en este capítulo para abordar el problema de la colocación de satélites en órbita alrededor de un planeta.

**A.39.** ¿Qué energía será necesaria para poner un satélite en órbita lanzándolo desde la superficie de la Tierra?

**A.40.** ¿Cuál será la **velocidad de escape** que se tendrá que comunicar a un satélite? (La velocidad de escape es la mínima velocidad necesaria para que el satélite escape del campo gravitatorio, partiendo de la superficie).

**A.41.** Determinar el radio de la órbita de un satélite geoestacionario y su energía.

En los problemas anteriores se pone de manifiesto que a mayor velocidad (o menor periodo) en la órbita, menor altura. Es interesante mostrar la coherencia de este hecho con la tercera ley de Kepler y con la conservación de la energía (cuanto mayor es la energía cinética, menor es la potencial) ya vistos.

[...]

Comentarios A.39.-A.41.

Los problemas planteados en las actividades A.39., A.40. y A.41. se pueden abordar como pequeñas investigaciones (Gil *et al.* 1991). La supresión de los datos obliga a comenzar por el análisis cualitativo de la situación, a modelizarla, etc. Esto obliga a los alumnos a emitir hipótesis, pensar en los parámetros pertinentes y la forma en que intervienen. A continuación, se pueden elaborar las estrategias de resolución. Por ejemplo, en el problema A.38. necesitamos conocer la energía en la órbita y en la superficie terrestre, y aplicar la conservación de la energía. Para calcular la primera necesitamos conocer la velocidad, que se puede determinar, en el caso de órbita circular, a partir de la relación entre la aceleración centrípeta y la fuerza gravitatoria. Se puede proseguir con el análisis de resultados, es decir, ver si es razonable, si se ajusta a lo que se podría esperar en situaciones sencillas y especiales -los casos límite, etc.-. Por último, conviene dar datos reales para que los alumnos puedan estimar órdenes de magnitud, etc. Así, por ejemplo, en el problema A.38.,  $h = 2000$  km, mientras que en la actividad A.40, se puede determinar el valor de la velocidad de escape en las superficies de la Tierra y de la Luna. El profesor hará observar a los estudiantes que las actividades A.40. y A.41. son dos ejemplos de la aplicación de la conservación de la energía mecánica.

## TEMA 2. VIBRACIONES Y ONDAS

[...]

### 2. Generalidades sobre las ondas. Elaboración de un modelo sobre su naturaleza

[...]

A.14. Hemos visto cómo en una onda no hay transporte neto de materia. ¿Qué se propaga entonces?

[...]

Comentarios A.14.

La respuesta a la actividad A.14. debe ser, lógicamente, que se propaga energía y cantidad de movimiento. Es conveniente poner ejemplos en los que se vea que ocurre esto: la onda expansiva de una explosión, las ondas sísmicas, etc. Esta característica, como veremos, es compartida por las ondas electromagnéticas, lo que refuerza el carácter material de éstas y, por tanto, de los campos que las constituyen que no se deben considerar como un mero artificio matemático.

[...]

### 4.1. Transmisión de energía a través de un medio. Amortiguamiento

[...]

A.20. Teniendo en cuenta que cada partícula del medio vibra con un MAS, dar la expresión de la energía total de una partícula de masa  $m$  del medio (de constante elástica  $k$ ), en cualquier instante. Mostrar que dicha energía total coincide con la energía potencial máxima o con la cinética máxima.

A. 21. Señalar, a título de hipótesis, de qué dependerá la intensidad  $I$  de una onda (es decir, la la energía transferida por unidad de superficie y de tiempo) y proponer una definición de la misma.

Es de sobra conocido que una onda como el sonido se **amortigua** (se debilita) al propagarse desde el foco emisor, lo que se traduce en una disminución de la intensidad. Examinaremos a continuación las causas del **amortiguamiento**.

A.22. Hallar cómo variarán la intensidad y la amplitud de una onda en función de su distancia al foco en los siguientes casos: a) una onda esférica (como el sonido), cuya energía se halla distribuida en superficies esféricas de radio creciente; b) una onda circular (como las de la superficie de los líquidos); c) una onda que se propaga en una sola dirección.

El fenómeno de **atenuación** de las ondas no debe confundirse con la **absorción**. La atenuación se produce por la extensión de la onda en el medio, es decir, porque la energía transportada por un frente de ondas ha de repartirse en superficies cada vez mayores a medida que nos alejamos del foco.

**A.23.** Explicar brevemente en qué puede consistir la absorción. Indicar la relación que existe entre la intensidad del sonido que incide en una pared y la transmitida.

**A.24.** (Opcional). Señalar, a título de hipótesis, de qué depende la variación de la intensidad  $dI$  de una onda al atravesar un medio. Dar la ecuación que relaciona este valor  $dI$  con los factores considerados y resolverla.

**A.25.** Dibujar, uno debajo del otro, los perfiles de dos ondas de igual frecuencia, una de las cuales se amortigua y la otra no.

[...]

#### Comentarios A.20.-A.25.

No es difícil, en la actividad A.20., llegar a la conclusión de que la energía que transporta una onda es  $1/2 kA^2$ , es decir, directamente proporcional al cuadrado de la amplitud. El profesor debe insistir sobre la validez general de esta conclusión (pese a haber sido obtenida en un caso particular) y sobre su utilización posterior en electromagnetismo y en la física moderna.

La actividad A.21. permite la introducción de la intensidad de una onda. Se debe llegar a que dicha intensidad es proporcional a la energía de la onda e inversamente proporcional al tiempo y a la superficie (la energía se distribuye uniformemente en todo el frente de ondas, repartiéndose cada vez entre más puntos). Por tanto, la intensidad es el flujo de energía por unidad de superficie y tiempo, es decir,  $I = E/St = P/S$ . Su unidad en el S.I. es  $w/m^2$ .

En la actividad A.22. se plantea el fenómeno de la atenuación. Ya se ha visto que, a medida que avanza la onda, la energía inicial se reparte entre un número mayor de partículas del medio. Este fenómeno recibe el nombre de atenuación de la onda. En el caso de una onda esférica se cumple que  $I = P/4\pi r^2$ . Por tanto,  $I_1/I_2 = r_2^2/r_1^2$ . Puesto que la intensidad depende del cuadrado de la amplitud  $A$ , ésta será inversamente proporcional a la distancia, cumpliéndose  $A_1/A_2 = r_2/r_1$ .

Los estudiantes puede señalar en la actividad A.23. que la absorción es el debilitamiento que se produce en la onda a medida que la energía va siendo absorbida por el medio. La aplicación del principio de conservación de la energía conduce fácilmente a sugerir que una parte de la energía incidente se refleja en la pared, otra es absorbida y la restante se transmite, es decir;  $I_0 = I_r + I_a + I_t$ .

La actividad A.24. introduce los factores de los que depende la absorción de una onda al atravesar un medio. La variación de la intensidad debida a la absorción,  $dI$ , es directamente proporcional a la intensidad  $I$ , a la distancia  $dx$  y las características del medio, que se tienen en cuenta en el coeficiente de absorción  $\alpha$ , es decir,  $dI = -\alpha dx$ . Integrando esta expresión obtenemos que  $I = I_0 e^{-\alpha x}$ . De acuerdo con esta expresión, la intensidad decrece exponencialmente con la distancia recorrida. Es una actividad interesante porque dicha ecuación reaparece en muchos ámbitos de la física: las desintegraciones nucleares, la variación de la velocidad de un móvil sometido a una fuerza de rozamiento proporcional a dicha velocidad, etc.

La actividad A.25. permite poner de manifiesto la idea errónea del alumnado de que la longitud de onda disminuye cuando se amortigua la onda.

## SEGUNDA PARTE. EL PODER UNIFICADOR DE LA FÍSICA: EL ELECTROMAGNETISMO

### TEMA 4. LA INTERACCIÓN ELECTROMAGNÉTICA

[...]

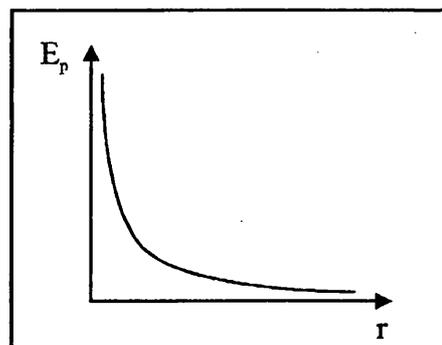
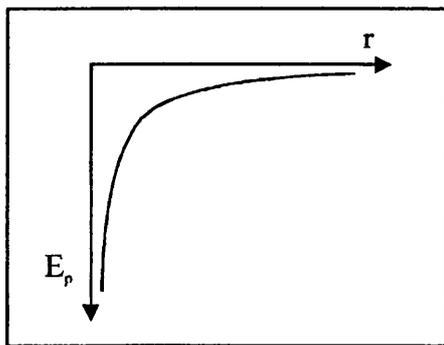
#### 1.3. Estudio energético de la interacción eléctrica

Los conceptos de trabajo y energía van a permitir abordar las manifestaciones energéticas de la interacción eléctrica, es decir de la relación entre el trabajo que se realiza al desplazar una carga en un campo eléctrico y las variaciones de energía que se producen.

**A.11.** Calcular el trabajo realizado por las fuerzas eléctricas cuando una carga  $q$  se desplaza desde  $r_1$  a  $r_2$  en el campo creado por otra carga  $Q$ . Dar así mismo la variación de la energía potencial del sistema que tiene lugar.

**A.12.** Obtener la expresión de la energía potencial eléctrica en un punto cualquiera del campo creado por  $Q$  sobre  $q$ , tomando como origen de la energía potencial  $E_p$  la separación infinita de las cargas ¿Qué signo tendrá la energía potencial  $E_p$ ?

**A.13.** Las siguientes gráficas muestran la variación de la energía potencial del sistema formado por dos cargas, en función de la distancia que existe entre ellas. Analizar dichas gráficas. Señalar cuándo dos cargas podrán formar un sistema ligado. ¿Cuándo pueden considerarse libres?



[...]

Comentarios A.11.-A.13.

Las actividades A.11., A.12. y A.13. son semejantes a las que se presentaron en el estudio de la interacción gravitatoria. Se puede calcular el trabajo, en la actividad A.11., por medio de la integración de la fuerza eléctrica entre dos cargas separadas una distancia  $r$ .

$$W = \int_{r_1}^{r_2} \frac{kQq}{r^2} dr = \frac{kQq}{r_1} - \frac{kQq}{r_2} = -\Delta E_p$$

Por tanto, una evolución espontánea del sistema de cargas, en la que sólo actúan las fuerzas del campo, se traduce en una disminución de la energía potencial.

En la actividad A.12. debemos fijar un origen para la energía potencial. Si se considera que dicha energía es cero cuando las cargas están separadas una distancia que tiende a infinito, se puede definir la energía potencial eléctrica en un punto como  $E_p = kQq/r$ . Es necesario realizar dos puntualizaciones: el origen de la energía potencial puede ser asignado al punto que se desee. La elección arbitraria del origen de la energía potencial no influye en los resultados físicos (por ejemplo, en el trabajo) porque se determinan incrementos de energía potencial. Por otra parte, la energía potencial no es de la carga, sino del conjunto de cargas que interaccionan o, mejor, del campo eléctrico. De hecho la energía potencial se asigna a los puntos del espacio que rodean a la carga  $Q$ , es decir, al campo creado por  $Q$ .

