

Experimentos sencillos de onda estacionaria en tubos

Javier Cabello

Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura
Universidad nacional de Rosario
jcabello@fceia.unr.edu.ar

Se presentan en este trabajo tres experimentos que pueden realizarse con materiales de bajo costo si se dispone de una computadora común con placa de sonido. Estos experimentos permiten medir la velocidad del sonido en el aire, la frecuencia de una onda y la frecuencia de resonancia en un tubo abierto. Una ventaja adicional que tiene esta organización experimental, además de su sencillez, es que permite realizar los experimentos en el tiempo destinado a una clase. Se presentan primero los fundamentos teóricos mínimos sobre ondas estacionarias en tubos abiertos, a continuación se muestra el armado de la configuración experimental y finalmente se explica cómo se emplea esta última para realizar los experimentos.

Palabras clave: ondas estacionarias, experimentos, bajo costo.

This article presents a set of 3 experiments to study standing waves using low cost materials (an ordinary computer with a normal sound board is needed). This set of experiments allow to measure speed of sound in the air, sound wave frequency and sound resonance frequency inside a tube. One additional advantage of each experiment, besides the simplicity, is that can be realized in one module class (80 min). First theoretical fundamentals of stationary waves on tubes are presented. Assembling configuration and a procedure guide are shown for each experience.

Keywords: stationary waves, experiments, low cost.

Introducción

Un tipo de ondas que se encuentra con frecuencia en dispositivos tecnológicos e instrumentos musicales como las guitarras o los pianos son las denominadas ondas estacionarias, que se tienen cuando a las ondas se las confina a un medio con límites rígidos que sólo permiten la reflexión.

El modo de representar matemáticamente este fenómeno consiste en considerar la superposición de dos ondas de igual amplitud, frecuencia y dirección viajando en sentidos opuestos.

Si

$$y_1(x, t) = A \sin(kx - \omega t); \quad (1)$$

$$y_2(x, t) = A \sin(kx + \omega t); \quad (2)$$

Entonces su suma será:

$$y(x, t) = y_1(x, t) + y_2(x, t) = 2A \sin(kx) \cdot \cos(\omega t) \quad (3)$$

El resultado ya no es más una onda que se propaga: cada punto x tiene un movimiento armónico expresado por el factor $\cos(\omega t)$ dependiente del tiempo y la amplitud varía de un punto a otro según el factor $2A \sin(kx)$.

La amplitud de este movimiento armónico será cero para algunos valores de x y las coordenadas de estos puntos que no vibran son:

$$\frac{2\pi}{\lambda} x_n = n\pi \quad \text{con } n \text{ entero} \quad (4)$$

entonces,

$$x_n = n \frac{\lambda}{2} \quad \text{con } n \text{ entero} \quad (5)$$

Se dice que la onda tiene nodos en esos valores de x , y la distancia entre dos nodos consecutivos es igual a media longitud de onda ($\lambda/2$).

La amplitud máxima será $2A$ y las coordenadas de estos puntos serán:

$$\frac{2\pi}{\lambda} x_n = (2n-1)\frac{\pi}{2} \quad \text{con } n \text{ entero} \quad (6)$$

entonces,

$$x_n = (2n-1)\frac{\lambda}{4} \quad \text{con } n \text{ entero} \quad (7)$$

A continuación se muestra la una gráfica de la amplitud en función de la posición para distintos valores de t .

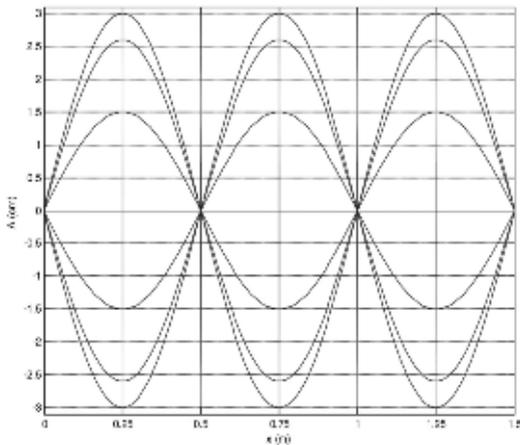


Figura 1. Onda estacionaria de amplitud 3cm y longitud de onda 1m.

