

# Física II

## Ondas mecánicas y sonido

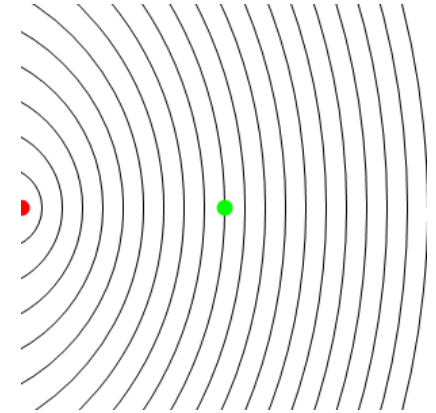
### Ondas sonoras

Ondas de presión, percepción del sonido. Rapidez de las ondas sonoras.

Intensidad del sonido. La escala de decibeles.



**Sonido** es una onda longitudinal en un medio



Infrasonido



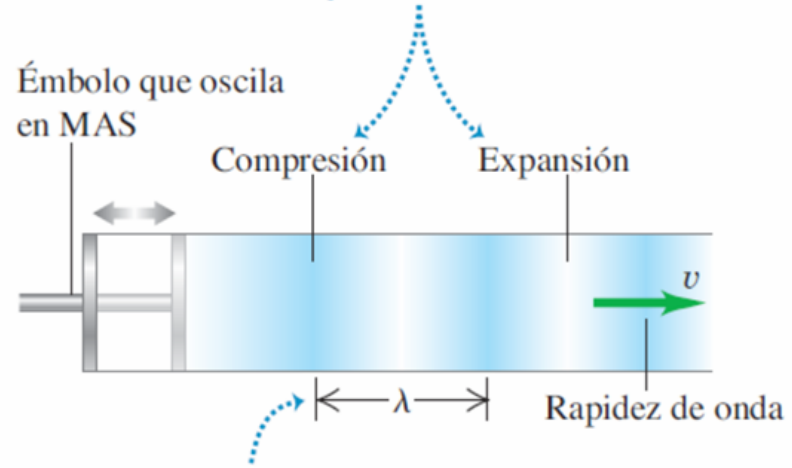
Gama audible 20 a 20,000 Hz