En la representación gráfica de la actividad A.13. si  $Q > 0$ , la energía potencial  $E_p > 0$  y si  $Q < 0$ , la  $E_p < 0$ . Sólo en el caso de que  $E_c < |E_p|$  tenemos un sistema ligado (Energía total  $< 0$ ), ya que la carga  $q$  sólo puede moverse desde 0 hasta  $r$ . En los restantes casos el sistema será libre.

[...]

### Intensidad de las ondas electromagnéticas

Las ondas electromagnéticas (oem) transmiten energía y cantidad de movimiento, como se vio en el tema sobre vibraciones y ondas.

**A.60.** Recordando lo visto allí, indicar, a título de hipótesis, de qué dependerá la intensidad (potencia/superficie) de las oem.

**A.61.** Determinar el valor del campo eléctrico, a una distancia de 1 m, de la luz emitida por una bombilla de 100 w. Repetir los cálculos para el caso de la luz del Sol cuando llega a la superficie de la Tierra si su intensidad es de  $1000 \text{ w/m}^2$ .

[...]

Comentarios A.60.-A.61.

La actividad A.60. permite recordar que la intensidad  $I$  de una onda es proporcional al cuadrado de su amplitud. En el caso de las oem, la intensidad es proporcional al cuadrado del campo eléctrico. Concretamente,  $I = c\epsilon_0 E^2$  o como  $E = Bc$ , se tiene que  $I = c^2 \epsilon_0 E B$ .

En la actividad A.61. se debe igualar la intensidad de una onda  $I = P/S$  (siendo  $S$  la superficie que atraviesa) con la expresión obtenida en la actividad A.60. Despejando  $E$  se tiene

$$E = \sqrt{\frac{P}{Sc\epsilon_0}}$$

Si se sustituyen los datos, se obtiene  $54,8 \text{ V/m}$  en el caso de la bombilla y  $204,9 \text{ V/m}$  en el caso del Sol.

## TERCERA PARTE. LA CRISIS DE LA FÍSICA CLÁSICA Y EL SURGIMIENTO DE LA FÍSICA MODERNA

### TEMA 5. ELEMENTOS DE FÍSICA RELATIVISTA

[...]

#### 3.2. Relación masa/energía

Einstein realiza una crítica de los conceptos básicos de cinemática, como hemos visto en los apartados anteriores. Ello exigió, a su vez, una modificación de los conceptos básicos de la física clásica. En efecto, las leyes fundamentales de la mecánica clásica -tales como las leyes de conservación de la energía o de la cantidad de movimiento-, dejaban de ser válidas, lo que implicaba reducir la validez de estas leyes a una mera aproximación para pequeñas velocidades, o bien exigía una modificación de las definiciones operativas de cantidad de movimiento, energía, etc.

Einstein, para preservar la validez de los principios de conservación, siguió la segunda opción. Así, para que la cantidad de movimiento se conserve, la masa de un cuerpo ha de variar con la velocidad según  $m = m_0/[1 - (v^2/c^2)]^{1/2}$ , donde  $m_0$  es la masa medida por un observador con respecto al cual la partícula está en reposo.

Kaufmann anunció que sus resultados concordaban mejor con las ecuaciones de Abraham y Bucherer que con la de Einstein, pero en 1909 el propio Bucherer obtuvo una confirmación experimental para los resultados de Einstein. Estos mostraron, además, una gran fertilidad en el establecimiento de nuevas predicciones, que la experiencia había de verificar plenamente, como veremos a continuación.

**A.11.** Representar la gráfica  $m = f(v)$ , de acuerdo con: a) la física clásica y b) la física relativista (Datos:  $v = 0,1c, 0,2c, 0,3c, 0,5c, 0,7c$  y  $0,99c$ ;  $m = 1$  kg).

**A.12.** Indicar en qué condiciones puede considerarse prácticamente constante la masa de un cuerpo tal como supone la mecánica clásica.

El aumento de la masa con la velocidad se ha comprobado experimentalmente en los aceleradores de partículas elementales, donde se han encontrado hechos como el que se muestra en la siguiente actividad.

**A.13.** Supóngase un electrón de masa  $m = 9,11 \cdot 10^{-31}$  kg que se mueve a una velocidad de  $0,8c$ .  
a) ¿Cuál será su masa para un observador en reposo con respecto a él? b) ¿Y para un observador con su misma velocidad?

El aumento de la masa provoca que no se desvíe tanto un haz de partículas cargadas en el campo magnético de un acelerador circular, como el ciclotrón o el bevatrón. Este es un hecho al que se enfrentan todos los días los físicos que trabajan con partículas de alta energía.

Einstein propuso además una relación entre masa y energía. Según sus propias palabras: "la masa de un sistema de cuerpos puede considerarse precisamente como una medida de su energía. La ley de conservación de la masa de un sistema equivale a la ley de conservación de la energía".

Por tanto, si  $E$  es la energía total de un sistema, podremos escribir la ecuación más famosa de la Física  $E = mc^2$ , o también  $E = m_0 c^2 / [1 - v^2/c^2]^{1/2}$ , expresión que denota la existencia de energía incluso para velocidades nulas, lo que lleva a concluir que la masa en reposo está relacionada con una **energía en reposo**  $E_0 = m_0 c^2$ .

La relación  $m = m_0 / [1 - (v^2/c^2)]^{1/2}$  puede considerarse, desde este punto de vista, como una variación de la masa que tiene lugar al comunicar energía cinética al cuerpo, luego  $m = m_0 + E_c/c^2$ , o lo que es equivalente,  $E = m_0 c^2 + E_c$ . Por tanto la energía cinética no se obtiene sustituyendo la masa por su expresión relativista  $m$  en la expresión clásica  $E_c = mv_0^2/2$ , sino que es  $E_c = mc^2 - m_0 c^2$ .

**A.14.** Aplicar el desarrollo del binomio  $(1 + x)^n = 1 + nx + n(n-1)x^2/2 + \dots$  a la expresión de la energía cinética obtenida. ¿Qué sucede cuándo la velocidad  $v$  es mucho menor que  $c$ ?

**A.15.** Determinar la energía cinética de un electrón con velocidades  $0,99c$ ,  $0,50c$ ,  $0,20c$ ,  $0,10c$  y  $0,01c$ . ¿Para cuáles de estas velocidades pueden utilizarse las expresiones no relativistas de la energía cinética?

Conviene escribir de otra forma la energía de la partícula en términos de  $p$ .

**A.16.** Escribir  $p$  y  $E$  en función de  $m$  y  $v$ . Eliminando  $v$  de ambas expresiones, obtener una relación directa entre  $E$  y  $p$ .

En la expresión  $E = mc^2$  el elevado valor de  $c$  ofrece la posibilidad de liberación de grandes cantidades de energía, consistente en aprovechar reacciones con "defecto de masa", tales como la fisión o la fusión.

**A.17.** Calcular la energía que podría liberarse si se desintegrará 1 g de materia. Comparar dicha cantidad con la que se libera al quemar 1 g de petróleo. (Poder calorífico aproximado del petróleo: 10,3 kcal/g).

Comentarios A.11-A.17.

Existe una controversia sobre la conveniencia de introducir la masa relativista. La mayoría de los autores de textos de física de primer curso de universidad (Feynman 1969, Alonso-Finn 1976, Giancoli 1985) optan por hacerlo, en tanto que los textos más avanzados no lo hacen. Algunos autores (Tipler 1985) señalan que no es conveniente hacerlo para evitar errores como la obtención de expresiones relativistas (por ejemplo, de la energía cinética) sustituyendo la masa en reposo por la relativista. Otros señalan que se logra una mayor concordancia con el enfoque covariante de la relatividad si se

adjudica una propiedad escalar invariante (bajo las transformaciones de Lorentz) a la partícula, su masa en reposo, y después se define el cuadrivector momento como el producto de ese invariante por el cuadrivector velocidad.

Consideramos (Gil *et al.* 1988), con los autores mencionados en primer lugar, que es conveniente introducir la masa relativista  $m$  por razones didácticas. Puede favorecer una interpretación correcta de la relación  $E = mc^2$ , al mostrar la variación de la masa con la velocidad como una variación que tiene lugar al comunicar energía cinética al cuerpo, es decir, como una consecuencia de la relación masa/energía. Permite, así mismo, comprender el comportamiento material de la luz (capacidad de transmitir cantidad de movimiento -efecto Compton- o de interaccionar gravitatoriamente). También se pueden aportar razones experimentales e históricas. En efecto, la variación de la masa con la velocidad aparece en muchas experiencias en las que tenemos partículas cargadas moviéndose a gran velocidad. Históricamente se abordó el tema de la variación de la masa con la velocidad antes de que Einstein formulase la teoría especial en 1905.

Las actividades A.11., A.12. y A.13. son coherentes con esta propuesta y muestran cómo la masa del cuerpo va aumentando con la velocidad y tiende a infinito cuando la velocidad  $v$  tiende a  $c$ . Sólo para velocidades  $v$  menores que  $0,2c$ , la masa es prácticamente constante. Esta es una nueva evidencia del carácter límite de la velocidad de la luz. Si se decide no utilizar la masa relativista, las actividades anteriores se pueden sustituir por las siguientes:

**A.11.** Representar la gráfica de  $p/p_0 = \gamma$ , donde  $\gamma = 1/(1 - (v^2/c^2))^{1/2}$  para los siguientes valores de la velocidad:  $0,1c$ ,  $0,2c$ ,  $0,3c$ ,  $0,5c$ ,  $0,7c$  y  $0,99c$ .

**A.12.** Indicar en qué condiciones puede considerarse prácticamente coincidentes la cantidad de movimiento  $mv$  de la física clásica y la cantidad de movimiento  $\gamma mv$  de la física relativista.

Para la deducción de expresión  $E = mc^2$  existen varios métodos. En unos casos (Steck y Rioux 1983, Rohrlich 1990) se analiza la emisión de dos fotones por un cuerpo, mientras que en otros (Feigenbaum y Mermin 1988, Strnad 1991, Smith 1992) se repiten o se adaptan los procedimientos utilizado por Einstein en 1905 y 1906. De cualquier forma, todos los métodos anteriores utilizan conceptos de mecánica clásica y electromagnetismo pero no los postulados de la relatividad especial. Por dicha razón, no se ha considerado conveniente utilizarlos porque el hecho de que la deducción sea puramente clásica, hace que se pierda el sentido físico de los nuevos conceptos de la física relativista (Moore 1991). Por otra parte, Galili y Kaplan (1997) recomiendan la utilización de las leyes de conservación de la energía y de la cantidad de movimiento en sistemas de referencia diferentes al del laboratorio.

En la actividad A.15. vemos que para el cálculo se pueden utilizar los valores de  $m/m_0$  determinados en la actividad A.13 (10; 1,4; 1,2; 1,12 y 1,05, respectivamente). La utilización de las expresiones clásicas depende de la relación entre la energía cinética y la energía en reposo (511 keV). Como ésta es pequeña, bastan velocidades de  $0,1c$  para encontrar condiciones relativistas.

Para resolver la actividad A.16 partimos de las relaciones  $p = m_0 v / (1 - v^2/c^2)^{1/2}$  y  $E = m_0 c^2 / (1 - v^2/c^2)^{1/2}$ . Un procedimiento simple es combinar ambas expresiones de forma que  $1 - v^2/c^2$  aparezca en el numerador. Para ello multiplicamos  $p$  por  $c$ , elevamos ambas expresiones al cuadrado y las restamos. Obtendremos  $E^2 - (pc)^2 = (m_0 c^2)^2$  o bien  $E^2 = (m_0 c^2)^2 + (pc)^2$ .

