Experimento 10

VELOCIDAD DEL SONIDO EN EL AIRE- TUBO DE RESONANCIA

Objetivo

Medir la velocidad del sonido en el aire a temperatura ambiente

Teoría

Los sistemas mecánicos tienen frecuencias naturales de vibración. Cuando excitamos un sistema mecánico en una de sus frecuencias naturales de oscilación, hay una transferencia máxima de energía por parte de la fuente excitadora hacia el sistema, y la amplitud de la vibración aumenta hasta un máximo. En estas condiciones decimos que el sistema está en *resonancia* con la fuente y nos referimos a la frecuencia particular en la cual esto ocurre como *frecuencia de resonancia*. La relación entre la frecuencia f, la longitud de onda λ, y la velocidad v de la onda, que se propaga a través del sistema es $v = \lambda f$. Si conocemos la frecuencia y la longitud de onda, podemos deducir su velocidad. O, si conocemos la longitud de onda y la velocidad, podemos calcular la frecuencia

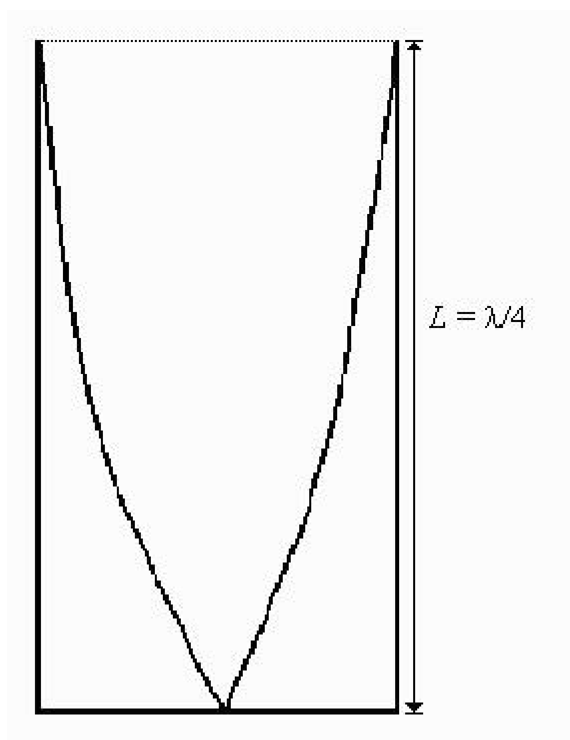

Figura 1 Un tubo cilíndrico cerrado en su extremo inferior y abierto en su extremo superior

Sistemas mecánicos, como las columnas de aire en el interior de pipas o tubos, de longitudes fijas, tienen frecuencias resonantes particulares. La interferencia de las ondas que viajan hacia el interior del tubo y las ondas reflejadas por el extremo cerrado, que viajan de regreso hacia la entrada, produce ondas longitudinales estacionarias, que tienen un *nodo* en el extremo cerrado y un *anti-nodo* en el extremo abierto. Las frecuencias de resonancia de una pipa o tubo dependen de su longitud L, según lo muestran las figuras 1, 2 y 3 en donde vemos que hay un cierto número de longitudes de onda o "lazos" que se acomodan en la longitud del tubo en forma de nodos y anti-nodos. Puesto que cada lazo corresponde a una longitud de media-onda, la resonancia ocurre cuando la longitud del tubo es igual a un número impar de cuartos de longitudes de onda, es decir, cuando $L = \lambda/4, 3\lambda/4, 5\lambda/4$, etc., o en general,

$$L = n\lambda/4, n = 1, 3, 5, \text{etc.} \qquad 1$$

De donde,

$$\lambda = 4L/n \qquad 2$$

Recordemos que la frecuencia, f y la velocidad v, se relacionan con el largo de onda mediante la ecuación,

$$v = \lambda f, \qquad 3$$

La ecuación 3, también llamada *relación de dispersión*, puede escribirse como $f = v/\lambda$, y si substituimos λ en ella, según la ecuación 2, obtenemos:

$$f_n = nv/4L, \; n = 1, 3, 5, \text{etc.} \qquad 4$$

Estas frecuencias f_n son las de resonancia para todas las ondas estacionarias que pueden establecerse en el tubo