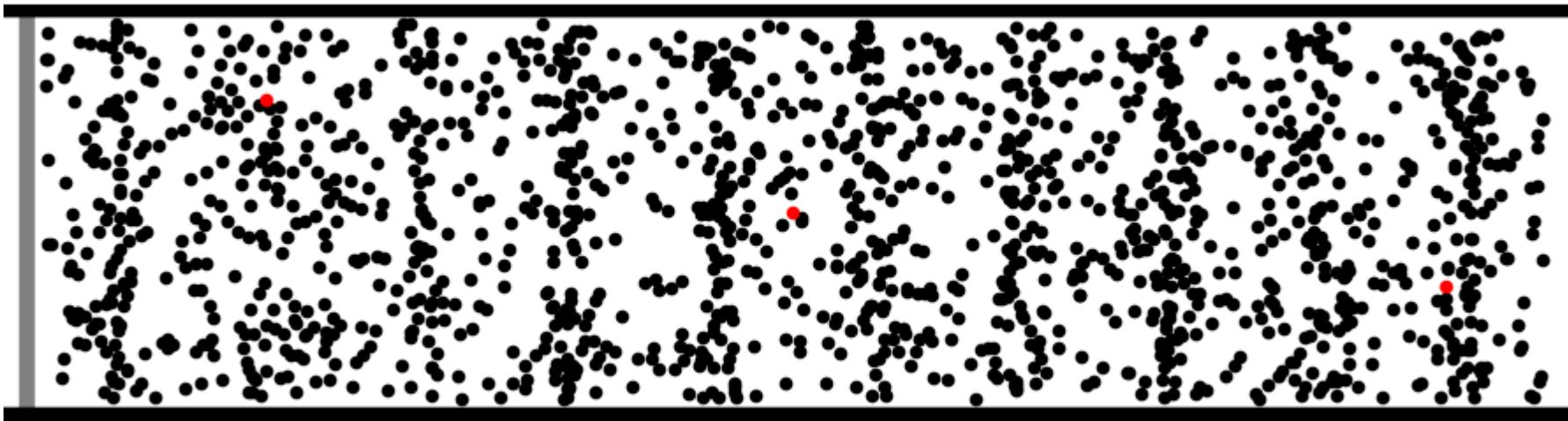
Ultrasonido

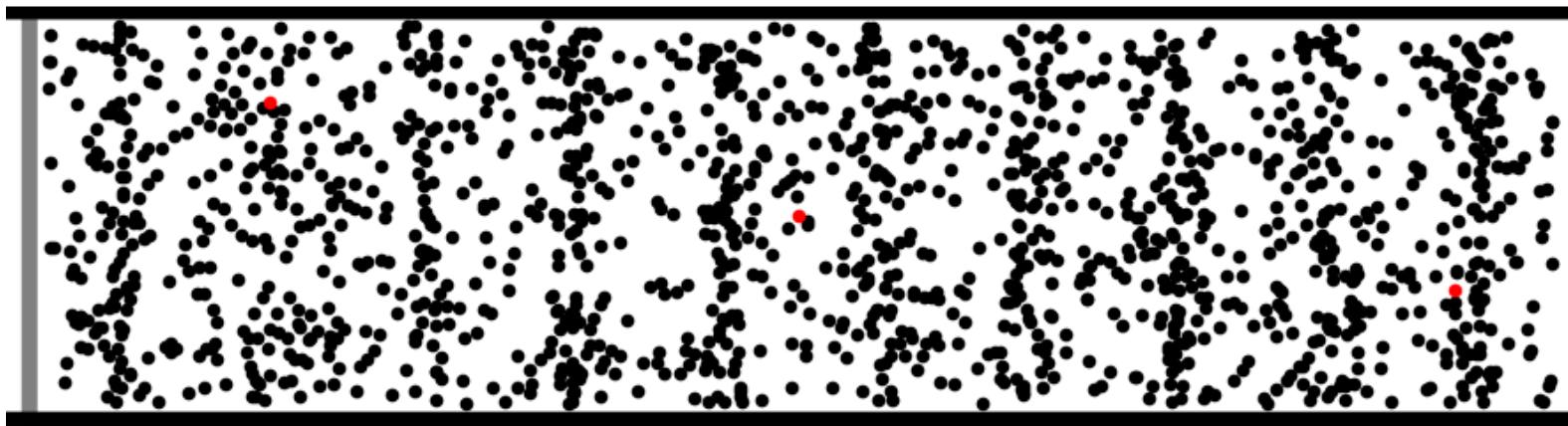


El movimiento hacia delante del émbolo crea una compresión (una zona de alta densidad); el movimiento hacia atrás crea una expansión (una zona de baja densidad).



La longitud de onda  $\lambda$  es la distancia entre los puntos correspondientes de ciclos sucesivos.