Con referencia a la actividad A.17. es preciso salir al paso de una confusión muy extendida. Consiste en concebir la relación  $E = mc^2$  como expresión de una posible

conversión o transformación de masa en energía ("desmaterialización") y viceversa. Como señala Warren (1976): "La falsedad más común en la relación de Einstein es inferir que la masa puede convertirse en energía y viceversa: 'En ciertos procesos la masa puede ser convertida en una cantidad equivalente de energía'. Se puede asumir que los autores quieren decir que inicialmente se tiene una cantidad de masa y no de energía. Entonces la reacción cede energía y pierde masa. Esta idea es absolutamente contraria al principio de Einstein. De acuerdo con Einstein, si comenzamos con una masa  $m$ , ésta tiene un contenido de energía  $E = mc^2$ . Si esta energía se transforma en otra, existe todavía la misma cantidad de energía  $E$ , la cual tiene la misma masa  $m$ ". En resumen, la masa final es idéntica a la de partida y lo mismo sucede con la energía, por lo que ambas leyes de conservación son equivalentes.

## TEMA 6. ELEMENTOS DE FÍSICA CUÁNTICA

### 1. El efecto fotoeléctrico: los fotones

[...]

En su trabajo de 1905 sobre el efecto fotoeléctrico, Einstein planteó la hipótesis de que las ondas electromagnéticas son una distribución de "paquetes de energía" o cuantos -posteriormente fotones- cada uno de los cuales posee una energía proporcional a la frecuencia,  $E = h\nu$ , en donde  $h$  es una constante cuyo valor es  $6,6 \cdot 10^{-34}$  Js, denominada constante de Planck. Dicha constante fue introducida por este físico en 1900.

[...]

**A.6.** Siendo  $\nu$  la frecuencia de la radiación (superior a la frecuencia umbral  $\nu_0$  necesaria para que se presente el efecto fotoeléctrico) escribir, de acuerdo con la hipótesis anterior, una ecuación que ligue la energía del fotón incidente con la energía cinética del electrón liberado.

[...]

#### Comentarios A.6.

La actividad A.6. pretende que los alumnos planteen el principio de conservación de la energía en el efecto fotoeléctrico y lleguen a la ecuación de Einstein, deducida en 1905,  $h\nu = W + E_c$ , en la que  $h\nu$  representa la energía del fotón incidente,  $W$  el trabajo de extracción y  $E_c$  la energía cinética del electrón liberado. Cuando  $\nu = \nu_0$ , la energía cinética es cero y, por tanto,  $W = h\nu_0$ , lo que nos da otra expresión para la ecuación de Einstein  $E_c = h(\nu - \nu_0)$ .

### 2. Espectros atómicos y modelo de Bohr

[...]

**A.11.** Utilizando las ideas de Bohr, justificar los espectros de absorción y emisión.

[...]

#### Comentario A.11.

En la actividad A.11. los alumnos razonan que, al hacer incidir luz, los electrones sólo podrán absorber los fotones de energías iguales a las correspondientes a la transición de un valor energético o nivel a otro superior, de acuerdo con el principio de

conservación de la energía. De modo semejante, sólo emitirán fotones cuando pasen de un nivel a otro inferior. Así, la frecuencia de la radiación emitida es igual a la diferencia de energía entre niveles  $E_n - E_m = h\nu$ .

## TEMA 7. FÍSICA NUCLEAR Y DE PARTÍCULAS

[...]

### 2. Interacciones nucleares y energías de enlace

[...]

**A.10.** Comparar la masa isotópica del deuterio H-2 (2,01410 u) con las del H-1 (1,00783 u) y neutrón (1,00867 u) que lo constituyen. Justificar el resultado.

**A.11.** Calcular el valor en MeV de una unidad de masa atómica y utilizarlo para determinar la energía de enlace del O-16 (15,99491 u).

[...]

Comentarios A.10.-A.11.

La masa total de un átomo es siempre menor que la de los protones, neutrones y electrones constituyentes (para tener en cuenta la masa del electrón usamos la masa de H-1 en vez de la masa del protón). Esta diferencia entre las masas que, en el caso de la actividad A.10. es de 0,0024 u, recibe el nombre de defecto de masa ( $\Delta m$ ). ¿Cómo se puede explicar este hecho? La teoría de la relatividad lo aclara a partir de la relación entre la masa y la energía  $E = mc^2$ . Según esto, existe una proporcionalidad entre la energía que se libera cuando se unen los nucleones o la que se necesita para desintegrar el núcleo en sus componentes (energía de enlace  $E_b$ ) y el defecto de masa  $\Delta m$ , dada por  $E_b = \Delta mc^2$ .

Como el equivalente energético de una "uma" ( $1,66 \cdot 10^{-27}$  kg) es 931 MeV, valor que podemos pedir a los alumnos que calculen, la energía de enlace del deuterio será  $0,0024 \cdot 931 = 2,23$  MeV. Podemos estudiar, pues, la estabilidad de los núcleos con ayuda del concepto de energía de enlace que se puede calcular, en general por medio de la expresión  $E_b = (Zm_H + Nm_n - M_a)c^2$  siendo  $m_n$  la masa del neutrón,  $m_H$  la masa del átomo de hidrógeno y  $M_a$  la masa del átomo.

### 3.1. Modos de desintegración radiactiva

[...]

**A.15.** ¿Qué relación debe existir entre la masa del núcleo padre y la de las partículas resultantes para que se produzca la desintegración? En relación con esto, ¿por qué los núcleos emiten partículas  $\alpha$  y no cuatro nucleones?

**A.16.** Calcular la energía cinética de la partícula  $\alpha$  emitida cuando se desintegra el U-232 (232,0372 u) en Th-228 (228,0287 u).

[...]

Comentarios A.15. y A.16.

En la actividad A.15. la masa del núcleo padre debe ser mayor que la suma de las masas del núcleo hijo más la partícula  $\alpha$ . La diferencia de masas aparece en forma de energía cinética  $E_c$  que transporta principalmente la partícula  $\alpha$ . Si no se verifican los enunciados anteriores, no se produce la desintegración, porque se vulnera el principio de conservación de la energía. Por ello se emiten preferentemente partículas  $\alpha$ , dado que está muy firmemente ligada y su masa es mucho menor que la de los cuatro nucleones separados. La actividad A.16. es una aplicación numérica de una desintegración alfa.

[...]

**A.18.** ¿Qué energía cinética podríamos esperar que tuviera el electrón emitido en la desintegración beta del C-14? Masa del C-14: 14,00324 u; masa del N-14: 14,00307 u)

En la actividad anterior se ha puesto de manifiesto que el electrón emitido en la desintegración beta cabe esperar que tenga una energía de 0,16 MeV. Pero, de hecho, la energía de los electrones puede tomar cualquier valor entre 0 y 0,16 MeV. Parece que se viole la conservación de la energía. Así mismo se puso de manifiesto que la cantidad de movimiento y el momento angular tampoco se conservaban. ¿Qué otra solución alternativa se puede proponer?

Existen dos posibles soluciones. Bohr supuso que la energía no se conserva en los procesos microscópicos, aunque macroscópicamente sí se conserva. Ante la perspectiva de tener que abandonar estos principios tan bien fundamentados, los físicos optaron por otra solución. En 1930 Pauli supuso que durante la desintegración  $\beta$ , se emitía además del electrón una nueva partícula muy difícil de detectar, a la que Fermi dio posteriormente el nombre de **neutrino**, cumpliéndose  $n \rightarrow p + e^- + \nu_e$ .

Para explicar la inestabilidad del neutrón (y de otras partículas) Fermi tuvo que postular la existencia de una cuarta interacción fundamental en la naturaleza, a la que denominó **débil** (dado que su intensidad era menor que la correspondiente a las interacciones nuclear y electromagnética), responsable de dichas interacciones. Por otra parte, para que se conserve el número de leptones, la partícula emitida es un antineutrino, como veremos en el apartado de partículas.

[...]

Comentarios A.18.

La energía cinética de la desintegración propuesta en la actividad A.18. sería 0,16 MeV. En efecto, la masa del N-14 (que no es neutro ya que tiene seis electrones a su alrededor) más la masa del electrón emitido es la de un átomo neutro de N, por lo que la diferencia de masas es 0,00017 u, que corresponde a 0,16 MeV. Sin embargo, la experiencia muestra que la mayoría de los electrones emitidos tienen una energía cinética entre 0 y 0,16 MeV, lo que, aparentemente, constituye una violación del principio de conservación de la energía.

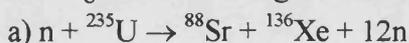
#### 4. Reacciones nucleares. Fisión y fusión

[...]

**A.25.** Señalar las leyes de conservación que se cumplen en una reacción nuclear. Aplicarlas para escribir las siguientes reacciones: a) la transmutación del N-14 al bombardearlo con He-4, en la que Rutherford observó la emisión de protones en 1919; b) el bombardeo de Be-9 con He-4, que condujo a Chadwick al descubrimiento del neutrón en 1932.

**A.26.** ¿Tendrá lugar la reacción  $^{13}\text{C}(p,n)^{13}\text{N}$  cuando la energía de los protones incidentes sea 2,0 MeV?

**A.27.** ¿Cuál es la energía liberada en las siguientes reacciones?:



[...]

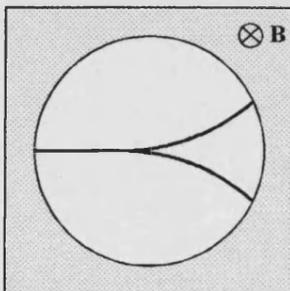
Comentarios A.25.-A.27.

La actividad A.25. permite deducir las leyes de conservación de las reacciones nucleares a partir de las que se vieron en el estudio de las transformaciones radiactivas, que pueden considerarse reacciones sin partícula incidente. Por tanto, se conserva la carga eléctrica, el número atómico Z y también el número total de nucleones A. También se conserva la energía, la cantidad de movimiento, el momento angular, etc. Aplicando las dos primeras leyes podemos escribir las reacciones  $^{14}\text{N}(^4\text{He},^1\text{H})^{17}\text{O}$  y  $^9\text{Be}(^4\text{He},n)^{12}\text{C}$ .

Las masas totales antes y después de la reacción de la actividad A.26. son, respectivamente,  $13,003355 + 1,007825 = 14,011180$  u y  $13,005739 + 1,008665 = 14,014404$  u (utilizamos la masa del átomo H-1 y no la del protón porque las masas de C-13 y N-13 incluyen los electrones y debemos tener un número igual de electrones en cada miembro de la reacción). Los productos tienen un exceso de masa de  $0,0032244.931,5 = 3,0$  MeV. De acuerdo con el principio de conservación de la energía, esta reacción necesita energía y los protones de 2,0 MeV no tienen la suficiente para que se produzca. De hecho, deberían tener algo más de 3 MeV, pues con esta energía se produciría el N-13 y el neutrón sin energía cinética y, por tanto, sin cantidad de movimiento, incumpliendo la ley de conservación de éste. La energía liberada en las reacciones de la actividad A.27. se resuelven de manera semejante. Basta calcular la masa de los reactivos y de los productos. La diferencia entre el primer resultado y el segundo es el defecto de masa que aparece como energía.

