

Contra la distinción clásica entre “teoría”, “prácticas experimentales” y “resolución de problemas”: el estudio de las fuerzas elásticas como ejemplo ilustrativo

Gil Pérez, D.

*Dpto. de Didáctica de las Ciencias
Experimentales y Sociales
Universitat de València*

Valdés Castro, P.

*Dpto. de Física
Instituto Superior Pedagógico
de la Habana*

Summary

This paper intends to illustrate the possibility of integrating conceptual knowledge, paper and pencil problem-solving and lab activities in a unic oriented research program, overcoming their usual treatment as three different and separated activities.

Introducción

El tratamiento de los temas en un curso de ciencias Físico-Químicas suele responder al siguiente esquema: *exposición*, en primer lugar, de “la teoría” (conceptos, leyes...) seguida de su *aplicación*, mediante “problemas de lápiz y papel” y, en ocasiones, de su *ilustración* con alguna “práctica de laboratorio”.

La investigación en didáctica de las ciencias ha analizado críticamente cada una de estas tres actividades y existe, así mismo, una abundante literatura en torno a su posible transformación en ocasión de construcción de conocimientos y de familiarización con las estrategias del trabajo científico. Estos estudios han contribuido, además, a un consenso creciente en lo que se refiere a los planteamientos constructivistas que proponen orientar el aprendizaje de las ciencias como una investigación dirigida que se inspira en la propia actividad científica (Gil et al 1991; Hodson 1992; Porlán 1993...).

Sin embargo, tanto los análisis críticos como las propuestas de innovación han respetado hasta aquí la distinción clásica entre “teoría”, “práctica” y “problemas”, pese a que dicha distinción no

guarda paralelismo alguno con la actividad científica, en la que se inspiran las nuevas propuestas.

Podríamos ver en ello, una vez más, el peso de tradiciones docentes asumidas acríticamente: piénsese que en las universidades la teoría, las prácticas y los problemas son desarrollados muy a menudo por distintos profesores. También puede haber influido en ello el carácter necesariamente acotado de las investigaciones, que ha llevado a centrarse en distintos aspectos concretos del proceso de enseñanza/aprendizaje. Eso es lo que ha ocurrido, p.e., en nuestro propio equipo, en el que las tesis doctorales dirigidas se han centrado bien en las prácticas de laboratorio (Gené 1986; Payá 1991; González 1994; Salinas 1994) en los problemas de lápiz y papel (Mtnez-Torregosa 1987; Ramírez 1990; Reyes 1991) o en la introducción y manejo de conceptos (Solbes 1986; Carrascosa 1987).

En cualquier caso, pensamos, es necesario cuestionar este tratamiento separado de aspectos que en la actividad científica aparecen absolutamente imbricados. La convergencia de las investigaciones realizadas en los tres dominios apoya, sin lugar a dudas, un planteamiento más integrado de las mismas. Nuestra intención es abordar detenidamente esta cuestión en un próximo trabajo, fundamentando la desaparición (o, si se prefiere, la integración) de las categorías “teoría”, “prácticas” y “problemas” en la enseñanza/aprendizaje de las ciencias.

En esa perspectiva, el trabajo que aquí presentamos intenta ilustrar “en acto” la posibilidad de estructurar un tema “clásico”, *las fuerzas elásticas*, de tal modo que la introducción de conceptos, la realización de prácticas de laboratorio y la resolución de problemas de lápiz y papel queden fusionados en un programa de actividades con una orientación investigativa. Previamente expondremos, muy brevemente, las características que, según nuestra opinión, debe tener el proceso de enseñanza/aprendizaje para que pueda ser considerado una actividad investigativa.

1. Algunas actividades esenciales en una estrategia de enseñanza/aprendizaje de las ciencias como investigación

Podría pensarse que un recordatorio de las características esenciales de la actividad científica resulta aquí innecesario; sin embargo, diversas investigaciones han mostrado que en la “epistemología espontánea” de los profesores están presentes concepciones reduccionistas y deformadas de la ciencia (Désautles et al 1993; Gil 1993; Hodson 1993; Meichstry 1993; Praia y Cachapuz 1994). Este problema no se limita, por otra parte, a que los profesores poseamos, o no, concepciones correctas acerca de la ciencia; es preciso tener en cuenta además, que el paso de las ideas a la acción se

realiza en determinadas condiciones concretas –limitaciones de tiempo, necesidad de calificar, etc...– y bajo la influencia de tradiciones y hábitos fuertemente arraigados, lo que muchas veces dificulta ser coherente con concepciones sobre la ciencia epistemológicamente correctas (Hodson 1993).

Hemos resumido en diez puntos aquellos aspectos cuya presencia consideramos fundamental para poder hablar de una orientación investigadora del proceso de enseñanza/aprendizaje de las ciencias, pero nos apresuramos a señalar que dichos aspectos no constituyen ningún algoritmo a seguir linealmente, sino un recordatorio de la extraordinaria riqueza de la actividad científica, que las situaciones de aprendizaje deberían potenciar:

1. Presentar **situaciones problemáticas abiertas** de un nivel de dificultad adecuado (correspondiente a la *zona de desarrollo potencial* de los y las estudiantes) con objeto de que puedan tomar decisiones para precisarlas y entrenarse, así, en la transformación de situaciones problemáticas abiertas en problemas precisos (ver punto 3).

2. Favorecer la reflexión de los estudiantes sobre la relevancia y el posible **interés de las situaciones** propuestas, que dé sentido a su estudio (considerando las posibles implicaciones CTS, etc...) y evite un estudio descontextualizado, socialmente neutro.

3. Potenciar los **análisis cualitativos**, significativos, que ayuden a com-

prender y a acotar las situaciones planteadas (a la luz de los conocimientos disponibles, del interés del problema, etc...) y a formular preguntas operativas sobre lo que se busca.

Se trata de salir al paso de operativismos ciegos sin negar, muy al contrario, el **papel esencial de las matemáticas como instrumento de investigación**, que interviene en todo el proceso, desde el enunciado mismo de problemas precisos (con la necesaria formulación de preguntas operativas, etc...) hasta el análisis de los resultados.

4. Plantear la **emisión de hipótesis** como actividad central de la investigación científica, susceptible de orientar el tratamiento de las situaciones y de hacer explícitas, funcionalmente, las preconcepciones de los estudiantes.

Insistir en la necesidad de fundamentar dichas hipótesis y prestar atención, en ese sentido, a la *actualización de los conocimientos que constituyen prerrequisitos* para el estudio emprendido.

Reclamar una cuidadosa *operativización de las hipótesis*, es decir, la derivación de consecuencias contrastables, prestando la debida atención al control de variables, etc.

5. Conceder toda su importancia a la **elaboración de diseños** y a la planificación de la actividad experimental por los propios estudiantes.

Potenciar, allí donde sea posible, la incorporación a los diseños experimen-

tales de la tecnología actual (ordenadores, electrónica, automatización...) con objeto de favorecer una visión más correcta de la actividad científico-técnica contemporánea.

6. Plantear el **análisis detenido de los resultados** (su interpretación física, fiabilidad, etc...), a la luz del cuerpo de conocimientos disponible, de las hipótesis manejadas y de los resultados de "otros investigadores" (otros equipos de estudiantes, el profesor...).

Favorecer, a la luz de los resultados, las necesarias revisiones de los diseños, de las hipótesis, o, incluso, del planteamiento del problema. Prestar una particular atención, en su caso, a *los conflictos* entre los resultados y las concepciones iniciales, facilitando así, de una forma funcional, los cambios conceptuales.

7. Plantear la consideración de posibles **perspectivas** (replanteamiento del estudio a otro nivel de complejidad, problemas derivados...) y contemplar, en particular, las *implicaciones CTS* del estudio realizado (posibles aplicaciones, repercusiones negativas...).

