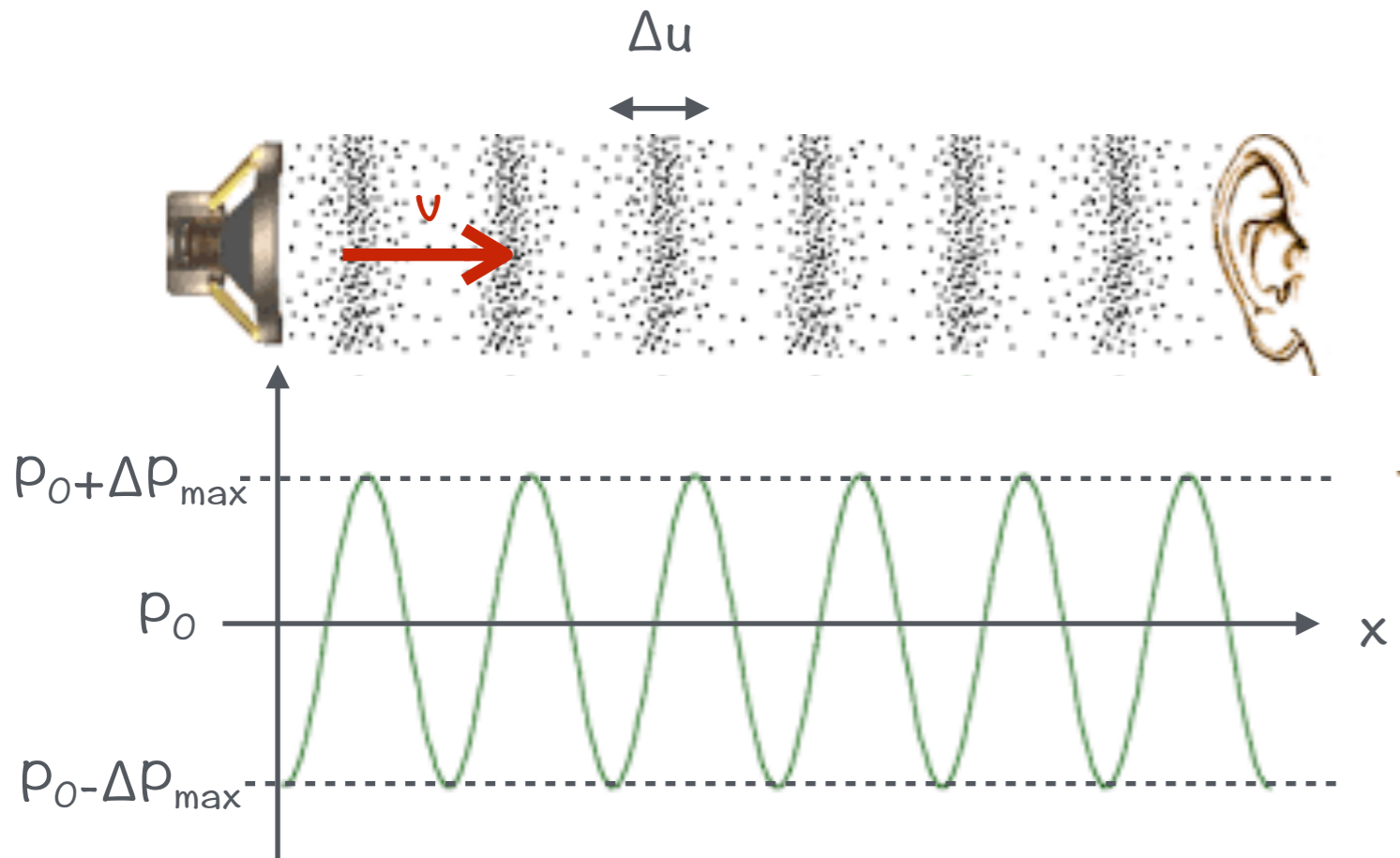


ONDAS SONORAS

Som - onda longitudinal



Regiões de compressão e rarefação do ar

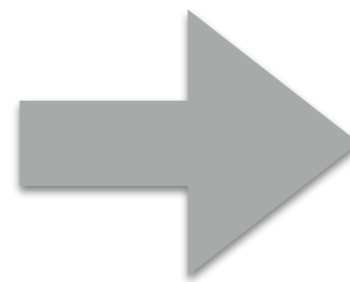
