Laboratorio 4

Ondas estacionarias en una columna de aire

4.1 Objetivos

1. Identificar los distintos modos de vibración de las columnas de aire en un tubo abierto y cerrado.
2. Medir la velocidad del sonido en el aire.

4.2 Preinforme

1. Ilustre gráficamente los patrones de resonancia para ondas de presión en tubos abiertos y cerrados.
2. Explique la relación existente entre las ondas de desplazamiento y las ondas de presión en una columna de aire.
3. Calcule la frecuencias de resonancia para los primeros cinco modos de oscilación de la columna de aire en un tubo abierto y cerrado, utilizando las ecuaciones (4.1) y (4.2) repectivamente. Se debe tener en cuenta las correcciones de la longitud del tubo presentadas en la ecuacion (4.3) y (4.4).

4.3 Fundamento Teórico

Análogamente a como se producen las ondas estacionarias en una cuerda, las ondas estacionarias en una columna de aire confinado en un tubo, se producen por la superposición de ondas longitudinales incidentes y reflejadas en el interior del mismo en estado de resonancia. Pero a diferencia de los modos propios de oscilación en una cuerda, en una columna de aire, estos no se pueden ver a simple

vista; existen como arreglos de las moléculas de aire llamados **condensaciones** y **rarefacciones**.
Así como para el caso de la cuerda[1], la función de onda en estado estacionario para una columna de gas confinada dentro de un tubo de longitud finita, puede escribirse en términos de la ecuación:

$$\psi(x,t) = (A\,Sen\,kx + B\,Cos\,kx)\,Sen\,\omega t.$$

De la misma manera como se consideró en la sección 3.3, las frecuencias de resonancia f_n correspondientes a los distintos modos de oscilación de la columna de aire, se obtienen aplicando las diferentes condiciones de frontera. Estas se determinan por la condición del tubo.

Tubos abiertos

Si las condiciones de frontera son tales que:

- $\frac{\partial\psi(x,t)}{\partial x}|_{x=0} = 0.$
- $\frac{\partial\psi(x,t)}{\partial x}|_{x=L} = 0.$

Significa que en $x = 0$ y $x = L$, las moléculas de aire tienen un valor máximo de desplazamiento a partir de su posición de equilibrio, definiendo un tubo abierto en ambos extremos.

Aplicando estas condiciones de frontera en forma análoga a como se hizo para el caso de ondas estacionarias en la cuerda, se encuentra que las frecuencias de resonancia correspondientes a los distintos modos propios de oscilación de la columna de aire en un tubo abierto están dadas por:

$$f_n = \frac{n}{2L}v, \quad n = 1, 2, 3... \tag{4.1}$$

Donde v es la velocidad del sonido en el aire. La Figura 4.1, muestra el tono fundamental y algunos sobretonos para la onda φ *de presión*. Estos están desfasados 90^o con las ondas de desplazamiento. Las frecuencias de resonancia f_n tambén se conocen con el nombre de **armónicos**.

Tubos cerrados

Si las condiciones de frontera son tales que:

- $\frac{\partial\psi(0,t)}{\partial x} = 0.$

[1] ver Laboratorio 3 de este texto

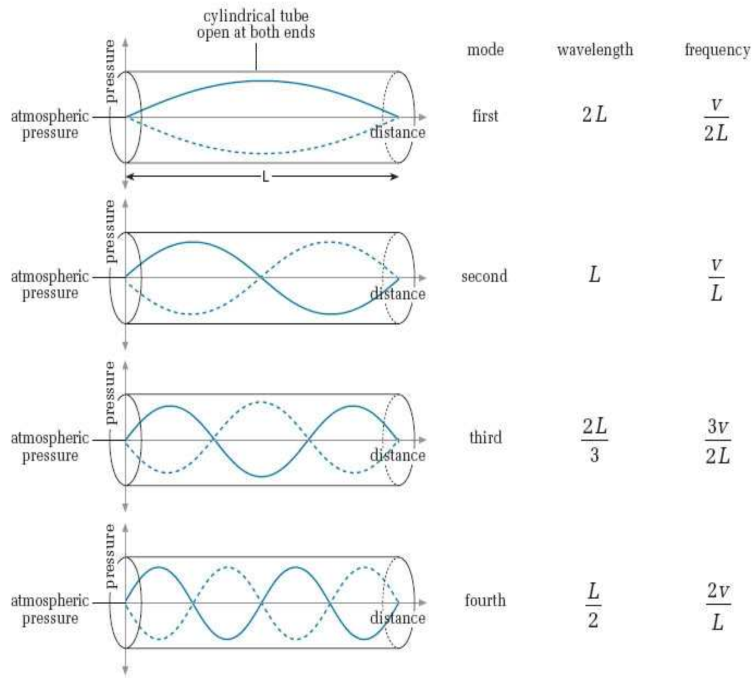

Figura 4.1: Patrones de ondas estacionarias correspondientes a *ondas de presión* en un tubo abierto en los dos extremos.

- $\psi(L,t) = 0$.

Significa que en $x = 0$, la onda estacionaria tiene un valor máximo y en $x = L$ tiene un valor mínimo con respecto al desplazamiento de las moléculas de aire o a partir de la posición de equilibrio. Esto define un tubo cerrado.
Aplicando estas condiciones de frontera y llevando a cabo los cálculos apropiados, se encuentra que las frecuencias de resonancia en tubo cerrado estan dadas por:

$$f_n = \frac{n}{4L}v, \quad n = 1, 3, 5, ... \tag{4.2}$$

Donde v es la velocidad del sonido en el aire. La Figura 4.2 muestra los primeros cuatro armónicos en este caso.

Las fórmulas y diagramas mostrados para resonancia en tubos son aproximadas, debido a que el comportamiento de las ondas en los extremos del tubo dependen parcialmente de factores tales como el diámetro del tubo y la frecuencia de las ondas. Los extremos del tubo no son exactamente nodos o antinodos. Las siguientes fórmulas empíricas deben utilizarse para la corrección de la longitud del tubo.
Para un tubo abierto:

$$L' = L + 0.8d. \tag{4.3}$$

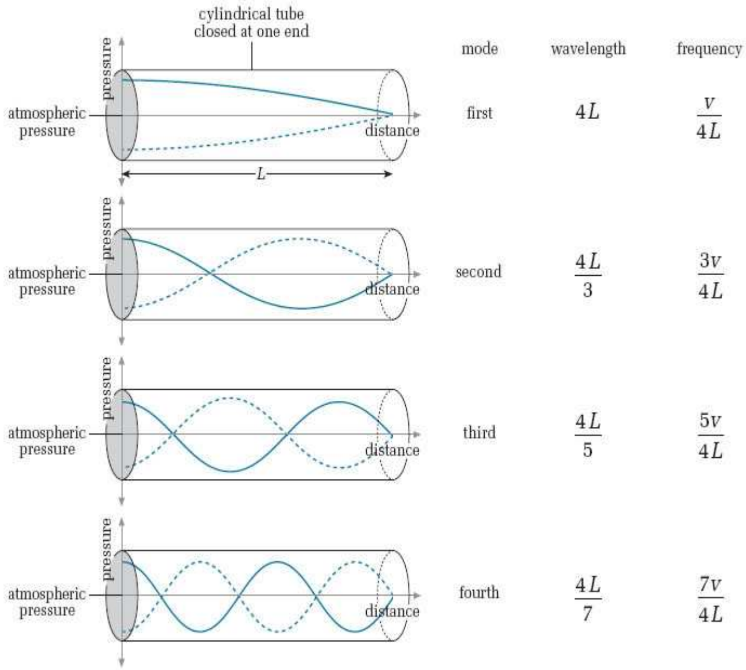

Figura 4.2: Patrones de ondas estacionarias correspondientes a *ondas de presión* en un tubo cerrado en un extremo y abierto en el otro.

