

## Condiciones de contorno en cuerdas y tubos

1. Se tiene una cuerda de longitud  $L$  y densidad lineal de masa  $\mu$  sometida a una tensión  $T_0$ . Proponga como solución de la ecuación de ondas para un modo normal a la expresión:  $\Psi(x, t) = A \sin(kx + \varphi) \cos(\omega t + \theta)$ . Tome el sistema de coordenadas con  $x = 0$  en un extremo de la cuerda y  $x = L$  en el otro. Encuentre la forma particular que adopta la solución propuesta en los siguientes casos:

- $\Psi(0, t) = \Psi(L, t) = 0$  (ambos extremos están fijos).
- $\Psi(0, t) = 0$  y  $\frac{\partial \Psi}{\partial x}(L, t) = 0$  (un extremo está fijo y el otro está libre). ¿Imponer que un extremo se encuentre “libre” es equivalente a no imponer condiciones de contorno sobre ese extremo? ¿Cómo lograría un extremo “libre” para la cuerda?
- $\frac{\partial \Psi}{\partial x}(0, t) = \frac{\partial \Psi}{\partial x}(L, t) = 0$  (ambos extremos se encuentran libres). ¿A qué corresponde el modo de frecuencia mínima? ¿Cuánto vale la frecuencia de oscilación de ese modo?
- Ahora tome un sistema de coordenadas con  $x = 0$  en el centro de la cuerda. Halle la forma que adopta la solución general propuesta si  $\Psi(-L/2, t) = \Psi(L/2, t) = 0$  (ambos extremos fijos).

2. Se tiene una cuerda de 20 cm de longitud y 5 g de masa, sometida a una tensión de 120 N. Calcule sus modos naturales de oscilación. ¿Son todos audibles para el oído humano?

3. Considere las cuerdas de un violín. De la primera (más aguda) a la cuarta (más grave) producen las siguientes notas (acompañadas por la frecuencia del oscilación del modo fundamental<sup>1</sup>):

- |                             |                              |
|-----------------------------|------------------------------|
| 1. Mi <sub>5</sub> , 659 Hz | 2. La <sub>4</sub> , 440 Hz  |
| 3. Re <sub>4</sub> , 294 Hz | 4. Sol <sub>3</sub> , 196 Hz |

Cada cuerda está hecha de distinto material y tiene diferente diámetro:

- |  |   |
|--|---|
| 1. Aluminio: $\rho_1 = 2.6 \text{ g cm}^{-3}$ , $d_1 = 0.09 \text{ cm}$ .      | 2. Aleación Al-Ni: $\rho_2 = 1.2 \text{ g cm}^{-3}$ , $d_2 = 0.12 \text{ cm}$ . |
| 3. Aleación Al-Ni: $\rho_3 = 1.2 \text{ g cm}^{-3}$ , $d_3 = 0.1 \text{ cm}$ . | 4. Acero: $\rho_4 = 7.5 \text{ g cm}^{-3}$ , $d_4 = 0.1 \text{ cm}$ .           |

Considerando que todas las cuerdas tienen igual longitud, calcular las tensiones a las que deben estar sometidas con respecto a la primera, para lograr la afinación deseada. ¿Qué cambios son necesarios para que todas las tensiones estén equilibradas?

4. Se tiene un tubo de longitud  $L$ . Considere las siguientes posibilidades:

- Está cerrado en ambos extremos, lleno de aire en su interior.
- Tiene un extremo cerrado y el otro abierto.
- Ambos extremos están abiertos.

---

<sup>1</sup>Considerando una escala bien temperada y tomando como referencia  $\text{La}_4 = 440 \text{ Hz}$ . Consultar: <https://pages.mtu.edu/~suits/notefreqs.html>

---

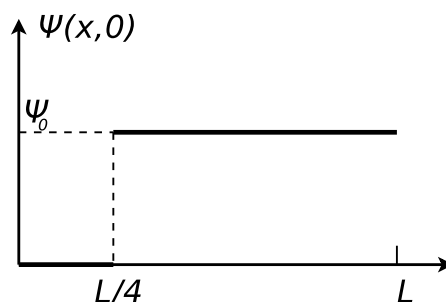
**Datos:** velocidad de propagación de las ondas  $v_s$ ,  $L$ ,  $P_0$  (presión atmosférica),  $\rho_0 = \gamma P_0 / v_s^2$ .

