LA REDUCCIÓN FUNCIONAL EN LA JUSTIFICACIÓN DE LA ADIABATICIDAD DE LAS ONDAS SONORAS

Utges, Graciela y Welti, Reinaldo
Taller de Investigación en la Didáctica de las Ciencias. Departamento de Física y Química. Facultad de Ciencias Exactas e Ingeniería. Universidad Nacional de Rosario. Argentina
graciela@fceia.unr.edu.ar

Resumen. Se presentan en este trabajo los resultados de una investigación exploratoria en la que se analiza una interpretación errónea acerca del carácter adiabático del proceso de propagación de las ondas sonoras. Se explica la persistencia de esta interpretación a partir de la tendencia del pensamiento espontáneo a reducir la complejidad de problemas con variables múltiples, privilegiando una de ellas sobre las otras. Esta reducción funcional aparece tanto en los textos de física como en el discurso de algunos docentes universitarios cuando se intenta justificar por qué las ondas sonoras deben considerarse adiabáticas y no isotérmicas.

Palabras clave. Propagación de ondas, sonido, reducción funcional, enseñanza.

Functional reduction in the justification of sound wave adiabaticity

Summary. In this paper we present the results of an exploratory investigation in which we analyze an erroneous interpretation on the adiabatic hypothesis of sound. The persistence of this interpretation is explained according to a tendency of the spontaneous thought in reducing the complexity of problems with multiple variables and privileging one of them over the other ones. It is shown how this functional reduction is manifested as much in physics texts as in some university professors practice when they try to justify why the sound waves should be considered adiabatic and not isothermic ones.

Keywords. Sound waves, functional reduction, teaching.

INTRODUCCIÓN

Newton (1687), el primero en deducir una expresión para la velocidad del sonido en el aire, obtuvo un valor sensiblemente menor al que se mide experimentalmente. En su deducción supone que, cuando una onda se propaga en un gas, las variaciones de presión de un elemento del mismo son directamente proporcionales a las variaciones de su densidad. Laplace (1816) demostró que esta hipótesis supone movimientos isotérmicos del gas y rectificó esta diferencia numérica postulando que los movimientos del fluido son adiabáticos.

Nuestro interés aquí es analizar, con mayor profundidad, el carácter adiabático de las ondas sonoras, mostrando que, si bien se trata de una idea ampliamente aceptada, suele ser justificada de manera errónea.

Todos los cursos introductorios en la mecánica de las ondas incluyen una discusión de la propagación de ondas sonoras a través de gases. Las dos ecuaciones fundamentales son la segunda ley de Newton, que relaciona la aceleración al gradiente de presión, y la ecuación de continuidad, que expresa la conservación de la masa. Estas dos ecuaciones pueden ser linealizadas si se supone que la presión acústica de la onda es muy pequeña comparada con la presión atmosférica. Para completar el sistema de ecuaciones se necesita una ecuación que relacione la presión y la densidad en la onda acústica. Es en este punto en el que se introduce la ecuación adiabática. En muchos textos se justifica que las compresiones y rarefacciones son adiabáticas porque las variaciones de presión son muy rápidas para que haya un flujo de calor. El hecho sorprendente es que estas justificaciones son completamente incorrectas, pues, como se demuestra en el apéndice, la suposición adiabática es correcta sólo si los cambios en la presión y, por lo tanto, de la temperatura son lo suficientemente lentos. Este hecho es ciertamente conocido en el «ambiente científico» (Zemansky, 1976; Fletcher, 1977) pero no está reflejado en la mayoría de los textos universitarios.

Habiendo constatado razonamientos incompletos, equivocados e incluso contradictorios en textos universitarios, decidimos analizar de qué modo los docentes de física explicaban la adiabaticidad del sonido. Una investigación exploratoria realizada con un grupo reducido nos permitió comprobar la persistencia de interpretaciones erróneas y detectar en qué medida la fuente de dificultades reside en la inclinación espontánea hacia una «reducción funcional» (Viennot y Rozzier, 1994) en el razonamiento común. La reducción funcional es una tendencia del razonamiento común en tratar a una cantidad física que depende de muchas variables como si ésta dependiera solamente de una.

Presentamos, en este trabajo, resultados preliminares de nuestra investigación, enfocados desde tres perspectivas: el análisis histórico del proceso de la determinación teórica y experimental de la velocidad del sonido, las modalidades de la explicación encontradas en los textos universitarios sobre la adiabaticidad de las ondas sonoras y la visión de los docentes universitarios sobre el tema.

DETERMINACIÓN TEÓRICA DE LA VELOCIDAD DEL SONIDO Y VALORES EXPERIMENTALES. ASPECTOS HISTÓRICOS

El primer intento para calcular teóricamente la velocidad de propagación de la onda sonora fue realizado por Newton (1687). En el segundo libro de su *Principia matematica* explica la generación y propagación del sonido y obtiene una expresión para su velocidad: «[…] las velocidades de los pulsos que se propagan en un fluido elástico están en razón directa a la raíz cuadrada de la fuerza elástica, e inversamente a la densidad».