8. Pedir un **esfuerzo de integración** que considere la contribución del estudio realizado a la construcción de un cuerpo coherente de conocimientos, así como las posibles implicaciones en otros campos de conocimientos.

9. Conceder una especial importancia a la elaboración de **memorias científicas, "posters", etc...**, que

reflejen el trabajo realizado y puedan servir de base para resaltar el papel de la comunicación y el debate en la actividad científica.

10. Potenciar la **dimensión colectiva del trabajo científico** organizando equipos de trabajo y facilitando la interacción entre cada equipo y la comunidad científica, representada en la clase por el resto de los equipos, el cuerpo de conocimientos ya construido (recogido en los textos), el profesor como experto...

Hacer ver, en particular, que los resultados de una sola persona o de un solo equipo no pueden bastar para verificar o falsar una hipótesis y que el cuerpo de conocimientos constituye la cristalización del trabajo realizado por la comunidad científica y la expresión del consenso alcanzado en un determinado momento.

Insistimos en que los puntos anteriores no constituyen ningún algoritmo, ningún intento de ahorrar la actividad científica en unos "pasos" o "etapas", sino un recordatorio de aspectos esenciales del trabajo científico, que deben estar presentes en los intentos de transformar la enseñanza de las ciencias en su totalidad y no sólo algunas actividades aisladas.

En el proyecto que aquí presentamos, pretendemos dar a los estudiantes la ocasión de practicar estos aspectos, habitualmente ignorados en el proceso de enseñanza/aprendizaje. Hemos preparado así un "plan de investigación" para orientar el trabajo

de los estudiantes, desde la transformación de una situación problemática inicial en un problema preciso, hasta la consideración de las posibles perspectivas abiertas por la investigación, incluyendo el planteamiento de nuevos problemas, etc. Intentaremos mostrar así, que ello hace posible que la resolución de problemas de lápiz y papel y las prácticas de laboratorio se integren funcionalmente en el proceso de construcción de los conocimientos científicos y dejen de aparecer como actividades separadas, concebidas como meras ilustraciones de la “teoría”.

2. Estudio de las fuerzas elásticas como una actividad de investigación dirigida

Con la elección de un tema como el de las fuerzas elásticas, pretendemos mostrar que incluso el tratamiento de aquellos temas considerados “clásicos” en todo curso de física, pueden ser reestructurados con el fin de generar en los estudiantes un mayor interés hacia su estudio, proporcionar una visión más correcta del trabajo científico y favorecer un aprendizaje significativo. Se propone su desarrollo cuando ya se han estudiado –también en forma de investigación dirigida– los conceptos básicos de la cinemática (Calatayud et al 1990; Gil y Valdés 1995a) y el segundo principio de la dinámica (Gil y Valdés 1995b).

A continuación reproducimos el programa de actividades que hemos concebido para orientar la investigación de los estudiantes. Las actividades propuestas a los equipos de estudiantes son designadas con la notación A.1., A.2.,... y van acompañadas de comentarios que pretenden justificar su introducción, transcribir sintéticamente las contribuciones de los estudiantes, etc.

2.1. Planteamiento de una situación problemática abierta y transformación de la misma en problemas precisos.

A.1. En los estudios cinemáticos y dinámicos realizados hasta aquí hemos considerado los cuerpos como rígidos, indeformables. Comentar el interés y las limitaciones de este modelo de los cuerpos.

Los estudiantes argumentan que los cuerpos reales no sólo pueden acelerarse cuando sobre ellos actúan fuerzas, sino además deformarse. Esto puede aprovecharse para volver a insistir en que el modelo de punto material –en el cual se hizo abstracción no sólo de la posible deformación del cuerpo, sino también de su movimiento de rotación– es el resultado de un esfuerzo por simplificar y acotar el estudio que se realiza, ya que, en general, no resulta provechoso comenzar estudiando las situaciones en toda su complejidad.

Sin embargo, es obvio que tales simplificaciones tienen una validez

limitada, que debe ser cuestionada cuando se pretende seguir profundizando en el tema. Es lo que ocurre si se desea pasar a estudiar las deformaciones que experimentan los cuerpos cuando sobre ellos actúan fuerzas.

A.2. *Considerar algunos cuerpos que se deformen con facilidad e intentar describir cualitativamente su comportamiento cuando se produce la deformación (Conviene procurarse, o solicitar al profesor, distintos objetos deformables).*

Esta es una actividad fundamental, en la que conviene detenerse el tiempo necesario para que los estudiantes procedan a un análisis, cualitativo, pero detenido, del comportamiento de distintos objetos al ser deformados. Pueden apreciar así grandes diferencias entre ellos: unos cuerpos son fáciles de deformar, mientras que otros no; por otra parte, después que las fuerzas externas dejan de actuar, algunos cuerpos permanecen deformados, pero otros recuperan su forma y tamaño originales, lo que se acompaña de vibraciones, etc. En esta discusión los estudiantes suelen introducir la idea de elasticidad, pero en la forma imprecisa típica del lenguaje ordinario. Conviene detenerse en clarificar este concepto, planteando la siguiente actividad.

A.3. *Mencionar ejemplos de cuerpos y materiales elásticos y ordenarlos de mayor a menor elasticidad.*

Esta actividad permite sacar a la luz las preconcepciones de los estu-

diantes sobre la elasticidad. Entre los cuerpos elásticos mencionan muelles, pelotas de goma, cordones de goma, etc., sin embargo, algunos citan también materiales fácilmente deformables, pero que no son elásticos, como la "plastilina". Por otra parte, en la relación no suelen incluir cuerpos metálicos como vigas y barras, que requieren ser sometidos a grandes fuerzas para ser deformados, ni líquidos, los cuales son muy difíciles de comprimir, ni se refieren tampoco a los gases. Dicho de otra manera, al orientarse por sus experiencias sensoriales comunes los estudiantes frecuentemente confunden la elasticidad con la deformabilidad. Por eso es necesario insistir en que el rasgo distinto de la elasticidad, es la capacidad que tiene el cuerpo de recobrar su forma y tamaño originales cuando dejan de actuar las fuerzas deformantes, lo que lleva a introducir la idea de *fuerza elástica* o *fuerza recuperadora*, como característica fundamental del comportamiento elástico. Ello permite a los estudiantes revisar su ordenamiento de los objetos de mayor a menor elasticidad y comprender que la elasticidad de la plastilina es prácticamente nula, que la de una esfera de acero (con fuerzas recuperadoras tan grandes que se deja deformar muy difícilmente) es mayor que la una esfera de caucho, etc.; durante este análisis pueden discutirse otras situaciones, como el comportamiento del aire confinado en el interior de una

jeringuilla, etc., lo cual posibilita incidir sobre las concepciones erróneas que tienen los estudiantes. Esta es también una oportunidad para ampliar la idea habitual de deformación elástica –que generalmente sólo se relaciona con las deformaciones longitudinales y por flexión– analizando otros ejemplos que involucran deformaciones por torsión, etc.

En el debate se llega a la conclusión de que la elasticidad es una propiedad que exhibe la mayoría de los cuerpos, siempre que las deformaciones provocadas sean relativamente pequeñas (lo que posibilita comenzar a introducir la idea de *límite de elasticidad*, como expresión, una vez más, de la validez acotada de los conceptos físicos).

Digamos por último que esta discusión exige que los estudiantes manipulen, como se ha indicado en la actividad A.2, distintos objetos deformables, lo que les permite asociar la capacidad de vibrar a la propiedad elástica, es decir, a la existencia de *fuerzas recuperadoras*.

