

Obstáculos conceptuales en el aprendizaje de la energía de las ondas

(Conceptual obstacles in the learning of the energy of the waves)

Reinaldo Welti¹

¹Facultad de Ciencias Exactas e Ingeniería, Universidad Nacional de Rosario, Rosario, Argentina

Recibido em 13/1/2005; Aceito em 16/3/2005

Se analizan algunas de las dificultades que tienen los estudiantes universitarios para comprender los mecanismos físicos asociados con la energía de una onda mecánica unidimensional.

Palabras claves: energía, ondas, enseñanza – aprendizaje.

We analyze some difficulties of university students for understand the physical mechanisms related to the energy of a one dimensional mechanical wave.

Keywords: energy, waves, learning difficulties, university teaching.

1. Introducción

En un artículo publicado [1] en esta revista se hace un interesante análisis sobre cómo se aborda en algunos libros de textos el tema de la energía de las ondas mecánicas. En estos textos se presenta la energía de las ondas mediante una analogía entre un oscilador masa resorte que realiza un movimiento armónico simple (MAS) y un elemento del medio unidimensional en el que se propaga una onda armónica progresiva. A partir de las evaluaciones de los exámenes de alumnos que asistían a un curso de física en la Facultad de Ciencias e Ingeniería de la Universidad Nacional de Rosario percibimos que esta analogía podría ser el origen de una transferencia inadecuada de los conceptos de la mecánica del punto a un medio continuo, similar a la que se menciona en referencia [1]. En esta nota se presenta el cuestionario que utilizamos para precisar y definir en qué consistía el problema, un resumen de las respuestas de los estudiantes y se sugiere una forma sobre cómo presentar el tema para resolver estas dificultades.

2. Descripción y resultados del cuestionario

El cuestionario que se muestra en la Fig. 1, fue preparado [2] para explorar las ideas de los estudiantes acerca de la energía de una onda armónica que se propaga a lo largo de una cuerda. En particular se pretendía averiguar: ¿cómo describen el movimiento de un elemento de la cuerda? ¿cómo esquematizan estas ideas? ¿dónde suponen que la energía cinética y potencial son máximas? ¿cómo imaginan la distribución de energía a lo largo de la cuerda?

mento de la cuerda? ¿cómo esquematizan estas ideas? ¿dónde suponen que la energía cinética y potencial son máximas? ¿cómo imaginan la distribución de energía a lo largo de la cuerda?

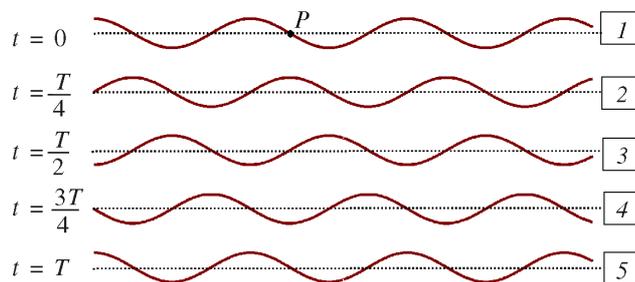


Figura 1 - Una onda armónica se propaga a lo largo de una cuerda, sin fricciones internas ni externas. En las cinco primeras gráficas de la figura se muestran instantáneas de la cuerda separadas por un intervalo de tiempo igual a $T/4$ donde T es el período de la onda. (a) Muestre sobre las gráficas (2), (3), (4) y (5) la posición del elemento de cuerda P que se muestra en la gráfica (1) (b) Grafique el desplazamiento de P en función del tiempo. ¿Qué tipo de movimiento P ? c) En cuál de las gráficas (2, 3, 4 ó 5) la energía cinética es máxima. (d) La cuerda tiene, además, energía potencial. Cuál de las gráficas la energía potencial de P es máxima? (e) Justifique la respuesta dada en (d).