Newton denomina *fuerza elástica* al *coeficiente de compresibilidad.* Si designamos con B la compresibilidad del aire, con c la velocidad del sonido y con ρ la densidad del aire, su ecuación se escribe de la siguiente manera:

$$c = \sqrt{\frac{B}{\rho}}$$

Los trabajos experimentales de Boyle (1660) –contemporáneo de Newton– sobre las propiedades elásticas del aire se resumen en la ley que lleva su nombre, que establece que la presión (*fuerza elástica*) es proporcional a la densidad (*condensación*). De acuerdo con esta ley, el módulo de compresibilidad del aire es igual a la presión atmosférica, esto es: $B = p =$ *presión atmosférica*. Admitiendo este valor para el módulo de compresibilidad, Newton obtuvo el valor de *280 m/s*, que juzgó adecuado, a pesar de ser menor que los medidos, en esa época, por Gassendi y Marsenne (Leninhan, 1951). Consideró, al parecer, que la diferencia no era muy significativa y que futuras mediciones se aproximarían más a su fórmula. Sin embargo, experimentos posteriores, cada vez más precisos, confirmaban valores más altos, por lo cual, en la segunda edición de su *Principia matematica* de 1713, revisó su teoría, tratando de ajustarse a los resultados experimentales. Especulaba que una de las causas del desacuerdo podría deberse a las impurezas del aire (en particular el vapor de agua) y otra, al tamaño de las partículas del aire. Sostenía que, en las partículas sólidas del aire, el sonido se propaga instantáneamente y, como la distancia entre partículas está en una relación *9* a *1* con su diámetro, entonces el valor que previamente había calculado debía incrementarse en un factor $1/9 \approx 0,11$. Con este argumento obtiene para la velocidad del sonido el valor $280 + 0,11 \times 280 = 310,8$ *m/s*.

La deducción de Newton fue muy criticada, entre otros, por Euler (Teubner, 1926), quien, en una disertación en la Universidad de Basilea en 1727, expone su versión de la propagación del sonido y propone (sin ofrecer deducción) que la expresión para la velocidad del sonido es la fórmula de Newton multiplicada por $4/\pi$. D'Alambert (1747) sugirió que el problema se resolvería cuando se encontrase una ecuación, para las ondas sonoras que se propagan en el aire, similar a la que él había deducido para las ondas en cuerdas. Lagrange deduce la ecuación de las ondas sonoras y encuentra para la velocidad del sonido en el aire ¡la misma expresión que Newton! Lindsay (1974), refiriéndose a esta circunstancia se pregunta: ¿Es esto una evidencia del genio de Newton o de su buena suerte? En 1766, Euler (Teubner, 1926), siguiendo un procedimiento similar al de los textos de física actuales, deduce también la ecuación de ondas para las ondas sonoras. Como obtiene para la velocidad del sonido el mismo valor que Lagrange y Newton (*280 m/s*), reconoce que:

«[...] sin embargo, sabemos por la experiencia que el sonido se transmite en el aire a la velocidad de 340 m/s. Nadie ha descubierto la razón para este exceso del valor experimental sobre el teórico».

También Poisson (1808) hace referencia a las discrepancias mencionadas:

«[...] existe una apreciable diferencia entre la velocidad del sonido calculada por la teoría y el encontrado en la experiencia. Todos los físicos que han medido esta velocidad encuentran un valor más grande que el calculado. Los miembros de la Academia de Ciencias [de París] han encontrado que el sonido viaja a 337 metros por segundo. Pero si se usan los valores de la elasticidad y densidad del aire, que resultan de las mediciones más recientes, y [con estos valores] se calcula, la velocidad del sonido con la expresión teórica se encuentra 282 metros por segundo, una cantidad que difiere del medido en una sexta parte».

No se progresó más sobre el problema de la velocidad del sonido hasta que Laplace (1816) señaló que tanto Newton como Lagrange, en sus deducciones, consideraron el módulo de compresibilidad igual a la presión y que esto es equivalente a suponer que los movimientos elásticos del aire se producen a temperatura constante. Laplace argumentaba que:

«[...] cuando un gas se comprime, el calor generado por el acercamiento de dos moléculas próximas incrementa su temperatura y ésta se difunde poco a poco a través del aire que rodea los cuerpos. Pero como (en una onda sonora) esta difusión es muy lenta comparada con la velocidad de las vibraciones, podemos suponer, sin sensible error, que, durante el periodo de una sola vibración, la cantidad de calor es la misma para las dos moléculas. Al acercarse las moléculas, una repele a la otra, en primer lugar, porque si se mantiene constante la temperatura, la repulsión mutua incrementa en razón inversa a su separación y, en segundo lugar, porque el calor latente que se desarrolla aumenta su temperatura. Newton tomó en cuenta solamente la primera de estas dos causas de repulsión, pero es claro que la segunda causa incrementará la velocidad del sonido ya que incrementa la elasticidad del aire. Teniendo en cuenta esto, encuentro para la elasticidad del aire la siguiente expresión: $B = \gamma p$, donde γ es la razón entre los calores específicos del gas a presión y a volumen constante respectivamente».