Una vez que se ha esclarecido el concepto de elasticidad y que se ha puesto de manifiesto la estrecha relación que hay entre ésta y las vibraciones, puede pasarse a discutir el interés que tiene el estudio de las fuerzas elásticas.

A.4. Reflexionar sobre el posible interés que tiene el estudio de las fuerzas elásticas.

El debate puede focalizarse alrededor de dos ideas. En primer lugar, la

importancia para la construcción, el diseño de máquinas, etc., de conocer las características de las fuerzas elásticas que se originan cuando los cuerpos son deformados; el profesor puede profundizar en esta cuestión y señalar que existe una rama de la mecánica, llamada “resistencia de materiales”, que se ocupa de la misma. En segundo lugar, se ha visto que la capacidad de los cuerpos para vibrar está asociada a su elasticidad; por consiguiente, el estudio de las fuerzas elásticas debe contribuir a comprender las características de las vibraciones y de su propagación en diferentes medios. Al reflexionar sobre esta cuestión los estudiantes suelen tener en cuenta, por supuesto, aquellas vibraciones comúnmente observadas, como las de un péndulo, un cuerpo sujeto a un resorte, las vibraciones sonoras, los terremotos, etc. Sin embargo, es conveniente aprovechar la ocasión para referirse a otras vibraciones que se estudiarán más adelante, como las de los átomos que componen las moléculas, las de las partículas que forman la estructura cristalina de la mayoría de los cuerpos sólidos, y las oscilaciones de carga eléctrica, intensidad de corriente y campo electromagnético. Esta diversidad de ejemplos contribuye a formar en los estudiantes la idea de que la propiedad de vibrar no es exclusiva de ciertos cuerpos, sino que está presente en toda la materia y que la investigación que ahora inician pudiera sentar las bases para el estudio de otros

tipos de vibraciones.

Luego de haberse contextualizado el estudio que se va a realizar, esclareciendo conceptos básicos, analizando el posible interés del tema, etc., puede pasarse a precisar el problema a investigar:

A.5. *Precisar aquellas cuestiones que pudiera tener interés investigar en torno a las fuerzas elásticas.*

Esta actividad pretende que los estudiantes comenten los diferentes aspectos que pudieran ser investigados, es decir, que formulen los posibles problemas a estudiar. En la discusión se proponen, básicamente, los siguientes temas:

- * Estudio de las fuerzas elásticas (factores de que dependen).
- * Estudio del movimiento vibratorio que realizan los objetos elásticos cuando se les deja en libertad tras deformarlos.
- * Determinación, en particular, del período de las vibraciones.

Es de esperar que los estudiantes propongan iniciar la investigación por el primero de los problemas, ya que éste conecta más directamente con sus experiencias cotidianas. Pero existe otra razón para ello, hacia la que debe dirigirse la atención: el hecho de que las fuerzas determinan la aceleración de los cuerpos, lo que facilita el análisis de los otros dos problemas. Las siguientes actividades centran la atención, pues, en el primero de los problemas.

2.2. Estudio de las fuerzas elásticas: formulación de hipótesis y elaboración de diseños para su contrastación experimental.

A.6. *Formular hipótesis acerca de los factores de los cuales depende la fuerza ejercida por un objeto elástico cuando se le deforma.*

La experiencia sensorial sugiere que a mayor deformación corresponde una mayor fuerza recuperadora (en sentido contrario a la deformación) y los estudiantes formulan la hipótesis más simple de una proporcionalidad directa entre la deformación y la fuerza elástica. Por otra parte, señalan también la dependencia de esta fuerza elástica de las características del objeto (la naturaleza del material, su forma, etc.). Los estudiantes resumen sus hipótesis indicando que, para un objeto elástico dado, la fuerza elástica F es proporcional a la deformación x , y de sentido contrario, o sea $F = -kx$, donde k tiene un valor característico para cada objeto.

Conviene señalar que el signo “menos” es olvidado con frecuencia, cuando se expresan operativamente las hipótesis formuladas, por ello es necesario insistir, repetidamente, en el carácter recuperador de las fuerzas elásticas.

Una vez que han sido operativizadas las hipótesis, puede pensarse en su contrastación experimental, centrándose la atención en la proporcionalidad entre la deformación y la fuerza recuperadora y dejando de lado

el estudio, mucho más complejo, de cómo influyen las características del objeto:

A.7. Diseñar algún experimento para contrastar la hipótesis formulada, detallando el procedimiento a seguir para medir las deformaciones y las fuerzas elásticas.

Los estudiantes proponen utilizar algún objeto elástico fácilmente deformable, como un resorte, un cordón de caucho, etc., sujetándolo de un extremo y colgando de su otro extremo pesas conocidas hasta dejar el sistema en reposo, evitando su vibración. De este modo es posible asegurar que la fuerza elástica y el peso del cuerpo que cuelga del resorte tienen el mismo valor; por otra parte, la deformación puede medirse fácilmente mediante una escala situada paralelamente al resorte.

En el experimento es posible utilizar resortes confeccionados por los propios estudiantes, por ejemplo de alambre de cobre, que, evidentemente, no tendrán la calidad de los que existen en los laboratorios, pero que ofrecen, entre otras ventajas, la posibilidad de establecer con facilidad el límite de elasticidad del objeto investigado.

Las próximas dos actividades se destinan a la realización del experimento diseñado y al análisis de los resultados.

2.3. Estudio de las fuerzas elásticas: realización de los experimentos y

análisis de los resultados. Perspectivas abiertas.

A.8. Proceder a la realización del experimento diseñado.

A pesar de la aparente sencillez del diseño concebido, a la hora de efectuar el experimento surgen una serie de cuestiones que resolver: ubicación del cero de la escala utilizada para la medida de las deformaciones, número de medidas a realizar, evaluación de la influencia de las diferentes fuentes de error, etc.

A.9. Analizar e interpretar los resultados obtenidos en el experimento.

Los resultados obtenidos por los distintos equipos coinciden en establecer –de acuerdo con las hipótesis formuladas– la proporcionalidad entre la deformación y la fuerza recuperadora, siempre que la deformación no sea muy grande, es decir, que no sobrepase el límite de elasticidad. En efecto, el gráfico de $F = f(x)$ corresponde muy bien, en general, a una línea recta. Si se han utilizado resortes confeccionados por los propios estudiantes y se han realizado mediciones más allá del límite de elasticidad, podrán constatar que tras una primera serie de puntos que se disponen claramente según una línea recta, sigue otra serie de puntos que no tiene esta disposición; los estudiantes pueden comprobar que en tal caso el resorte utilizado no recupera su tamaño original.

Si los diversos equipos de trabajo han utilizado resortes diferentes, entonces las constantes de proporcionalidad obtenidas también serán diferentes, de acuerdo con la hipótesis de que dicha constante depende de las características del resorte (aún cuando el estudio detallado de dichas características no se contempla en esta investigación).

Conviene informar a los estudiantes que su investigación ha conducido a los mismos resultados que obtuvo el científico inglés Robert Hooke, de aquí que la expresión $F = -kx$ sea conocida como *Ley de Hooke*. Se trata de una ley, por otra parte, en cuya importancia conviene detenerse:

A.10. Reflexionar sobre el posible interés de la ley establecida y considerar las perspectivas abiertas por la investigación susceptibles de originar nuevos estudios.

Esta actividad conecta con la A.4. En aquel momento la situación problemática tenía aún un carácter general y el objetivo de provocar una discusión acerca de su interés era, fundamentalmente, evitar que los estudiantes se formen la imagen de que la investigación científica es una actividad descontextualizada, que no se pregunta desde el inicio por su finalidad e implicaciones. Pero en el transcurso de la investigación, los conocimientos se enriquecen, surgen nuevos problemas y aparecen posibilidades que al principio aún eran des-

conocidas. Por eso, al concluir esta primera parte de la investigación es conveniente detenerse de nuevo en esta cuestión.