Onda de pressão

ou

Onda de deslocamento

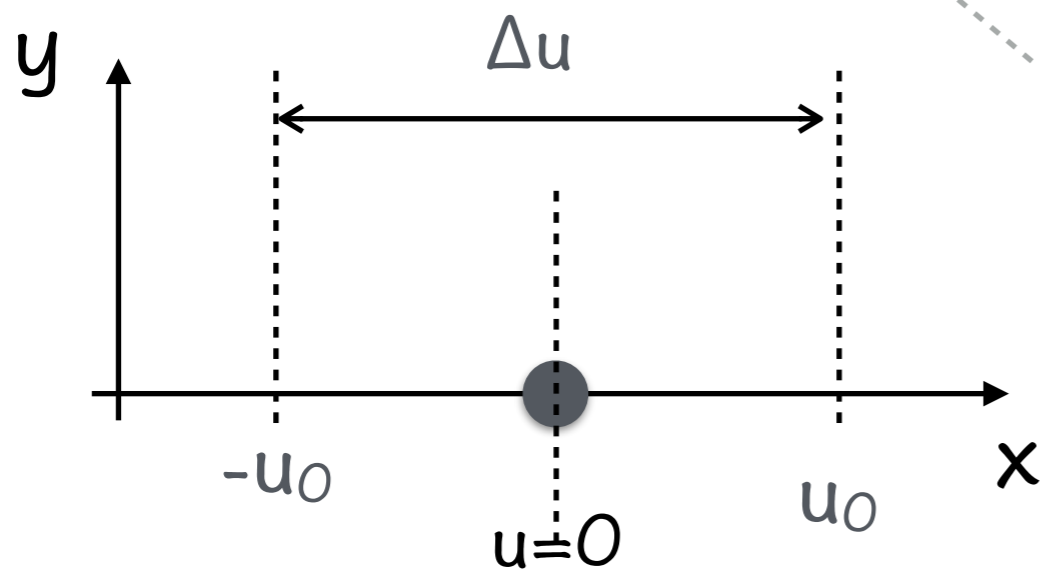
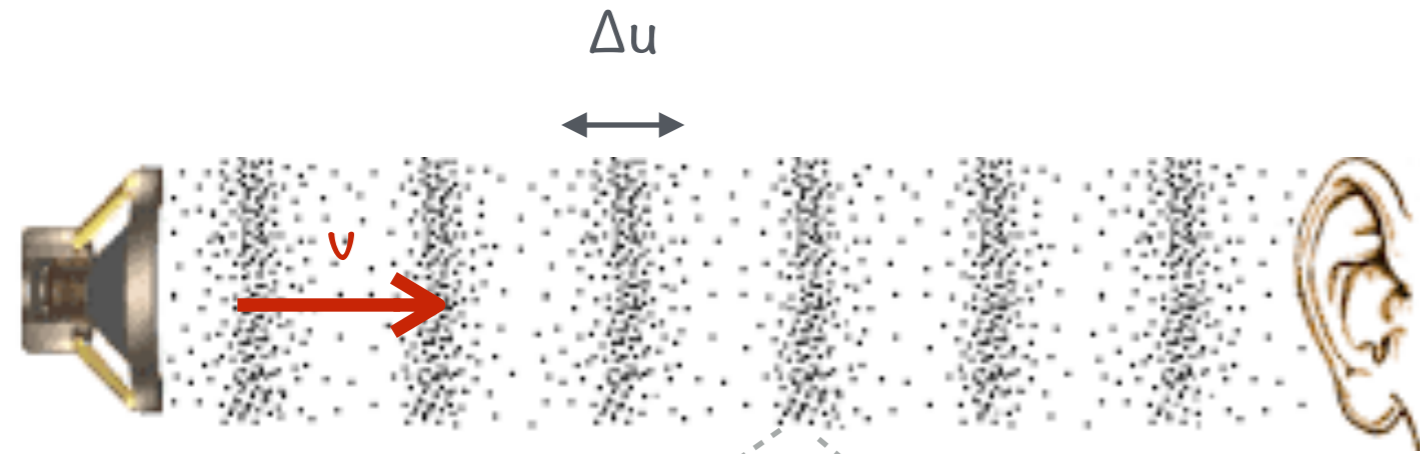
ou

Onda de densidade



Relação entre elas?