El cuestionario fue aplicado (en los años 1998, 1999 y 2001) a estudiantes que estaban cursando el tercer semestre de las carreras de ciencias e ingeniería, y se tomó inmediatamente después de haber finalizado la presentación de la “cinemática” de la onda (velocidad de propagación, velocidad del medio, propagación de

¹E-mail: weltreb@arnet.com.ar.

pulsos y ondas armónicas). El número total de encuestados fue de 221. En [2] se analizan en detalle los referentes teóricos y la metodología utilizada en el análisis de datos. En esta nota haremos un resumen de las respuestas de la mayoría de los estudiantes que participaron en la entrevista:

Describen correctamente el movimiento del elemento de cuerda y concluyen que éste efectúa un MAS.

Afirman que la energía cinética es máxima en las gráficas 1, 2 y 3, cuando el elemento de cuerda pasa por su posición de equilibrio.

Sostienen que la energía potencial es máxima en las gráficas 2 y 4, cuando el elemento de cuerda está más alejado de su posición de equilibrio. Justifican esta respuesta argumentando que en un MAS la energía se conserva y, como en las gráficas 2 y 4 la energía cinética es nula, la energía potencial debe ser máxima.

La mayoría de los estudiantes imaginan que la energía potencial está relacionada con el trabajo que hay que realizar para sacar el elemento de cuerda de su posición de equilibrio y que, en consecuencia, la energía potencial es máxima cuando el elemento de cuerda está más lejos de su posición de equilibrio. Este razonamiento es consistente con la dinámica del MAS. Ninguno mencionó una posible conexión entre la energía potencial de la cuerda con el estiramiento de la misma.

Al discutir con los estudiantes los resultados del cuestionario éstos defendían sus puntos de vista utilizando como principal argumento el siguiente: [...] “como la energía de la onda es en parte cinética y en parte potencial, ésta tiene que ir cambiando de forma (de cinética a potencial y viceversa) a medida que se propaga”. Observemos que este argumento es en todo coherente con sus respuestas al cuestionario.

3. La energía de las ondas en textos y notas de clase

Se observa que, con frecuencia, las ideas de los estudiantes son ampliamente compartidas por todos quienes participan en el proceso de enseñanza-aprendizaje de las ciencias [?]. En particular, numerosos libros de textos, documentos de divulgación y notas de clase se hacen eco de las concepciones e ideas de los estudiantes. Por lo tanto, hay un permanente refuerzo de sus ideas o al menos de su manera de ver las cosas. No es de extrañar, entonces, que en la mayoría de los materiales escritos se encuentren razonamientos similares a las respuestas que dan los estudiantes a la encuesta que realizamos. Sin embargo, se pueden distinguir diferentes niveles de compatibilidad entre las ideas comunes y lo que expresan los textos, que en algunos casos son francamente erróneos y en otros ambiguos y más o menos compatibles con las ideas de los estudiantes. Además de los que se comentan en [1] podemos agregar los siguientes enunciados:

Borowitz y Bornstein [4], afirman que: [...] “cada partícula de la cuerda tiene un movimiento armónico simple. Hemos visto que en un movimiento armónico simple, la energía del oscilador se convierte continuamente de energía cinética en elástica y viceversa. Entonces, cuando el elemento de cuerda está momentáneamente en reposo, no tiene energía cinética y toda su energía es elástica.”

Observamos que este razonamiento es idéntico al que hacen nuestros estudiantes, y coincide con lo que afirma Watson [5]: [...] “cuando un punto de la cuerda está en su máxima elongación, a uno y otro lado de su posición de equilibrio, queda un instante en reposo, y toda la energía se encuentra en estado potencial debido a la deformación de la cuerda. Cuando el elemento de cuerda pasa por su posición de equilibrio, toda su energía es cinética.”

Lo mismo ocurre en Tipler [6]: [...] “Si consideramos a cada elemento de cuerda de masa $\mu\Delta x$ como un oscilador armónico simple cuya máxima amplitud es A , sabemos que su energía total será $\Delta E = 1/2\mu\omega^2 A^2\Delta x$, donde ω es la frecuencia de la onda”.