Una primera aplicación de la ley de Hooke a la que los estudiantes se refieren es *la medida de fuerzas* a partir de las deformaciones que provocan en un resorte calibrado al efecto. Éste es el fundamento de los dinamómetros, que si bien es cierto que por lo general no permiten determinar fuerzas con gran precisión, presentan la utilidad de hacer posible medidas rápidas y fáciles.

Existe, sin embargo, la posibilidad de medir con precisión fuerzas muy débiles gracias a las fuerzas elásticas de *torsión* y merece la pena referirse al papel jugado por las mismas en el desarrollo de la física. En particular, utilizando la fuerza elástica de torsión, a finales del siglo XVIII Charles A. Coulomb midió las fuerzas de atracción y repulsión eléctricas entre dos cuerpos cargados y estableció la ley que lleva su nombre. En este experimento utilizó una "balanza de torsión" (Fig. 1) cuya parte fundamental consiste en una varilla ligera v en los extremos de la cual se colocan dos esferas cargadas eléctricamente, a y a' ; esta varilla se suspende en posición horizontal por medio de una delgada fibra que puede torcerse. La fuerza elástica no se determina ahora a partir del *estiramiento* del cuerpo, como en el caso del dinamómetro, sino a partir del *ángulo* que la fibra se tuerce.

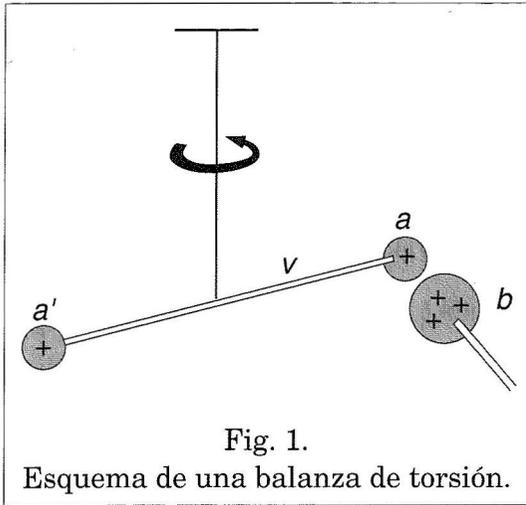


Fig. 1.

Esquema de una balanza de torsión.

Algunos años más tarde, mediante un procedimiento similar, Henry Cavendish midió una fuerza aún muchísimo menor que la eléctrica, la fuerza de atracción gravitatoria, y por primera vez determinó la constante de gravitación universal.

Por otra parte, en lo que se refiere a las perspectivas abiertas por la investigación, los estudiantes pueden referirse a la posibilidad de profundizar e investigar, entre otras, en las siguientes cuestiones:

- * La dependencia de la fuerza elástica con características de los cuerpos como por ejemplo, longitud inicial, área de su sección transversal, etc., así como la naturaleza de dicha fuerza.
- * Otros tipos de deformaciones elásticas, además de la deformación longitudinal, en particular, las deformaciones por torsión y flexión.
- * Cuestiones relacionadas con la resistencia de materiales, tales co-

mo las relaciones entre deformación y los límites de elasticidad y de rotura para diversos materiales.

- * La posibilidad, a la que ya hemos hecho referencia, de utilizar las fuerzas elásticas para medir otras fuerzas.
- * Las características del movimiento vibratorio de un cuerpo sujeto al extremo del resorte.
- * Los factores de que depende la duración o período de las vibraciones de un cuerpo elástico y la posible aplicación de este conocimiento a la medida precisa del tiempo.

Cuál de estas cuestiones abordar a continuación y la forma concreta de hacerlo, depende de múltiples circunstancias, en particular, de los objetivos del curso, de la relevancia de cada una de ellas para la solución de otros problemas o el tratamiento de nuevos temas, del tiempo disponible, etc. En un curso de introducción a la física para la Enseñanza Media superior se incluyen habitualmente las dos últimas cuestiones, la primera de las cuales se desarrolla como contenido teórico y la segunda, como problema de aplicación. Nosotros plantearemos su estudio como derivación de la investigación realizada hasta aquí, a partir de esta consideración de las perspectivas abiertas.

2.4. Estudio del período de oscilación de un cuerpo sujeto al extremo de un resorte.

Habitualmente se llega a la expresión del período de las vibraciones del

sistema cuerpo-resorte, después de obtener las ecuaciones cinemáticas del movimiento, sin haber realizado antes un análisis cualitativo que permita interpretar físicamente la situación, formular hipótesis acerca de los posibles factores de que depende el período, argumentar dichas hipótesis. Con las siguientes actividades pretendemos que los estudiantes practiquen estos importantes aspectos del trabajo científico.

A.11. Formular unas primeras conjeturas acerca de los factores de que depende el período de las vibraciones de un cuerpo sujeto al extremo de un resorte.

Durante la actividad A.8., al manipular resortes de los cuales cuelgan diferentes cuerpos, los estudiantes pueden haber constatado que el período de las vibraciones depende de la masa de los cuerpos y de las características del resorte. Ahora estas ideas pueden precisarse, ensayando con resortes de diferentes constantes elásticas a cuyos extremos se sujetan cuerpos de diversas masas. Se llega así a conjeturar que el período de las vibraciones depende directamente de la masa del cuerpo (admitiendo, en una primera aproximación, que la masa del resorte es despreciable) y es inversamente proporcional a la constante elástica del resorte. Esta conjetura puede apoyarse, además, en el sistema de conocimientos teóricos que poseen los estudiantes. En efecto,

mientras mayor sea la constante elástica del resorte, mayor será la fuerza elástica que actúa sobre el cuerpo –teniendo en cuenta iguales desplazamientos– y por tanto también la aceleración de su movimiento; por otra parte, cuanto mayor sea la masa del cuerpo, menor será su aceleración. El resultado de estos análisis puede expresarse, simbólicamente, del modo siguiente:

$$T \uparrow = f(m \uparrow, k \downarrow)$$

Como los estudiantes basan su análisis en una disposición vertical del sistema cuerpo-resorte, el razonamiento anterior se dificulta, ya que en tal caso el cuerpo está sometido no sólo a la fuerza elástica, sino también de gravedad. Sin embargo, mediante un análisis cualitativo del gráfico $F = f(x)$ los estudiantes pueden comprender que siendo la fuerza peso constante, el cuerpo sigue estando sometido a una fuerza del tipo $F = -kx$, donde ahora x se mide a partir de la nueva posición de equilibrio y F representa la fuerza elástica que aparece al desplazarse el sistema de esa posición.

En cuanto a la posible dependencia con la amplitud de la oscilación, surgen diversas opiniones. Algunos estudiantes, haciendo un análisis parcial, se orientan por la idea de que mientras mayor es la distancia recorrida por el cuerpo mayor debe ser el tiempo invertido, y por eso piensan que el período de las vibraciones depende de la amplitud. Otros estudian-

tes, en cambio, advierten que con el aumento de la amplitud también aumenta la fuerza y que, por tanto, crece la rapidez del movimiento, y tal vez estos efectos pudieran compensarse. Sin embargo, el análisis cualitativo no permite arribar a un resultado concluyente en relación con esta última cuestión, la cual requiere ser estudiada con mayor profundidad, o contrastada experimentalmente.

En casos como éste, en que aún no se dispone de conocimientos teóricos suficientes para realizar un análisis exhaustivo del fenómeno estudiado, puede resultar particularmente útil hacer un análisis dimensional de las magnitudes que intervienen en las relaciones hipotéticamente planteadas (si los estudiantes están familiarizados con esta técnica).