Para el caso de la onda confinada en un medio, las ondas viajeras de sentido opuesto serán producidas por la reflexión en los límites. Si consideramos la cuerda de una guitarra ambos extremos son totalmente rígidos y no poseen desplazamiento, por lo que serán nodos de las ondas estacionarias que se formen. Para una longitud determinada de la cuerda, las frecuencias de las ondas estacionarias que se pueden generar son fijas y dadas por las siguientes expresiones.

$$v = f \cdot \lambda \Rightarrow f = \frac{v}{\lambda} \quad (8)$$

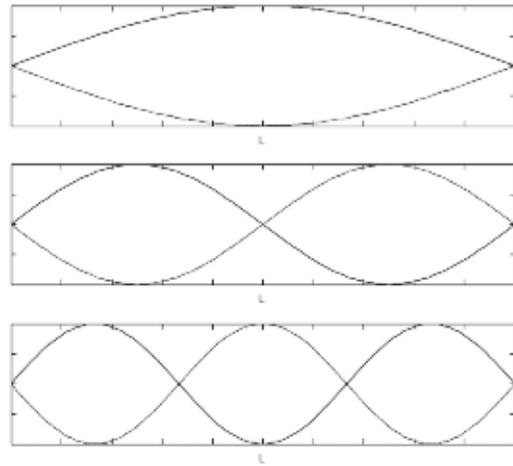


Fig.2 Primeras 3 frecuencias de resonancia en tubo abierto.

Primer Armónico

$$\lambda_1 = \frac{L}{2} \Rightarrow f_1 = \frac{2v}{L} \quad (9)$$

Segundo Armónico

$$\lambda_2 = L \Rightarrow f_2 = \frac{v}{L} \quad (10)$$

Tercer Armónico

$$\lambda_3 = \frac{3L}{2} \Rightarrow f_3 = \frac{2v}{3L} \quad (11)$$

Se llega a la siguiente expresión para un armónico genérico:

$$\lambda_n = \frac{nL}{2} \Rightarrow f_n = \frac{2v}{nL} \quad (12)$$

donde n indica el número de armónico.

Para las ondas estacionarias en tubos, al igual que en la cuerda, el aire sólo puede vibrar a determinadas frecuencias que dependen tanto de la longitud del tubo como del aire dentro de él. Existen dos formas en que puede encontrarse este tipo de ondas, que el tubo este abierto en ambos extremos (tubo abierto) o con un extremo abierto y el otro cerrado (tubo cerrado). Si el diámetro del cilindro es pequeño comparado con la longitud de onda de la onda estacionaria, estas se refleja en el otro extremo del cilindro y vuelve hacia el interior del

tubo. La superposición de estas ondas de igual amplitud y frecuencia dan origen a las ondas estacionarias en los tubos.

El extremo cerrado de una columna de aire es un nodo de desplazamiento debido a que la pared en este extremo no permite el movimiento molecular. Este extremo cerrado también corresponde a un antinodo de presión, es decir una posición donde la variación de presión es máxima.

En cambio un extremo abierto es un antinodo de desplazamiento y un nodo de presión, ya que la presión está fijada por la presión atmosférica.

Las ecuaciones y las gráficas de las ondas del tubo abierto son idénticas a las que se establecen en una cuerda con ambos extremos fijos. En cambio las del tubo cerrado difieren. A continuación se muestran las gráficas y las expresiones de los distintos armónicos para el tubo cerrado.

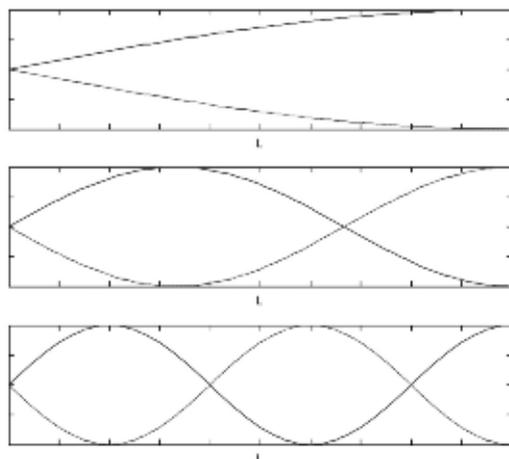


Fig.3 Primeras 3 frecuencias de resonancia en tubo cerrado.

