UNIVERSIDAD DEL BIO-BIO

Física III (sección 1) (230006-230010) Ondas, Óptica y Física Moderna

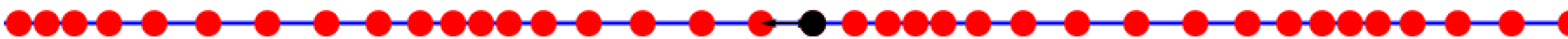
Profesor: M. Antonella Cid
Departamento de Física, Facultad de Ciencias
Universidad del Bío-Bío

Carreras: Ingeniería Civil Civil, Ingeniería Civil Mecánica, Ingeniería Civil Industrial

UNIVERSIDAD DEL BIO-BIO

Ondas de Sonido

- La onda mecánica longitudinal más conocida es la onda de sonido. Los elementos de medio vibran (respecto de su posición de equilibrio) en la misma dirección en la cual se propaga la onda

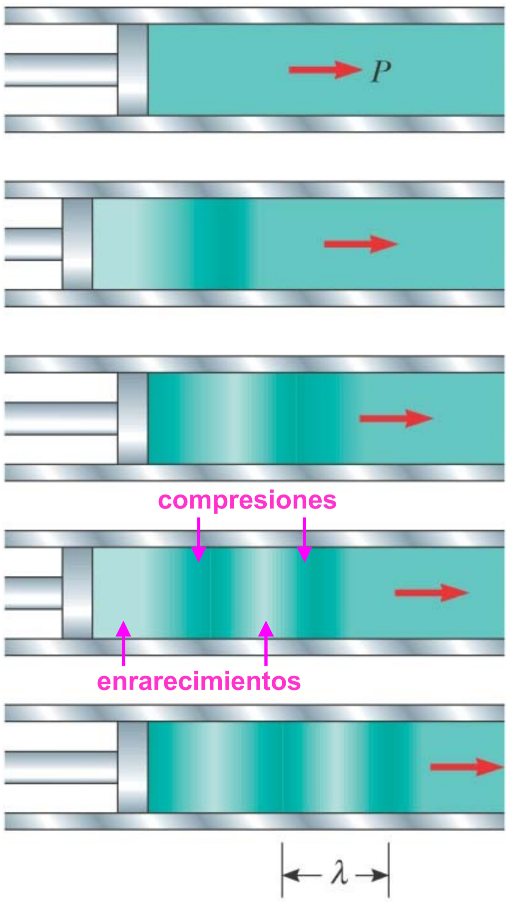


- Las ondas sonoras se clasifican de acuerdo a la frecuencia:
  - Ondas audibles: $20\ [Hz] < f < 20000\ [Hz]$
  - Ondas ultrasónicas o supersónicas: $f > 20000\ [Hz]$
  - Ondas infrasónicas: $f < 20\ [Hz]$

- Las ondas sonoras viajan en 3 dimensiones aunque podemos simplificar la situación haciendo que éstas viajen en un tubo.

Ondas de Sonido en un Tubo

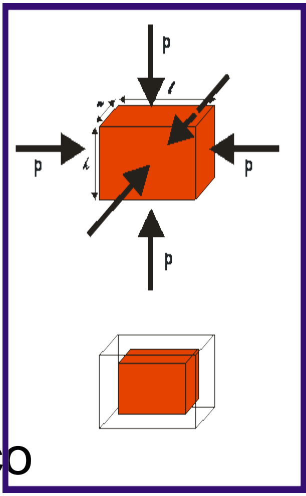
Consideremos un **tubo largo** (para poder ignorar la posible reflexión de ondas) lleno de un **medio compresible**.
En uno de los extremos del tubo hay un émbolo (o pistón) que se mueve alternadamente.
Cuando el **émbolo** se mueve hacia la derecha e izquierda **comprime y enrarece** el medio respectivamente. Compresiones y enrarecimientos pueden considerarse como aumentos y disminuciones de la ***densidad local*** en relación a su valor promedio, respectivamente. Equivalentemente, compresiones y enrarecimientos pueden verse como aumentos y disminuciones de la ***presión local***.



Velocidad del Sonido

En ondas longitudinales en fluidos la propiedad elástica que describe cómo responde el medio a cambios de presión con un cambio de volumen se denomina ***módulo volumétrico de elasticidad***

$$B = \frac{-\Delta p}{\Delta V} V$$



El signo menos mantiene B positivo dado que el volumen disminuye con un aumento de presión.