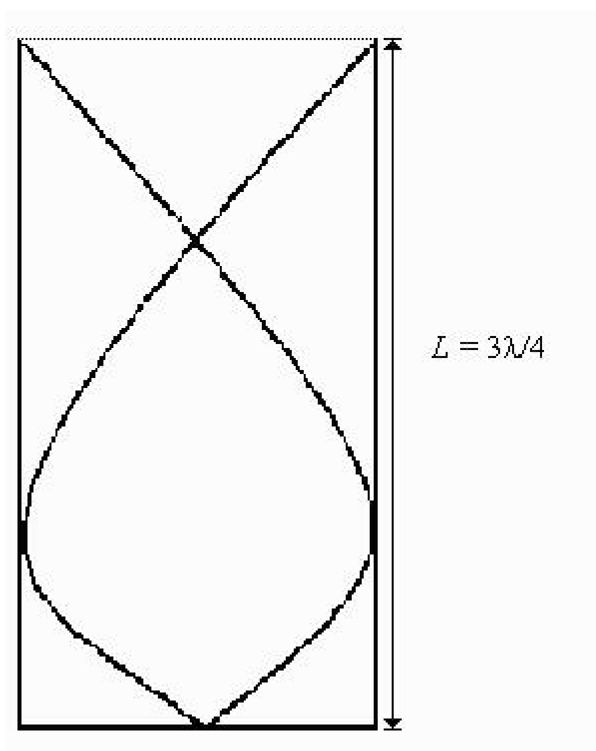

Figura 2 Segundo armónico estacionario de la onda acústica

Como puede ser visto a partir de las ecuaciones 1 y 4, las tres variables físicas implicadas en la condición de resonancia de una columna del aire son f, v, y L. Para estudiar la resonancia en este experimento, ajustaremos la longitud L de una columna de aire para una frecuencia excitadora preestablecida. Cambiaremos la longitud de la columna de aire moviendo un pistón dentro del tubo según lo muestra la figura 3. Si la posición del pistón cambia, aumentando la longitud de la columna de aire, habrá más segmentos de cuartos de longitud de onda en el tubo, cumpliendo con las condiciones de nodo y anti-nodo en los extremos. La diferencia en las longitudes del tubo, cuando dos anti-nodes sucesivos se forman en su extremo abierto, es igual a media longitud de onda, es decir,

$$\Delta L = L_2 - L_1 = 3\lambda/4 - \lambda/4 = \lambda/2, \qquad 5$$

Según lo visto en la figura 3. Cuando hay un anti-nodo en el extremo abierto del tubo, se intensifica el sonido hasta un máximo. Por lo tanto, las longitudes L_1 y L_2 pueden ser determinadas alejando el pistón del extremo abierto y poniendo atención a la intensificación del sonido en dos casos sucesivos. Puesto que la frecuencia de la fuente, en este caso una pequeña bocina, será establecida por nosotros al principio del experimento, y la diferencia en longitud del tubo entre dos anti-nodes sucesivos, ΔL, será medida, la longitud de onda se determina de la ecuación 5, como $\lambda = 2\Delta L$, y la velocidad de la onda acústica será deducida de la ecuación 3

