

EXPERIMENTO 7

Ondas mecánicas de sonido en el aire

Objetivos

- * Estudiar la propagación de ondas mecánicas longitudinales de sonido en un tubo lleno de aire.
- * Estudiar en un tubo abierto por un extremo y cerrado por el otro, los modos normales de oscilación que se producen por ondas estacionarias de sonido.
- * Medir en un tubo la longitud de onda y la frecuencia de un modo normal de sonido y calcular de estos valores la velocidad del sonido en el aire.

Teoría

Las ondas mecánicas de sonido son perturbaciones débiles que se propagan en un fluido. En ausencia de alguna perturbación, el fluido permanece en un estado de equilibrio descrito por las variables termodinámicas de presión P , temperatura T , volumen V y densidad ρ .

En presencia de alguna perturbación, pequeños volúmenes de moléculas se desplazan ordenadamente, reduciendo o aumentando su volumen una cantidad dV ; este cambio de volumen produce a su vez cambios de presión dP con respecto al valor en equilibrio P_0 . Este proceso se extiende entre todos los elementos de volumen del fluido hasta lograr que la perturbación se propague como una onda longitudinal de sonido. La velocidad a la que viaja esta onda depende de las variables termodinámicas que describen el estado del fluido.

El medio más común para estudiar la propagación de ondas de sonido es el aire, éste es una mezcla de diferentes gases, entre ellos: Nitrógeno, Oxígeno, Dióxido de carbono y pequeñas cantidades de otros gases inertes.

En un tubo largo y angosto lleno de aire, las ondas se propagan longitudinalmente en una dimensión espacial. Dichas ondas pueden ser de desplazamiento $\delta(x, t)$ o de presión acústica $P_a(x, t) = P(x, t) - P_0$, donde $P(x, t)$ es la presión del aire perturbado en un punto x en el tiempo t . La presión acústica depende del módulo de compresibilidad B y el gradiente de desplazamiento. Esto es: $P_a(x, t) =$

$-B \frac{\partial \delta(x, t)}{\partial x}$. Las ondas de presión satisfacen la ecuación de onda $\frac{\partial^2 P_a(x, t)}{\partial t^2} - \frac{B}{\rho} \frac{\partial^2 P_a(x, t)}{\partial x^2} = 0$ y se propagan en el aire con una velocidad de fase o grupo $v_s = \sqrt{\frac{B}{\rho}}$.

El módulo de compresibilidad es un parámetro termodinámico definido por $-V \frac{\partial P}{\partial V} = B$, su valor depende del proceso termodinámico de los gases en el aire. Con buena aproximación el aire puede describirse mediante un proceso adiabático a través de la relación $PV^\gamma = \text{Constante}$ y un módulo de compresibilidad dado por $B = \gamma P$. Usando la ecuación de estado de los gases ideales, el módulo es $B = \frac{\gamma \rho R T}{M}$ y la densidad del gas es $\rho = \frac{m}{V} = \frac{PM}{RT}$. Donde M es la masa molar, R la constante de los gases ideales, T la temperatura absoluta y γ la constante adiabática. A partir de estas cantidades, la velocidad del sonido es $v_s = \sqrt{\frac{\gamma R T}{M}}$.

En su mayoría el aire está compuesto por 78.08 % de Nitrógeno y 20.94 % de Oxígeno. La velocidad del sonido en esta mezcla de gases a una temperatura de 20° es aproximadamente $343.21 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.

Si se acerca una fuente externa de sonido de frecuencia ν al extremo abierto de un tubo de longitud efectiva L lleno de aire, las ondas de sonido se propagan longitudinalmente en el interior del tubo hasta el otro extremo cerrado donde las ondas se reflejan, interfieren y permiten la formación de ondas estacionarias de sonido. Estas ondas se manifiestan como modos normales de oscilación, ya sea de desplazamiento $\delta_n(x, t)$ o de presión acústica $P_{an}(x, t)$; la superposición de estos modos $P_a(x, t) = \sum_n P_{an}(x, t)$ es una solución general a la ecuación de onda de sonido.