A.12. Intentar obtener la forma concreta de las dependencias anteriores realizando un análisis dimensional.

A través del análisis dimensional los estudiantes llegan a la conclusión de que el período de las vibraciones debe ser expresado mediante una ecuación de la forma $T = \text{const.}(m/k)^{1/2}$, lo que modifica parcialmente su hipótesis inicial de que el período es directamente proporcional a la masa e inversamente proporcional a la constante elástica. Es esta una buena ocasión para reflexionar acerca de la simplicidad de las relaciones existentes entre las magnitudes físicas que intervienen

en un fenómeno, pero sin que ello signifique que *las únicas* relaciones sean la proporcionalidad directa e inversa. En cualquier caso, el resultado obtenido, además de ser coherente con el análisis cualitativo realizado anteriormente, permite precisar la forma en que el período de las vibraciones parece depender de la masa y la constante elástica y, al propio tiempo, refuerza la idea de que no depende de la amplitud de las vibraciones.

Los estudiantes también pueden efectuar un análisis cuantitativo aproximado, utilizando los conceptos y ecuaciones correspondientes al movimiento rectilíneo uniformemente acelerado, ya estudiado:

A.13. Intentar obtener el período de las vibraciones, considerando que el tiempo transcurrido desde que se suelta el cuerpo hasta que pasa por la posición de equilibrio, es decir, el tiempo correspondiente a la cuarta parte de una vibración, no es muy diferente del que emplearía el cuerpo si se moviera con una aceleración constante igual a la aceleración media en dicho trayecto.

Sin excesivas dificultades los estudiantes obtienen que el valor medio de la aceleración *respecto al trayecto considerado* es $a = kx/2m$, donde x es la distancia a que se encuentra el cuerpo de la posición de equilibrio en el momento de soltarlo. Al suponer que el cuerpo se mueve con una aceleración constante de ese valor, se obtiene que

el tiempo invertido en recorrer el trayecto (la cuarta parte del camino recorrido en una oscilación completa) es $t = 2(m/k)^{1/2}$ y por tanto que el período es $T = 8(m/k)^{1/2}$.

A través de un análisis cualitativo puede ponerse de manifiesto que el cuerpo se mueve mucho más lentamente durante la primera parte del trayecto analizado que durante la segunda parte y, en consecuencia, que durante más de la mitad del tiempo la fuerza tienen un valor superior a $kx/2$. Esto conduce a la conclusión de que el valor medio de la fuerza respecto al tiempo es mayor que $kx/2$ y que, por tanto, el período debe ser algo inferior al calculado. Pero por ahora lo más importante no es el valor exacto de dicho tiempo, sino la forma que tiene la dependencia de T con m y k .

Todos los razonamientos efectuados en las actividades anteriores sugieren, pues, que la relación buscada tiene la forma $T = \text{const.}(m/k)^{1/2}$ y que, por tanto, el período es independiente de la amplitud.

A continuación pueden planificarse nuevos experimentos con el fin de contrastar las conclusiones anteriores. Nos limitaremos a destacar aquí –para no alargar excesivamente este trabajo– que los estudiantes obtienen resultados muy aceptables para la relación entre el período y la masa, mientras que la influencia de la constante elástica puede estudiarse proporcionándoles resultados obtenidos por “otros investigadores”.

Al finalizar esta parte de la investigación, conviene volver a reflexionar sobre el interés que tiene la determinación del período de las vibraciones de los cuerpos elásticos, incorporando ahora lo que se refiere al posible interés de las dependencias recién establecidas. En este sentido pueden mencionarse cuestiones como la posibilidad de medir la masa de los cuerpos en condiciones de imponderabilidad, p.e., la masa de los astronautas en una nave espacial; la determinación de la constante elástica en casos en que ésta sea muy pequeña, p.e., la constante de la fibra utilizada en la balanza de Cavendish; etc.

Pese a los buenos resultados obtenidos, el estudio del período de oscilación realizado en este apartado no nos ha permitido llegar a una expresión cuantitativa exacta, debido al tratamiento intuitivo, pre-teórico, que hemos realizado. Surge así la necesidad de establecer las ecuaciones del movimiento oscilatorio, lo que habría de permitirnos, entre otras cosas, obtener de forma más fundamentada, el período del mismo.

2.5. Estudio del movimiento vibratorio de un cuerpo sujeto al extremo de un resorte.

Usualmente esta cuestión es abordada en una clase de “teoría”, limitándose la actividad de los estudiantes a seguir la explicación del profesor. No suele incitárseles, en cambio, a que reflexionen sobre el posible interés que

tiene el problema planteado, tampoco es habitual que se les pida formular conjeturas acerca de la forma en que dependen del tiempo, la posición y velocidad del cuerpo; mucho menos frecuente aún es el intento de mostrar la coherencia del cuerpo de conocimientos construido, así como de los resultados que se obtienen por diferentes caminos, incluido uno tan actual como es el de la experimentación con modelos matemáticos en el ordenador, o simulación matemática. Las siguientes actividades pretenden resaltar estos aspectos del trabajo científico, generalmente olvidados en el proceso de enseñanza/aprendizaje.

A.14. *Considerar el posible interés que tiene obtener las ecuaciones del movimiento vibratorio considerado.*

La investigación de las características del movimiento de un cuerpo sujeto a un resorte constituye un aspecto dentro del estudio de las fuerzas elásticas y tiene, además, un carácter teórico; ambas circunstancias dificultan que los estudiantes encuentren razones para explicar su posible interés, más allá de la cuestión, ya señalada, de la obtención rigurosa de la ecuación del período de las vibraciones. Debido a ello puede requerirse una intervención más directa del profesor. Este puede referirse a que no todos los problemas particulares que se plantean en la ciencia, especialmente si son de carácter teórico, tienen un interés práctico *directo*; la solución de

muchos de ellos inicialmente contribuye sólo al desarrollo del cuerpo de conocimientos, mostrando su coherencia y preparando el camino para la solución de otros problemas, y es sólo pasado cierto tiempo, que en ocasiones llega a valorarse en toda su magnitud la importancia de tales problemas. En este sentido, la utilización del segundo principio de la dinámica y de la ley de Hooke para *predecir* correctamente el movimiento del cuerpo sujeto al resorte, constituiría una magnífica prueba de la coherencia y potencia del cuerpo de conocimientos construido.

El profesor puede referirse también a que muchas vibraciones que encontramos en la naturaleza y la técnica (sonoras, eléctricas...) no son tan simples como las del cuerpo resorte, pero que ellas siempre pueden ser estudiadas, considerándolas como la superposición de una serie de movimientos vibratorios tan simples como éste, debido a lo cual tiene interés estudiar dicho movimiento.

A.15. *Formular unas primeras conjeturas, dibujando gráficos aproximados, acerca de las posibles dependencias $x = f(t)$ y $v = f(t)$ para un cuerpo que se mueve sujeto al extremo de un resorte.*

Los estudiantes describen, cualitativamente, las características del movimiento observado y las explican utilizando la ley de Hooke y los conceptos de la mecánica ya estudiados: a medida que el cuerpo se separa de su

posición de equilibrio, la fuerza elástica crece, de modo que cuando se suelta es máxima; luego, mientras el cuerpo en movimiento se aproxima a la posición de equilibrio, la fuerza elástica va decreciendo, hasta hacerse cero, pero debido a su velocidad, el cuerpo sobrepasa dicha posición; ahora la fuerza se opone al movimiento, a consecuencia de lo cual el cuerpo va disminuyendo su velocidad hasta que por fin se detiene e invierte el sentido de su movimiento... Los estudiantes pueden reflejar sus primeras ideas acerca de las posibles formas que tienen las dependencias solicitadas mediante gráficos trazados tentativamente en un sistema de ejes x - y , pudiendo algunos llegar incluso a plantear como supuestas dependencias, las funciones *seno* o *coseno*.