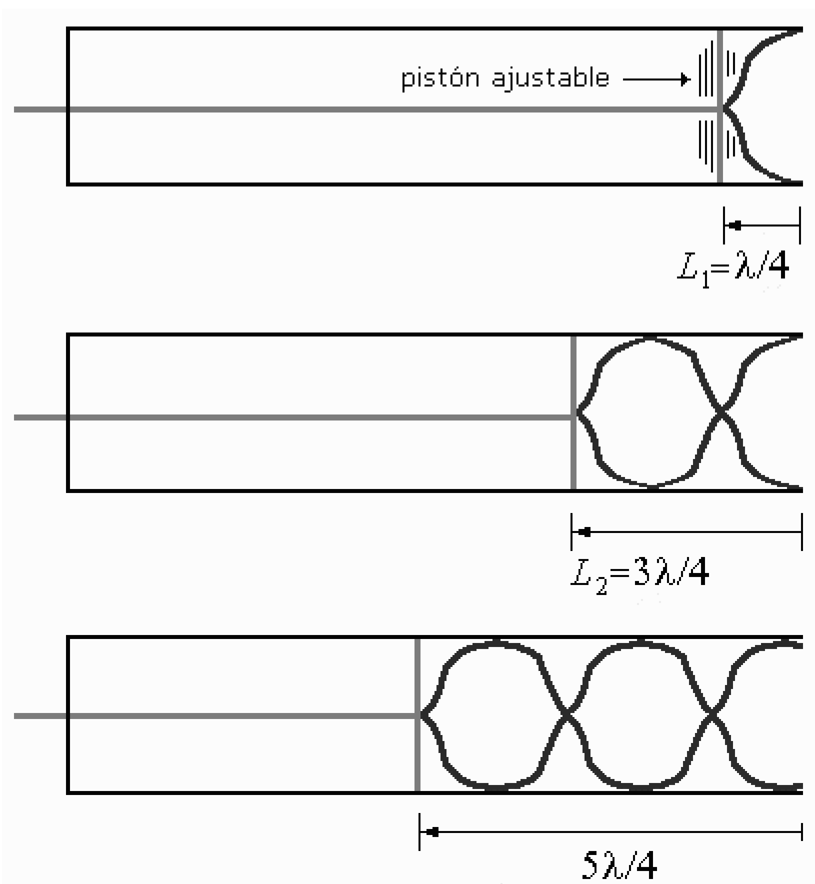

Figura 3 Las primeras tres ondas acústicas estacionarias en una pipa

La velocidad del sonido en el aire depende de la temperatura y se expresa como:

$$v = (331.5 + 0.6T) \text{ m/s} \qquad 6$$

Donde T, la temperatura del aire, se mide en grados centígrados. La ecuación 6 muestra que la velocidad del sonido en aire a 0°C es de 331.5 m/s y aumenta en 0.6 m/s por cada grado de aumento de la temperatura. Por ejemplo, a 20°C, la velocidad del sonido es de 343.5 m/s

Ejemplo 1

Los débiles ruidos de fondo de un cuarto excitan la onda fundamental dentro de un tubo de cartulina de longitud $L = 67.0$ cm con sus dos extremos abiertos. Asumir que la velocidad del sonido en el aire dentro del tubo es de 343 m/s. ¿Qué frecuencia usted oye si apoya su oído contra uno de los extremos del tubo?

Solución: Al cerrar el extremo del tubo con el oído, la frecuencia fundamental se calcula como:

$f = v/4\text{L} = 343/(4)(0.67) = 128$ Hz

Ejemplo 2

Los débiles ruidos de fondo de un cuarto excitan la onda fundamental dentro de un tubo de cartulina de longitud $L = 67.0$ cm con sus dos extremos abiertos. Asumir que la velocidad del sonido en el aire dentro del tubo es 343 m/s. ¿Qué frecuencia usted oye si mueve su cabeza lejos del tubo de tal forma que ahora quedan abiertos los dos extremos?

Solución: Con ambos extremos abiertos, la ecuación para la frecuencia fundamental cambia porque ahora hay dos anti-nodos, uno en cada extremo del tubo, entonces,

$f = v/2\text{L} = 343/ (2) (0.67) = 256$ Hz

Ejemplo 3

La gama de frecuencias audibles para la audiencia normal de los seres humanos empieza en 20 Hz y termina en 18 kHz. ¿Cuáles son las longitudes de onda de ondas acústicas en estas frecuencias a 20°C?

