

Resonancia de las ondas sonoras en una columna de aire

(exp. id 20210106-2-v1)

Un experimento propuesto por
Prof. Alessandro Ercoli and Prof. Cristina Trifolelli Liceo Scientifico Statale "P. Ruffini", Viterbo, Italia

Introducción

El presente experimento trata del fenómeno de la interferencia en las ondas sonoras.

En particular, proporciona pruebas cualitativas y cuantitativas de la interferencia de las ondas sonoras en el interior de una columna de aire, cerrada en un extremo y abierta en el otro. El objetivo es caracterizar el comportamiento de una onda sonora en una columna de aire de este tipo, poniendo de manifiesto cómo la onda resultante es función tanto de la longitud de la columna como de la frecuencia del sonido. Si se genera una onda sonora cerca de un extremo abierto de la columna de aire, la onda resultante dentro de la columna es la suma de la onda generada (onda incidente) y la onda reflejada del extremo cerrado. La onda resultante tiene *nodos* y *antinodos*: en la primera la onda resultante es siempre cero, en la segunda la onda resultante tiene su valor máximo. Para realizar el experimento, un smartphone genera un sonido de cierta frecuencia en el extremo abierto de un tubo y un segundo smartphone detecta la señal mientras se desliza dentro del tubo.

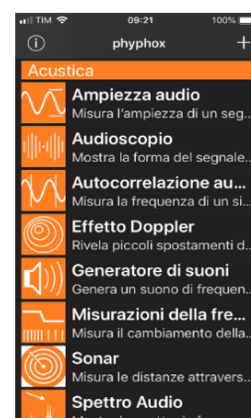


Fig. 1: Acoustic list options of the *Phyphox* app

Materiales

- Dos smartphones con PHYPHOX instalado (Fig. 1);
- un tubo, de al menos un metro de longitud, con un diámetro mayor que el tamaño medio de los smartphones;
- un soporte para un smartphone;
- Una varilla graduada, o un metro de sastre, o una cinta métrica.

El experimento

Cuando se activa el generador de sonido del primer smartphone en el extremo abierto del tubo, el segundo smartphone, con la función de audioscopio de la app PHYPHOX activada, se desplaza deslizándose dentro del tubo, y mide la intensidad del sonido en función de su posición.

La medición puede realizarse más fácilmente colocando el smartphone dentro de un tubo transparente, mantenido en posición horizontal o vertical. De este modo, podrá medir directamente su posición. Como alternativa se puede utilizar un tubo de almacenamiento de carteles, sujetando el smartphone a una varilla graduada, un metro de sastre o una cinta métrica, obteniendo la posición del smartphone a partir de la medida de su profundidad. La adquisición y el almacenamiento de datos pueden realizarse aprovechando la función de acceso remoto del PHYPHOX, que se activa al tocar los tres puntos verticales de la parte superior derecha de la pantalla y seleccionar “ac-

ceso remoto”. Para que esto funcione es importante que tanto el smartphone como el ordenador utilizado para acceder a él mediante un navegador web común pertenezcan a la misma red local.

A medida que el smartphone se desliza en el interior del tubo, desde $x = L$, correspondiente al extremo cerrado del tubo, hasta $x = 0$, correspondiente al extremo abierto del tubo, la intensidad sonora medida por el audioscopio varía. En algunos puntos es máxima (antinodos) en otros es aproximadamente cero (nodos).

Medir la intensidad del sonido $A(x)$ en función de la posición x dentro del tubo y de la frecuencia f , manteniendo el aparato y la intensidad del sonido lo más estable posible.

Repita el procedimiento con el siguiente conjunto de frecuencias,

$$f_n = n \left(\frac{v}{8L} \right)$$

with $\{n \in N : 5 \leq n \leq 15\}$ where L is the length of the tube and v is the speed of sound.

Preguntas

- a) ¿Hay frecuencias para las que nunca se encuentra $A(x) = 0$?
- b) ¿Hay frecuencias para las que los máximos de la señal son evidentemente más intensos que los demás?

Teniendo en cuenta las frecuencias de b), anote las posiciones del smartphone correspondientes a una señal máxima y nula de $A(x)$. Marque los valores de estas posiciones en un eje cuya escala completa es la longitud del tubo.

- c) ¿Existe una regularidad en la distribución de valores, es decir, dónde la amplitud es máxima (antinodos) y dónde es nula (nodos)?
- d) ¿Cómo varía esta distribución de los puntos en función de la frecuencia y la longitud de onda del sonido en el tubo?
- e) ¿Es posible predecir otras frecuencias, y longitudes de onda relacionadas, en las que se produzca la misma regularidad?
- f) ¿Existe una relación entre la longitud del tubo y la frecuencia y longitud de onda del sonido?
- g) ¿Qué relación matemática describe la regularidad observada?
- h) ¿Qué distribución de nodos y antinodos debe tener la onda en el interior del tubo para obedecer a la relación matemática encontrada?