De acuerdo con este razonamiento se obtiene para la velocidad del sonido la expresión: $c = \sqrt{\gamma\, p/\rho}$. En 1816, cuando Laplace formuló esta teoría no se tenían medidas muy precisas de γ. Usando el valor de $\gamma = 1{,}5$, Laplace encontró que $c = 345{,}9$ *m/s* para una temperatura de *6 ºC*, valor muy próximo al mejor resultado experimental de la época, *337,2 m/s*, para esa temperatura. Algunos años más tarde, el valor medido de γ fue de *1,40,* con el que se obtiene un muy buen acuerdo entre la teoría y el experimento.

Pommeau (1999) afirma que esta concisa deducción de Laplace marca el origen de la termodinámica. En la época de Boyle y de Newton, la termodinámica no estaba aún constituida como una rama de la física. Recién a fines del siglo XVIII se comenzó a diferenciar el calentamiento de un gas realizado a volumen y a presión constante, y se introdujeron los conceptos de *calor específico* para uno y otro caso. A principios del siglo XIX, Laplace consolidó el concepto de transformación adiabática y transformación isotérmica. En una compresión adiabática, la temperatura del gas aumenta y, por lo tanto, se precisa realizar un esfuerzo mayor para obtener la misma deformación unitaria que en una compresión isotérmica. Esto significa que la elasticidad *B* de un gas en una compresión adiabática es mayor que en una compresión isotérmica. Podemos concluir que, desde Newton en adelante, la mecánica de la velocidad del sonido estaba resuelta, el problema era la termodinámica.

LAS INTERPRETACIONES SOBRE LA ADIABATICIDAD. UN ANÁLISIS EN TEXTOS UNIVERSITARIOS

En el apartado anterior, analizamos cómo se desarrollaron históricamente los ajustes que condujeron a una adecuación entre la velocidad del sonido calculada teóricamente y los valores experimentales. Resulta evidente que el denominado «error de Newton» estaba relacionado con la consideración del proceso como isotérmico y fue superado cuando se comprendió su carácter adiabático. Si bien eso resuelve las conocidas diferencias entre los valores experimentales y teóricos, implica, al mismo tiempo, interpretar las razones por las cuales la propagación del sonido debe considerarse como adiabática. Como vimos, Laplace menciona que la razón reside en que la difusión del calor es muy lenta comparada con la rapidez de las vibraciones, lo que permite suponer que, durante el periodo de una sola vibración, la cantidad de calor permanece constante.

Nos interesa ahora analizar cómo se explica esta argumentación en los textos de física. En general, los textos universitarios suelen retomar el debate histórico sobre el valor de la velocidad del sonido y su relación con la adiabaticidad del fenómeno. Al mismo tiempo, presentan algunos argumentos para justificar este aspecto. Veamos algunos ejemplos:

«[...] el error de Newton resulta del empleo de la ley de Boyle, válida solamente a temperatura constante. [...] En lugar de utilizar la ley de Boyle, válida únicamente a temperatura constante, se debe utilizar la ley adiabática que relaciona *p* y *V*, cuando ningún calor puede circular en el sistema. En efecto, las vibraciones son tan rápidas que el calor no puede transferirse entre las zonas comprimidas y las zonas dilatadas. Antes de que esto se produzca, transcurre un medio periodo, la zona comprimida se dilata y recíprocamente: todo ocurre como si dos muros impidiesen que el calor se desplace de un punto al otro.» (Crawford, 1977)

Como vemos, Crawford argumenta que la adiabaticidad del sonido se debe a que las vibraciones son «muy rápidas» para que pueda producirse transferencia de calor entre la zonas de alta temperatura y las de baja temperatura. En la última parte del párrafo transcripto, el autor alude al periodo de las vibraciones. La idea entonces es que la frecuencia debe ser lo suficientemente elevada para que no pueda establecerse un intercambio de calor que tienda a igualar las temperaturas. Argumentos similares encontramos en otros textos:

«[...] al comprimir un gas se eleva su temperatura, sucediendo lo contrario al expandirse. En el razonamiento anterior [donde utilizó la ley de Boyle para relacionar las variaciones de presión con las variaciones de densidad] hemos supuesto que las condensaciones y enrarecimientos que tienen lugar en el gas al atravesarle la onda sonora son tan pequeñas que, por conducción a y desde el aire circundante, permanece constante la temperatura. Sin embargo, las condensaciones y enrarecimientos se verifican tan rápidamente que el aire no tiene tiempo de perder calor cuando se calienta por compresión, ni de recibir calor de las partículas que le rodean cuando se enfría por expansión, durante el paso de una onda y, por tanto, son adiabáticas la compresión y expansión.» (Watson, 1950)

«Una aplicación interesante de la ecuación PV^{γ} = cte es la propagación del sonido en un gas. Si la frecuencia de vibración de una onda sonora es ω, el intervalo entre una compresión y una expansión de un elemento de volumen del gas es del orden de $\tau \sim 1/\omega$. La frecuencia ω de un sonido ordinario es lo suficientemente elevado para que τ sea muy pequeño e impida los intercambios de calor entre una pequeña cantidad cualquiera del gas y el gas del medio ambiente. Una pequeña cantidad de gas cualquiera sufre entonces compresiones que son adiabáticas, y sus propiedades elásticas son entonces descriptas por la ecuación PV^{γ} = cte.» (Reif, 1977)

En los párrafos precedentes, los argumentos se asientan en razonamientos temporales, relacionando la adiabaticidad con la gran rapidez de los cambios y sugiriendo, entonces, que la hipótesis mencionada es tanto más adecuada cuanto mayor es la frecuencia. De hecho, esto no es así. Como se muestra en el apéndice, el criterio de aplicabilidad de la suposición adiabática es correcta, por el contrario, si la frecuencia de la onda sonora es lo *suficientemente baja*.

Si bien la mayoría de los textos que hemos analizado brindan explicaciones que aluden al período o la frecuencia de las ondas sonoras, destacando la idea de la falta de tiempo para la transferencia de calor, encontramos otros que utilizan también argumentos espaciales para justificar la adiabaticidad. Veamos un ejemplo:

«Es un hecho conocido que la compresión de un gas origina una elevación de su temperatura (y viceversa), salvo que el calor de compresión se elimine de algún modo. A medida que una onda de compresión se propaga a través de un gas, las regiones comprimidas en un instante dado se encuentran ligeramente más calientes, mientras que los enrarecidos están algo más fríos. Sin embargo las distancias entre las compresiones y los enrarecimientos son tan grandes y se suceden tan rápidamente los cambios de temperatura que, de hecho, no tiene lugar ningún intercambio de calor entre las partes más calientes y más frías de la onda. Por tanto las compresiones son adiabáticas en lugar de isotermas, por lo que en la ecuación de la onda debe utilizarse la compresibilidad adiabática.» (Sears, 1959)

Podemos notar en este último párrafo que se menciona simultáneamente que las distancias entre compresiones y enrarecimientos son grandes (λ grande) y se suceden muy rápidamente (T pequeño)[1]. Sin embargo, período y longitud de onda no son magnitudes independientes. Si una de las magnitudes aumenta, también lo hace la otra. En una onda sonora las magnitudes físicas involucradas, como presión y densidad, varían con el espacio x y el tiempo t según la relación $t - x/c$ o $t + x/c$, donde c es la velocidad de propagación de la onda. Esto significa que, si Δt es la duración temporal de la onda, su extensión espacial es $\Delta x = c\, \Delta t$. En particular, en una onda armónica, la periodicidad espacial λ (longitud de onda) está relacionada con la periodicidad temporal T (periodo) mediante la relación $\lambda = cT$. Cabe preguntarse, entonces, ¿qué significa afirmar simultáneamente que λ es grande y T es pequeño? O, en todo caso, dentro de qué rangos de λ o de T es justificable la hipótesis de adiabaticidad? Para obtener una respuesta adecuada, debemos comparar el proceso de propagación de la onda con el proceso de termoconducción (Apéndice).

Cabe destacar que, en el caso de que realicemos razonamientos exclusivamente espaciales, podríamos pensar que, si la longitud de onda es grande, entonces, la distancia entre las zonas de alta y baja temperatura es grande y, como además la conductividad térmica del aire es pequeña, el flujo de calor entre estas zonas es despreciable y el proceso es adiabático. Con este razonamiento se llega a la conclusión de que el proceso es adiabático si la longitud de onda es grande, esto es, si la frecuencia es baja.

Observemos que el razonamiento temporal y espacial llega a resultados contradictorios. El temporal concluye que el proceso es adiabático si la frecuencia es lo suficientemente grande, o sea que, de manera explícita, supone una cota inferior f_m para la frecuencia, mientras que el razonamiento espacial concluye que el proceso es adiabático si la longitud de onda es grande, lo cual equivale a suponer la existencia de una cota superior para la frecuencia f_M.