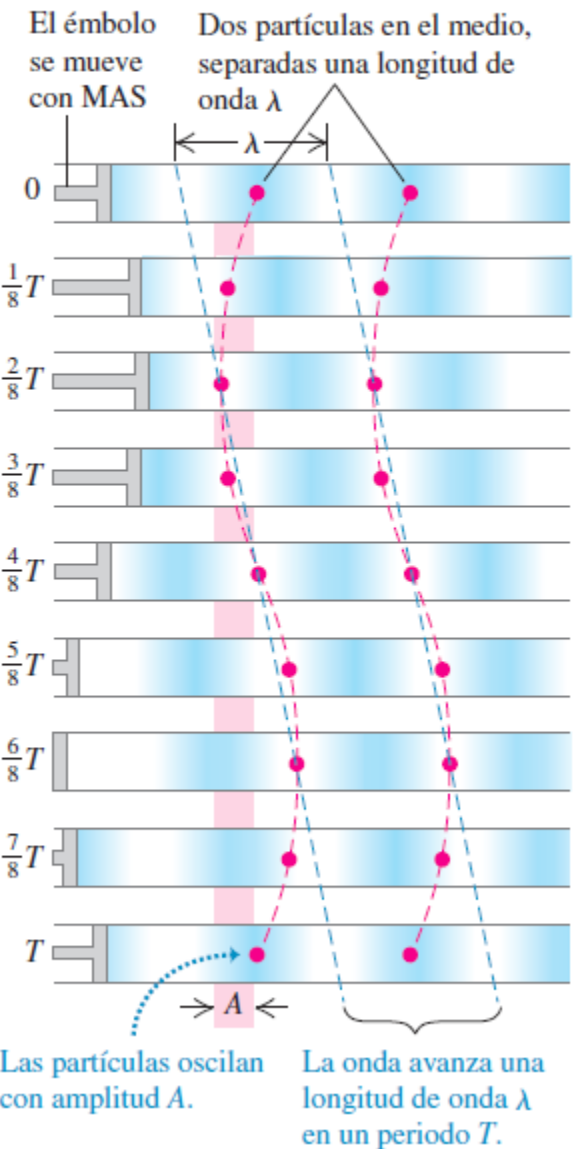




©2011. Dan Russell

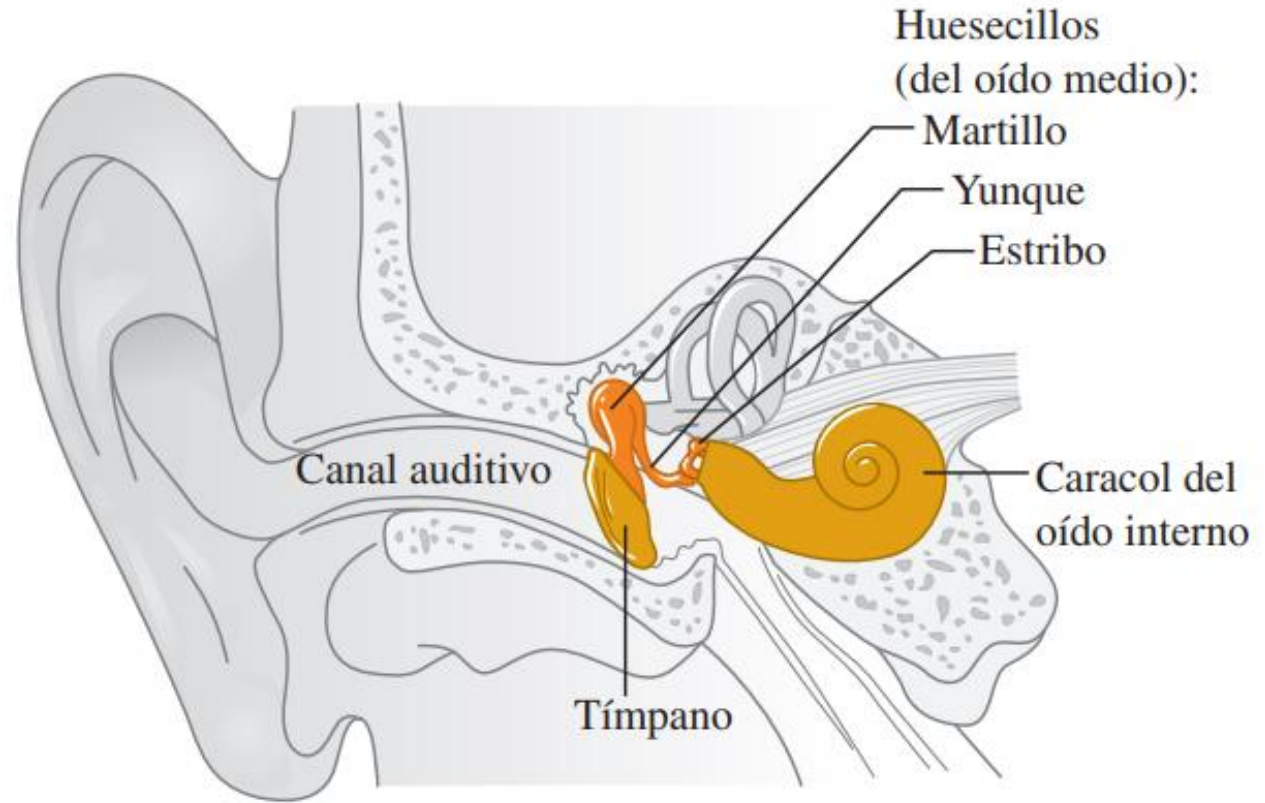
$$y(x, t) = A \cos(kx - \omega t)$$

Las ondas longitudinales se muestran a intervalos de  $\frac{1}{8}T$  para un periodo  $T$ .