#### 5.1. Partículas y antipartículas

**A.33.** En 1932, Blackett y Ochialini descubrieron, en una placa fotográfica expuesta a los rayos cósmicos y sometida a un campo magnético, dos trazas que surgiendo de un punto común correspondían a un electrón y a una partícula hasta entonces desconocida. ¿Qué puede decirse de la naturaleza de dicha partícula?



**A.34.** ¿Cuál es la energía mínima de un fotón (y su longitud de onda) para que pueda producir un par  $e^-e^+$ ?

**A.35.** ¿Qué ocurrirá cuando un  $e^-$  se encuentre con un  $e^+$ ?

Comentarios A.33-A.35.

Al examinar la figura de la actividad A.33. se deduce que las dos curvas son similares excepto en el sentido de la fuerza de Lorentz. Se trata, por tanto, de una partícula de igual masa que el electrón y carga positiva. Dicha partícula es el positrón, la antipartícula del electrón, cuya existencia había sido predicha por Dirac. En este proceso desaparece un fotón produciéndose un par electrón-positrón. Este proceso resulta interesante como ejemplo de la relación masa/energía. De acuerdo con el principio de conservación de la energía, la del campo electromagnético se transforma en materia ordinaria. Usualmente se denomina producción de un par  $e^-e^+$ .

Para el cálculo de la energía propuesta en la actividad A.34. tendremos en cuenta que la energía mínima en reposo de un  $e^-$  o un  $e^+$  es  $m_0c^2$  por lo que se necesita para su producción una energía  $2m_0c^2$ . Teniendo en cuenta que la masa en reposo del  $e^-$  es  $0,00055 \text{ u} = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ ,  $E = 2m_0c^2 = 2 \cdot 0,00055 \cdot 931 = 1,02 \text{ MeV}$ . Por el principio de conservación de la energía, la correspondiente al fotón tendrá el valor  $1,02 \text{ MeV}$ . Como  $E = h\nu = hc/\lambda$ , despejando  $\lambda$  se obtiene  $\lambda = hc/E = 1,2 \cdot 10^{-10} \text{ m}$ . Luego la longitud de onda del fotón ha de ser muy corta. Tales fotones están en la región de los rayos X del espectro. El profesor puede añadir que otras partículas también pueden tener antipartículas, siendo la energía mínima para su producción mucho mayor. Así, la antipartícula del protón, el antiprotón, fue descubierta en 1955 por Segré y sus colaboradores. Dos años después fue descubierto el antineutrón.

En la actividad A.35. se debe tener en cuenta que, del mismo modo que los fotones pueden dar lugar a pares  $e^-e^+$ , el proceso inverso puede tener lugar cuando un  $e^-$  se encuentra con un  $e^+$  dando fotones. Se necesitan como mínimo dos fotones para que se conserve la cantidad de movimiento. Este proceso se denomina aniquilación. El profesor puede indicar a los estudiantes que este proceso es un ejemplo de la relación masa/energía y del principio de conservación de la energía. Aunque el  $e^+$  es estable, tiene una existencia muy corta puesto que se aniquila en presencia de materia. Esta es una característica general de nuestro Universo. Las antipartículas se aniquilan con sus correspondientes partículas. Afortunadamente este suceso no tiene lugar muy a menudo, puesto que supondría la aniquilación de la materia ordinaria. El hecho anterior permite concluir que en nuestro Universo las antipartículas son más raras que las correspondientes partículas.

## 5.2. Las interacciones como intercambio de partículas

[...]

**A.37.** Teniendo en cuenta los trabajos de Einstein, Compton, etc., sobre la luz, imaginar cómo interactúan dos cuerpos cargados. Comparar dicha idea de interacción con la clásica.

**A.38.** Calcular el tiempo durante el cual la energía  $E$  de las partículas cargadas puede venir afectada por una imprecisión equivalente a la energía del fotón, es decir, calcular el tiempo

que puede durar el intercambio de un fotón entre dos partículas cargadas y el alcance máximo de la interacción electromagnética.

Yukawa, apoyándose en la idea de la interacción electromagnética como intercambio de fotones, la extendió a la interacción nuclear considerándola como un intercambio de partículas con masa a las que denominó **mesones**.

**A.39.** A partir de las relaciones de indeterminación, calcular la masa de las partículas de Yukawa, teniendo en cuenta que su alcance es del orden de 1 fermi (tamaño del núcleo).

#### Comentarios A.37.-A.39.

En la actividad A.37. se puede partir de los dos problemas fundamentales de la acción a distancia newtoniana. Para evitar dicha idea, en el siglo XIX se introduce el concepto de campo que las masas o cargas crean a su alrededor. Si colocamos una carga  $q$  en un punto de un campo eléctrico  $E$ , aquella interactúa con el campo en dicho punto, evitando así el problema de la distancia. Por otra parte, si la carga  $Q$ , que crea el campo, cambia su estado de movimiento en un instante  $t$ , el campo en los puntos circundantes deberá cambiar también pero con un retardo  $t' = t + r/c$  siendo  $r$  la distancia del punto a la carga  $Q$ , lo que elimina el carácter instantáneo de la interacción newtoniana.

Posteriormente, vimos que el campo electromagnético está constituido por fotones, por lo que cabe pensar que la interacción entre dos partículas cargadas suponga el intercambio de fotones. Sin embargo, si una partícula cargada emite un fotón, la energía del sistema aumenta en una cantidad  $h\nu$ , lo que contradice el principio de conservación de la energía. Sin embargo, la física cuántica lo explica mediante las relaciones de indeterminación y proporciona, al mismo tiempo, una estimación del alcance de las interacciones.

La actividad A.38. se puede resolver por medio de las relaciones de indeterminación de Heisenberg. De acuerdo con éstas, la energía de una partícula puede venir afectada por una indeterminación  $\Delta E$ , durante un tiempo, debiendo cumplirse que  $\Delta t = h/\Delta E$ , tanto mayor cuanto menor sea la energía  $h\nu$  del fotón intercambiado. El alcance  $r = c\Delta t = hc/\Delta E$  puede tomar cualquier valor por grande que sea, lo que equivale a decir que el alcance de la interacción electromagnética es infinito. Es decir, cuanto más alejadas estén las dos partículas menor es la energía de los fotones que pueden intercambiar, lo que justifica la disminución de la intensidad con la distancia.

Si consideramos en la actividad A.39. que la masa del protón o del neutrón que interactúa se ve afectada por una indeterminación igual a la masa del mesón durante el tiempo  $\Delta t$  permitido por las relaciones de indeterminación, tenemos  $\Delta t = h/mc^2$ . Teniendo en cuenta que la velocidad de los mesones ha de ser inferior a la de la luz, el límite para la distancia recorrida será  $r = h/mc$  y, por tanto, si  $r = 1 \text{ fm}$ ,  $m = 130 \text{ MeV}/c^2$ . En 1937 se descubrió el muón ( $mc^2 = 105 \text{ MeV}$ ), creyéndose que era la partícula de Yukawa, pero en 1946 se comprobó que los muones no interaccionan nuclearmente y, poco tiempo después, se descubrió el pión ( $mc^2 = 140 \text{ MeV}$ ), que se consideró el mediador de la interacción nuclear. En la década de los 70 se han descubierto aspectos de la interacción fuerte que no encajan en la teoría de Yukawa, como se indica en el subapartado 5.3. "Partículas e interacciones".

## ANEXO IV

### LIBROS DE TEXTO REVISADOS

AUTORES	TÍTULO	NIVEL	EDITORIAL	AÑO
Aguilar, J <i>et al.</i>	Física y Química	BUP. 2º curso	Anaya	1981
Arriola, A. <i>et al.</i>	Energía 2	BUP. 2º curso	SM	1995
Bascones, F <i>et al.</i>	Física y Química	BUP. 2º curso	Edelvives	1990
Beltrán, J. <i>et al.</i>	Física y Química	BUP. 2º curso	Anaya	1985
Cacho, F <i>et al.</i>	Física y Química	BUP. 2º curso	Santillana	1976
Candel, A. <i>et al.</i>	Física y Química	BUP. 2º curso	Anaya	1989
L. Lasheras, A. <i>et al.</i>	Positrón	BUP. 2º curso	Vicens-Vives	1985
Marín, F.	Física y Química	BUP. 2º curso	Alhambra	1982
Nagore, E. <i>et al.</i>	Física y Química	BUP. 2º curso	ECIR	1976
Ontañón, G. <i>et al.</i>	Laser 2	BUP. 2º curso	Bruño	1991
-----	Física y Química	FP1. 1º curso	Editex	1979
Casas, J.M.	Física y Química	FP1. 1º curso	Bruño-Edebé	1975
G. Lazpita, J.F.	Física y Química	FP1. 1º curso	Larrauri	1981
G. Lazpita, J.F.	Física y Química	FP1. 2º curso	Larrauri	1982
L. Lasheras, A. <i>et al.</i>	Fuerza	FP1. 1º curso	Vicens-Vives	1982
Ontañón, G.	Física y Química	FP1. 2º curso	Bruño-Edebé	1976
Aguilar, J <i>et al.</i>	Física y Química	BUP. 3º curso	Anaya	1982
Aragó, C. <i>et al.</i>	Física y Química	BUP. 3º curso	Santillana	1977
Beltrán, J. <i>et al.</i>	Física y Química	BUP. 3º curso	Anaya	1977
Candel, A. <i>et al.</i>	Física y Química	BUP. 3º curso	Anaya	1989
del Barrio, J.I. <i>et al.</i>	Energía 3	BUP. 3º curso	SM	1994
L. Lasheras, A. <i>et al.</i>	Spin	BUP. 3º curso	Vicens-Vives	1988
Latorre, M. <i>et al.</i>	Física y Química	BUP. 3º curso	Edelvives	1981
Miralles, L. <i>et al.</i>	Física y Química	BUP. 3º curso	ECIR	1978
Ontañón, G. <i>et al.</i>	Laser 3	BUP. 3º curso	Bruño	1991

Aguilar, J. <i>et al.</i>	Física	COU	Anaya	1978
Agullés, J. <i>et al.</i>	Física	COU	Magisterio E.	1979
Candel, A. <i>et al.</i>	Física	COU	Anaya	1989
Casanova, J. <i>et al.</i>	Física	COU	Santillana	1982
Caturla, E. <i>et al.</i>	Quark	COU	Vicens-Vives	1982
L. Rupérez, F. <i>et al.</i>	Energía	COU	SM	1993
Llorís, A. <i>et al.</i>	Física	COU	S.M.	1979
M. Lorenzo, A. <i>et al.</i>	Física	COU	Bruño	1989
Peña, A. <i>et al.</i>	Física	COU	McGraw Hill	1989

---

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDULLAHLL, A. y SCAIFE, J., 1997, Using interviews to assess children's understanding of science concepts, *School Science Review*, 78, 79-84.

ADAMS, B., 1988, Energy: transfer or conversion?, *School Science Review*, 69, 602-603.

ADLER, C.G., 1987, Does mass really depend on velocity, dad?, *American Journal of Physics*, 55 (8), 739-743.

ALBERT, E., 1978, Development of the concept of heat in children, *Science Education*, 62 (3), 389-399.

ALONSO, M., 1990, On the Meaning of Temperature-Comment I by Alonso, *The Physics Teacher*, 28, 441.

ALONSO, M. y FINN, E. J., 1976, *Física*, Vol. 1, Fondo Educativo Interamericano: Bogotá.

ALONSO, M. y FINN, E. J., 1995, An Integrated Approach to Thermodynamics in the Introductory Physics Course, *The Physics Teacher*, 33, 296-310.