Solución: Sabemos que $\lambda = v/f$

Para $f = 20$ Hz, $\lambda = 343/20 = 17.15$ m. Para $f = 18$ kHz, $\lambda = 343/18{,}000 = 1.91$ cm

Ejemplo 4

La longitud de onda más corta emitida por un murciélago es de unos 3.3 mm. ¿Cuál es la frecuencia correspondiente?

Solución: $f = v/\lambda = 343/0.0033 = 104$ kHz

Por lo tanto, es inaudible para los seres humanos. En este caso decimos que se trata de una onda ultrasonora

Ejemplo5

El ultrasonido de diagnóstico con una frecuencia de 4.5 MHz se utiliza para examinar tumores en tejido suave. ¿Cuál es la longitud de onda en aire de una onda como ésta?

Solución: $\lambda = v/f = 343/(4.5 \times 10^6) = 76.2$ μm

Ejemplo 6

El ultrasonido de diagnóstico con una frecuencia de 4.5 MHz se utiliza para examinar tumores en tejido suave. Si la velocidad del sonido en este tejido es de 1,500 m/s, ¿cuál es la longitud de onda de esta onda?

Solución: $\lambda = v/f = 1{,}500/(4.5 \times 10^6) = 333.3$ μm

Ejemplo 7

Un altavoz cónico tiene un diámetro de 15.0 cm. ¿Cuál es la frecuencia del sonido que emite este altavoz si su largo de onda es igual a su diámetro?

Solución: $\lambda = 15.0$ cm. Sabemos que $f = v/\lambda$, entonces, $f = 343/0.15 = 2.29$ kHz

Equipo y materiales

Sensor de voltaje
Tubo de la resonancia con sus accesorios
Micrófono
Sistema de computadora
Programa *DatoStudio*

Procedimiento

Vamos a usar los terminales de *salida* (*Output*) localizadas al extremo derecho de la interfaz, para generar una señal senoidal de audio, en la bocina del tubo de resonancia. Usaremos el programa *DataStudio* para seleccionar la frecuencia de salida de la bocina, alimentada por el generador de señal de la interfaz. Un micrófono, montado en el tubo de resonancia junto con un sensor de voltaje, medirá la intensidad del sonido. Un pistón móvil, dentro del tubo, se utilizará para ajustar la longitud de la columna de aire. Cambiaremos la posición del pistón para escuchar cómo se intensifica el sonido cuando ocurren resonancias en las ondas acústicas estacionarias dentro del tubo. Mediremos las distancias entre anti-nodos sucesivos para determinar la longitud de onda del sonido y de ahí calcular la velocidad de éste

Parte I

1. Observe la figura 4 para hacer las conexiones necesarias
2. Conectar la bocina a los terminales de *salida* (*Output*) de la interfaz
3. Escoger una señal senoidal y ajustar su voltaje a 0.5 V y frecuencia de 3 kHz
4. Conectar el micrófono al sensor de voltaje y éste al canal A de la interfaz
5. Escoger una frecuencia de muestreo de 2,500 Hz, con sensibilidad alta
6. Introducir el pistón movible hasta tocar el fondo del tubo

7. Abra una gráfica de voltaje del canal A *vs*. tiempo y pulse el botón de *Inicio*
8. Mueva lentamente el pistón hacia afuera mientras escucha el sonido y mira la gráfica de intensidad (voltaje) *vs*. tiempo. En la medida que usted mueve el pistón hacia afuera oirá máximos y mínimos del sonido, así como verá máximos y mínimos en la gráfica. Ver la figura 5
9. Localizar cuidadosamente las posiciones sucesivas del pistón correspondientes a los máximos en la intensidad del sonido, comenzando con el pistón tocando el fondo del tubo. Para hacerlo use la cinta métrica ubicada en la pared inferior del tubo
10. Calcular la longitud de onda de la onda estacionaria dentro del tubo usando la ecuación 5
11. Calcular la velocidad del sonido en el aire y compararlo con el valor esperado
12. Repetir el mismo experimento para una frecuencia diferente a la de 3 kHz escogida anteriormente. Por ejemplo, puede seleccionar 3.6 kHz