La velocidad del sonido es dada en términos del módulo volumétrico de elasticidad y la densidad de volumen como:

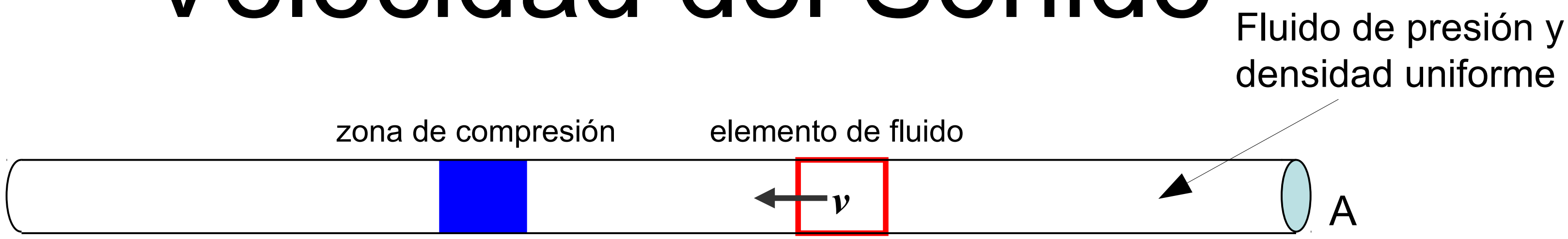
$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho_V}}$$

En sólidos el módulo volumétrico es reemplazado por el módulo de Young

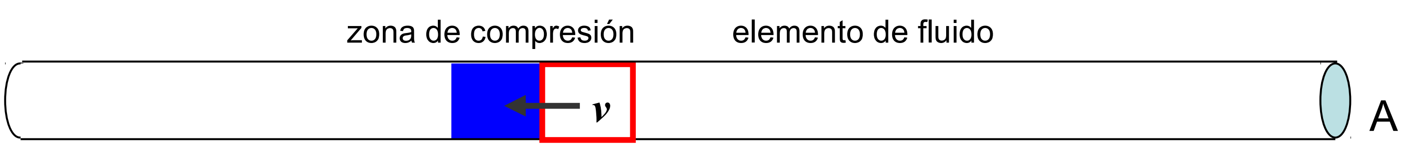
La velocidad del sonido también varía con la temperatura de acuerdo a la relación:

$$v = 331 \left[\frac{m}{s}\right] \sqrt{1 + \frac{T_C}{273\,°[C]}}$$

Velocidad del Sonido



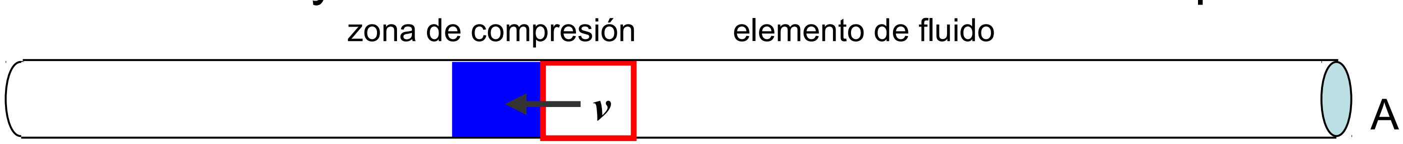
Una perturbación se propaga a la derecha en un tubo. En un sistema de referencia donde la perturbación permanece estacionaria, el fluido se mueve a la izquierda con rapidez v.



El borde izquierdo de un elemento de fluido entra a la zona de compresión en el tiempo t, mientras que el borde derecho lo hace en un tiempo posterior $t + \Delta t$, donde $v = \frac{\Delta x}{\Delta t}$

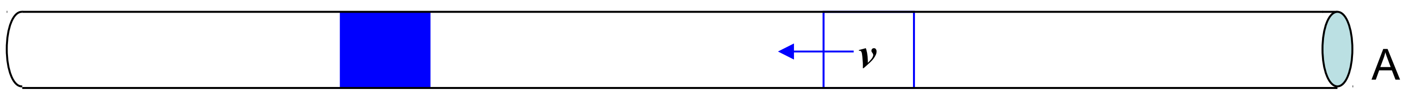
Velocidad del Sonido

El borde izquierdo del elemento de fluido siente una presión $p + \Delta p$ mientras que el borde derecho siente una presión p. Debido a esta diferencia de presión, el elemento de fluido se comprime y su velocidad disminuye mientras atraviesa la zona de compresión.