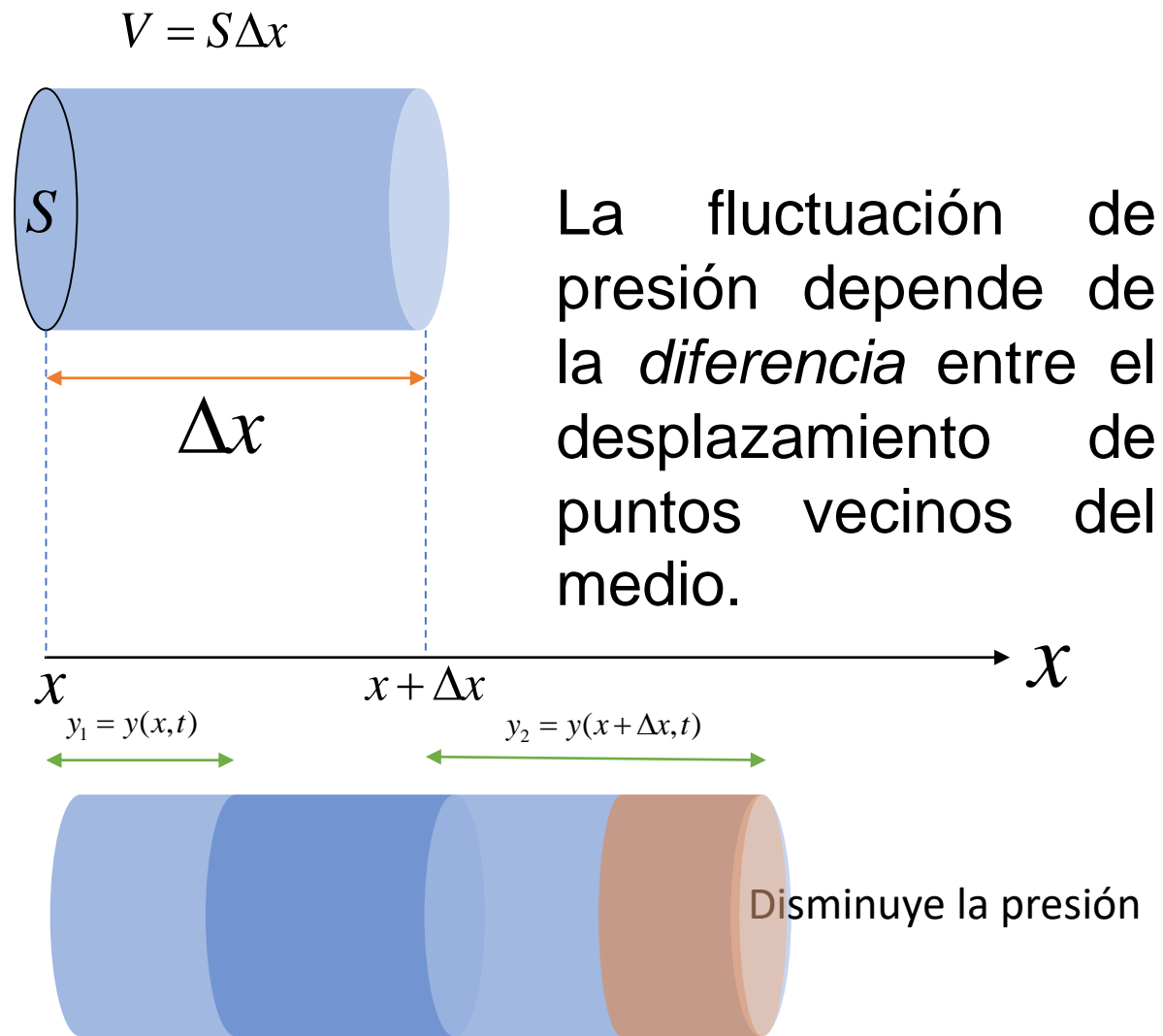
# Ondas sonoras como fluctuaciones de presión

$$y(x, t) = A \cos(kx - \omega t)$$



$$p(x, t)$$

**Variación de presión instantánea:** es la cantidad en que la presión difiere de la presión atmosférica normal.



$$B = \frac{\text{Esfuerzo volumétrico}}{\text{Deformación volumétrica}} = -\frac{\Delta p}{\Delta V/V_0} \quad (\text{módulo volumétrico})$$

$$\Delta V = S(y_2 - y_1) = S[y(x + \Delta x, t) - y(x, t)]$$

$$\begin{aligned} \frac{dV}{V} &= \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{S[y(x + \Delta x, t) - y(x, t)]}{S\Delta x} \\ &= \frac{\partial y(x, t)}{\partial x} \end{aligned}$$

Módulo volumétrico B [ecuación (11.13)]