Primer Armónico

$$\lambda_1 = \frac{L}{4} \Rightarrow f_1 = \frac{4v}{L} \quad (13)$$

Tercer Armónico

$$\lambda_3 = \frac{3L}{4} \Rightarrow f_3 = \frac{4v}{3L} \quad (14)$$

Quinto Armónico

$$\lambda_5 = \frac{5L}{4} \Rightarrow f_5 = \frac{4v}{5L} \quad (15)$$

Se puede observar que sólo se establecen armónicos impares y escribiéndolo en forma general resulta:

$$\lambda_n = \frac{nL}{4} \Rightarrow f_n = \frac{4v}{nL} \quad (16)$$

donde n indica el número de armónico

Disposición experimental

A continuación se describen tres experimentos que pueden realizarse con materiales de bajo costo y permiten medir la velocidad del sonido en el aire, la frecuencia de una onda y la frecuencia de resonancia en un tubo abierto.

Los materiales necesarios para realizar los experimentos son los siguientes:

- Una computadora con placa de sonido
- Un parlante de 3Ω de impedancia y 7cm de diámetro
- Dos metros de cable bipolar
- Conector Plug-in mono para PC
- Un tubo de plástico (diámetro aproximado 5cm, largo aproximado 40 cm; se adquiere en casas de venta de materiales sanitarios)
- Un recipiente profundo para llenar de agua y poder sumergir en tubo

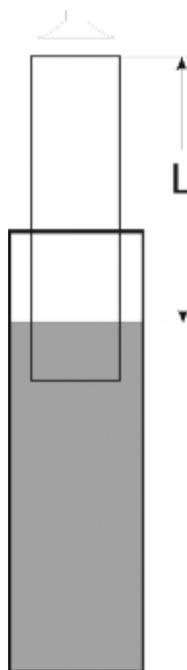


Fig.4 Esquema tubo-parlante

Construcción

Es necesario conectar un extremo del cable bipolar a los terminales de conexión del parlante y el otro extremo a la ficha Plug-in (es indiferente la polaridad de la conexión). Este dispositivo conectado a la salida de audio de la computadora constituirá nuestra fuente de sonido monocromática.

Para la creación de la onda senoidal monocromática se puede utilizar programas de dominio público accesibles desde la Web. En este caso particular se empleó el GoldWave, que posee una amplia librería para la creación de archivos de sonido, entre ellas se encuentran las señales Chirp (señales senoidales con frecuencia creciente o decreciente) que se emplea en uno de los experimentos.

Cabe destacar que el programa solo es necesario para la creación de los archivos. Una vez creada la librería de funciones lo único que se necesita es el reproductor de música (Windows Media Player, Winamp, etc) por lo que no es necesario que la computadora que se emplea para hacer los experimentos esté conectada a la Web ni que sea la misma que se empleó para generar los archivos de sonido.

Primer experimento. Determinación de la velocidad del sonido en el aire

Para la realización de este experimento se llena el recipiente con agua y se coloca el tubo en su interior sosteniéndolo para que no quede totalmente sumergido. Se acerca el parlante excitado con una frecuencia conocida a la boca del tubo y se procede a elevar lentamente el tubo hasta que se escuche que el sistema entra en resonancia.

Al estar alimentado directamente de la placa de sonido, el parlante producirá un sonido con muy poca intensidad y será poco audible. Es posible intercalar entre la salida de señal de la computadora y el parlantes un sistema de amplificación de potencia para aumentar ese sonido, pero no es imprescindible para la realización del experimento. Cuando se establezca la onda estacionaria en el tubo, la señal constante proporcionada por el parlante se amplificará y será muy audible y dependiendo de la frecuencia, hasta molesto.

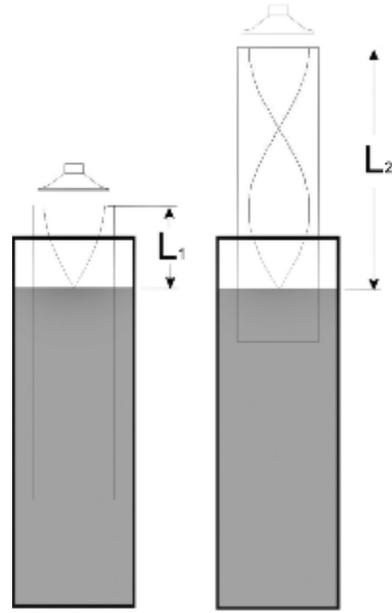


Fig.5 Esquema 1^{er} y 3^{er} armónico en tubo.