En el borde izquierdo del elemento de fluido la rapidez es $v+\Delta v$ con Δv negativo. Luego de salir de la zona de compresión el elemento se expande y aumenta su rapidez

Velocidad del Sonido



Aplicamos la II ley de Newton al elemento de fluido:

$F = -\Delta p\, A$ donde la dirección positiva es a la izquierda.
Considerando que esta es la única fuerza que actúa:

$$F = -\Delta p\, A = ma = (\rho_V A \Delta x)\frac{\Delta v}{\Delta t} = (\rho_V A[v \Delta t])\frac{\Delta v}{\Delta t} \Rightarrow \rho_V v^2 = \frac{-\Delta p}{\Delta v} v$$

Durante el intervalo de tiempo Δt el volumen del elemento de fluido cambia debido a un cambio en el ancho de este elemento:

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{A \Delta v \Delta t}{A v \Delta t} = \frac{\Delta v}{v} \Rightarrow v^2 = \frac{B}{\rho_V}$$

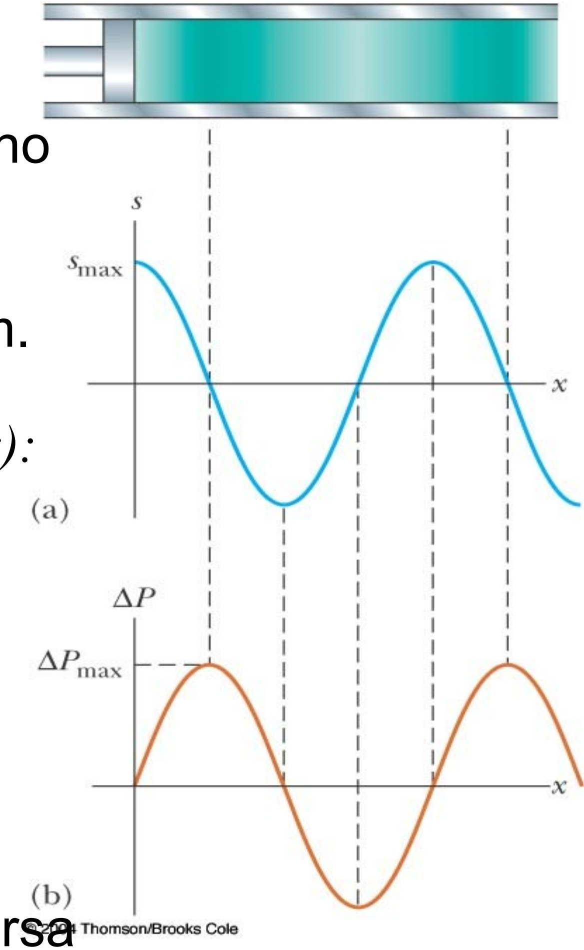
Descripción de una onda de sonido

Consideremos un tren continuo de compresiones y enrarecimientos que viajan a lo largo de un tubo lleno de fluido.

Podemos enfocar nuestra atención en el desplazam. de un elemento de medio $s(t,x)$ o en las variaciones periódicas de la presión en nuestra ubicación $\Delta p(t,x)$:

$$s(t,x) = s_m \cos(kx - \omega t)$$

$$\Delta p(t,x) = \Delta p_m \sin(kx - \omega t)$$



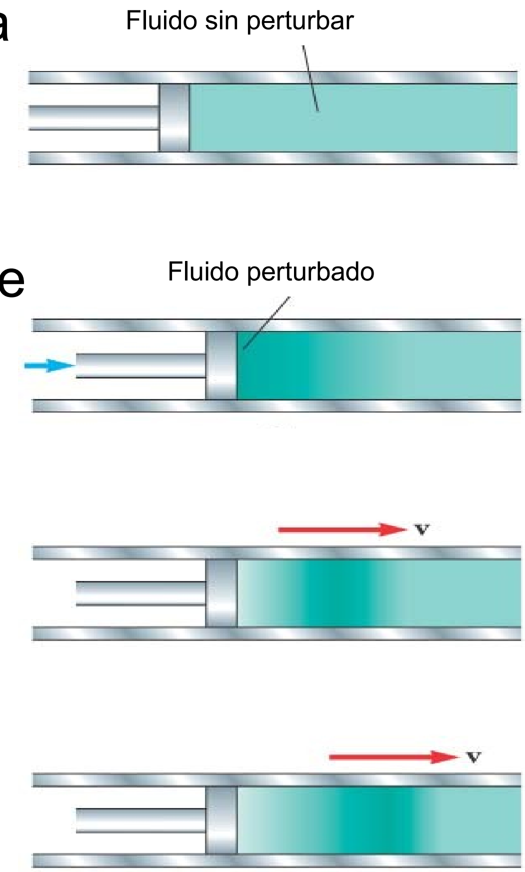
Ambas descripciones están desfasadas $\pi/2$ rad.

La variación de presión es máxima cuando el desplazamiento desde el equilibrio es cero y viceversa

UNIVERSIDAD DEL BIO-BIO

Descripción de una onda de sonido

Un elemento de medio experimentará cambios en la posición, y presión a medida que la onda de sonido se propaga en el fluido



Un cambio de volumen ΔV del elemento de medio se traduce en un cambio de presión Δp en esa zona:

$$\Delta V = A\,\Delta s = A\left[s(x+\Delta x) - s(x)\right]$$

$$\Delta p = -B\frac{\Delta V}{V} = -B\frac{A\,\Delta s}{A\,\Delta x} = -B\frac{\Delta s}{\Delta x}$$

Tomando el limite para Δx pequeño obtenemos:

$$\Delta p = -B\frac{\partial s}{\partial x}$$

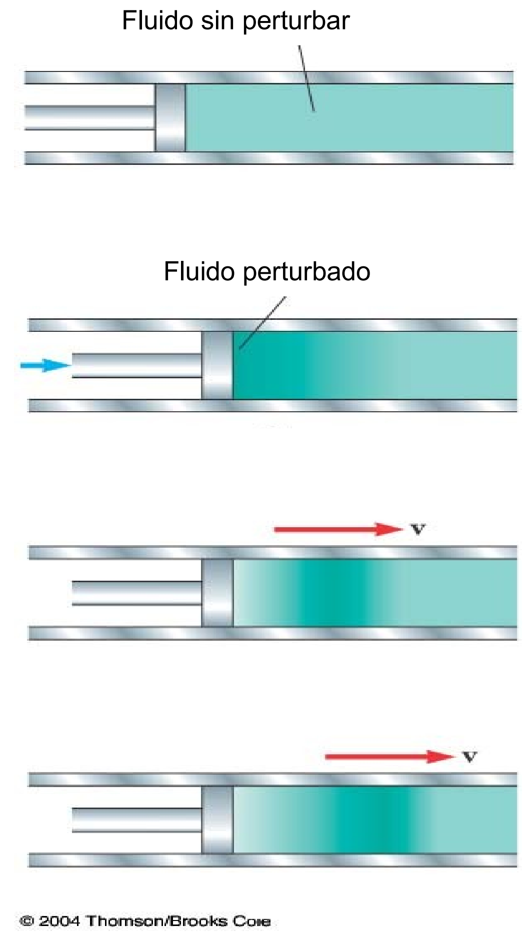
Descripción de una onda de sonido

Usando la función $s(t,x)$ descrita en la transparencia anterior, la relación entre B y la rapidez de propagación en el medio y $v = \omega / k$ obtenemos:

$$\Delta p = \rho_V v \omega s_m \sin(kx - \omega t)$$

Comparando con la expresión para $\Delta p(t,x)$ en la transparencia anterior encontramos la relación:

$$\Delta p_m = \rho_V v \omega s_m$$



Potencia instantánea

Al viajar una onda sonora (o una onda de presión), cada elemento de fluido ejerce una fuerza sobre el elemento que está delante de él, la magnitud de esta fuerza es: $F_{em} = A\Delta p = A\Delta p_m \sin(kx - \omega t)$