$$B = -\frac{p(x, t)}{\left(\frac{dV}{V}\right)}$$

$$p(x, t) = -B \frac{\partial y(x, t)}{\partial x}$$

Aumento de volumen  
Disminución de presión

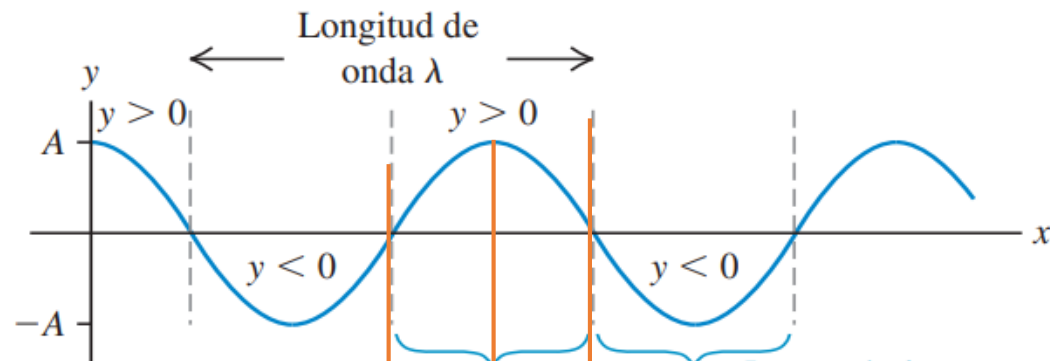
$$y(x,t) = A \cos(kx - \omega t)$$

$$p(x,t) = -B \frac{\partial y(x,t)}{\partial x}$$

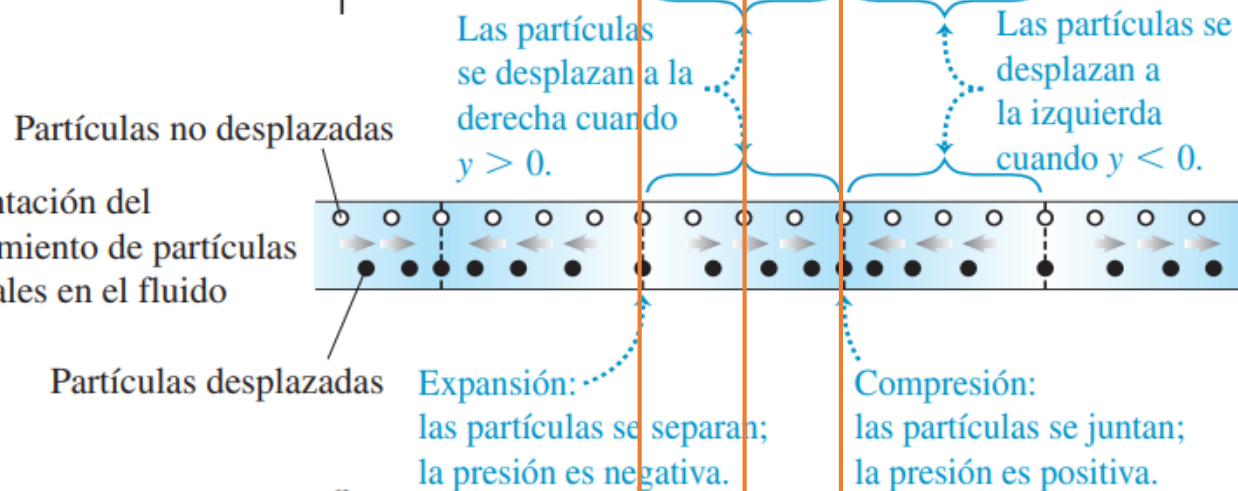
$$p(x,t) = BkA \sin(kx - \omega t)$$

$$p_{\text{máx}} = BkA \quad (\text{onda sonora sinusoidal})$$

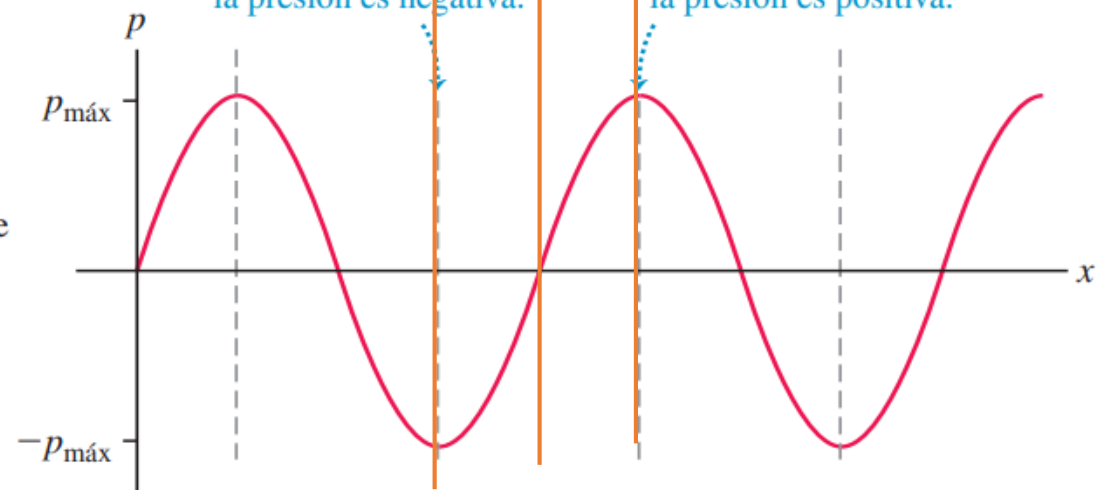
a) Gráfica de desplazamiento y contra posición  $x$  en  $t = 0$



b) Representación del desplazamiento de partículas individuales en el fluido a  $t = 0$



c) Gráfica de variación de la presión  $p$  contra la posición  $x$  en  $t = 0$





# Pregunta 1

Se produce una onda sonora sinusoidal en el aire con un generador de señales electrónico. Luego, se aumenta la frecuencia de la onda de 100 a 400 Hz manteniendo constante la amplitud de presión.