ALONSO, M. y FINN, E.J., 1997, On the notion of internal energy, *Physics Education*, 32 (4), 256-264.

ARNOLD, M., 1994, Children's and lay adults' views about thermal equilibrium, *International Journal of Science Education*, 16 (4), 405-419.

ARONS, A.B., 1989, Developing the Energy Concepts in Introductory Physics, *The Physics Teacher*, 27, 506-517.

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

AUSUBEL, D. P., 1978. *Psicología educativa. Un punto de vista cognoscitivo*. Trillas: México.

AZCÁRATE, G.C., 1990, *La velocidad: introducción al concepto de derivada*, Tesis doctoral. Universidad Autónoma de Barcelona.

- BAIERLEIN, R., 1990a, The Meaning of Temperature, *The Physics Teacher*, 28, 94-96.
- BAIERLEIN, R., 1990b, On the Meaning of Temperature-Baierlein's Response to Alonso and Munley, *The Physics Teacher*, 28, 442-444.
- BAIERLEIN, R., 1991, Teaching  $E = mc^2$ , *The Physics Teacher*, 29 (3), 170-175.
- BASTAI PRAT, A., DOMINIJANNI, M. y QUASSIATI, B., 1984, Il problema dell'energia: sperimentazione di alcune unità didattiche, *La Fisica nella Scuola*, 17 (2), 68-73.
- BAUMAN, R.P., 1992a, Physics that Textbooks Writers Usually Get Wrong-I. Work, *The Physics Teacher*, 30, 264-269.
- BAUMAN, R.P., 1992b, Physics that Textbooks Writers Usually Get Wrong-II. Heat and Energy, *The Physics Teacher*, 30, 353-356.
- BAUMAN, R.P., 1994, Mass and Energy: The Lower-Energy Limit, *The Physics Teacher*, 1994, 32, 340-342.
- BÉCU-ROBINAULT, K. y TIBERGHIE, A., 1998, Integrating experiments into the teaching of energy, *International Journal of Science Education*, 20 (1), 99-114.
- BELTRÁN, J., FURIÓ, C., GIL, D., GIL, G., GRIMA, M<sup>a</sup> J., LLOPIS, R., SÁNCHEZ, A., 1977, *Física y Química 3<sup>o</sup>*. Anaya: Madrid.
- BELLOMONTE, L. y SPERANDEO-MINEO, R.M., 1997, A statistics approach to the second law of thermodynamics using a computer simulation, *European Journal of Physics*, 18, 321-326.
- BERKSON, W., 1985, *Las teorías de los campos de fuerza*, Alianza Universidad: Madrid.
- BEVILACQUA, F. y GIANNETTO, E., 1998, The History of Physics and European Physics Education, en Fraser, B.J. y Tobin, K.G. (eds.), *International Handbook of Science Education*, Kluwer Academic Publishers.
- BEYNON, J., 1994, A few thoughts on energy and mass, *Physics Education*, 29, 86-88.
- BICKERSTAFF, R.P. y PATSAKOS, G., 1995, Relativistic generalizations of mass, *European Journal of Physics*, 16, 63-66.
- BLISS, J. y OGBORN, J., 1985, Children's choices of uses of energy, *European Journal of Science Education*, 7 (2), 195-203.
- BOOHAN, R. y OGBORN, J., 1996, Differences, energy and change: a simple approach through pictures, *School Science Review*, 78, 13-19.
- BRIDGMAN, P.W., 1941, *The Nature of Thermodynamics*, Harvard University Press: Cambridge, Massachusetts.

- BROOK, A. y WELLS, P., 1988, Conserving the circus?, *Physics Education*, 23, 80-85.
- BRUSH, S.G., 1974, Should the History of Science be Rated X?, *Science*, 18, 1164-1172.
- BURBULES, N.C., 1991, Science education and philosophy of science: congruence or contradiction?, *International Journal of Science Education*, 13 (3), 227-241.
- CABALLER, M.J. et al., 1993, *Ciencias de la naturaleza, 4º curso*, M.E.C.: Madrid.
- CALATAYUD, M.L. et al., 1988, *La construcción de las ciencias físico-químicas*, Nau Llibres: Valencia.
- CANDEL, A. et al., 1989, *Física COU*, Anaya: Madrid.
- CÁRDENAS, M. y RAGOULT DE LOZANO, S., 1996, Explicaciones de procesos termodinámicos a partir del modelo corpuscular: una propuesta didáctica, *Enseñanza de las Ciencias*, 14 (3), 342-349.
- CARR, M. y KIRKWOOD, V., 1988, Teaching and learning about energy in New Zealand secondary school junior science classrooms, *Physics Education*, 1988, 23, 87-91.
- CARRASCOSA, J., 1985, Errores conceptuales en la enseñanza de la física y la química: una revisión bibliográfica, *Enseñanza de las Ciencias*, 3 (3), 230-234.
- CARRASCOSA, J., 1987, *Tratamiento didáctico en la enseñanza de las ciencias de los errores conceptuales*. Tesis doctoral. Universidad de Valencia.
- CARRASCOSA, J. y GIL, D., 1985, La metodologia de la superficialitat i l'aprenentatge de les ciencies, *Enseñanza de las Ciencias*, 3 (2), 113-120.
- CONFORTO, A.M., 1984, Energy options: A practical work project for the school, *International Journal of Science Education*, 6 (3), 227-234.
- CROOKES, J., 1982, The nature of personal commitment in change in explanations, *Seminar on Investigating Children's Existing Ideas about Science*, School of Education, Universidad de Leicester.
- DE SOUSA, C.A. y PINA, E.P., 1997, Aspects of mechanics and thermodynamics in introductory physics: an illustration in the context of friction and rolling, *European Journal of Physics*, 18, 334-337.
- DOMÉNECH, A., 1998, El debate sobre la masa relativista: el problema definicional y otros aspectos epistemológicos, *Enseñanza de las Ciencias*, 16 (2), 331-339.
- DRIVER, R. y BELL, B., 1986, Students' thinking and the learning of science: a constructivist view, *School Science Review*, 67, 443-456.

DRIVER R., GUESNE, E. y TIBERGHIE, A., 1992, *Ideas científicas en la infancia y la adolescencia*, Morata y M.E.C: Madrid.

DRIVER, R. y WARRINGTON, L., 1985, Students' use of the principle of energy conservation in problem situations, *Physics Education*, 20, 171-176.

DUGAS, R., 1988, *A history of mechanics*, Dover: Nueva York.

DUIT, R., 1981, Understanding Energy as a Conserved Quantity-Remarks on the Article by R. U. Sexl, *European Journal of Science Education*, 3 (3), 291-301.

DUIT, R., 1984, Learning the energy concept in school-empirical results from The Philippines and West Germany, *Physics Education*, 19, 59-66.

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

DUIT, R., 1987b, Der 2.Hauptsatz der Thermodynamik-ein Thema für alle Schulstufen, *Naturwissenschaften im Unterricht-Physik/Chemie*, 35 (24), 140-146.

DUSCHL, R.A., 1994, Research on the history and philosophy of science, en *Handbook of Research on Science Teaching and Learning*, D.L. Gabel.

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

ELLSE, M., 1989, Transferring not transforming energy, *School Science Review*, 70, 123-124.

ENGEL, E. y DRIVER, R., 1986, A study of consistency in the use of the students' conceptual frameworks across different task contexts, *Science Education*, 70 (4), 473-496.

ENGEL CLOUGH, E. y DRIVER, R., 1985, Secondary students' conceptions of the conduction of heat: bringing together scientific and personal views, *Physics Education*, 20, 176-182.

ERICKSON, G., 1979, Children's conceptions of heat and temperature, *Science Education*, 63 (2), 221-230.

ERICKSON, G., 1980, Children's viewpoints of heat: A second look, *Science Education*, 64 (3), 323-336.

ERLICHSON, H., 1984, Internal energy in the first law of thermodynamics, *American Journal of Physics*, 52 (7), 623-625.

ERLICHSON, H., 1996, Christiaan Huygens' discovery of the center of oscillation formula, *American Journal of Physics*, 64 (5), 571-574.

- ERLICHSON, H., 1997, The young Huygens solves the problem of elastic collisions, *American Journal of Physics*, 65 (2), 149-154.
- ERLICHSON, H., 1999, Sadi Carnot, 'Founder of the Second Law of Thermodynamics', *European Journal of Physics*, 20, 183-192.
- FADNER, W.L., 1988, Did Einstein really discover " $E = mc^2$ "?, *American Journal of Physics*, 56 (2), 114-122.
- FALK, G., HERRMAN, F. y SCHMID, B., 1983, Energy forms or energy carriers?, *American Journal of Physics*, 51, 1074-1077.
- FAROUKI, N., 1994, *La relatividad*, Debate: Madrid.
- FEIGENBAUM, M.J. y MERMIN, N.D., 1988,  $E = mc^2$ , *American Journal of Physics*, 56(1), 18-21.
- FEYNMAN, R.P., LEIGHTON, R.B. y SANDS, M., 1969, *The Feynman Lectures on Physics*, Vol. I, II y III, Addison-Wesley: Reading, Massachusetts.
- FILON, P., 1991, Histoire des sciences et réflexion épistémologique des élèves, *Aster*, 12, 91-120.
- FOX, D.J., 1981, *El proceso de investigación en la educación*, EUNSA: Pamplona.
- FURIÓ, C. y GIL, D., 1978, *El programa-guía: una propuesta para la clase activa*. ICE. Universidad de Valencia: Valencia.
- FURIÓ, C. y GUIASOLA, J., 1993, ¿Puede ayudar la historia de la ciencia a entender por qué los estudiantes no comprenden los conceptos de carga y potencial eléctrico?, *Revista Española de Física*, 7 (3), 46-50.
- FURIÓ, C. y GUIASOLA, J., 1999, Concepciones alternativas y dificultades de aprendizaje en electrostática. Selección de cuestiones elaboradas para su detección y tratamiento, *Enseñanza de las Ciencias*, 17 (3), 441-452.
- GAGLIARDI, R., 1988, Cómo utilizar la historia de las ciencias en la enseñanza de las ciencias, *Enseñanza de las Ciencias*, 6 (3), 291-296.
- GAGLIARDI, R. y GIORDAN, A., 1986, La historia de las ciencias: una herramienta para la enseñanza, *Enseñanza de las Ciencias*, 4 (3), 253-258.
- GALILI, I. y KAPLAN, D., 1997, Extending the application of the relativity principle: Some pedagogical advantages, *American Journal of Physics*, 65 (4), 328-335.
- GALLAGHER, J.J., 1991, Prospective and Practicing Secondary School Science Teachers' Knowledge and Beliefs about the Philosophy of Science, *Science Education*, 75 (1), 121-133.