Por otra parte, el movimiento que experimenta un elemento de medio es dado por la función *s(t,x)*, luego la velocidad con la cual se mueve un elemento de medio es:

$$v_{em} = \frac{\partial s}{\partial t} = s_m \omega \sin(kx - \omega t)$$

La potencia instantánea para un elemento de medio es dada en términos del trabajo mecánico W como:

$$P = \frac{dW}{dt} = \frac{\vec{F} \cdot d\vec{r}}{dt} = \vec{F}_{em} \cdot \vec{v}_{em}$$

luego:

$$P = A\omega\Delta p_m s_m \sin^2(kx - \omega t) = A\rho_V v(\omega s_m)^2 \sin^2(kx - \omega t)$$

Potencia e Intensidad

Promediando la potencia para un ciclo de oscilación obtenemos:

$$\bar{P}=\frac{1}{T}\int_0^T P\,dt=\frac{1}{2}A\,\omega\,\Delta p_m s_m=\frac{1}{2}\frac{A}{\rho_V v}\Delta p_m^2=\frac{1}{2}A\rho v(\omega s_m)^2$$

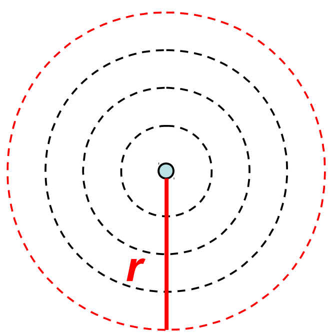
Al igual que en el caso de una onda en una cuerda (onda transversal), la potencia promedio depende del cuadrado de la amplitud, ya sea de la presión o del desplazamiento.

La ***intensidad*** de una onda o la potencia por unidad de área corresponde a la tasa a la cual la energía transportada por la onda pasa a través de un área A perpendicular a la dirección de propagación de la onda.

$$I=\bar{P}\,A=\frac{1}{2}\omega\,\Delta p_m s_m=\frac{1}{2}\frac{1}{\rho_V v}\Delta p_m^2=\frac{1}{2}\rho v(\omega s_m)^2$$

Intensidad de una fuente puntual

Una fuente puntual emite ondas de sonido igualmente en todas direcciones



Frentes de onda esféricos emitidos por una fuente puntual. Los frentes de onda son proyectados como circunferencias en el plano de esta hoja

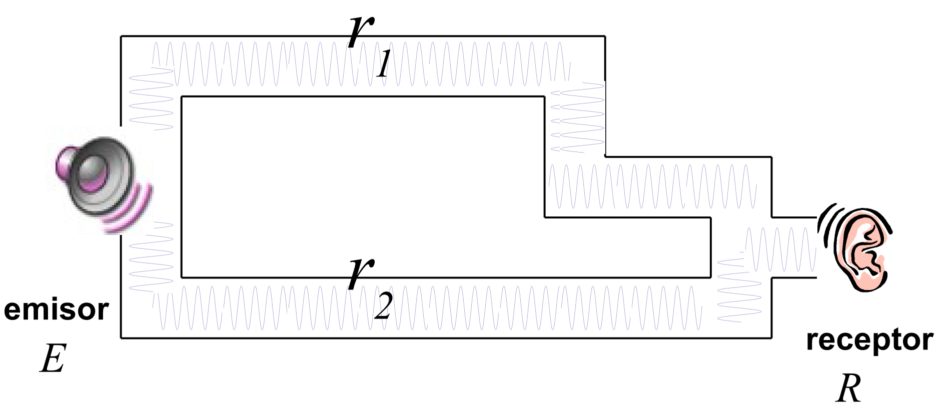
De la experiencia cotidiana sabemos que la intensidad de sonido decrece cuando nos alejamos de la fuente.

Dado que los frentes de onda son esferas, el área a una distancia r de la fuente corresponderá a $4\pi r^2$, luego la intensidad toma la forma:

$$I = \frac{\bar{P}}{A} = \frac{\bar{P}}{4\pi r^2}$$

La intensidad de la fuente decrece con el cuadrado de la distancia que separa el observador de una fuente puntual

Interferencia de ondas de sonido



Las ondas de sonido emitidas en E siguen dos caminos diferentes. Parte del sonido toma el camino de arriba r_1 y parte del sonido el camino de abajo r_2. Las ondas de sonido que llegan a R pueden venir de cualquiera de estos caminos

Debido a la superposición de las ondas de sonido en R se presenta **interferencia** entre estas ondas de sonido.