Para un tubo cerrado:

$$L' = L + 0.4d, \tag{4.4}$$

donde $L = 90$ cm es la longitud del tubo y $d = 31$ mm es el diámetro del tubo.

4.4 Materiales

- Tubo de resonancia.
- Generador de señales.
- Osciloscopio.

4.5 Precauciones

Trabajar a frecuencia máxima de 1600 Hz.

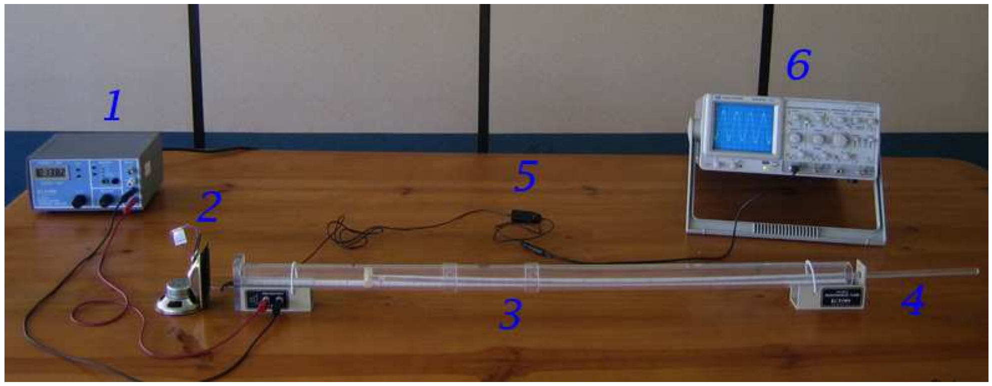

Figura 4.3: Montaje experimental: 1. Generador de señales, 2. Parlante, 3. Tubo de acrílico, 4. Émbolo móvil, 5. Amplificador y micrófono, 6. Osciloscopio.

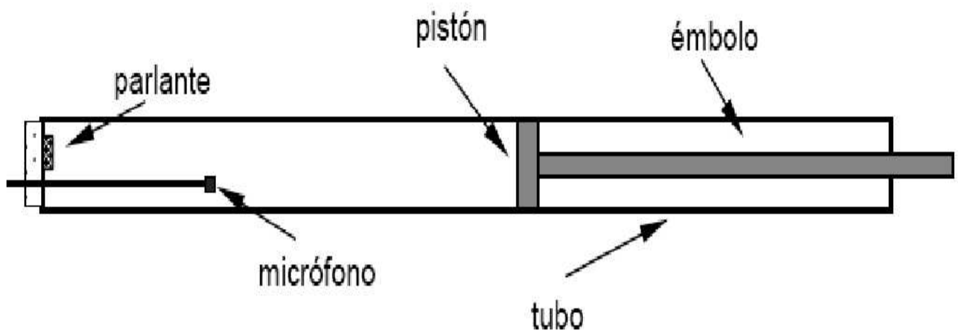

Figura 4.4: Esquema interno del tubo

4.6 Procedimiento

4.6.1 Frecuencias de resonancia de un Tubo abierto

1. Monte el equipo como se muestra en las Figuras 4.2 y 4.3. Coloque el generador de señales en el modo senusoidal, con la frecuencia de salida en la escala de 1 kHz, con el dial en 0 Hz. conecte esta señal al canal CH1 del osciloscopio. Coloque la velocidad de barrido en 1 ms/div y la ganancia en el canal uno en 5 V/div. Verifique que las perillas de calibración esten giradas completamente a la derecha. Aumente levemente la frecuencia y observe la señal.

2. Coloque el micrófono aproximadamente en la mitad del tubo. El amplificador conéctelo al canal CH2 y actívelo. Ajuste la amplitud del generador hasta

que pueda distinguir el sonido proveniente del parlante. Varíe la frecuencia lentamente a partir de cero hasta que observe *el efecto de resonancia* entre las dos señales. **La condición de resonancia se observa cuando la señal del micrófono es muy similar a la proveniente del generador y además tiene una amplitud máxima**.