Lograda la longitud del tubo para la que se produce el primer armónico se podrá calcular la longitud de onda de la onda estacionaria a partir de:

$$\lambda_1 = \frac{L}{4} \Rightarrow f_1 = \frac{4v}{L} \quad (13)$$

Así, conocida la longitud de la columna de aire se puede calcular la velocidad de la onda en el aire

Es conveniente, antes de realizar el experimento, considerar la velocidad del sonido en el aire de 344 m/s y elegir la frecuencia con la cual excitar al parlante en relación con la longitud del tubo.

En realidad, las condiciones de contorno del tubo abierto hacen que la longitud efectiva de la columna de aire que vibra sea un poco mayor que el tubo que lo contiene. Un cuidadoso estudio teórico muestra que para diámetros mucho menores que el largo del tubo ($D \ll L$) la longitud efectiva de la columna es $L + 0.4 D$.

A fin de independizarnos de este efecto se puede encontrar la longitud del 1° y 3° armó-

nico dentro del tubo para una frecuencia fija y utilizar su resta como el valor de media longitud de onda.

Mediante estas mediciones también se puede hallar el aumento virtual y comprobar si efectivamente es del orden de 0,4 D.

Segundo experimento. Determinación de la frecuencia de una onda sonora desconocida

Conocida la velocidad de una onda sonora en el aire y midiendo la longitud de la columna para la cual se establece la onda estacionaria se puede hallar la frecuencia incógnita. Como se hizo en el ensayo anterior el objetivo sigue siendo encontrar y medir la longitud del tubo para la cual se establece una onda estacionaria. También puede hacerse la corrección de condición de borde en caso de que sea necesario si el diámetro del tubo es importante en relación con la longitud de onda.

Tercer experimento. Determinación de la frecuencia de resonancia en un tubo abierto

En este caso se emplea únicamente el tubo abierto y se coloca el parlante en un extremo. Teniendo una noción aproximada del valor de la frecuencia a la cual se establecerá la onda se genera una señal chirp con un rango de 80% al 120% de la frecuencia estimada. La frecuencia es estimada a partir de la siguiente expresión;

$$f = v/2L$$

Es necesario tener en cuenta que es conveniente que la señal Chirp tenga un crecimiento lineal y un cambio lento ($t > 30s$) para facilitar la lectura.

El procedimiento para la estimación de la frecuencia consiste en determinar el tiempo en el cual se escucha un máximo en el sonido y luego encontrar a partir del patrón utilizado para la generación de la Chirp la frecuencia asociada a dicho tiempo.

Consideraciones finales

Estos tres experimentos sencillos y de muy bajo costo, si se dispone de una computadora con placa de sonido, amplían el conjunto de actividades experimentales disponibles por los docentes.

Otra característica es que son particularmente versátiles como recurso didáctico ya que se pueden emplear para realizar demostraciones en el aula, por su sencillez y facilidad de percepción de los fenómenos, o bien implementarlos como experimentos clásicos en el laboratorio escolar, teniendo en cuenta el tratamiento de las incertezas en el proceso de medición. Además, dependiendo de cada caso en particular, es posible que los propios alumnos armen y operen el dispositivo.

Finalmente, será el criterio de los docentes y las situaciones particulares en que se encuentren lo que permitirá ampliar las opciones de empleo de este dispositivo.

Bibliografía

- Alonso M., Finn E.J. "Física". Ed. Addison-Wesley Iberoamericana. E.E.U.U. 1995.
 Serway R. A., "Física". Ed Mac Graw Hill, México, 1993.
 Sears F. y Zemansky M., "Física". Aguilar, Madrid, 1981.
 Tipler P.A., "Física" 2da Edición, Ed. Reverté, Barcelona, 1983.
 Strutt, John William, Baron of Rayleigh, (1894, [1945]) Theory of sound, Dover Publications
 New York