Onda periódica de deslocamento



posição de equilíbrio

$$u(x, t) = u_0 \text{sen}(kx - \omega t + \varphi)$$

Amplitude do deslocamento

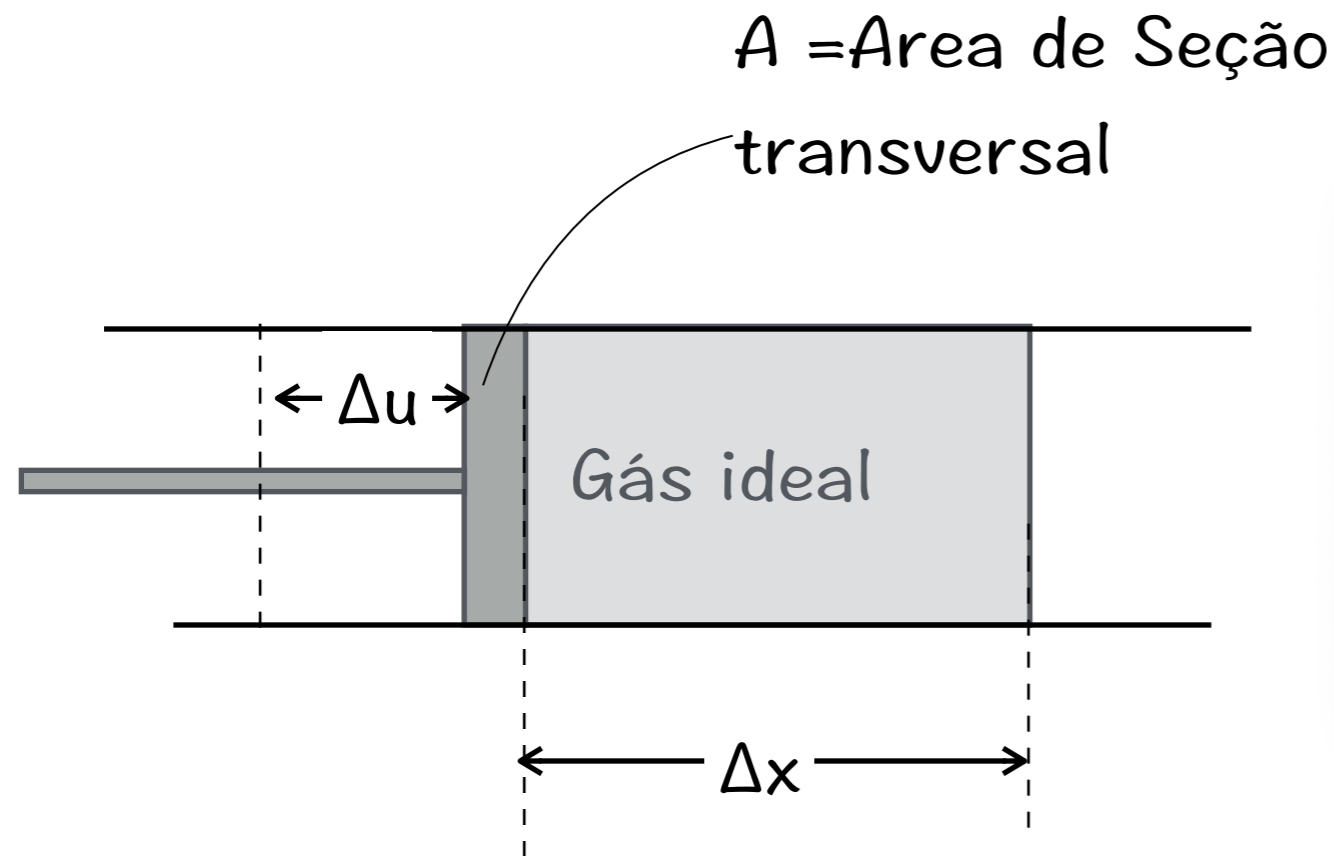
$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

$$kv = \omega \quad \omega = 2\pi f$$

$$v = \lambda f$$

Onda periódica de Pressão

Modelo: Pistão com embolo que oscila produzindo deslocamento do ar e pequenas variações de pressão.