3. Tenga en cuenta que debido al ruido del laboratorio, es difícil encontrar el primer armónico. Si no lo encuentra, intente con el siguiente armónico. Utilice la perilla trigger del osciloscopio para estabilizar la señal de salida del micrófono, si es necesario. Deduzca, comparando la frecuencia encontrada con la dada por la teoría, si la primera corresponde al armónico fundamental o a otro armónico.

4. Una vez hallada la frecuencia de resonancia, active el modo XY del osciloscopio; su efecto es independizar las señales del tiempo, para observar la figura de Lissajous que se forma al superponerlas. ¿ Qué figura espera observar si hay resonancia entre las dos señales?

5. Desactive el modo XY y mida en el osciloscopio la frecuencia proveniente del generador . Esta es la frecuencia f_0, correspondiente al modo fundamental (180-190 Hz) o al armónico encontrado. Verifique que es el armónico más bajo que es capaz de medir.

6. Eleve lentamente la frecuencia hasta que encuentre nuevas resonancias procediendo de la misma forma que en los pasos anteriores. Estas serán las frecuencias correspondientes a los armónicos superiores al fundamental. Encuentre al menos cinco frecuencias de resonancia. **Tenga en cuenta mover el micrófono hasta las posiciones donde se esperan observar los máximos de presión para cada armónico.** Para guiarse observe la figura 4.1. Registre los resultados en una tabla.

7. Para observar el patrón de la onda estacionaria, retire el micrófono lentamente y observe en la pantalla de osciloscopio la señal correspondiente a éste. ¿ Corresponde lo observado con lo que espera de acuerdo a los patrones de ondas estacionarias correspondientes a ondas de presión?

4.6.2 Frecuencias de resonancia de un Tubo cerrado

1. Coloque el émbolo dentro del tubo en la posición de 50 cm. Cerciórese que el extremo frente al parlante esté abierto. Coloque el micrófono dentro del tubo donde se presente un máximo de presión (cerca al pistón).

2. Repita el procedimiento seguido para tubo abierto, hasta el item 5, para obtener la frecuencia correspondiente al modo fundamental.

3. Para hallar las frecuencias correpondientes a los armónicos superiores al fundamental repita el item 6, pero **deje el micrófono en la posición inicial.** ¿ Por qué es mejor hacer esto?. Explique. Registre los datos en una tabla.

4. Para observar el patrón de la onda estacionaria, retire el micrófono lentamente y observe en la pantalla de osciloscopio la señal correspondiente a este. ¿ Corresponde lo observado con lo que espera de acuerdo a los patrones de onda estacionarias correspondientes a ondas de presión?

4.7 Análisis

Frecuencias le resonancia en un tubo

1. Para cada configuración del tubo (abierto y cerrado) divida cada una de las frecuencias de resonancia halladas por la frecuencia de resonancia más baja que encontró. Sus resultados deberían dar una serie de números cercanos a números enteros. ¿ Confirman sus resultados esta aseveración?. Explique.

2. ¿ Es la serie de números que usted ha hallado, la misma para tubo cerrado que para tubo abierto?.

3. Con los datos para tubo abierto y cerrado construya dos gráficos de frecuencia en función del número de armónico. Halle la ecuación de la recta en cada caso y comparándola con la ecuación teórica para tubo abierto y cerrado respectivamente, deduzca la velocidad del sonido con su incertidumbre.

4. Promedie los resultados para la velocidad obtenida de los dos gráficos y obtenga el mejor estimado con su respectiva incertidumbre.

5. Compare el valor obtenido con el calculado a través de la expresión $v = 333.5 + 0,607\,T$, donde T es la temperatura en grados Celsius medida en el laboratorio. Utilize el termómetro del laboratorio para esta medida. Halle el porcentaje de error y explique las posibles razones de la discrepancia.