A lo largo del tubo aparecen puntos con sonido amplificado conocidos como *antinodos* y puntos con sonido reducido conocidos como *nodos*; un nodo de desplazamiento corresponde a un antinodo de presión $P_{an} \neq 0$, mientras que un antinodo de desplazamiento corresponde a un nodo de presión $P_{an} = P_0$ ¹. Dicho de otro modo: en un extremo abierto, la presión acústica es igual a la presión en equilibrio o atmosférica, en cambio, en un extremo cerra-

¹ Verifique este resultado usando la ecuación de onda para el desplazamiento $\frac{\partial^2 \delta(x, t)}{\partial t^2} - \frac{B}{\rho} \frac{\partial^2 \delta(x, t)}{\partial x^2} = 0$ y la definición de presión acústica en función del gradiente de desplazamiento.

do, la presión acústica cambia con respecto a la presión en equilibrio por efectos de la perturbación.

En el tubo de longitud efectiva L abierto por un extremo y cerrado por el otro, los modos normales de presión acústica con $\frac{n+1}{2}$ antinodos se definen por la ecuación²:

$$P_{an}(x, t) = A_n \cos(k_n x) \cos(\omega_n t - \beta_n) \quad (7.1)$$

donde las cantidades:

$$k_n = \frac{n\pi}{2L} = \frac{2\pi}{\lambda_n} \quad (7.2)$$

y

$$\omega_n = v_s k_n \quad \text{o} \quad \nu_n = \frac{nv_s}{4L} = \frac{v_s}{\lambda_n} \quad (7.3)$$

están definidas solamente para los enteros impares $n = 1, 3, 5, \dots$. Mientras que las amplitudes A_n y fases β_n son cantidades arbitrarias.

Al igual que la cuerda del Experimento 6, la frecuencia de oscilación de todos los modos normales en el tubo es igual a la frecuencia de la fuente externa de sonido. Para escuchar el sonido amplificado (antinodo) de un determinado modo, será necesario ajustar la longitud efectiva del tubo hasta alcanzar la resonancia. Esta longitud efectiva es un poco más larga que la longitud real del tubo, debido a que el antinodo de presión se forma justo después del extremo abierto.

Equipo

- * Probeta de 1000mL, tubo de PVC, generador de señales Tektronix CFG253, parlante Phywe, cables de conexión, nueces, pinza ajustable y soportes universales.
- * Flexómetro, osciloscopio digital Tektronix TDS210 y sonda BNC.

Precauciones

- * No deje caer agua de la probeta a los equipos electrónicos como el generador o el osciloscopio.
- * Verifique que su montaje este bien ajustado y alineado antes de medir.
- * Cuando esté barriendo la longitud del tubo, tenga cuidado de no sacarlo del agua porque no sería un tubo cerrado.

²Un resultado similar se puede obtener en tubos con ambos extremos abiertos o cerrados. En este caso se debe considerar la solución general 6.1 y aplicar las condiciones de frontera en los extremos.

Procedimiento

1. Ajuste los soportes universales a la mesa como se muestra en la Figura %. Llene la probeta con agua por debajo del borde; introduzca el tubo de PVC en la probeta, luego fíjelo a la barra usando la pinza y la nuez. La pinza ajustable le permite fijar o liberar el tubo de tal forma que se pueda desplazar por la probeta y cambiar su longitud neta. Cuando el tubo se introduce parcialmente en el agua, uno de sus extremos se cierra, mientras el otro permanece al aire libre.

Use los cables de conexión y la sonda BNC para conectar el parlante a la salida **MAIN** del generador de señales. Ajuste el rango de frecuencia en 1KHz para una señal cuadrada, luego ajuste la amplitud de la señal con **AMPLITUDE** hasta escuchar el sonido de la señal en el parlante. Con la perilla **FREQUENCY** varíe la frecuencia para escuchar ondas de sonido con diferentes frecuencias.

Pruebe subir el rango de frecuencias y perciba las ondas de sonido. ¿Hasta donde puede escucharlas?

Vuelva al rango de frecuencias inicial y en este rango ajuste el valor 1.2KHz. Acerque el parlante al extremo libre del tubo sin pegarlo, luego desplace el tubo por la probeta junto con el parlante procurando que nunca se pegue al borde del tubo. A medida que desplace (sacar o sumergir) el tubo-parlante por toda la probeta escuche el sonido, identifique con cuidado los puntos donde el sonido se escucha amplificado.