- GARCIA, A., 1988, *La contaminación acústica*, Servei de Publicacions, Universitat de València: Valencia.
- GARDNER, M., 1986, *La explosión de la relatividad*, Salvat: Barcelona.
- GETTYS, W.E., KELLER, F.J. y SKOVE, M.J., 1993, *Física*, McGraw-Hill: Madrid.
- GIANCOLI, D.C., 1984, *Física General*, Vol. 2, Prentice-Hall Hispanoamericana: México.
- GIANCOLI, D.C., 1985, *Física*, Vol I y II, Reverté: Barcelona.
- GIL, D., 1983, Tres paradigmas básicos en la enseñanza de las ciencias, *Enseñanza de las Ciencias*, 1, 26-34.
- GIL, D., 1986, La metodología científica y la enseñanza de las ciencias: unas relaciones controvertidas. *Enseñanza de las Ciencias*, 4 (2), 111-121.
- GIL, D., 1993, Contribución de la historia y de la filosofía de las ciencias al desarrollo de un modelo de enseñanza/aprendizaje como investigación, *Enseñanza de las Ciencias*, 11 (2), 197-212.
- GIL, D. y CARRASCOSA, J., 1985, Science learning as a conceptual and methodological change, *European Journal of Science Education*, 7, 231-236.
- GIL, D., CARRASCOSA, J., FURIÓ, C. y MARTÍNEZ TORREGROSA, J., 1991, *La enseñanza de las ciencias en la educación secundaria*, ICE-Horsori: Barcelona.
- GIL, D., FURIÓ, C. y CARRASCOSA, J., 1996, *Curso de formación de profesores de ciencias*, M.E.C., U.N.E.D. y U.A.B.: Madrid.
- GIL, D. y MARTÍNEZ TORREGROSA, J., 1983, A model for problem solving in accordance with scientific methodology, *European Journal of Science Education*, 5, 447-455.
- GIL, D. y MARTÍNEZ TORREGROSA, J., 1984, Problem-Solving in Physics: a critical analysis, *Research on Physics Education*, Editions du CRNS: París.
- GIL, D. y MARTÍNEZ TORREGROSA, J., 1987, *La resolución de problemas de Física*, M.E.C: Madrid.
- GIL, D., SENENT, F. y SOLBES, J., 1986, Análisis crítico de la Física moderna, *Revista de Enseñanza de la Física*, 2, 16-21.
- GIL, D., SENENT, F. y SOLBES, J., 1988,  $E = mc^2$ , la ecuación más famosa de la física: Una incomprendida, *Revista Española de Física*, 2 (2), 53-55.
- GIL, D. y SOLBES, J., 1993, The introduction of modern physics: overcoming a deformed vision of science, *International Journal of Science Education*, 15 (3), 255-260.

- GOLDSTEIN, H., 1970, *Mecánica clásica*, Aguilar: Madrid.
- GRUENDER, C.D. y TOBIN, K.G., 1991, Promise and Prospect, *Science Education*, 75 (1), 1-8.
- GUISASOLA, J., 1996, *La enseñanza aprendizaje de la electrostática como investigación en el Bachillerato*. Tesis doctoral. Universidad del País Vasco.
- HAKE, R.R., 1993, Introducing work, *The Physics Teacher*, 31, 197.
- HANNIBAL, L., 1991, On the concept of energy in classical relativistic physics, *European Journal of Physics*, 12, 283-285.
- HARMAN, P.M., 1990, *Energía, fuerza y materia*, Alianza Universidad: Madrid.
- HAWES, J.L., 1981, Matter for illumination, *Physics Education*, 16, 178-185.
- HEATH, N.E., 1976, Heating, *Physics Education*, 11, 389.
- HERNÁNDEZ, J., 1997, *Dificultades de aprendizaje sobre la naturaleza corpuscular de la materia en la enseñanza secundaria. Una propuesta didáctica para superarlas*. Tesis doctoral. Universidad de Valencia.
- HIERREZUELO, J. (coord.) et al., 1995, *Ciencias de la Naturaleza*, Vol. 4, Edelvives y M.E.C.: Madrid.
- HIERREZUELO, J. y MONTERO, A., 1989, *La ciencia de los alumnos: su utilización en la didáctica de la Física y Química*, Laia-M.E.C.:Barcelona, Madrid.
- HOFFMANN, B., 1985, *La relatividad y sus orígenes*, Labor: Barcelona.
- HOLTON, G., 1979, *Introducción a los conceptos y teorías de las ciencias físicas*, Reverté: Barcelona.
- IRESON, G., Introducing relativistic mass: the 'ultimate speed experiment' of William Bertozzi revisited, *Physics Education*, 33 (3), 182-186.
- IRWIN, A., 1996, A survey of the historical aspects of science in school textbooks, *School Science Review*, 78, 101-107..
- IRWIN, A., 1997, Theories of burning: a case study using a historical perspective, *School Science Review*, 78, 31-38.
- JENELTEN ALLKOFER, C., 1979, *Energievorstellungen von 5- bis 16-jährigen bei physikalischen Experimenten*, Universidad de Kiel: Kiel.
- JUNGNICKEL, C. y McCORMMACH, R., 1990, *Intellectual mastery of nature*, Vol. 1 y 2, The University of Chicago Press: Chicago.
- KEMP, H.R., 1984, The concept of energy without heat or work, *Physics Education*, 19(3), 234-240.

- KESIDOU, S. y DUIT, R., 1993, Students' Conceptions of the Second Law of Thermodynamics-An interpretative Study, *Journal of Research in Science Teaching*, 30 (1), 85-106.
- KIRKWOOD, V. y CARR, M., 1989, A valuable teaching approach; some insights from LISP (Energy), *Physics Education*, 24 (6), 332-334.
- KLEIN, M.J., 1972, Use and Abuse of Historical Teaching in Physics, en Brush, S.G. y King, A.L. (eds.), *History in the Teaching of Physics*, University Press of New England; Hanover.
- KOLBENSTVEDT, H., 1995, The mass of a gas of massless photons, *American Journal of Physics*, 63 (1), 44-46.
- KUHN, T.S., 1975, *La estructura de las revoluciones científicas*, Fondo de cultura económica: México.
- KUHN, T.S., 1982, *La tensión esencial*, Fondo de cultura económica: Madrid.
- LANDAU, L.D. y LIFSHITZ, E.M., 1973, *Teoría clásica de los campos*, Reverté: Barcelona.
- LANG DA SILVEIRA, F. y MOREIRA, M.A., 1996, Validación de un test para verificar si el alumno posee concepciones científicas sobre calor, temperatura y energía interna, *Enseñanza de las Ciencias*, 14 (1), 75-86.
- LEBOUTET, L., 1973, *L'Enseignement de la Physique*, PUF: París.
- LEFF, H.S., 1996, Thermodynamic entropy: The spreading and sharing of energy, *American Journal of Physics*, 64 (10), 1261-1271.
- LIJNSE, P., 1990, Energy between the Life-World of Pupils and the World of Physics, *Science Education*, 74 (5), 571-583.
- LÓPEZ GAY, R., 1987, Las representaciones de los alumnos como punto de partida. El caso de la energía, *Investigación en la escuela*, 3, 47-54.
- LLORÉNS, J.A., 1987, *Propuesta y aplicación de una metodología para el análisis de la adquisición de conceptos en la introducción a la teoría atómico-molecular: percepción de los hechos experimentales, sus representaciones y el uso del lenguaje en alumnos de formación profesional y bachillerato*. Tesis doctoral. Universidad de Valencia.
- MACE, W.K., 1988, Energy transfer, *School Science Review*, 69, 169-170.
- MAK, S-Y. y YOUNG, K., 1987, Misconceptions in the teaching of heat, *School Science Review*, 68, 464-470.
- MARBURGER, J.H. III, 1996, What is a Photon?, *The Physics Teacher*, 34, 482-486.

- MARIANI, M.C. y OGBORN, J., 1990, Common-sense reasoning about conservation: the role of action, *European Journal of Science Education*, 12(1), 51-66.
- MARTÍNEZ, J.M. y PÉREZ, B.A., 1997, Estudio de propuestas alternativas en la enseñanza de la termodinámica, *Enseñanza de las Ciencias*, 15 (3), 287-300.
- MARTÍNEZ TORREGROSA, J., 1987, *La resolución de los problemas de Física como investigación: un instrumento de cambio metodológico*. Tesis doctoral. Universitat de València.
- MATTHEWS, M.R., 1990, History, Philosophy and Science Teaching: A Rapprochement, *Science Education*, 18, 25-51.
- MATTHEWS, M.R., 1994, Historia, filosofía y enseñanza de las ciencias: la aproximación actual, *Enseñanza de las Ciencias*, 12 (2), 255-277.
- MATTHEWS, M.R., 1991, Un lugar para la historia y la filosofía en la enseñanza de las ciencias, *Comunicación, Lenguaje y Educación*, 11-12, 141-155.
- MAXWELL, J.C., 1877, *Matter and motion*, reedición de 1991, Dover: Nueva York.
- MCCLELLAND, G., 1989, Energy in school science, *Physics Education*, 24 (3), 162-164.
- MCDERMOTT, L.C., 1984, Research on conceptual understanding in mechanics, *Physics Today*, 7, 24-34.
- MICHINEL, J.L. y D'ALESSANDRO, A., 1994, El concepto de energía en los libros de textos: de las concepciones previas a la propuesta de un nuevo sublenguaje, *Enseñanza de las Ciencias*, 12 (3), 369-380.
- MONTANERO, M., SUERO, M.I. y PÉREZ, A.L., 1996, *Problemas de dinámica: Heurístico para el cambio conceptual*, Universidad de Extremadura: Cáceres.
- MOORE, G.S.M., 1991, A simple derivation of  $E = mc^2$ , *Physics Education*, 26, 8.
- MOORE, G.S.M., 1993, General, restricted and misleading forms of the First Law of thermodynamics, *Physics Education*, 28 (4), 228-237.
- NE'EMAN, Y. y KIRSH, Y., 1988, *Los cazadores de partículas*, Gedisa: Barcelona.
- NEWELL, A. y ROSS, K.A., 1996, Children's conception of thermal conduction - or the story of a woollen hat, *School Science Review*, 78, 33-38.
- NICHOLLS, G. y OGBORN, J., 1993, Dimensions of children's conceptions of energy, *International Journal of Science Education*, 1993, 15 (1), 73-81.
- NOVAK, D.J., 1982, *Teoría y práctica de la educación*, Alianza Universidad: Madrid.
- NOVAK, D.J. y GOWIN, D.B., 1984, *Learning how to learn*, Cambridge University Press: Cambridge.

- NUFFIELD, 1974, *Física básica*, Reverté: Barcelona.
- NUFFIELD, 1990, *Revised Physics*, Longman: Harlow.
- O'BRIEN PRIDE, T., VOKOS, S. y MCDERMOTT, L.C., 1998, The challenge of matching learning assessments to learning goals: An example from the work-energy and impulse-momentum theorems, *American Journal of Physics*, 66 (2), 147-157.
- OGBORN, J., 1986, Energy and fuel: the meaning of 'the go of things', *School Science Review*, 67, 30-35
- OKUN, L.B., 1989, The concept of mass, *Physics Today*, 42 (6), 31-36.
- OPEN UNIVERSITY, 1979, *Research Methods in Educational and Social Science*, Milton: Keynes.
- ORPAZ, N., DORI, E. y SHADMI, Y., 1979, *Physics Teaching to the Disadvantages: Why and How*, The Physics-Chemistry Project, Curriculum Center, Ministry of Education and Culture: Jerusalén.
- OTERO, J., 1985, Assimilation problems in traditional representation of scientific knowledge, *European Journal of Science Education*, 7(4), 361-369.
- PAIS, A., 1984, *'El Señor es sutil...'*, Ariel: Barcelona.
- PAPP, D., 1961, *Historia de la física*, Espasa-Calpe: Madrid.
- PAYÁ, J., 1991, *Los trabajos prácticos en la enseñanza de la Física y la Química: un análisis crítico y una propuesta fundamentada*. Tesis doctoral. Universitat de València.
- PEÑA, A. y GARCÍA, J.A., 1996, *Física 2*, McGraw-Hill: Madrid.
- PÉREZ LANDAZÁBAL, M.C., FAVIERES, A., MANRIQUE, M.J. y VARELA, P., 1995, La energía como núcleo en el diseño curricular de la física, *Enseñanza de las Ciencias*, 13 (1), 55-65.
- Physical Science II (PS II), Preliminary Edition*, 1969, IPS Group, Educational Development Center: Newton, Massachusetts.
- PINTÓ, M.R., 1991, *Algunos conceptos implícitos en la primera y la segunda Leyes de la Termodinámica: una aportación al estudio de las dificultades de su aprendizaje*. Tesis doctoral. Universitat Autònoma de Barcelona.
- PLANCK, M., 1885, *Das Prinzip von der Erhaltung der Energie*, reedición de 1913, Teubner: Leipzig y Berlín.
- POON, C.H., 1986, Teaching field concept and potential energy at A-level, *Physics Education*, 21 (5), 307-316.
- POPE, M. y GILBERT, J., 1993, Personal experience and the construction of knowledge in science, *Science Education*, 67, 193-203.