Una vez realizado el análisis cualitativo del movimiento, puede pasarse a su estudio cuantitativo, para lo cual existen diversos procedimientos. Los más utilizados consisten, en un nivel superior, en resolver la ecuación diferencial que resulta de sustituir la expresión de la fuerza elástica, $F = -kx$, en la ecuación correspondiente al segundo principio de la dinámica, y en un nivel elemental, en asociar el movimiento vibratorio con el de la proyección del movimiento circular uniforme de un punto sobre el diámetro de la circunferencia. El primer procedimiento no está al alcance de los estudiantes de la escuela media, por otra parte, tras la solución formal de la ecuación diferencial, muchas veces queda oculto

el sentido físico de lo que se hace. El segundo procedimiento es muy interesante, por ser un buen ejemplo de una estrategia particularmente eficaz: buscar las posibles relaciones entre un fenómeno complejo y difícil de estudiar (como es el movimiento vibratorio) y otro más simple y ya conocido (el movimiento circular uniforme). Centraremos nuestro estudio en esta estrategia pero, previamente, nos referiremos a un tercer procedimiento que aprovecha la enorme capacidad de cálculo de los ordenadores:

A.16. *Si descomponemos el movimiento vibratorio en intervalos de tiempo muy pequeños, se puede considerar constante la aceleración en cada intervalo. Realizar dicha aproximación y establecer las ecuaciones del movimiento para intervalos sucesivos de tiempo (iguales y muy pequeños).*

Los estudiantes obtienen sin dificultad que para un primer intervalo la ecuación de la posición es:

$$x_1 = x_0 + v_0\Delta t + 1/2a_0\Delta t^2$$

y la de la velocidad:

$$v_1 = v_0 + a_0\Delta t$$

siendo $a_0 = -k/mx_0$

Y, en general, para un intervalo $i+1$:

$$x_{i+1} = x_i + v_i\Delta t + 1/2a_i\Delta t^2 \quad v_{i+1} = v_i + a_i\Delta t$$

donde $a_i = -k/mx_i$

Si realizáramos los cálculos planteados utilizando intervalos Δt realmente muy pequeños, deberíamos obtener relaciones $x = f(t)$ y $v = f(t)$ que muestren el carácter periódico del

movimiento y proporcionen valores precisos de x y v .

A.17. *Proceder a programar dichos cálculos con ayuda de un ordenador y obtener las gráficas $x = f(t)$ y $v = f(t)$.*

Los estudiantes pueden realizar los cálculos y trazar los gráficos empleando un programa informático como el EXCEL, o confeccionando por sí mismos un programa mediante algún lenguaje de programación.

En la figura 2 se muestra una porción de una hoja de cálculo del programa EXCEL 5.0. Luego de introducir en la "hoja" el algoritmo de cál-

culo descrito en la actividad anterior, el programa llenó automáticamente las casillas correspondientes a x , v y a , para valores de i desde 1 hasta 1400 (filas 4-1404). Modificando en la pequeña tabla de la derecha los valores asignados a x_0 , v_0 , k , m y Δt , se recalculan –automáticamente– todos los datos de la hoja.

En la figura 3 se muestran en un mismo sistema de ejes coordenados los gráficos de $x = f(t)$ –también construídos utilizando el programa EXCEL– para tres situaciones diferentes: el gráfico a corresponde a $x_0 = 1\text{ m}$, $v_0 = 0\text{ m/s}$, $k = 1\text{ N/m}$ y $m = 1\text{ kg}$; en el caso del gráfico b , x_0 se había reducido a la mitad y en el

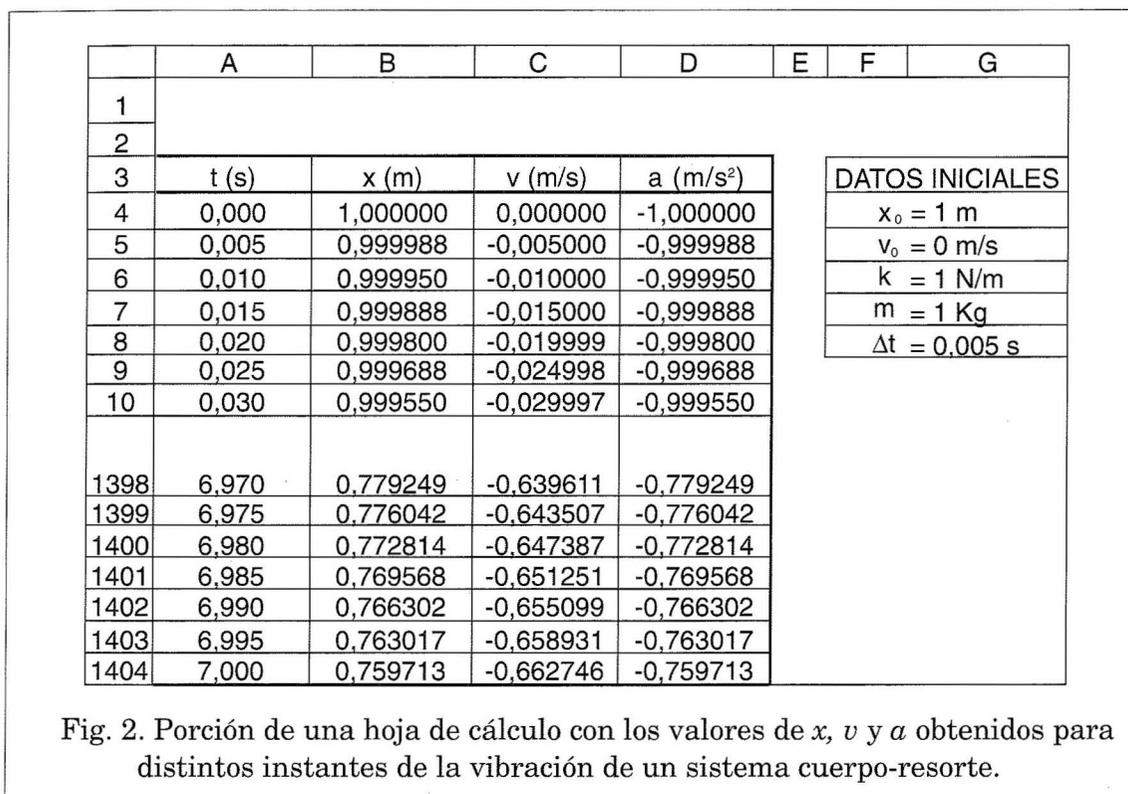


Fig. 2. Porción de una hoja de cálculo con los valores de x , v y a obtenidos para distintos instantes de la vibración de un sistema cuerpo-resorte.