¿Porqué escucha el sonido amplificado para una longitud neta del tubo?. ¿Qué representa el máximo de sonido desde el punto de vista de una onda estacionaria de presión?.

2. El osciloscopio está disponible para que mida directamente la frecuencia ν de la señal del generador antes de conectarlo al parlante. La razón de este procedimiento es porque la perilla de frecuencia del generador indica unos valores que no corresponden con los valores reales. Por ejemplo: si ajusta una frecuencia de 1.2KHz en el generador, su valor real puede ser menor o mayor. Para disminuir esta incertidumbre se mide esa frecuencia con el osciloscopio. Trate de usar siempre este procedimiento para garantizar buena precisión en sus medidas de frecuencia.
3. Una vez haya practicado la búsqueda de máximos de sonido en el tubo. Elija una frecuencia de sonido y comience a sacar el tubo del agua. Cuando escuche exactamente un máximo de sonido, ajuste el tubo con la pinza y luego mida su longitud neta L , en pocas palabras: mida la parte no sumergida del tubo³. Siga

³En esta medida usted puede introducir el flexómetro en la probeta

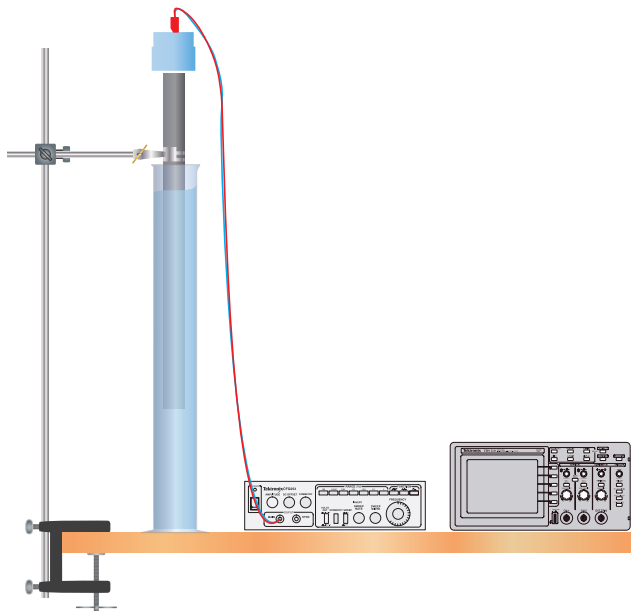


Figura 7.1

sacando el tubo hasta encontrar el resto de máximos y para cada uno de ellos mida la longitud neta que alcanza el tubo. ¿Cómo son estas longitudes entre máximos?.

Repita este procedimiento para 6 frecuencias comenzando desde 0.3KHz hasta 3.0KHz.

¿Porqué escucha pocos máximos de sonido cuando la frecuencia es baja en comparación con una frecuencia alta?.

Análisis

- * Por cada valor de frecuencia de sonido ν usted registró las longitudes netas L cuando encontraba los máximos. A partir de estos valores de longitud calcule la longitud de onda promedio λ_n correspondiente al modo de sonido con frecuencia $\nu_n = \nu$. Recuerde que en este tubo la separación entre dos máximos de sonido es $\frac{\lambda_n}{4} = \frac{L}{n}$ con $n = 1, 3, 5, \dots$. Para cada frecuencia usada verifique cuantos antinodos de presión acústica soporta todo el tubo, en cada caso indique a que modo normal n corresponde. ¿Qué diferencias encuentra con respecto a los modos normales en la cuerda del Experimento 6?.
- * Con cada valor de frecuencia y su longitud de onda promedio, calcule el valor y la incertidumbre de la ve-

locidad del sonido v_s en el aire del laboratorio. Obtenga una velocidad experimental promedio de los seis valores calculados.

Registre la temperatura del laboratorio durante su experimento y usela para calcular un valor teórico de la velocidad del sonido en condiciones físicas reales. Por último, compare su resultado experimental con este valor teórico e indique la exactitud de sus medidas.

para medir la profundidad del tubo en el agua, luego a la longitud total del tubo de PVC le resta ese valor de profundidad.