¿Qué efecto tiene esto sobre la amplitud de desplazamiento de la onda sonora?

- i. Se cuadruplica
- ii. Se duplica
- iii. Permanece sin cambio
- iv. Se reduce a la mitad
- v. Se reduce a la cuarta parte.

$$p_{\text{máx}} = BkA \quad (\text{onda sonora sinusoidal})$$

$$f_0 = 100 \text{ Hz} \quad f = 400 \text{ Hz} \rightarrow f = 4f_0$$

$$A = \frac{p_{\text{max}}}{Bk} = \frac{p_{\text{max}}v}{B(2\pi f)} = \frac{\text{Constante}}{f}$$

$$A_0 = \frac{C}{f_0}$$

$$A = \frac{C}{f} = \frac{C}{4f_0}$$

$$\omega = vk \rightarrow \frac{1}{k} = \frac{v}{\omega} = \frac{v}{2\pi f}$$

$$\rightarrow A = \frac{A_0}{4}$$



# Percepción de las ondas sonoras

A una **frecuencia dada**, cuanto **mayor sea la amplitud de presión** de una onda sonora sinusoidal, mayor será el **volumen** percibido

frecuencia  
1000 Hz       $\longrightarrow$       Mínimo  $P_{\max}$   
 $3 \times 10^{-5}$  Pa

200 o 15000 Hz       $\longrightarrow$        $3 \times 10^{-4}$  Pa

La **frecuencia** de una onda sonora es el factor principal que determina el **tono**

Alta frecuencia	$\longrightarrow$	Agudos
Baja frecuencia	$\longrightarrow$	Graves
Igual frecuencia	$\longrightarrow$	Graves y fuerte

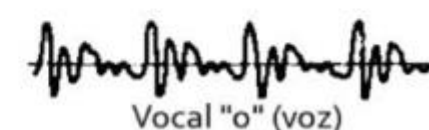
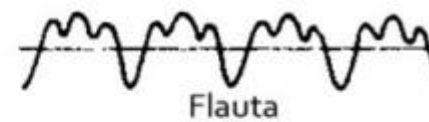
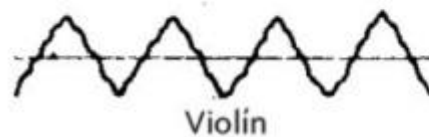
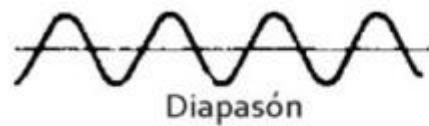
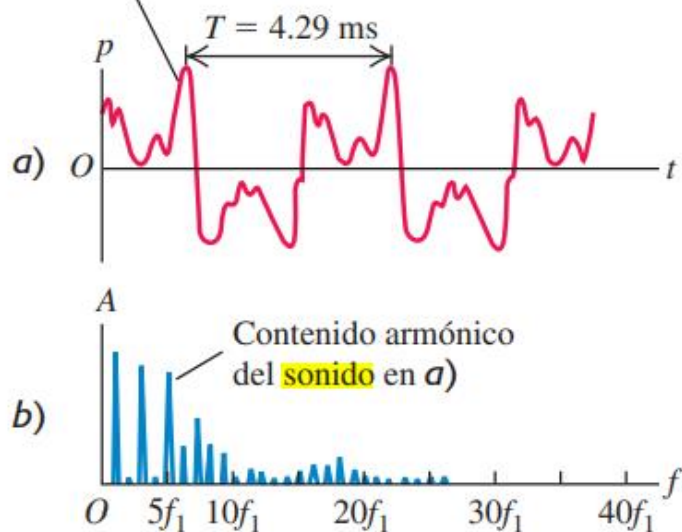
Mayor amplitud



# Timbre: Contenido armónico

Fluctuación de presión contra tiempo para un clarinete con una frecuencia fundamental

$$f_1 = 233 \text{ Hz}$$



Ruido blanco

# Rapidez de las ondas sonoras

$$v = \sqrt{\frac{\text{Fuerza de restitución que vuelve el sistema al equilibrio}}{\text{Inercia que se opone al retorno al equilibrio}}}$$

$$v = \sqrt{\frac{F}{\mu}}$$

Módulo volumétrico B

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

rapidez de una onda longitudinal en un fluido

Gas ideal

$$v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}$$

Y es el módulo de Young,

$$v = \sqrt{\frac{Y}{\rho}}$$

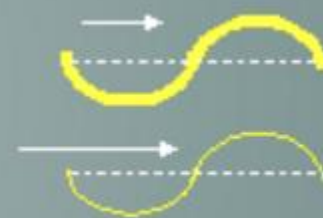
rapidez de una onda longitudinal en una varilla sólida