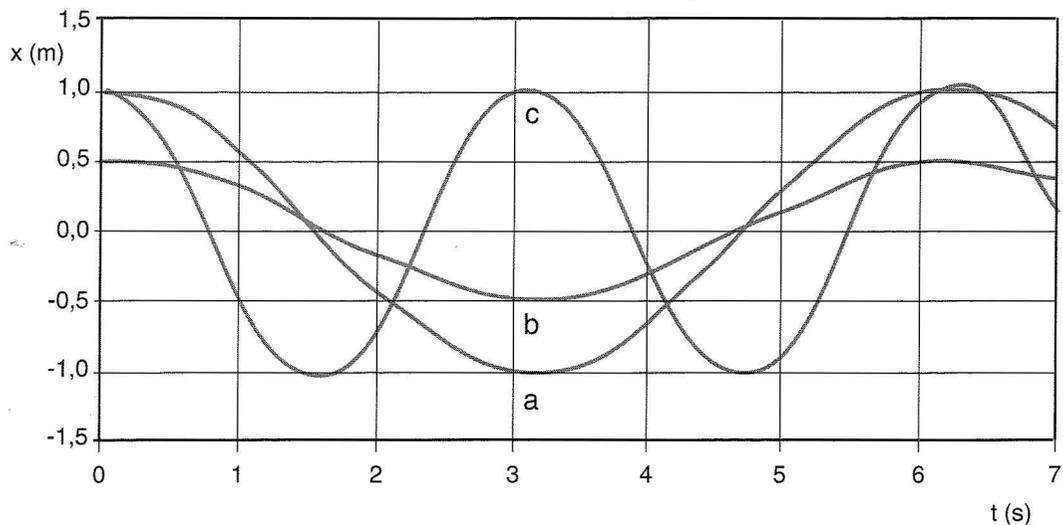


Fig. 3. Gráficos de $x = f(t)$ para la vibración de un sistema cuerpo-resorte, obtenidos mediante ordenador.

gráfico *c*, k se había cuadruplicado. En todos los casos $\Delta t = 0,005$ s.

A partir de gráficos como éstos los estudiantes pueden constatar, p.e.: el carácter periódico del movimiento analizado –e incluso determinar el período–, la independencia del período respecto a la posición inicial x_0 , la relación de proporcionalidad inversa entre el período y la raíz cuadrada de la constante elástica, etc. El gráfico *c* pone de manifiesto un pequeño incremento de la amplitud del movimiento con el tiempo, lo cual se debe a que el intervalo escogido aún no era suficientemente pequeño.

El procedimiento aquí descrito tiene la ventaja adicional de que relaciona a los estudiantes con conceptos y forma de trabajo muy utilizadas en la actividad científico-técnica contem-

poránea (Valdés y Valdés 1994): las ideas intuitivas se plasman en una forma matemática que no necesariamente ha sido rigurosamente fundamentada, y luego se “experimenta” en el ordenador con el modelo construido. En particular, en esta actividad los estudiantes “experimentan”, modificando los valores de x_0 , v_0 , k , m y Δt y analizando las características del movimiento que resulta.

Pasemos ahora a las actividades relacionadas con el procedimiento basado en la asociación entre el movimiento vibratorio y la proyección de un movimiento circular uniforme.

A.18. *Intentar obtener la forma concreta de las dependencias $x = f(t)$ y $v = f(t)$, relacionando el movimiento periódico de vaivén del cuerpo sujeto al resorte con otro movimiento*

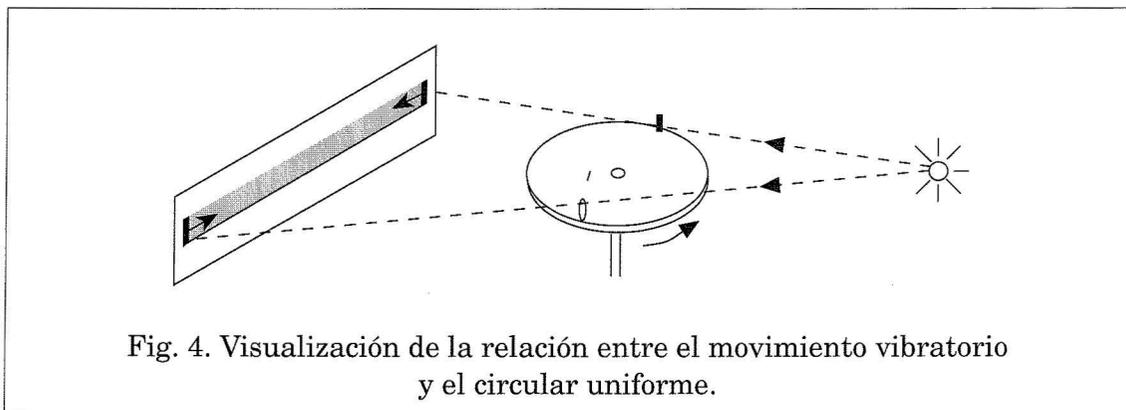
periódico más sencillo cuyas ecuaciones sean conocidas.

Seguramente todos los estudiantes han observado alguna vez la transformación, por medio de un cigüeñal o de mecanismos similares, de un movimiento rectilíneo de vaivén en otro circular, o a la inversa, de uno circular en otro de vaivén. En la discusión puede partirse de estas ideas iniciales, que luego es posible precisar con ayuda de experiencias como, por ejemplo, la representada en la figura 4, en la cual un movimiento circular uniforme se proyecta como un movimiento oscilatorio. Los estudiantes llegan así a la hipótesis de que el movimiento del cuerpo sujeto al resorte es similar al de la proyección de un movimiento circular uniforme.

El profesor debe precisar que si la hipótesis anterior es correcta, entonces es de esperar que las conclusiones que se obtengan al analizar la proyección del movimiento circular uniforme puedan ser extendidas al movimiento vibratorio; esta idea conduce a susti-

tuir, transitoriamente, el análisis del movimiento vibratorio real por el de un modelo: el de la proyección del movimiento circular uniforme.

La discusión con los estudiantes pueden apoyarse en un esquema como el de la figura 5. El origen de coordenada se fija en el centro de la circunferencia y el tiempo puede comenzarse a contar, por ejemplo, en el instante en que el cuerpo pasa por el punto P, lo que en el caso del cuerpo-resorte equivaldría al instante en que el cuerpo se suelta luego de haber sido separado una distancia A de la posición de equilibrio. Mediante un sencillo análisis geométrico y haciendo uso de las ecuaciones cinemáticas del movimiento circular uniforme, los estudiantes obtienen la ecuación $x = A \cos \omega t$, donde A es la amplitud del movimiento vibratorio y $\omega = 2\pi/T$, siendo T el período del movimiento circular y, por tanto también, de las vibraciones. La conclusión anterior, acerca de que la posición del cuerpo depende sinusoidalmente del tiempo, es coherente con los resultados obte-



nidos en las dos actividades anteriores, lo cual hace pensar que, en efecto, la hipótesis de partida para este análisis es correcta.

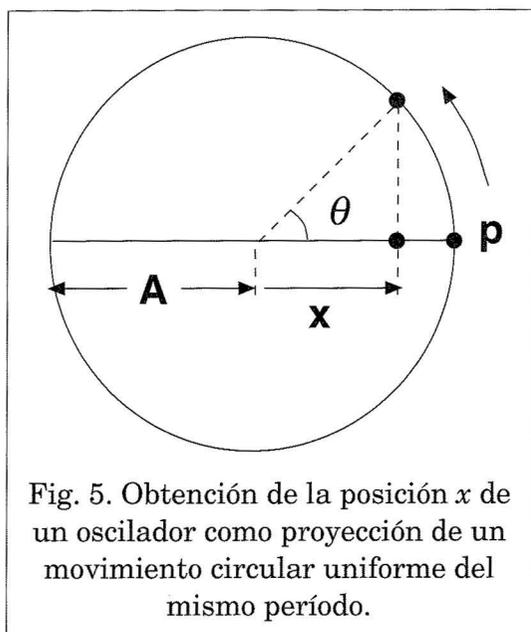


Fig. 5. Obtención de la posición x de un oscilador como proyección de un movimiento circular uniforme del mismo período.

Derivando sucesivamente respecto al tiempo la ecuación de la posición, se obtienen las ecuaciones de la velocidad, $v = -\omega A \operatorname{sen} \omega t$, y de la aceleración, $a = -\omega^2 A \operatorname{cos} \omega t$.