Si la diferencia de camino es un múltiplo entero de λ (longitud de onda) se presenta interferencia **constructiva**. Si la diferencia de camino es un múltiplo semi-entero de λ, se presenta interferencia **destructiva**.

Puede aparecer una diferencia de fase cuando dos ondas generadas por la misma fuente viajan por caminos diferentes de distinta longitud.

Interferencia de ondas de sonido

Interferencia Constructiva:

$$\Delta r = |r_1 - r_2| = n\lambda, \qquad n = 0, 1, 2, \ldots$$

Las ondas estarán en fase en el receptor. Se detecta un máximo en la intensidad de sonido

En términos de la constante de fase, se presenta interferencia constructiva cuando:

$$\phi = 2n\pi, \qquad n = 0, 1, 2, \ldots$$

Interferencia Destructiva:

$$\Delta r = |r_1 - r_2| = \left(n + \frac{1}{2}\right)\lambda, \qquad n = 0, 1, 2, \ldots$$

Las ondas estarán completamente fuera de fase en el receptor (π rad). Se detecta un mínimo en la intensidad de sonido.

En términos de la constante de fase, se presenta interferencia destructiva cuando:

$$\phi = (2n + 1)\pi, \qquad n = 0, 1, 2, \ldots$$

Ondas de sonido estacionarias

Es posible encontrar ondas de sonido estacionarias para determinadas frecuencias de vibración. La frecuencia de vibración depende de si tratamos con un tubo abierto o cerrado. Las ondas estacionarias se generan con una onda de sonido viajera incidente y la onda reflejada en el extremo del tubo en el cual se propaga la onda

En un ***tubo cerrado*** el extremo cerrado corresponde a un nodo de desplazamiento debido a que en el extremo cerrado la pared no permite el movimiento longitudinal de las moléculas de aire. La onda reflejada esta π rad fuera de fase con la onda incidente. Este punto corresponde a un anti-nodo de presión (puesto que la presión y el desplazamiento están π rad fuera de fase)

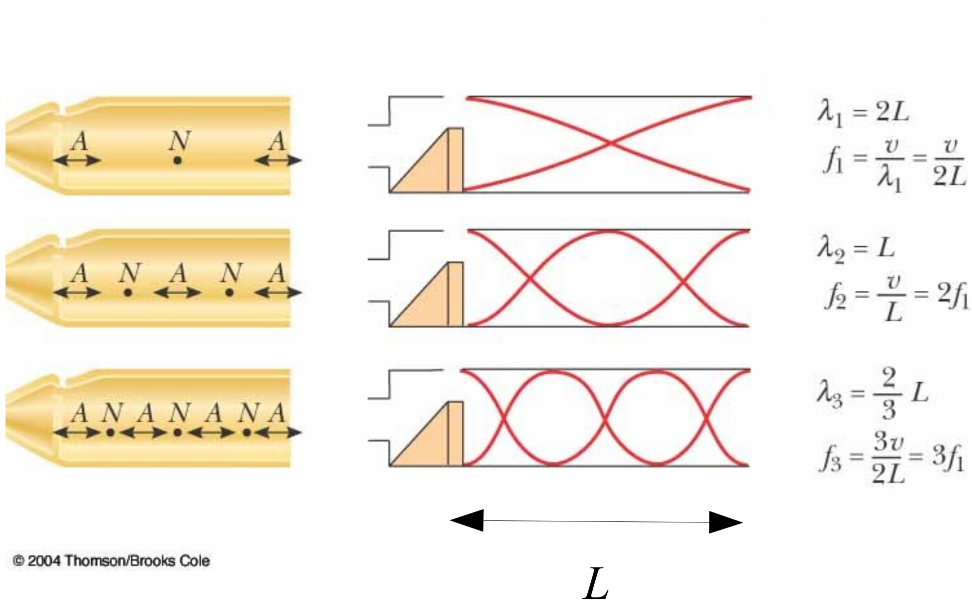
En un ***tubo abierto*** el extremo corresponde aproximadamente a un anti-nodo de desplazamiento y un nodo de presión, la presión en el extremo abierto corresponde a la presión atmosférica (cuando el tubo está en contacto con el aire). En el extremo de un tubo abierto hay un cambio en la forma del medio, allí el medio es libre de moverse en una región más grande.