$$\text{Volume } V = A\Delta x$$

$$\text{Variação do volume: } \Delta V = A\Delta u$$

Δu = pequeno deslocamento em relação à posição de equilíbrio

Gás ideal

$$P = \frac{nRT}{V} \quad \frac{1}{\kappa} = B = -V \frac{\Delta P}{\Delta V}$$

κ = Módulo de compressibilidade

B = Módulo de elasticidade

$$\text{ar: } B = 1,42 \times 10^5 \text{ Pa}$$

Gás ideal $\rightarrow B = -V \frac{\Delta P}{\Delta V} \rightarrow \Delta P = -B \frac{\Delta V}{V}$

$$\Delta V = A \Delta u$$

$$V = A \Delta x$$

$$\rightarrow \Delta P = -B \frac{A \Delta u}{A \Delta x}$$

limite pequenos deslocamentos

$$\Delta P = -B \frac{\partial u}{\partial x}$$

$$u(x, t) = u_0 \text{sen}(kx - \omega t + \varphi)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} = -u_0 k \cos(kx - \omega t + \varphi)$$

$$\rightarrow \Delta P = \underbrace{B k u_0 k}_{\Delta P_{max}} \cos(kx - \omega t + \varphi)$$

$$\Delta P = \Delta P_{max} \cos(kx - \omega t + \varphi)$$

\rightarrow Onda periódica de pressão

As ondas de pressão e deslocamento estão defasadas de $\pi/2$

Onda periódica de densidade

A variação de pressão produz uma variação de densidade:

$$\rho = \frac{M}{V} \quad \rightarrow \quad \frac{d\rho}{dV} = -\frac{M}{V^2} = -\frac{M}{V} \frac{1}{V}$$

$$\frac{d\rho}{dV} = -\frac{\rho}{V} \quad \rightarrow \quad \frac{d\rho}{\rho} = -\frac{dV}{V}$$

Lembrando que: $\Delta P = -B \frac{\Delta V}{V} \quad \rightarrow \quad \Delta P = B \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad \rightarrow \quad \Delta \rho = \frac{\rho}{B} \Delta P$