- POSNER, G.J., STRIKE, K.A., HEWSON, P.W. y GERTZOG, W.A., 1982, Accomodation of a scientific conception: towards a theory of conceptual change, *Science Education*, 66, 211-227.
- POZO, J., 1989, *Teorías cognitivas del aprendizaje*, Morata: Madrid.
- POZO, J., 1992, *Psicología de la comprensión y el aprendizaje de las ciencias*, Ministerio de Educación y Ciencia: Madrid.
- PRIDEAUX, N., 1995, Different approaches to the teaching of the energy concept, *School Science Review*, 77, 49-57.
- PSSC, 1974, *Física, Guía del profesor*, Reverté: Barcelona.
- RESNICK, R. y HALLIDAY, D., 1965, *Física para estudiantes de ciencias e ingeniería*, Vol. I y II, CECSA: México.
- RESNICK, R., HALLIDAY, D. y KRANE, K.S., 1992, *Física*, Vol. I y II, CECSA: México
- RICHMOND, P.E., 1982, Teaching about energy, *Physics Education*, 17 (5), 193-194.
- ROHRLICH, F., 1990, An elementary derivation of  $E = mc^2$ , *American Journal of Physics*, 58(4), 348-349.
- ROSS, K.A., 1988, Matter scatter and energy anarchy, The Second Law of Thermodynamics is simply common experience, *School Science Review*, 69, 438-445.
- ROZIER, S. y VIENNOT, L., 1991, Students' reasoning in thermodynamics, *International Journal of Science Education*, 13 (2), 159-170.
- RUSSELL, B., 1989, *ABC de la relatividad*, Ariel: Barcelona.
- SALTIEL, E. y VIENNOT, L., 1985, ¿Qué aprendemos de las semejanzas entre las ideas históricas y el razonamiento espontáneo de los estudiantes?, *Enseñanza de las Ciencias*, 3, 137-144.
- SANDIN, T.R., 1991, In defense of relativistic mass, *American Journal of Physics*, 59 (11), 1032-1036.
- SANMARTÍ, N., 1989, *Estudio sobre las dificultades de los estudiantes en la comprensión de la diferenciación entre los conceptos de mezcla y compuesto*. Tesis doctoral. Universidad Autónoma de Barcelona.
- SAWICKI, M., 1996, What's Wrong in the Nine Most Popular Texts, *The Physics Teacher*, 34, 147-149.
- SCIS (Science Curriculum Improvement Study), 1971, *Energy Sources. Teacher's Guide*, Rand McNally: Chicago y Nueva York.
- SCHMID, G.B., 1982, Energy and its carriers, *Physics Education*, 17 (5), 212-218.

- SEARS, F.W., 1969, *Termodinámica*, Reverté: Barcelona.
- SEQUEIRA, M. y LEITE, L., 1991, Alternative Conceptions and History of Science in Physics Teacher Education, *Science Education*, 75 (1), 45-56.
- SERRAMONA J., 1980, *Investigación y estadística aplicada a la educación*, CEAC: Barcelona.
- SEXL, R.U., 1981, Some Observations Concerning the Teaching of the Energy Concept, *European Journal of Science Education*, 3 (3), 285-289.
- SHERWOOD, B.A., 1983, Pseudowork and real work, *American Journal of Physics*, 51 (7), 597-602.
- SHERWOOD, B.A. y BERNARD, W.H., 1984, Work and heat transfer in the presence of sliding friction, *American Journal of Physics*, 52 (11), 1001-1007.
- SMITH, R.T., 1992, Classical origins of "E = mc<sup>2</sup>", *Physics Education*, 27, 248-250.
- SOLAZ, J.J. y SANJOSÉ, V., 1992, El papel del péndulo en la construcción del paradigma newtoniano, *Enseñanza de las Ciencias*, 10(1), 95-100.
- SOLBES, J., 1986, *La introducción de los conceptos básicos de física moderna*. Tesis doctoral. Universitat de València.
- SOLBES, J., 1993, *Física*, Ministerio de Educación y Ciencia: Madrid.
- SOLBES, J. y MARTÍN, J., 1991, Análisis de la introducción del concepto de campo, *Revista Española de Física*, 5, 34-40.
- SOLBES, J. y NAVARRO, J., 1989, *Física moderna*, Conselleria de Cultura, Educación y Ciencia: Valencia.
- SOLBES, J. y TARÍN, F., 1996, *Física, 2º Bachillerato*, Octaedro: Barcelona.
- SOLBES, J. y TARÍN, F., 1998, Algunas dificultades en torno a la conservación de la energía, *Enseñanza de las Ciencias*, 16 (3), 387-397.
- SOLBES, J. y TRAVER, M.J., 1996, La utilización de la historia de las ciencias en la enseñanza de la física y la química, *Enseñanza de las Ciencias*, 14 (1), 103-112.
- SOLBES, J. y VILCHES, A., 1989, Interacciones ciencia/técnica/sociedad (CTS): un instrumento de cambio actitudinal, *Enseñanza de las Ciencias*, 7 (1), 14-20.
- SOLBES, J. y VILCHES, A., 1992, El modelo constructivista y las relaciones ciencia/técnica/sociedad, *Enseñanza de las Ciencias*, 10, 181-187.
- SOLBES, J. y VILCHES, A., 1997, STS Interactions and the Teaching of Physics and Chemistry, *Science Education*, 81, 377-386.

- SOLBES, J. VILCHES, A., CALATAYUD, M.L., HERNÁNDEZ, J., 1995, *Física y Química, 1º Bachillerato*, Octaedro: Barcelona.
- SOLÍS, R., 1984, Ideas intuitivas y aprendizaje de las ciencias, *Enseñanza de las Ciencias*, 2, 83-91.
- SOLOMON, J., 1983, Learning about energy: how pupils think in two domains, *European Journal of Science Education*, 5 (1), 49-59.
- SOLOMON, J., 1984, Alternative views of energy, *Physics Education*, 19, 56.
- SOLOMON, J., 1985, Teaching the conservation of energy, *Physics Education*, 20, 165-176.
- STECK, D.J. y RIOUX, F., 1983, An elementary derivation of mass-energy equivalence, *American Journal of Physics*, 51 (5), 461-462.
- STEINBERG, R.N., OBEREM, G.E. y MCDERMOTT, L.C., 1996, Development of a computer-based tutorial on the photoelectric effect, *American Journal of Physics*, 64 (11), 1370-1379.
- STRNAD, J., 1984, The second law of thermodynamics in a historical setting, *Physics Education*, 19 (2), 94-100.
- STRNAD, J., 1991, On mass and energy, *Physics Education*, 26, 6-8.
- STRUBE, P., 1988, The presentation of energy and fields in physics texts-a case of literary inertia, *Physics Education*, 23, 366-371.
- STYLIANIDOU, F., 1997, Children's learning about energy and processes of change, *School Science Review*, 79, 91-97.
- SUMMERS, M.K., 1982, Teaching heat-an analysis of misconceptions, *Science Teachers' Journal*, 10 (2), 25.
- SUMMERS, M.K., 1983, Teaching heat-an analysis of misconceptions, *School Science Review*, 64, 670.
- TATON, R. (ed), 1972, *Historia general de las ciencias*, Vol. 2, Destino: Barcelona.
- TATON, R. (ed), 1973, *Historia general de las ciencias*, Vol. 3, Destino: Barcelona.
- TAYLOR, E.F. y WHEELER, J.A., 1966, *Spacetime Physics*, Freeman: San Francisco.
- TAYLOR, M., 1989a, A criticism of the article on Energy by Mark Ellse, *School Science Review*, 70, 138-139.
- TAYLOR, M., 1989b, Transferring not transforming energy, *School Science Review*, 70, 124.
- TEJERINA, F., 1976, *Termodinámica*, Vol. 1 y 2, Alhambra: Madrid.

THOMAZ, M.F., MALAQUIAS, I.M., VALENTE, M.C. y ANTUNES, M.J., 1995, An attempt to overcome alternative conceptions related to heat and temperature, *Physics Education*, 30 (1), 19-26.

TIBERGHIEU, A., 1980, *Un exemple de restructuration de l'organisation conceptuelle à l'occasion d'un enseignement concernant la notion de chaleur*, Compte-rendus de Deuxièmes Journées sur l'Education Scientifique: Chamonix.

TIBERGHIEU, A. y BARBOUX, M., 1980, *Difficulté de l'acquisition de la notion de température par les élèves de 6ème*, Compte-rendus de Deuxièmes Journées sur l'Education Scientifique: Chamonix.

TIPLER, P.A., 1985, *Física moderna*, Reverté: Barcelona.

TIPLER, P.A., 1995, *Física*, Vol. 1 y 2, Reverté: Barcelona.

TOLEDO, B., ARRIASSECO, I. y SANTOS, G., 1997, Análisis de la transición de la física clásica a la relativista desde la perspectiva del "cambio conceptual", *Enseñanza de las Ciencias*, 15 (1), 79-90.

TRAVER, M.J., 1996, *La història de les ciències en l'ensenyament de la Física i la Química*. Tesis doctoral. Universitat de València.

TRIPLETT, G., 1973, Research on heat and temperature in cognitive development, *Journal of Children's Mathematic Behaviour*, 2, 27-43.

TRUMPER, R., 1990, Being constructive: an alternative approach to the teaching of the energy concept-part one, *European Journal of Science Education*, 12 (4), 343-354.

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

VAN HULS, C. y VAN DEN BERG, E., 1993, Teaching energy: a systems approach, *Physics Education*, 28, 146-153.

VAN ROON, P.H., VAN SPRANG, H.F. y VERDONK, A.H., 1994, 'Work' and 'Heat': on a road towards thermodynamics, *International Journal of Science Education*, 16 (2), 131-144.

VIENNOT, L., 1976, *Le Raisonnement Spontané en Dynamique Élémentaire*. Tesis doctoral. Herman: París.

VIENNOT, L., 1979, Spontaneous reasoning in elementary dynamics, *European Journal of Science Education*, 1 (2), 205-221.

VIGLIETTA, L., 1989, Il II principio della termodinamica in un corso de Fisica a livello di scuola secondaria superiore: una approccio macroscopico, Inserto speciale a *La fisica nella scuola*, 22, 5-43.