Tubo abierto

en ambos extremos

En este caso la condición es que se presenten anti-nodos de desplazamiento o nodos de presión en los extremos

$$\lambda_n = \frac{2L}{n} \qquad f_n = \frac{v}{\lambda_n} = \frac{vn}{2L} \qquad n = 1, 2, 3, \ldots$$



primer armónico

segundo armónico

tercer armónico

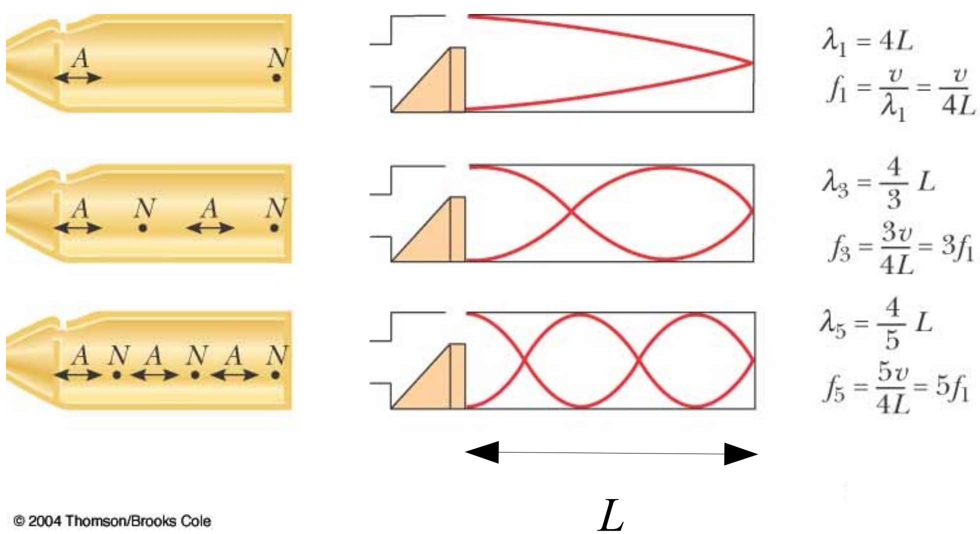
UNIVERSIDAD DEL BIO-BIO

Tubo cerrado

en un extremo

En este caso la condición es que se presente un nodo de desplazamiento (o anti-nodo de presión) en el extremo cerrado y un anti-nodo de desplazamiento (o nodo de presión) en el extremo abierto

$$\lambda_n = \frac{4L}{n} \qquad f_n = \frac{v}{\lambda_n} = \frac{vn}{4L} \qquad n = 1, 3, 5, \ldots$$



primer armónico

tercer armónico

quinto armónico

Intensidad de Sonido en decibeles

- Los sonidos más débiles que el oído humano puede detectar a una frecuencia de 1000 [Hz] corresponden a una intensidad de 10^{-12}[W/m²] denominado ***umbral de audición***. Los sonidos más fuertes que el oído puede tolerar a esta frecuencia corresponden a una intensidad de 1[W/m²] conocido como el ***umbral del dolor***
- Como el oído humano puede detectar un amplio rango de intensidades, se escoge una escala logarítmica para indicar la intensidad de sonido