En el libro de Mullin *et al* [7] se encuentra el siguiente argumento: [...] “Hemos examinado cómo la energía de un cuerpo se transforma de una forma a la otra (potencial y cinética) como ocurre en el ejemplo del péndulo. Ahora vamos a aplicar estos conceptos a las ondas. Cuando una onda viaja a través de un medio, la propiedad física que se propaga a través del medio es energía. Para las ondas en cuerdas o las ondas sonoras, esta energía que se propaga debe estar en la forma de energía cinética y potencial. En muchos casos, la energía de la onda es una mezcla de energías cinética y potencial, a pesar que la naturaleza de esta mezcla varía con el tiempo. Un modelo que muestra cómo viaja la energía a través de un medio y al mismo tiempo cambia su forma de energía cinética a potencial y viceversa es una cadena de masas conectadas entre sí por resortes sin masa. En la Fig. 2 se muestra una serie de dibujos que muestran a un pulso longitudinal que se propaga a lo largo de la cadena. Si despreciamos la fricción la energía total permanece constante, a pesar que está constantemente cambiando de forma. En las líneas 1, 3, 5,... la energía es toda cinética; en 2, 4, 6,... es toda potencial.”

En esta exposición se advierte claramente cómo la suposición errónea de que la energía potencial y cinética se alternan en el tiempo (en el péndulo y en un elemento del medio en el que se propaga una onda) induce a pensar que éstas también se alternan espacialmente, y se llega a una explicación que coincide con la de nuestros estudiantes.

En algunos textos - que tratan correctamente el tema se señala que el resultado no es intuitivo ni evidente. Por ejemplo en Roederer [8]: [...] “en una porción del medio, en la que en un instante dado la densidad de energía cinética es máxima, tam-

bién la densidad de energía elástica será máxima. Esto aparenta ser un contrasentido, pero se explica observando la figura.”. El autor remite a una figura en la que se muestra que cuando el elemento de cuerda pasa por su posición de equilibrio, su velocidad es máxima y también su deformación (estiramiento) es máxima.

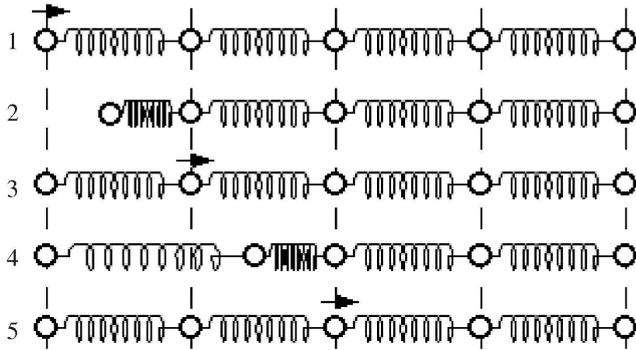


Figura 2 - Modelo para estudiar cómo viaja la energía a través de un medio.

4. Conclusión

Los resultados del cuestionario permitieron poner de manifiesto que la interacción entre el nuevo conocimiento (energía de la onda) y el conocimiento previo (oscilador armónico) estimula la transferencia de los significados anteriores a la nueva situación planteada. Los estudiantes encuentran que un elemento de cuerda realiza un movimiento armónico simple (MAS) similar al del oscilador de resorte estudiado en el semestre anterior. Esta analogía cinemática les induce a pensar que las propiedades dinámicas del elemento de cuerda son las mismas que las de un oscilador de resorte. En particular concluyen que la energía del elemento de cuerda se conserva y que su energía potencial es máxima cuando su elongación es máxima y que en esa posición, su energía cinética es cero.

Conciben el problema de la cuerda – que pertenece a la mecánica del continuo – como si fuese una prolongación de la mecánica del punto y piensan que, en un sistema de partículas que interactúan entre sí, la conservación de la energía del sistema implica la conservación de la energía de cada una de ellas.

Para superar algunos de los obstáculos conceptuales en el aprendizaje de la energía de las ondas, consideramos conveniente introducir, antes de iniciar el estudio del transporte y almacenamiento de la energía de las ondas, algunos contenidos de la física del continuo que permitan comprender cómo la energía conserva en un medio continuo.