Hallar, para cada una de dichas situaciones:

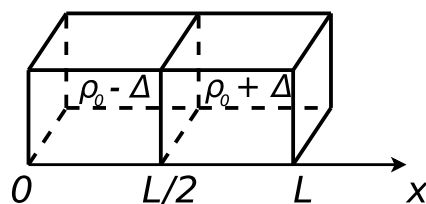
- a) Las posibles longitudes de onda con las que puede vibrar el aire en el tubo, y sus correspondientes frecuencias.
  - b) Elija un sistema de referencia conveniente, y escriba la expresión más general para el desplazamiento de las partículas  $\Psi(x, t)$ . En dicha expresión, ¿qué parámetros conoce? ¿De qué dependen los parámetros que no conoce?
  - c) A partir de la expresión hallada en (b), hallar  $\delta p(x, t)$  (presión en cada punto, tomando como referencia la atmosférica). ¿Cuál es la diferencia de fase entre ellas? ¿Cuánto vale la amplitud de presión?
  - d) Hallar  $\rho(x, t)$  (densidad). ¿Cuánto vale su amplitud?
5. a) ¿Qué longitud debe tener un tubo de órgano abierto en ambos extremos para que produzca en el aire un sonido de 440 Hz?
- b) ¿Qué longitud deberá tener un tubo de órgano cerrado en uno de sus extremos para que su primer sobretono (es decir, en su segundo modo) produzca la misma frecuencia? ¿A qué armónico corresponde?
6. Se tiene un tubo cerrado en uno de sus extremos; su longitud es menor a 1m. Se acerca al extremo abierto un diapasón que está vibrando con  $\nu = 440$  Hz. Considere  $v_s = 330$  m/s.
- a) Hallar las posibles longitudes del tubo para que haya resonancia. Para cada una de ellas, ¿en qué modo está vibrando el aire contenido en el tubo?
  - b) Repetir (a) si el tubo está abierto en ambos extremos.

## Condiciones iniciales en cuerdas y tubos

7. Considere una cuerda de longitud  $L$ , de densidad de masa uniforme  $\mu_0$  sujeta en ambos extremos y sometida a una tensión  $T_0$ . A  $t = 0$  la cuerda se suelta de modo que su forma está dada por la siguiente función:  $\Psi(x, 0) = H(x) = \sin(\pi x/L) + (1/3)\sin(3\pi x/L) + (1/5)\sin(5\pi x/L)$ , si se toma un sistema de coordenadas tiene  $x = 0$  en un extremo de la soga y  $x = L$  en el otro.
- a) Halle  $\Psi(x, t)$ .
  - b) Grafique  $\Psi(x, t)$  para  $\omega_1 t = 0, \pi/5, \pi/3$  y  $\pi/2$ . ¿Qué clase de simetría tiene  $\Psi(x, t)$  alrededor de  $\omega_1 t = \pi/2$ ? ¿y alrededor de  $\pi$ ? ¿Cómo espera que sea  $\Psi(x, t)$  para  $\omega_1 t = 2\pi$ ? ( $\omega_1$  es la frecuencia fundamental).
8. Considere una cuerda de longitud  $L$ , de densidad de masa uniforme  $\mu_0$  sometida a una tensión  $T_0$ , con un extremo fijo y el otro libre. Se le da a la cuerda la forma mostrada en la figura, y a  $t = 0$  se la suelta.