Para el docente

(exp. id 20210106-2-v1)

Proporcionamos dos películas cortas para mostrar cómo realizamos el experimento:

- `experiment.mp4` muestra la intensidad medida a medida que el smartphone desciende por el tubo, mantenido en posición vertical. También puede poner el tubo en posición horizontal cerrándolo contra una pared.
- `resonance.mp4` compara las mediciones realizadas con un tubo de un metro y dos frecuencias diferentes: 595 Hz es una frecuencia de resonancia, mientras que 546 Hz no lo es.

En el último vídeo quedan muy claros los diferentes valores de amplitud del máximo sonoro alcanzado en los dos experimentos.

La Fig. 2 muestra un gráfico en el que se indican las posiciones tanto de los máximos de amplitud (puntos azules) como de las señales nulas (puntos rojos) para tres frecuencias (la medición se refiere al caso de un tubo de un metro y una velocidad del sonido estimada en 340 m/s).

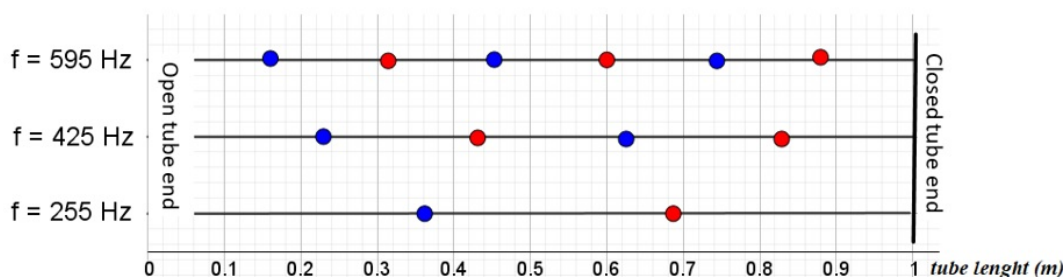


Fig. 2: Node (red dots) and antinode (blue dots) positions of the sound wave inside the tube for different frequencies

Se pueden hacer las siguientes observaciones.

- La densidad de puntos en la línea aumenta al aumentar la frecuencia y, por tanto, al disminuir la longitud de onda.
- Para cada frecuencia, la media de las distancias entre dos puntos adyacentes es igual a un cuarto de la longitud de onda del sonido. En otras palabras, para cada frecuencia, la distancia entre dos nodos (puntos rojos) o entre dos antinodos (puntos azules) es igual a la mitad de la longitud de onda del sonido.
- Las frecuencias de resonancia son siempre aproximadamente un múltiplo impar de $\frac{v}{4L}$, es decir, la longitud del tubo es siempre aproximadamente un múltiplo impar de un cuarto de la longitud de onda correspondiente.
- Pasando de una frecuencia baja a una alta, siguiendo la prescripción de f_n , el número de puntos aumenta cada vez en dos unidades (una roja y una azul). Esto nos permite encontrar otras frecuencias que muestran la misma regularidad.
- Por último, hay que encontrar las siguientes relaciones

$$f_n = \left(2n - 1\right) \frac{v}{4L} \quad (1)$$

$$\lambda_n = \frac{4L}{2n - 1} \quad (2)$$

donde v es la velocidad del sonido, L la longitud del tubo y $n \in \mathbb{N}_0$.

f) Conociendo la longitud del tubo y la velocidad del sonido, es posible predecir las frecuencias de la onda estacionaria en el interior de la columna. Para una columna de aire cerrada en un extremo y abierta en el otro, las frecuencias y sus longitudes de onda relativas para una onda estacionaria vienen dadas por las ecuaciones (1) y (2). Utilizando una hoja de cálculo y las ecuaciones mencionadas, es posible predecir dónde se esperan los puntos de amplitud máxima y mínima para una determinada frecuencia de resonancia (Fig. 3). Incluso es posible comparar la amplitud medida de la señal en función de la posición $A(x)$ con la figura mencionada anteriormente y discutir la validez del modelo.