LAS OPINIONES DE LOS DOCENTES

Habiendo observado que los textos universitarios realizan muchas veces interpretaciones inadecuadas sobre las razones de la adiabaticidad del sonido y no precisan las condiciones bajo las cuales constituye una hipótesis razonable, nos interesaba saber las ideas que tienen al respecto los docentes de física. Nos preguntábamos: ¿Qué tipo de argumentos utilizan los docentes para dar cuenta de la hipótesis de adiabaticidad? ¿Qué variables priorizan en la interpretación? (espacio, tiempo, velocidad) ¿Cómo modelizan el sistema? ¿Cómo imaginan la transferencia de calor? ¿Están presentes en sus argumentaciones razonamientos de tipo monoconceptual?

Para dar respuesta a estos interrogantes, realizamos una investigación exploratoria con un grupo reducido de docentes universitarios de física, que dictan actualmente cursos de ondas o de termodinámica. La decisión de trabajar con pocos docentes se basó en nuestro interés en acompañar de manera detallada sus razonamientos.

En primer lugar, realizamos entrevistas extensas con cada uno de los docentes. Iniciamos estas entrevistas semiabiertas preguntándoles si recordaban cómo se obtiene la velocidad del sonido y de qué variables depende. Pasábamos luego a considerar el carácter adiabático de las ondas sonoras, tema que era mencionado espontáneamente por casi todos los entrevistados. Les preguntamos entonces por qué consideraban el sonido como adiabático. A partir de ese punto, buscamos acompañar los razonamientos particulares de cada entrevistado, interviniendo solamente para realizar preguntas que contribuyeran a ampliar nuestra comprensión de sus argumentos o, como ilustraremos en la descripción de algunas de las entrevistas, para destacar conflictos o contradicciones. Concluida la entrevista, solicitamos a todos que pensaran más detalladamente la cuestión y una semana más tarde realizamos una reunión conjunta para discutir el tema.

Las entrevistas fueron grabadas y la reunión fue registrada en vídeo. Describimos a continuación aspectos significativos de algunas de las entrevistas con el objeto de ilustrar los razonamientos de los profesores.

Alberto (profesor de ondas) explica que la velocidad del sonido depende del módulo de compresibilidad y de la densidad y recuerda que hay allí una dependencia con la temperatura. Menciona que el modelo puede ser isotérmico o adiabático y que de allí sale la relación con la temperatura. Ante la pregunta de por qué se considera adiabática responde que «eso lo creo por razones experimentales. El cálculo hecho con la suposición isotérmica no da valores adecuados». Cuando le solicitamos una interpretación o una explicación, busca modelizar el sistema tomando un elemento de volumen. Del análisis del dibujo que realiza y sus comentarios iniciales surge que piensa en un gas dentro de un recinto aislado e interpreta la adiabaticidad en relación a la transferencia de calor con el medio externo. Explica que «*las compresiones son suficientemente rápidas como para que no haya transferencia de calor con el medio*». Ante la pregunta sobre qué significaría «suficientemente rápidas», comenta que «*hay que considerar que la transferencia de calor lleva un tiempo finito*». Piensa que ese tiempo debe ser bastante más grande que un tiempo característico de la onda que, concluye, debe ser el período. Sin embargo, no logra avanzar en sus razonamientos, no encuentra cómo comparar el período con algún tiempo relacionado con la transferencia de calor.

Carlos recuerda rápidamente que las ondas sonoras deben ser consideradas adiabáticas, pero no ha pensado nunca en las razones por las cuales esa idea es justificable. Sus razonamientos comienzan con la idea de rapidez, y menciona que *«debería compararse la rapidez* [velocidad] *de las ondas con la rapidez de difusión del calor*». Se pregunta cómo hacer eso, y comienza a plantear una perspectiva microscópica. Piensa en un gas, las moléculas, el camino libre medio. Intenta relacionar con la velocidad térmica, pero no consigue establecer relaciones adecuadas. Queda entusiasmado con el problema, y manifiesta su intención de profundizar.

Eliana, otra de las entrevistadas, recuerda que las ondas de sonido las comprendió bien a partir de los últimos capítulos del libro de Roederer (1966): «a partir del tratamiento de un tubito de gas que se desplazaba, es decir, se estiraba y comprimía, uno encuentra la ecuación de onda». Recuerda que hay un coeficiente que tiene que ver con las propiedades elásticas del aire, que va a intervenir y que ese coeficiente depende de la temperatura. Comenta a continuación que «la hipótesis que se hacía era que se modelizaba como adiabática porque era rápida». Agrega inmediatamente: *«tiempo corto»*. Solicitamos a Eliana que precisara mejor a qué se refería con tiempo corto. Comprendió la necesidad de comparar: «[…] claro, hay que pensarlo en relación a otro... las cosas son grandes o chicas relativas con otras». Y comenzó a recordar procesos en los cuales se plantea la adiabaticidad: «[…] el termo, por ejemplo, es adiabático en una hora, pero si lo dejo un día... Por otro lado, al termo lo “fabrico” para ser adiabático, en cambio, por ejemplo, en un motor, uno se encuentra con un proceso que considera adiabático». Dibuja un elemento de volumen y, considerando los desplazamientos del mismo, comenta que va a circunscribirse al caso de una onda plana. Y rápidamente plantea que la transferencia de calor posible sería entre las zonas de mayor o menor presión en la onda. Plantea que habría que suponer la hipótesis de adiabaticidad y ver cómo serían los gradientes de temperatura en ese caso. Piensa: «[…] si aumenta la presión, aumenta la temperatura». Analiza entonces, en voz alta, que la transferencia de calor se produciría entre las zonas de mayor y menor temperatura y, «como esa transferencia lleva un tiempo, si la frecuencia es alta, entonces no habrá tiempo para esa transferencia».