Los estudiantes también comprueban la coherencia entre esta última ecuación y la de la aceleración del movimiento vibratorio, $a = -k/m x$, utilizada anteriormente en las actividades A.13., A.16. y A.17. En efecto, la ecuación obtenida para la proyección del movimiento circular uniforme puede escribirse en la forma $a = -\omega^2 x$, según la cual, la aceleración de este tipo de movimiento es directamente proporcional a la posición y de sentido contrario.

De este modo, todos los resultados obtenidos confirman la hipótesis de partida acerca de que el movimiento del cuerpo sujeto al resorte es equivalente al de la proyección de un movimiento circular uniforme.

Por otra parte, al comparar las ecuaciones $a = -k/m x$ y $a = -\omega^2 x$ los estudiantes llegan a la conclusión de que $\omega^2 = k/m$, y puesto que $\omega = 2\pi/T$, obtienen la ecuación exacta para el período de las vibraciones: $T = 2\pi(m/k)^{1/2}$.

A continuación, como en el caso del problema anterior, pueden planificarse nuevos experimentos con el fin de contrastar las conclusiones de “lápiz y papel” a que se ha llegado, poniendo así de manifiesto, una vez más, la unidad que existe entre las diversas actividades, cuando el proceso de enseñanza/aprendizaje se desarrolla como una investigación dirigida. Es posible también pensar en nuevos problemas, p.e., ¿podría obtenerse el período de las oscilaciones de un péndulo a partir de la expresión $T = 2\pi(m/k)^{1/2}$?

Nota final

Hemos intentado dar en este trabajo un nuevo ejemplo de investigación dirigida y mostrar así, una vez más, la posibilidad de implicar a los estudiantes en la construcción de los conocimientos que habitualmente se les transmiten ya elaborados. En esta ocasión hemos pretendido, además, romper con la habitual distinción entre las tres activida-

des consideradas básicas en el aprendizaje de las ciencias: la “adquisición” de los conocimientos teóricos, la “verificación” experimental (a través de *prácticas ilustrativas*) y su “aplicación” a la resolución de *problemas de lápiz y papel*. En nuestro caso el hilo conductor ha sido el tratamiento de situaciones problemáticas de interés mediante un proceso investigativo que, como ocurre con todo trabajo científico, ha ido planteando más problemas que los que ha resuelto. En este proceso la distinción entre “resolución de problemas”, “prácticas de laboratorio” y “teoría” pierde todo sentido y nos encontramos con una única actividad investigadora compleja, multiforme, que va contribuyendo a la construcción de conocimientos que se apoyan mutuamente y se integran en un cuerpo coherente, al tiempo que los estudiantes se familiarizan con nuevas estrategias investigativas y reflexionan sobre el interés y relevancia del trabajo realizado. Cabría preguntarse, para terminar, si no es ésta la mejor forma —como afirma Hodson (1992)— de que los estudiantes aprendan ciencia (conocimientos científicos) y lo que es la ciencia (su naturaleza y estrategias), *haciendo ciencia*.

Agradecimientos

Los autores desean expresar su agradecimiento a la Dirección General de Investigación Científica y Técnica (DGICYT), cuya ayuda ha hecho posi-

ble la estancia del Dr. Valdés en la Universitat de València como profesor invitado, para el desarrollo del programa de investigación “La fusión de los problemas de lápiz y papel y de las prácticas de laboratorio en actividades de investigación dirigida, siguiendo las estrategias del trabajo científico”.

Referencias bibliográficas

- CALATAYUD, M. et al, (1990): *La construcción de las ciencias físico-químicas*. (NAU llibres: Valencia).
- CARRASCOSA, J. (1987): *Tratamiento didáctico en la enseñanza de las ciencias de los errores conceptuales*. (Tesis doctoral: Departament de Didàctica de les Ciències Experimentals, Universitat de València).
- DÉSAUTELS, J.; LAROCHELLE, M.; GAGNÉ, B. y RUEL, F. (1993): La formation à l’enseignement des sciences: le virage épistémologique, *Didaskalia*, 1, pp. 49-67.
- GENÉ, A. (1986): *Transformació dels treballs pràctics de Biologia: una proposta teòricament fonamentada*. (Tesis doctoral: Facultat de Biologia de la Universitat de Barcelona).
- GIL, D. (1993): Contribución de la Historia y Filosofía de las ciencias al desarrollo de un modelo de enseñanza-aprendizaje como investigación, *Enseñanza de las Ciencias*, 11 (2), pp. 197-212.
- GIL, D.; CARRASCOSA, J.; FURIÓ, C. y MTNEZ-TORREGROSA, J.

- (1991): *La enseñanza de las ciencias en la educación secundaria*. (Horsori: Barcelona).
- GIL, D. y VALDÉS, P. (1995a): La orientación de las prácticas de laboratorio como investigación: un ejemplo ilustrativo. *Enseñanza de las Ciencias* (pendiente de publicación).
- GIL, D. y VALDÉS, P. (1995b): Un ejemplo de práctica de laboratorio como actividad investigativa: segundo principio de la dinámica. *ALAMBIQUE. Didáctica de las Ciencias Experimentales* (pendiente de publicación).
- GONZÁLEZ, E. (1984): *Las prácticas de laboratorio en la formación del profesorado de física*. (Tesis doctoral: Departament de Didàctica de les Ciències Experimentals, Universitat de València).
- HODSON, D. (1992): In search of a meaningful relationship: an exploration of some issues relating to integration in science and science education, *International Journal of Science Education*, 14(5), pp. 541-566.
- HODSON, D. (1993): Re-thinking old ways: towards more critical approach to practical work in school science, *Studies in Science Education*, 22, pp. 85-142.
- MTNEZ-TORREGROSA, J. (1987): *La resolución de problemas de física como investigación: un instrumento de cambio metodológico*. (Tesis doctoral: Departament de Didáctica de les Ciències Experimentals, Universitat de València).
- MEICHSTRY, Y. (1993): The impact of science curricula on students views about the nature of science, *Journal of Research in Science Teaching*, 39 (5), pp. 429-443.
- PAYÁ, J. 1991. *Los trabajos prácticos en la enseñanza de la física y química: un análisis crítico y una propuesta fundamentada*. (Tesis doctoral: Departament de Didàctica de les Ciències Experimentals, Universitat de València).
- PORLÁN, R. (1993): *Constructivismo y Escuela. Hacia un modelo de enseñanza-aprendizaje basado en la investigación*. (Díada: Sevilla).
- PRAIA, J. y CACHAPUZ, F. (1994): Un análisis de las concepciones acerca de la naturaleza del conocimiento científico de los profesores portugueses de la enseñanza secundaria, *Enseñanza de las Ciencias*, 12 (3), pp. 350-354.
- RAMÍREZ, L. (1990): *La resolución de problemas de Física y de Química como investigación en la Enseñanza Media: Un instrumento de cambio metodológico*. (Tesis doctoral: Universidad Autónoma de Barcelona).
- REYES, J. (1991): *La resolución de problemas de Química como instrumento de cambio metodológico*. (Tesis doctoral: Universidad del País Vasco).
- SALINAS, J. (1994): *Las prácticas de física básica en laboratorios univer-*

sitaris. (Tesis doctoral: Departament de Didáctica de les Ciències Experimentals, Universitat de València).

SOLBES, J. (1986): *Introducción a los conceptos básicos de Física Moderna*. (Tesis doctoral: Departament de

Didáctica de les Ciències Experimentals, Universitat de València).

VALDÉS, R. y VALDÉS, P. (1994): Utilización de los ordenadores en la enseñanza de las ciencias, *Enseñanza de las Ciencias*, 12 (3), pp. 412-415.