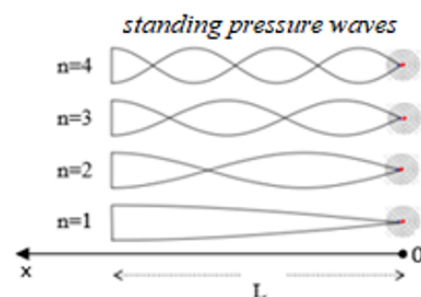


Fig. 3: Different standing pressure waves in a closed tube on the left side with a sound source in the tube opening on the right side

g) La concordancia entre la predicción teórica y los resultados experimentales puede verse afectada por errores sistemáticos, a saber

- la velocidad real del sonido puede ser ligeramente diferente a la utilizada en la ecuación (1), dependiendo de la temperatura y de la densidad y humedad del aire;
- la ubicación exacta del sensor del teléfono inteligente que adquiere los datos para el audioscopio PHYPHOX puede ser inexacta (para reducir este error, utilice siempre el mismo punto de referencia en el teléfono inteligente para realizar la medición: la ubicación del micrófono es una buena opción; suele estar situada en el borde inferior del teléfono);
- el modelo utilizado para derivar las ecuaciones (1) y (2) supone que no hay dependencia del radio del tubo. Sin embargo, los experimentos con los tubos muestran que el radio es importante. La razón es que el nodo de presión en el extremo abierto de la columna de aire se encuentra, de hecho, ligeramente fuera del extremo del tubo, dependiendo del radio del mismo. La distancia desde el extremo físico del tubo hasta el nodo de presión es aproximadamente 0,3 veces el diámetro del tubo. Esta distancia se denomina *corrección del extremo* [1] [2] [3]. Los tubos más grandes requieren una corrección final mayor. Por lo tanto, la longitud efectiva de una columna de aire abierta-cerrada es ligeramente mayor que el propio tubo:

$$L = L_0 + 0,3d$$

donde L es la longitud efectiva de la columna de aire, L_0 es la longitud física del tubo y d es el diámetro del tubo (Fig. 4).

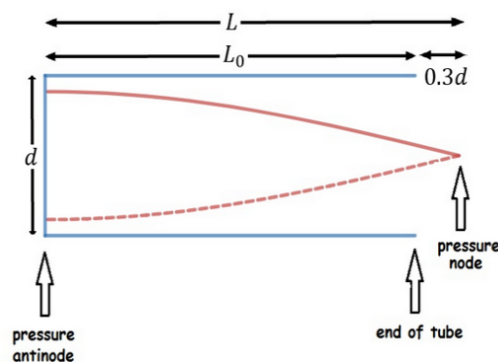


Fig. 4: The real pressure node at the open end lies slightly off of the tube end

Este experimento se probó con éxito en un curso de formación de física para profesores de secundaria en 2018 y se utiliza a menudo en las clases del último año de liceo.

Objetivos, nivel de despliegue y duración _____

- Objetivo principal: hacer ‘tangibles’ las ondas sonoras estacionarias y verificar la descripción teórica.
- Objetivo secundario: derivar algunas relaciones matemáticas apropiadas para describir las observaciones experimentales.
- Objetivo secundario: refinar un modelo cuando la teoría y el experimento no coinciden, tras excluir los errores experimentales.
- Adecuado para: bachillerato, ciencias de primer año de universidad; física de primer año.
- Duración: 2-3 horas para la adquisición de datos + 2 horas para el análisis de datos y para la interpretación.

Ampliaciones y otras consideraciones _____

- Este experimento está relacionado, por supuesto, con el funcionamiento de muchos instrumentos musicales. Debería ser posible hacer agujeros laterales en el tubo, en las posiciones adecuadas, y observar qué frecuencias no se ‘permiten’ como ondas estacionarias.
- Si puedes repetir el experimento en condiciones de temperatura bastante diferentes (¿una habitación con aire acondicionado frente a un exterior caluroso?), debería ser posible ver cambios en la propagación del sonido.
- Más complejo: si el experimento pudiera realizarse en una cámara en la que se pudiera variar la composición del gas (por ejemplo, el helio o el contenido de vapor de agua) o la presión, entonces también se obtendrían datos interesantes sobre cómo se ven afectadas las ondas estacionarias.

Bibliografía _____

Referencias

- [1] Experimentar con la corrección de los extremos y la velocidad del sonido, Michael C Lopresto, *Physics Education* Vol. 46, No.4, 2011
- [2] Diámetro del tubo y corrección del extremo de una onda estacionaria resonante, Taylor Boelkes and Ingrid Hoffmann, *ISB Journal of Physics* , January 2011
- [3] Corrección del extremo de una onda estacionaria resonante en tubos abiertos de diferentes diámetros, Syed Rashad Iqbal, Hudhaifa Mazin Abdull Majeed, *Journal of Natural Sciences Research*, Vo 1.3, No. 4, 2013

Para profundizar online _____

Deja opiniones, sugerencias, comentarios y noticias sobre el uso de este recurso en el canal correspondiente a este experimento dentro del espacio de trabajo de Slack “smartphysicslab.slack.com”.

Los profesores pueden solicitar su registro en la plataforma a través del formulario de la *página de inicio* de smartphysicslab.org, y obtener la invitación para registrarse en Slack y ser incluidos en la *lista de correo* de smartphysicslab.