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}} \quad v = \sqrt{\frac{Y}{\rho}}$$

**Tabla 16.1 Rapidez del sonido en varios materiales**

Material	Rapidez del sonido (m/s)
<i>Gases</i>	
Aire (20°C)	344
Helio (20°C)	999
Hidrógeno (20°C)	1330
<i>Líquidos</i>	
Helio líquido (4 K)	211
Mercurio (20°C)	1451
Agua (0°C)	1402
Agua (20°C)	1482
Agua (100°C)	1543
<i>Sólidos</i>	
Aluminio	6420
Plomo	1960
Acero	5941

Un medio **más denso** tiene mayor inercia que resulta en **menor** rapidez de onda.



Un medio que es **más elástico** se recupera más rápidamente y resulta en **mayor** rapidez.



**Ejemplo 1:** Encuentre la rapidez del sonido en una barra de acero.

$$\rho = 7800 \text{ kg/m}^3$$

$$Y = 2.07 \times 10^{11} \text{ Pa}$$

$$v_s = ?$$

$$v = \sqrt{\frac{Y}{\rho}} = \sqrt{\frac{2.07 \times 10^{11} \text{ Pa}}{7800 \text{ kg/m}^3}}$$

$$v = 5150 \text{ m/s}$$

$$v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}$$

**Ejemplo 2:** ¿Cuál es la rapidez del sonido en el aire cuando la temperatura es 20°C?

Dado:  $\gamma = 1.4$ ;  $R = 8.314 \text{ J/mol K}$ ;  $M = 29 \text{ g/mol}$

$$T = 20^\circ + 273^\circ = 293 \text{ K} \quad M = 29 \times 10^{-3} \text{ kg/mol}$$

$$v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} = \sqrt{\frac{(1.4)(8.314 \text{ J/mol K})(293 \text{ K})}{29 \times 10^{-3} \text{ kg/mol}}}$$

$$v = 343 \text{ m/s}$$

## Dependencia de la temperatura

Nota:  $v$  depende de  $T$  absoluta:

Ahora  $v$  a 273 K es 331 m/s.  $\gamma$ ,  $R$ ,  $M$  no cambian, de modo que una fórmula simple puede ser:

$$v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}$$

$$v = 331 \text{ m/s} \sqrt{\frac{T}{273 \text{ K}}}$$

**Ejemplo 3:** ¿Cuál es la velocidad del sonido en el aire en un día cuando la temperatura es de 27°C?



**Solución 1:**  $v = 331 \text{ m/s} \sqrt{\frac{T}{273 \text{ K}}}$

$$T = 27^\circ + 273^\circ = 300 \text{ K}; \quad v = 331 \text{ m/s} \sqrt{\frac{300 \text{ K}}{273 \text{ K}}}$$

$$v = 347 \text{ m/s}$$



# Pregunta 2

El mercurio es 13.6 veces más denso que el agua. De acuerdo con la tabla 16.1, a 20°C, ¿cuál de estos líquidos tiene el mayor módulo volumétrico?

- i. El mercurio.
- ii. El agua
- iii. Ambos tienen el mismo
- iv. No se dispone de suficiente información para determinarlo

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}} \quad \rightarrow \quad B = v^2 \rho$$
$$B_{Hg} = v_{Hg}^2 \rho_{Hg} \quad B_a = v_a^2 \rho_a$$
$$\frac{B_{Hg}}{B_a} = \frac{v_{Hg}^2 \rho_{Hg}}{v_a^2 \rho_a} = \left( \frac{1451}{1482} \right)^2 (13.6) = 13$$

TABLA 16.1 Rapidez del sonido en varios materiales	
Material	Rapidez del sonido (m/s)
<i>Gases</i>	
Aire (20°C)	344
Helio (20°C)	999
Hidrógeno (20°C)	1330
<i>Líquidos</i>	
Helio líquido (4 K)	211
Mercurio (20°C)	1451
Agua (0°C)	1402
Agua (20°C)	1482
Agua (100°C)	1543
<i>Sólidos</i>	
Aluminio	6420
Plomo	1960
Acero	5941