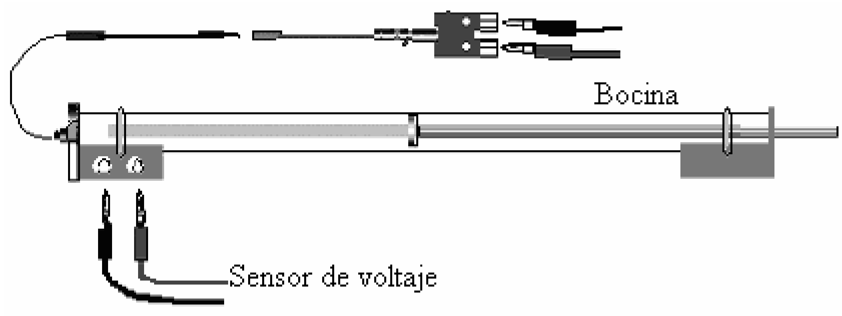

Figura 4 Instalación del tubo de resonancia

<u>Parte II</u>

1. Haga que uno de los compañeros de su mesa de trabajo seleccione una frecuencia más entre 2.5 y 3.5 kHz, pero que no coincida con las dos seleccionadas anteriormente, y que tampoco divulgue su valor al resto de los compañeros
2. Repetir los mismos pasos que en la parte I para localizar los máximos dentro del tubo y encontrar la longitud de onda
3. Utilizar la velocidad del sonido que usted encontró en la parte I para deducir el valor de la frecuencia de la onda acústica que seleccionó su compañero
4. Pregunte al compañero cuál fue la frecuencia que seleccionó y compárela con la que usted dedujo