Como puede observarse, tanto el razonamiento de Eliana, como el de los otros dos entrevistados, están asociados exclusivamente a los tiempos. El entrevistador sugiere entonces que piense en la relación frecuencia - longitud de onda. Eliana advierte que una frecuencia baja implica al mismo tiempo una longitud de onda grande. En particular, analiza el caso de una onda de frecuencia de *1 Hz*, para el cual *«la longitud de onda es del orden de 300 metros»*. Comprende que, si la frecuencia es baja, las zonas de alta y baja temperatura están muy distanciadas. Eso la sorprende. Queda pensando: «[…] puede haber algún tipo de compensación... habría que analizar mejor». Esta respuesta muestra un punto de inflexión entre el razonamiento puramente temporal y el puramente espacial. En las subsiguientes entrevistas se llegó, inducido por el entrevistador, a esta situación, y el resultado inmediato fue la sorpresa, pues el entrevistado se daba cuenta que, siguiendo este razonamiento, llegaba a una conclusión contraria: que el proceso es adiabático si la longitud de onda es grande, esto es, si la frecuencia es baja.

En una reunión realizada a la semana siguiente los docentes llegaron sin haber transformado significativamente sus ideas. Habían consultado algunos textos y observaron que la cuestión no era, en general, tratada en profundidad. El debate condujo al reconocimiento de las diversas modalidades de explicación adoptadas espontáneamente y a la necesidad de establecer un análisis que comparara la propagación sonora con la conducción térmica. El trabajo conjunto posibilitó una conceptualización adecuada del fenómeno, así como la toma de conciencia de los razonamientos iniciales indiferenciados y erróneos.

DISCUSIÓN

Como hemos mostrado en los parágrafos precedentes, existe una tendencia dominante a asociar las razones por las cuales las ondas sonoras deben considerarse adiabáticas con la «*rapidez*» de las ondas (y sus consecuentes cambios de presión y temperatura), lo cual justificaría que no se produzca la transferencia de calor que iguale las temperaturas. Ahora bien, ¿en qué consiste esa *rapidez*? Nuestro trabajo exploratorio indica que predomina la idea de asociar *rapidez* con frecuencia, idea que conduce a una interpretación errónea.

Resulta evidente que los razonamientos desarrollados por los docentes y los textos que hemos presentado avanzan en consideraciones que contemplan sólo una variable (generalmente temporal, aunque también aparecen casos en que se recurre a una consideración exclusivamente espacial). Ya sea que se explique en términos exclusivamente temporales o exclusivamente espaciales, los argumentos monoconceptuales ignoran las relaciones entre longitud de onda y frecuencia, tratando a una y otra como si fueran independientes.

Esta tendencia del pensamiento espontáneo a realizar razonamientos monoconceptuales fue identificada por Rozier y Viennot (1991) como *reducción funcional*: utilizar menos variables de las necesarias y preferentemente sólo una. Las autoras identifican dificultades en el análisis de fenómenos que contemplan diversas variables, en situaciones en que éstas cambian simultáneamente y, además mantienen relaciones permanentes entre sí. La reducción funcional aparece muchas veces asociada a otras tendencias, como la combinación de variables en una sola noción y el razonamiento causal lineal. El término *rapidez,* utilizado a menudo en el tema que nos ocupa, parece encerrar un carácter difuso, asociado a veces con frecuencia y a veces con velocidad.

El problema que hemos discutido no es sencillo ni evidente. Exige comparar dos fenómenos que involucran relaciones espacio-temporales de diferente naturaleza. Mientras que, en la propagación de una onda, la relación entre la longitud y el tiempo que caracteriza la perturbación es lineal, en la conducción térmica, la relación entre la longitud asociada (longitud de difusión) y el tiempo sigue una ley del tipo $l_d \approx \sqrt{t}$ (Apéndice). De no mediar este hecho, la solución habría sido casi trivial: hubiera bastado con comparar la velocidad de propagación con la «velocidad de difusión». Pero es justamente la dificultad del tema la que propicia razonamientos cualitativos y permite poner en evidencia tendencias espontáneas de razonamiento. No es que los docentes entrevistados o los autores de los textos consultados ignoren las relaciones entre velocidad de propagación, longitud de onda y frecuencia. La cuestión reside en que la situación propuesta los obliga a ubicar ese conocimiento en un marco diferente. Una vez más, constatamos que la transferencia de conocimientos de un contexto a otro no es simple, no sólo en los estudiantes, sino también en los especialistas en una disciplina.