- a) Usando el sistema de coordenadas indicado en la figura, halle  $\Psi(x, t)$ .
- b) Graficar  $\Psi(x, t)$  para  $\omega_1 t = 0, \pi$  y  $2\pi$ .
- c) Si tomara un sistema de coordenadas con el origen en el extremo libre de la cuerda, diga qué es lo que cambiaría. ¿Es conveniente ese sistema?
9. Considere una cuerda de longitud  $L$ , siendo  $T_0$  su tensión y  $\mu_0$  su densidad lineal. Sea  $\Phi(x, t)$  la elongación de la cuerda.
- a) Escriba la expresión más general que representa un modo normal en dicha cuerda, es decir, la expresión más general de una onda estacionaria.
- b) Sabiendo que la cuerda tiene un extremo libre y otro fijo, y que el sistema de coordenadas con el que trabaja es tal que el extremo libre está en  $x = 0$  y el extremo fijo está en  $x = L$ , imponga las condiciones de contorno y determine las constantes pertinentes.
- c) Usando la relación de dispersión, obtenga las posibles frecuencias temporales  $\nu_n$ .
- d) Si  $\Phi(x, 0) = 0$  y  $\dot{\Phi}(x, 0) = V_0 \cos\left(\frac{3\pi}{2L}x\right)$ , siendo  $0 \leq x \leq L$ , obtenga la amplitud y fase de cada modo y halle  $\Phi(x, t)$ .
10. Dada una cuerda de longitud  $L$  y densidad de masa uniforme  $\mu$ , sometida a una tensión  $T_0$  con ambos extremos fijos, demostrar que si  $\Phi(x, 0)$  y  $\dot{\Phi}(x, 0)$  son simétricas con respecto al centro de la cuerda, los modos con números de onda  $k_p = 2p\pi/L$  no se excitan.
11. Considere una cuerda de longitud  $L$  sujeta en ambos extremos y sometida a una tensión  $T_0$ , que consta de dos tramos: uno de longitud  $L_1$  y densidad de masa uniforme  $\mu_1$ , y otro de longitud  $L_2$  y densidad de masa uniforme  $\mu_2$ .
- a) Halle la expresión más general para un modo normal en dicha cuerda. Plantee las condiciones de contorno y halle las condiciones que deben cumplir los distintos parámetros.
- b) Considere que  $L_1 = 3L_2$  y que  $\mu_2 = 9\mu_1$ . Hallar los modos normales en este caso.
12. Se tiene una cuerda de longitud  $L$  y densidad de masa uniforme  $\mu$ , sometida a una tensión  $T_0$  y fija en ambos extremos. Se tiene además que una fuerza de amortiguamiento proporcional a la velocidad de la cuerda actúa en cada punto de la misma. Hallar la forma más general de  $\Phi(x, t)$ .
13. Se tiene un tubo de longitud  $L$  cerrado en ambos extremos como se indica en la figura. El tubo presenta un tabique ubicado en la mitad del mismo. De un lado del tabique hay un gas de densidad  $\rho_0 - \Delta$  y del otro lado hay un gas de densidad  $\rho_0 + \Delta$  (considere  $\Delta \ll \rho_0$ ). Todo el gas se encuentra en reposo. A  $t = 0$  se quita el tabique y se deja evolucionar al sistema.

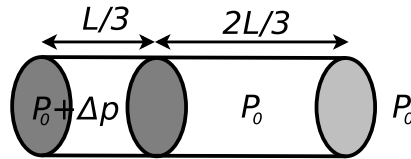


- a) Escriba la expresión para un modo normal  $\Psi_n(x, t)$  en el tubo, imponiendo las condiciones de contorno. ¿Cuáles son las longitudes de onda permitidas? ( $\Psi$  es el desplazamiento de los elementos del gas).

- b) Escriba la expresión de  $\rho(x,0)$  y de  $\Psi(x,0)$ ; grafíquelas. Sugerencia: hallar  $\Psi(x,0)$  a partir de  $\rho(x,0)$  usando las condiciones de contorno.
- c) Usando las condiciones iniciales, halle  $\Psi(x,t)$ . Calcule  $\rho(x,0)$ .

**Datos:**  $\rho_0$ ,  $\Delta$ ,  $L$ , velocidad del sonido en el gas  $v_s$ .

14. Se tiene un tubo dividido en dos regiones separadas por un tabique. En una de ellas se tiene una presión  $P = P_0 + \Delta p$  (constante). La otra región está abierta a la atmósfera, teniendo presión  $P_0$ . A  $t = 0$  se remueve el tabique. Hallar  $\delta p(x,t)$ ,  $\Psi(x,t)$  y  $\delta \rho(x,t)$ .



**Datos:**  $P_0$ ,  $\Delta p \ll P_0$ ,  $L$ ,  $\gamma$  y la velocidad del sonido en el gas  $v_s$ .