La ley de conservación de la energía es una de las leyes básicas de la física. Esta establece que hay una cierta cantidad, que llamamos energía que no cambia en las diferentes transformaciones que se producen en

la naturaleza. En otras palabras, si al inicio de un proceso calculamos la energía y si después de finalizado el proceso calculamos esa cantidad otra vez, ésta tiene el mismo valor que al inicio. Esta forma de enunciar la conservación de la energía es una concepción puramente *contable*, que se utiliza en la física de la partícula o en la teoría de circuitos concentrados, pero no es satisfactoria si se pretende incorporar algún detalle sobre cómo la energía se conserva. En el marco de la física del continuo se formula la ley de conservación *local* de la energía: *si la energía disminuye en una región del espacio es porque ésta fluye alejándose a través de los contornos de esta región* [9]. En esta formulación, además de especificar la densidad de energía en diferentes zonas del espacio, se debe introducir otra cantidad: el *flujo de energía* a través de una superficie. Esta jerarquización de los principios más abarcadores facilita la formulación de la estructura conceptual de la física y posibilita una acomodación del pensamiento científico al conocimiento intuitivo de los alumnos [10].

La mayoría de los textos que estudian la energía de las ondas, sin emplear las ecuaciones de conservación de la energía en un volumen de control, se valen, al igual que nuestros estudiantes, de la analogía entre el movimiento de un elemento de cuerda con un oscilador masa resorte [1] y concluyen que energía potencial y cinética se alternan en el tiempo y que la energía potencial es máxima cuando la separación del elemento de cuerda de su posición de equilibrio es máxima. No es de extrañar, por lo tanto, que los profesores que se formaron leyendo estos textos tengan ideas concordantes con las de los estudiantes. En este contexto se genera una retroalimentación permanente de estas ideas.

Los docentes debemos adoptar una actitud vigilante y activa para que nuestros estudiantes no reemplacen las ideas científicas por las comunes. Tenemos que identificar los enunciados incorrectos y descubrir los comentarios ambiguos que son más o menos compatibles con esas ideas comunes. Hay diversos modos posibles de trabajo como, por ejemplo, aplicar cuestionarios similares a los utilizados en nuestra encuesta como ejercicios cualitativos para crear una situación de conflicto o realizar otras actividades, como la crítica guiada de textos. Actualmente estamos implementando estas propuestas en nuestros cursos y hemos podido comprobar que resultan sumamente útiles para alcanzar una comprensión significativa de esta temática.

Referencias

- [1] A.B. Alfonso y A.S. Florencio, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **26**, 247 (2004)
- [2] R. Welte, *Revista Enseñanza de las Ciencias* **20**, 261 (2002)
- [3] L. Viennot y S. Rozier, *The Content of Science: A Constructivist Approach to its Teaching and Learning*, edi-

- tado por P. Fensham, R. Gunstone y R. White, R. (The Falmer Pres, London, 1994), p. 237-254.
- [4] S. Borowitz and L.A. Bornstein, *A Contemporary View of Elementary Physics* (McGraw-Hill Book Company, Tokyo, 1968).
- [5] W. Watson, *Curso de Física* (Editorial Labor S.A., Barcelona, 1950)
- [6] P.A. Tipler, *Física* (Editorial Reverté S.A., Barcelona, 1995).
- [7] W.J. Mullin, W.J. Gerace, J. Mestre and S.L. Velleman, *Fundamentals of Sound with Applications to Speech and Hearing Science* (Allyn & Bacon, Massachusetts, 2003).
- [8] J.G. Roederer, *Mecánica Elemental* (Editorial Universitaria de Buenos Aires, Buenos Aires, 2002).
- [9] R.P. Feynman, R.B. Leighton and M. Sands *The Feynman Lectures on Physics* (Addison Wesley, New York, 1966).
- [10] F. Herrmann, *European Journal Physics* **21**, 49 (2000).