NOTA

[1] Cabe notar que, en Sears, Zemansky y Young (1988), encontramos un texto idéntico al citado por Sears (1959) con la única diferencia que se ha retirado la frase «y se suceden tan rápidamente los cambios de temperatura». (¿Cambio conceptual de Sears o influencia de Zemansky?)

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BOYLE, R. (1660). *New Experiments Physico-Mechanical Touching the Spring of Air and Its Effects, Made for the Most Part in a New Pneumatical Engine*. Oxford.

CRAWFORD J.R. (1977). *Ondas. Berkeley Physics Course*. Volumen III. Barcelona: Reverté.

D'ALAMBERT, J. Le R. (1747). *Recherches sur le courbe que forme une corde tendue mise en vibration*, pp. 217-234. Berlín: Royal Academy.

FLETCHER, N. (1974). *American Journal of Physics*, 42, pp. 487-489.

LAGRANGE, J.L. (1759). *Recherches sur la nature et la propagation du son Miscellanea Taurinensis I*, 1. Reproducido y traducido por Lindsay, R. (1974). *Acoustics: Historical and Philosophical Development.* Pennsylvania: Dowden, Hutchinson & Ross, Inc.

LANDAU, L. y LIFCHITZ, L. (1971). *Mécanique des Fluides*. Moscú: MIR.

LAPLACE, P. S. (1816). Sur la vitesse du son dans l'aire et dans l'eau. *Annales de Chimie et Physic*, 3, pp. 238-243.

LENINHAN, L.M. (1951). Mersenne and Gassendi. An early Chapter in the History of Sound. *Acústica,* 2, pp. 95-99.

LINDSAY, R. (1974). *Acoustics: Historical and Philosophical Development*. Pennsylvania: Dowden, Hutchinson & Ross, Inc.

NEWTON, I. (1687). *Pilosophiae Naturalis Principia Mathematica*. Versión inglesa de Cajori, F. (1946). Berkeley: University of California Press.

POISSON, S. (1808). Memoir sur la teorie du son, *Journal de l'École Polytechnique,* 7, pp. 319-322. Reproducido y traducido por Lindsay, R. (1974). *Acoustics: Historical and Philosophical Development*. Pennsylvania: Dowden, Hutchinson & Ross, Inc.

POMMEAU, Y. (1999). Comment expliquer l'irréversibilité? *Bulletin de la Societé Francaise de Physique*, 119, pp. 21-23.

REIF, F. (1977). *Física estadística. Berkeley Physics Course*. Vol. V. Barcelona: Reverté.

ROEDERER, J.G. (1966). *Mecánica elemental*. Buenos Aires: Editorial Universitaria de Buenos Aires.

ROZIER, S. y VIENNOT, L. (1991). Student's reasoning in thermodynamics. *International Journal of Science Education,* 13(1), pp. 159-170.

SEARS, F. (1959). *Fundamentos de física, Vol. I: Mecánica, calor y sonido*. Madrid: Aguilar.

SEARS, F.W., ZEMANSKY, M.W. y YOUNG, H.D. (1988). *Física universitaria*. México: Addison Wesley Iberoamericana.

TEUBNER, L. (1926). *Leonhardi Euleri Opera Omnia*, Leipzig. Reproducido y traducido al inglés por Lindsay, R. (1974). *Acoustics: Historical and Philosophical Development*. Pennsylvania: Dowden, Hutchinson & Ross, Inc.

VIENNOT, L. y ROZIER, S. (1994). Pedagogical outcomes of research in science education, en Fesnham, P., Gunstone, R. y White, R. (eds.). *The content of science*. Londres: The Falmer Press.

WATSON, W. (1950). *Curso de física*. Barcelona: Labor.

ZEMANSKY, M. (1976). *Calor y termodinámica*. Nueva York: McGraw-Hill.