$$\beta = 10 \log_{10}\left(\frac{I}{I_0}\right)[dB]$$

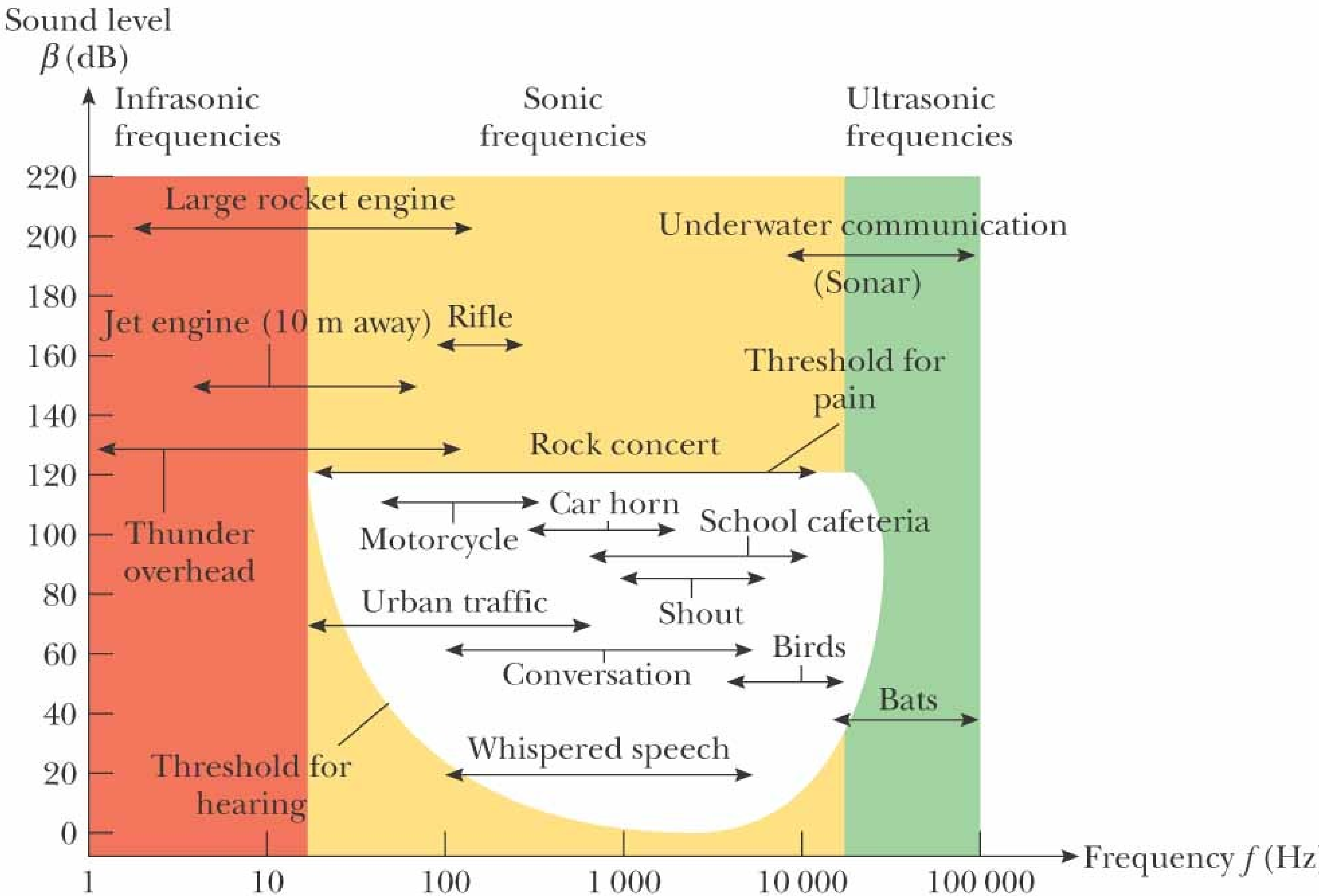
$$I_0 = 10^{-12}[W/m^2]$$

El umbral del dolor corresponde a… [dB]
El umbral de audición corresponde a… [dB]

Ejemplos

- Dos máquinas idénticas están ubicadas a la misma distancia de un trabajador. La intensidad del sonido entregado por cada máquina en la ubicación del trabajador es de $2\times10^{-7}[W/m^2]$. Encuentre la intensidad del sonido en dB en la ubicación del trabajador cuando opera una máquina y cuando operan las dos.

- Como regla, duplicar el volumen (que depende en general de la intensidad y la frecuencia) corresponde a un incremento de 10 dB de intensidad. Si en el ejemplo, el volumen se duplica, ¿cuántas máquinas estarían operando?


Sound level
β (dB)
Infrasonic frequencies
Sonic frequencies
Ultrasonic frequencies
220
200
180
160
140
120
100
80
60
40
20
0
Large rocket engine
Underwater communication
(Sonar)
Jet engine (10 m away)
Rifle
Threshold for pain
Rock concert
Car horn
Motorcycle
School cafeteria
Thunder overhead
Urban traffic
Shout
Birds
Conversation
Bats
Whispered speech
Threshold for hearing
1
10
100
1 000
10 000
100 000
Frequency f (Hz)