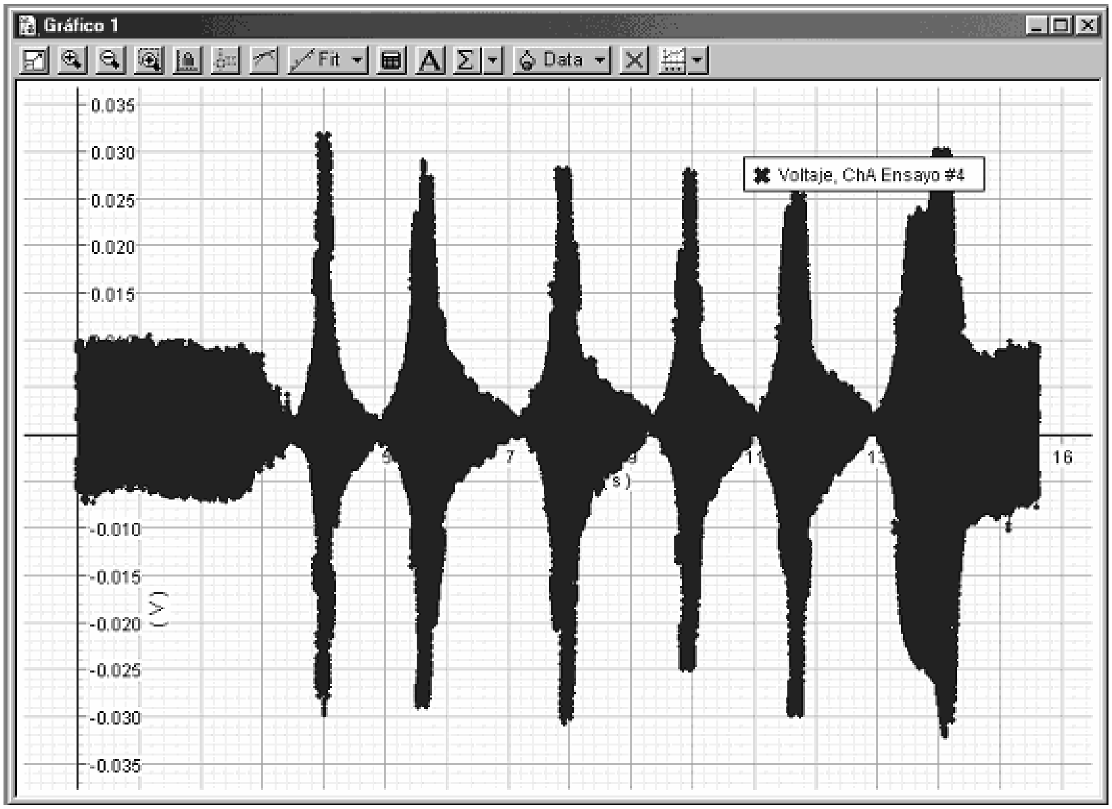

Figura 5 La intensidad del sonido pasa por máximos y mínimos

Preguntas

Contestar correctamente antes de hacer el experimento

1. Los débiles ruidos de fondo de una habitación crean el modo fundamental de una onda estacionaria en el interior de un tubo de longitud L = 67.0 cm, con sus dos extremos abiertos. Asumir que la velocidad del sonido en el aire dentro del tubo es de 343 m/s. La frecuencia de la onda en el tubo es de,
   (a) 128 Hz
   (b) 256 Hz
   (c) 512 Hz
   (d) 230 Hz

2. La gama de frecuencias audibles para los seres humanos es desde unos 20 Hz a 20 kHz. Asumiendo que la velocidad del sonido en el aire es de 343 m/s, el largo de onda de un sonido de 20 Hz es de,
   (a) 6860 m
   (b) 17 m
   (c) 0.06 m
   (d) 400 m

3. La gama de frecuencias audibles para los seres humanos es desde unos 20 Hz a 20 kHz. Asumiendo que la velocidad del sonido en el aire es de 343 m/s, el largo de onda de un sonido de 20 kHz es de,
   (a) 1.7 cm
   (b) 6860 km
   (c) 58 m
   (d) 400 km

4. La longitud de onda más corta emitida por un murciélago es cerca de 3.3 mm. Asumiendo que la velocidad del sonido en el aire es de 343 m/s, la frecuencia correspondiente a este largo de onda es de,
   (a) 1132 Hz
   (b) 104 Hz
   (c) 104 kHz
   (d) 104 MHz

5. El ultrasonido usado con fines médicos tiene una frecuencia de 4.5 MHz. Asumiendo que la velocidad del sonido en el aire es de 343 m/s, el largo de onda de este ultrasonido es de,
   (a) 76 mm
   (b) 76 μm
   (c) 76 cm
   (d) 76 m

6. El ultrasonido usado con fines médicos tiene una frecuencia de 4.5 MHz. Asumiendo que la velocidad del sonido en el tejido muscular es de 1,500 m/s, el largo de onda de la señal ultrasonora en el músculo es de,
   (a) 333 mm
   (b) 333m
   (c) 333 km
   (d) 333 μm

7. Un altavoz cónico tiene un diámetro de 15.0 centímetros. Asumiendo que emite sonido con un largo de onda igual al diámetro del altavoz, y que la velocidad del sonido en el aire es de 343 m/s, la frecuencia de la onda emitida es de,
   (a) 5145 Hz
   (b) 2.3 kHz
   (c) 51 Hz
   (d) 23 Hz

Informe del Experimento 10. Velocidad del sonido en el aire – Tubo de resonancia

Sección_______ Mesa _______

Fecha: ____

Estudiantes:

1. ____

2. ____

3. ____

4. ____

Parte I

Tabla 1. Datos para frecuencias de 3.0 kHz y una arbitraria entre 2.5 y 3.5 kHz

Frecuencia (kHz)	Posición del pistón para el primer máximo (m)	Posición del pistón para el segundo máximo (m)	Posición del pistón para el tercer máximo (m)	Posición del pistón para el cuarto máximo (m)	Posición del pistón para el quinto máximo (m)	Distancia promedio entre los máximos (m)
3.0						

1. Cálculo del largo de onda, $\lambda = 2\Delta L =$ _________________ (m)
   (Use el valor de la distancia promedio entre los máximos para ΔL)

2. Cálculo de la velocidad del sonido, $v = \lambda f =$ ____________________________ (m/s)

3. Pregunte al instructor cuál es el valor de la temperatura en el laboratorio y úselo, junto con la ecuación 6 del instructivo, para calcular el valor teórico de la velocidad del sonido. Incluya sus cálculos en el espacio provisto en seguida

4. Compare el valor de la velocidad del sonido, medido en el laboratorio, con el valor teórico

$$\Delta\% = \frac{\left|v_{\text{medido}} - v_{\text{teórico}}\right|}{v_{\text{teórico}}} \times 100 = \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ \%$$

<u>Frecuencia adicional entre 2.5 y 3.5 kHz (Use los datos de la tabla 1)</u>

1. Cálculo del largo de onda, $\lambda = 2\Delta L =$ __________________ (m)
   (Use el valor de la distancia promedio entre los máximos para ΔL)

2. Cálculo de la velocidad del sonido, $v = \lambda f =$ ______________________________ (m/s)

3. Compare el valor de la velocidad del sonido, medido en el laboratorio, con el valor teórico

$$\Delta\% = \frac{\left|v_{\text{medido}} - v_{\text{teórico}}\right|}{v_{\text{teórico}}} \times 100 = \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ \%$$

4. Suponga que el tubo de resonancia tiene una longitud de 1.0 m y la frecuencia senoidal del generador es de 500 Hz, ¿cuántos máximos se pueden encontrar en estas condiciones al mover el pistón desde la bocina hasta su otro extremo? Asuma que el sonido tiene la velocidad que usted midió para aquella frecuencia con la que obtuvo la diferencia porcentual más pequeña comparada con el valor esperado. Incluya sus cálculos en el espacio provisto

Parte II

1. Uno de los estudiantes establece nuevamente una frecuencia entre 2.5 y 3.5 kHz en la onda senoidal y pide a sus compañeros que encuentren su valor usando el procedimiento anterior sabiendo la velocidad del sonido, medida anteriormente. Use la más precisa de las dos

Tabla 2. Datos para una frecuencia arbitraria adicional

Posición del pistón para el primer máximo (m)	Posición del pistón para el segundo máximo (m)	Posición del pistón para el tercer máximo (m)	Posición del pistón para el cuarto máximo (m)	Posición del pistón para el quinto máximo (m)	Distancia promedio entre los máximos (m)

2. Cálculo del largo de onda, $\lambda = 2\Delta L$ = _________________ (m)
(Use el valor de la distancia promedio entre los máximos para ΔL)

3. Cálculo de la frecuencia del generador,

$f = v/\lambda$ = ____________________________ (m/s)
(Use el valor más preciso de la velocidad del sonido medida en la primera parte del experimento)

4. Compare el valor de la frecuencia del generador, establecida por su compañero, con la que usted midió

$$\Delta\% = \frac{\left| f_{\text{medida}} - f_{\text{seleccionada}} \right|}{f_{\text{seleccionada}}} \times 100 = \underline{\hspace{6cm}}\%$$

5. Suponga que la temperatura del laboratorio aumenta por 5°C. Explique el efecto de este cambio, sobre el valor de la velocidad del sonido que usted mediría, si repitiera el experimento con esta nueva temperatura

Conclusiones