[Artículo recibido en agosto de 2003 y aceptado en septiembre de 2005]

APÉNDICE

La figura 1 muestra, en un cierto instante t, la distribución de temperatura del gas en el interior de un tubo cuando una sonora se propaga en el interior del mismo. Las zonas más oscuras representan zonas de temperatura mayor que las zonas claras. Si el fenómeno de compresión-descompresión es adiabático, la distribución de temperatura se invierte en el instante $t + T/2$ como se muestra en la figura 1. El proceso será adiabático si en ese intervalo de tiempo el flujo de calor entre las zonas de alta temperatura y baja temperatura es despreciable. El calor se transmite desde la zona de alta temperatura hacia la zona de baja temperatura a través de un mecanismo conocido como termoconducción (Landau y Lifchitz, 1971). Si $\Theta(x,t) = T(x,t) - T_0$ es la temperatura a lo largo del tubo, relativa a la temperatura de equilibrio, entonces:

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} = \chi \frac{\partial^2 \Theta}{\partial x^2}$$

donde $\chi = k/\rho\, c_p$, k el coeficiente de conductividad térmica, ρ la densidad del medio y c_p la capacidad calorífica a presión constante.
Analizaremos cualitativamente cómo se produce la difusión del calor entre una zona de alta temperatura y zonas de menor temperatura que la rodean.
En la figura 2 se muestran gráficas de la solución de la ecuación diferencial para el caso en el que la zona de alta temperatura, en el instante inicial $t = 0$, está en un pequeño entorno alrededor de $\chi = 0$. Las curvas muestran el perfil de temperaturas en dos instantes diferentes ($t_2 > t_1 > 0$). Cuando t crece, la temperatura en el punto $\chi = 0$ decrece y la región en la cual la temperatura es notablemente no nula se ensancha progresivamente. El orden de magnitud l_d de esta región es $l_d \approx \sqrt{\chi \cdot t}$; es decir, crece en razón de la raíz cuadrada del tiempo.
Apliquemos estos resultados a nuestro problema. En un semiperíodo ($T/2$), se invierten las distribuciones de temperatura en las porciones del gas que están separadas una media longitud de onda como se muestra en la figura 1. En ese intervalo de tiempo, la difusión térmica homogeneiza la temperatura sobre una distancia del orden de $l_d \approx \sqrt{\chi T/2}$. En la figura 3 se grafica esquemáticamente λ y l_d en función de $T/2$. Estas curvas se cortan cuando el período de la onda es $T^* = 2\chi/c^2$. Si $T >> T^*$, o sea $\lambda/2 >> l_d$, el proceso es adiabático. Esta desigualdad implica que el proceso de compresión-descompresión es adiabática si la frecuencia de la onda es tal que $f << 1/T^* = c^2/2\chi$.
Si tomamos, para la conductividad térmica, la expresión, $K \approx \rho c_p l_c v_{cm}$ (Reif, 1977), donde l_c es el libre camino medio y v_{cm} la velocidad cuadrática de las moléculas del gas, encontramos que $\chi = l_c v_{cm}$. Como la velocidad cuadrática media es del orden de magnitud de la velocidad del sonido, la condición de adiabaticidad se puede escribir: $f << c/l_c$. En condiciones normales $l_c \approx 10^{-5} m$, entonces $f << 3x10^8\ Hz$, que es mucho más alta que la frecuencia de los sonidos audibles y aun para los ultrasonidos. Explicaciones similares a las que desarrollamos en este apéndice pueden encontrarse en una publicación de Fletcher (1974) y en el texto de Zemansky (1976).
La hipótesis de adiabaticidad formulada por Laplace es, entonces, correcta, pero no su justificación. Los movimientos del gas son adiabáticos porque la frecuencia de las ondas sonoras son «bajas» comparadas con c/l_c y no porque el fenómeno sea «rápido».

Figura 1

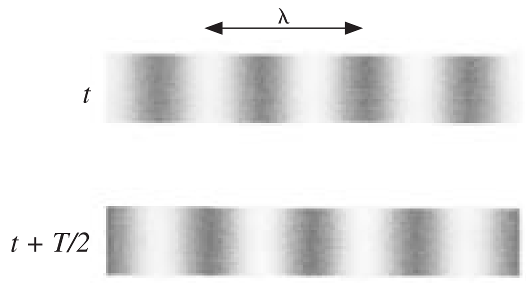

Figura 2

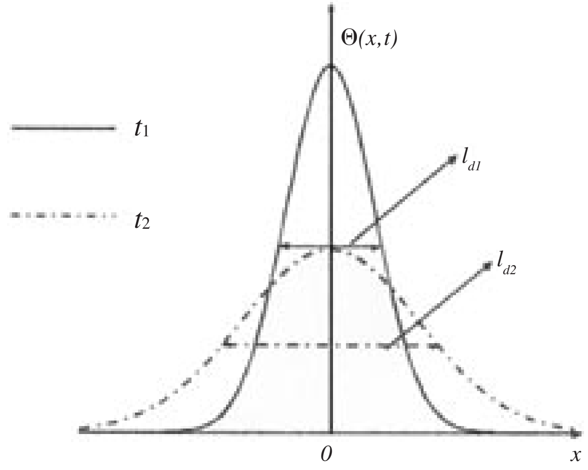

Figura 3