# Intensidad del sonido

$$v_y(x, t) = \frac{\partial y(x, t)}{\partial t} = \omega A \sin(kx - \omega t)$$

$$p(x, t)v_y(x, t) = [BkA \sin(kx - \omega t)] [\omega A \sin(kx - \omega t)]$$

$$= B\omega k A^2 \sin^2(kx - \omega t)$$

$$I = \frac{1}{2} B\omega k A^2$$

La intensidad es el valor promedio en el tiempo de la potencia por unidad de área

$$\omega = vk \text{ y } v = \sqrt{B/\rho}$$

La potencia sonora total media emitida por una persona que habla con voz normal es del orden de  $10^{-5}$  W, en tanto que un grito fuerte corresponde a  $3 \times 10^{-2}$  W aproximadamente

Intensidad de una onda sonora sinusoidal en un fluido

$$I = \frac{1}{2} \sqrt{\rho B} \omega^2 A^2$$

Frecuencia angular =  $2\pi f$   
 Amplitud de desplazamiento  
 Densidad del fluido  
 Modulo volumétrico del fluido

Intensidad de una onda sonora sinusoidal en un fluido

$$I = \frac{p_{\text{máx}}^2}{2\rho v} = \frac{p_{\text{máx}}^2}{2\sqrt{\rho B}}$$

Amplitud de presión  
 Rapidez de la onda  
 Densidad del fluido  
 Módulo volumétrico del fluido



# Intensidad del sonido: escala de Decibeleles

$$\beta = (10 \text{ dB}) \log \frac{I}{I_0}$$

Nivel de intensidad de sonido  $\beta$  (dB)   
 Intensidad de la onda sonora  $I$    
 Intensidad de referencia  $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$    
 Logaritmo de base 10

**TABLA 16.2**

Niveles de intensidad de sonido de diversas fuentes  
(valores representativos)

Fuente o descripción del sonido	Nivel de intensidad del sonido, $\beta$ (dB)	Intensidad, $I$ ( $\text{W/m}^2$ )
Avión militar a reacción a 30 m de distancia	140	$10^2$
Umbral de dolor	120	1
Remachador	95	$3.2 \times 10^{-3}$
Tren elevado	90	$10^{-3}$
Tránsito urbano intenso	70	$10^{-5}$
Conversación ordinaria	65	$3.2 \times 10^{-6}$
Automóvil silencioso	50	$10^{-7}$
Radio con volumen bajo en el hogar	40	$10^{-8}$
Murmullo normal	20	$10^{-10}$
Susurro de hojas	10	$10^{-11}$
Umbral del oído a 1000 Hz	0	$10^{-12}$

¿A qué nivel de intensidad del sonido corresponde una intensidad de  $1 \text{ W/m}^2$  ?

Una intensidad de  $1 \text{ W/m}^2$  corresponde a 120 dB

# Pregunta 3

Se duplica la intensidad de una onda sonora en el aire, sin alterar su frecuencia (la presión, la densidad y la temperatura del aire también permanecen constantes).

¿Qué efecto tiene esto sobre la amplitud de desplazamiento, la amplitud de presión, el módulo volumétrico, la rapidez del sonido y el nivel de intensidad del sonido?

Intensidad de una onda sonora sinusoidal en un fluido

$$I = \frac{1}{2} \sqrt{\rho B} \omega^2 A^2$$

Frecuencia angular =  $2\pi f$   
Amplitud de desplazamiento  
Densidad del fluido  
Módulo volumétrico del fluido

$$p_{\text{máx}} = BkA \quad (\text{onda sonora sinusoidal})$$

$$A' = \sqrt{2}A \quad p' = \sqrt{2}p$$

$$I = cte A^2 \quad A = cte \sqrt{I}$$

$$A' = cte \sqrt{2I} \quad A' = \sqrt{2}A$$

Nivel de intensidad de sonido

Intensidad de la onda sonora

$$\beta = (10 \text{ dB}) \log \frac{I}{I_0}$$

Logaritmo de base 10

Intensidad de referencia =  $10^{-12} \text{ W/m}^2$

$$\beta' = (10 \text{ dB}) \log \frac{I'}{I_0}$$

$$\beta' - \beta = (10 \text{ dB}) \log \frac{I'/I_0}{I/I_0} = (10 \text{ dB}) \log \frac{I'}{I} = (10 \text{ dB}) \log 2 = 3 \text{ dB}$$

# Ejemplo

Una exposición de 10 min a un sonido de 120 dB suele desplazar temporalmente el umbral del oído a 1000 Hz, de 0 dB a 28 dB. Diez años de exposición al sonido de 92 dB causan un desplazamiento *permanente* a 28 dB. ¿Qué intensidades corresponden a 28 y 92 dB?

GRACIAS