- VIGLIETTA, L., 1990, A more 'efficient' approach to energy teaching, *International Journal of Science Education*, 12 (5), 491-500.
- VILCHES, A., 1993, *Las interacciones ciencia, técnica, sociedad y la enseñanza de las ciencias físico-química*. Tesis doctoral. Universitat de València.
- VON ROON, P. H., VAN SPRANG, H. F. y VERDONK, A. H., 1994, 'Work' and 'Heat': on a road towards thermodynamics, *International Journal of Science Education*, 16 (2), 131-144.
- WANDERSEE, J.H., 1992, The Historicity of Cognition: Implications for Science Education Research, *Journal of Research in Science Teaching*, 29 (4), 423-434.
- WARREN, J.W., 1976, The mystery of mass-energy, *Physics Education*, 11, 52-54.
- WARREN, J.W., 1982, The nature of energy, *European Journal of Science Education*, 4 (3), 295-297.
- WARREN, J.W., 1983, Energy and its carriers, *Physics Education*, 18, 209-212.
- WARREN, J.W., 1986, At what stage should energy be taught?, *Physics Education*, 21, 154-156.
- WATTS, D.M., 1983, Some alternative views of energy, *Physics Education*, 18, 213-216.
- WHITAKER, M.A.B., 1976, Definitions of mass in special relativity, *Physics Education*, 11, 55-57.
- WHITAKER, M.A.B., 1979, History and Quasi-history in Physics Education, I, *Physics Education*, 14, 108-112.
- WHITAKER, M.A.B., 1979, History and Quasi-history in Physics Education, II, *Physics Education*, 14, 239-242.
- WHITE, T.R. y GUNSTONE, F.R., 1989, Metalearning and conceptual change, *International Journal of Science Education*, 11, 577-586.
- WHITTAKER, E., 1989, *A history of the theories of aether & electricity*, Dover: Nueva York.
- WILLIAMS, W.S.C., 1995, *Nuclear and Particle Physics*, Oxford University Press: Oxford.
- YAGER, R.E. y PENICH, J.E., 1986, Perception of four age groups toward science classes, teachers and the values of science, *Science Education*, 70, 355-363.
- ZEMANSKY, M.K., 1957, *Heat and Thermodynamics*, McGraw-Hill: Nueva York.
- ZEMANSKY, M.K., 1970, The use and misuse of the word 'heat' in physics teaching, *The Physics Teacher*, 8, 295-300.



## ÍNDICE DE AUTORES

- Adams, B., 130  
Albert, E., 26; 27; 141  
Alonso, M., 128; 140; 141; 142; 143;  
144; 145; 146; 147; 148; 150; 151;  
156; 157; 189; 285; 299  
Arnold, M., 27; 139  
Arons, A.B., 130; 133; 134; 136; 139;  
141; 142; 144; 145; 146; 147  
Ausubel, D. P., 122  
Azcarate, G.C., 122; 123
- Baierlein, R., 140; 155  
Bastai Prat, A., 137  
Bauman, R.P., 127; 128; 129; 130; 134;  
136; 140; 142; 144; 145; 146; 147  
Bécu Robinault, K., 268  
Beltrán, J., 156  
Bell, B., 18; 122; 123; 125  
Bellomonte, L., 290  
Berkson, W., 44  
Bernard, W.H., 134; 136; 144; 145;  
146; 147  
Bevilacqua, F., 30  
Bickerstaff, R.P., 80; 150; 152; 155  
Bliss, J., 21; 23  
Boohan, R., 139  
Bridgman, P.W., 20; 141  
Brook, A., 25; 69; 136; 137  
Brush, S.G., 30  
Burbules, N.C., 30
- Calatayud, M.L., 269  
Candel, A., 151  
Cárdenas, M., 24  
Carr, M., 22; 23; 24; 26; 69; 137  
Carrascosa, J., 19; 121; 123; 124  
Conforto, A.M., 137  
Crookes, J., 27
- D'Alessandro, A., 127  
De Sousa, C.A., 134
- Doménech, A., 151  
Driver R., 18; 21; 23; 24; 25; 27; 58;  
122; 123; 124; 125; 142  
Dugas, R., 32; 33; 34; 38; 40  
Duit, R., 20; 21; 22; 23; 24; 25; 26; 52;  
58; 69; 91; 94; 127; 130; 136; 138;  
268  
Duschl, R.A., 28
- Ellse, M., 130  
Engel, E., 27; 124; 142  
Engel Clough, E., 27  
Erickson, G., 26, 27  
Erlichson, H., 32; 33; 41; 146
- Fadner, W.L., 48; 49; 50  
Falk, G., 138  
Farouki, N., 150  
Feigenbaum, M.J., 300  
Feynman, R.P., 128; 138; 146; 149; 151;  
299  
Finn, E. J., 128; 140; 141; 142; 143;  
144; 145; 146; 147; 148; 150; 151;  
156; 157; 189; 285; 299  
Fox, D. J., 55; 163  
Furió, C., 18; 29; 125
- Gagliardi, R., 29; 30  
Galili, I., 300  
Garcia, A., 76  
García, J.A., 151  
Gardner, M., 150  
Gettys, W. E., 146  
Giancoli, D.C., 128; 140; 141; 142; 143;  
144; 145; 146; 150; 151; 157; 299  
Giannetto, E., 30  
Gil, D., 18; 19; 29; 63; 80; 123; 124;  
125; 129; 138; 142; 144; 155; 156;  
170; 293; 300  
Gilbert, J., 125  
Goldstein, H., 153

- Gowin, D.B., 64  
 Gruender, C.D., 30  
 Guesne, E., 18  
 Guisasola, J., 18; 29; 122; 123  
 Gunstone, F.R., 124
- Hake, R.R., 147  
 Halliday, D., 128; 129; 130; 134; 136;  
 140; 141; 142; 143; 145; 146; 147;  
 148; 150; 157  
 Hannibal, L., 153  
 Harman, P.M., 40; 44  
 Hawes, J.L., 157  
 Heath, N.E., 142  
 Hernández, J., 122; 123  
 Herrman, F., 138  
 Hierrezuelo, J., 18; 26; 137  
 Holton, G., 32; 39; 40; 41; 42; 47; 172;  
 189; 268; 285  
 Hoffmann, B., 150
- Ireson, G., 150  
 Irwin, A., 30
- Jenelten Allkofer, C., 25; 138  
 Jung, W., 138  
 Jungnickel, C., 41; 42; 43; 45; 47; 48
- Kaplan, D., 300  
 Kemp, H.R., 127; 137  
 Kesidou, S., 26  
 Kirsh, Y., 157  
 Kirkwood, V., 22; 24; 26; 69; 137  
 Klein, M.J., 30  
 Kolbenstvedt, H., 153  
 Krane, K.S., 130; 134; 136; 147; 148;  
 150; 157  
 Kuhn, T.S., 28; 30; 37; 38; 39
- Landau, L.D., 150; 153  
 Lang da Silveira, F., 18  
 Leboutet, L., 18  
 Leff, H.S., 139  
 Leite, L., 29  
 Lifshitz, E.M., 150; 153  
 Lijnse, P., 21; 23; 24  
 López Gay, R., 24  
 Lloréns, J.A., 121; 123
- Mace, W.K., 131  
 Mak, S-Y., 139; 142; 143; 145; 146;  
 147  
 Mariani, M.C., 24  
 Martín, J., 26; 279  
 Martínez, J.M., 139  
 Martínez Torregrosa, J., 19; 123  
 Matthews, M.R., 29; 30  
 McClelland, G., 23; 26; 68; 129  
 McCormmach, R., 41; 47  
 McDermott, L.C., 18  
 Mermin, N.D., 300  
 Michinel, J.L., 127  
 Montanero, M., 22  
 Montero, A., 18  
 Moore, G.S.M., 139; 146; 147; 300  
 Moreira, M.A., 18
- Navarro, J., 163  
 Ne'eman, Y. 157  
 Newell, A., 27  
 Nicholls, G., 22; 25  
 Novak, D.J., 18; 19; 64
- O'Brien Pride, T., 26  
 Ogborn, J., 21; 22; 24; 25; 136; 137;  
 139  
 Okun, L.B., 49; 80; 150; 151  
 Orpaz, N., 138  
 Otero, J., 19
- Pais, A., 47; 48; 49  
 Papp, D., 35; 36; 37; 39; 41; 45  
 Patsakos, G., 80; 150; 153; 154; 155  
 Payá, J., 19; 122  
 Penich, J.E., 54  
 Peña, A., 151  
 Pérez Landazábal, M.C., 137  
 Pérez, A.L., 22  
 Pérez, B.A., 139  
 Pina, E.P., 134  
 Poon, C.H., 26; 68; 129; 149  
 Pope, M., 125  
 Posner, G.J., 29; 122; 123  
 Pozo, J., 18  
 Prideaux, N., 136

- Resnick, R., 128; 129; 130; 134; 136;  
140; 141; 142; 143; 145; 146; 147;  
148; 150; 157
- Richmond, P.E., 127
- Rioux, F., 300
- Rohrlich, F., 300
- Ross, K.A., 27; 136; 137
- Rozier, S., 24
- Russell, B., 150
- Saltiel, E., 29
- Sandin, T.R., 153; 154; 155
- Sanjosé, V., 33
- Sanmartí, N., 123
- Sawicki, M., 150
- Schmid, G.B., 138
- Sears, F.W., 140; 141; 142; 145; 146;  
147
- Sequeira, M., 29
- Serramona J., 55
- Sexl, R.U., 20; 127; 138
- Shadmi, Y., 127
- Sherwood, B.A., 130; 133; 134; 136;  
142; 144; 145; 146; 147; 148
- Smith, R.T., 300
- Solaz, J.J., 33
- Solbes, J., 19; 26; 121; 123; 125; 148;  
155; 163; 196; 268; 279
- Solis, R., 18
- Solomon, J., 20; 21; 22; 25; 138
- Sperandeo Mineo, R.M., 290
- Steck, D.J., 300
- Steinberg, R.N., 157
- Strnad, J., 136; 300
- Strube, P., 23
- Stylianidou, F., 139
- Suero, M.I., 22
- Summers, M.K., 142
- Tarín, F., 148; 163; 196; 268
- Taton, R., 33; 35; 36; 37; 39; 45; 46
- Taylor, E.F., 153
- Taylor, M., 131
- Tejerina, F., 147
- Thomaz, M.F., 140
- Tiberghien, A., 18; 26; 27; 141; 268
- Tipler, P.A., 128; 129; 140; 141; 143;  
144; 146; 147; 148; 150; 153; 156;  
157; 275; 299
- Tobin, K.G., 30
- Toledo, B., 155
- Traver, M.J., 29; 122; 123
- Triplett, G., 27
- Trumper, R., 21; 23; 24; 137
- Van den Berg, E., 24; 137; 142
- Van Huls, C., 24; 137; 142
- Van Roon, P.H., 145
- Viennot, L., 18; 24; 29
- Viglietta, L., 22; 136; 137; 138
- Vilches, A., 19; 123; 125
- Wandersee, J.H., 29; 30
- Warren, J.W., 20; 26; 60; 63; 80; 127;  
138; 145; 155; 156; 268; 301
- Warrington, L., 21; 23; 24; 25; 58
- Watts, D.M., 21; 22
- Wells, P., 25; 69; 136; 137; 139
- Wheeler, J.A., 153
- Whitaker, M.A.B., 30; 153
- White, T.R., 124
- Whittaker, E., 34; 36; 44; 45; 46; 47;  
48; 50; 51
- Williams, W.S.C., 150
- Yager, R.E., 54
- Young, K., 139; 142; 143; 145; 146;  
147
- Zemansky, M.K., 143; 145