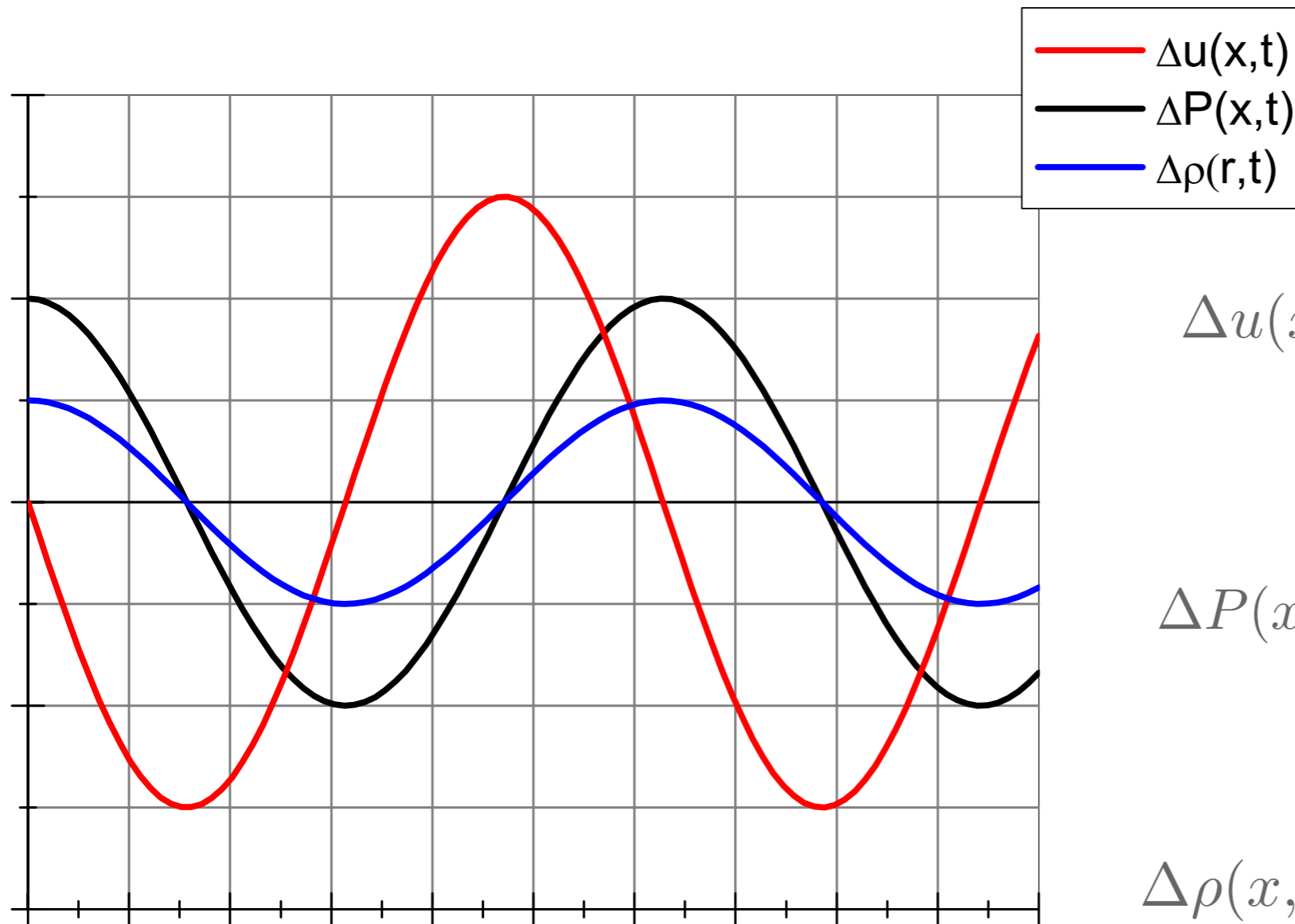
$$\Delta P = B k u_0 \cos(kx - \omega t + \varphi) \quad \rightarrow \quad \Delta \rho = \underbrace{\rho k u_0}_{\Delta \rho_{max}} \cos(kx - \omega t + \varphi)$$

$$\Delta \rho = \Delta \rho_{max} \cos(kx - \omega t + \varphi)$$

Onda periódica de densidade, em fase com a onda de pressão

A onda de pressão e de densidade estão em fase

A onda de pressão e de deslocamento estão defasadas de $\pi/2$



$$\Delta u(x, t) = u_0 \text{sen}(kx - \omega t + \varphi)$$

$$\Delta P(x, t) = Bku_0 \text{cos}(kx - \omega t + \varphi)$$

$$\Delta \rho(x, t) = \rho ku_0 \text{cos}(kx - \omega t + \varphi)$$

Equação diferencial da onda sonora

A equações da ondas periódica de deslocamento (densidade, pressão, também) devem satisfazer a equação diferencial da onda.

$$\frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$$

$$u = u_0 \text{sen}(kx - \omega t + \varphi)$$

A velocidade de propagação da onda sonora depende das propriedades elásticas do meio:

corda

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

ar

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

sólido

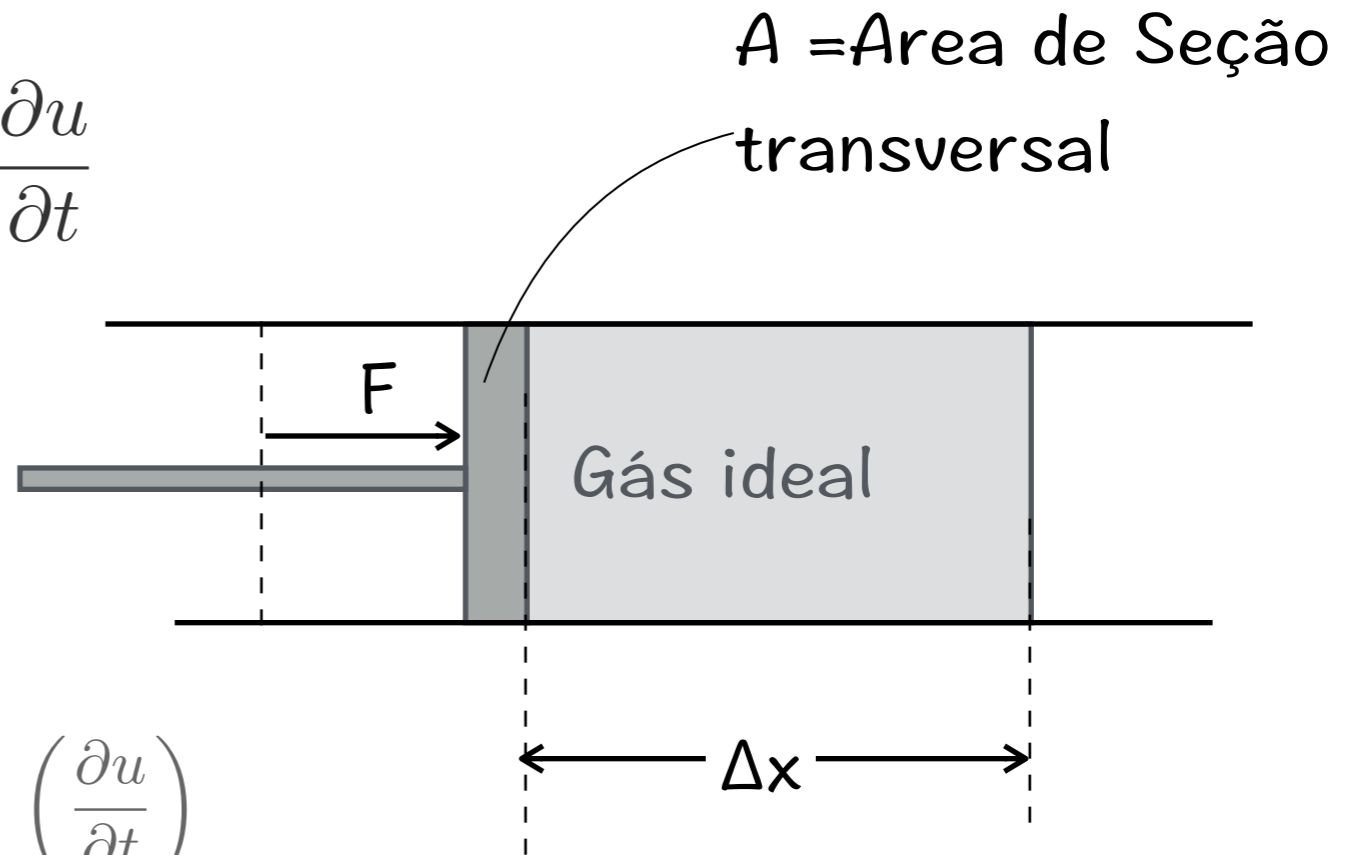
$$v = \sqrt{\frac{Y}{\rho}}$$

Y =módulo de Young

Intensidade da onda Sonora

Potencia instantânea : $Pot = F \frac{\partial u}{\partial t}$

Pressão = Força/unidade de área



$$F = (\Delta P)A$$

$$\Delta P = -B \frac{\partial u}{\partial x} \quad \text{Pot} = -BA \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial u}{\partial t} \right)$$

Intensidade da Onda= I

I = Potencia/área.



$$I = -B \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial u}{\partial t} \right)$$

unidades: $J/(s.m^2)$ ou W/m^2

$$I = -B \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial u}{\partial t} \right)$$

$$u = u_0 \text{sen}(kx - \omega t + \varphi)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = u_0 \omega \cos(kx - \omega t + \varphi)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} = -u_0 k \cos(kx - \omega t + \varphi)$$



$$I = Bu_0^2 k \omega (\cos^2(kx - \omega t + \varphi))$$

Valor médio da energia/(unidade de tempo e unidade de área)

$$\bar{I} = Bu_0^2 k \omega \left(\overline{\cos^2(kx - \omega t + \varphi)} \right) \quad \rightarrow \quad \bar{I} = \frac{Bu_0^2 k \omega}{2}$$

$$kv = \omega$$



$$\bar{I} = \frac{Bu_0^2 k \omega^2}{2v}$$

ou

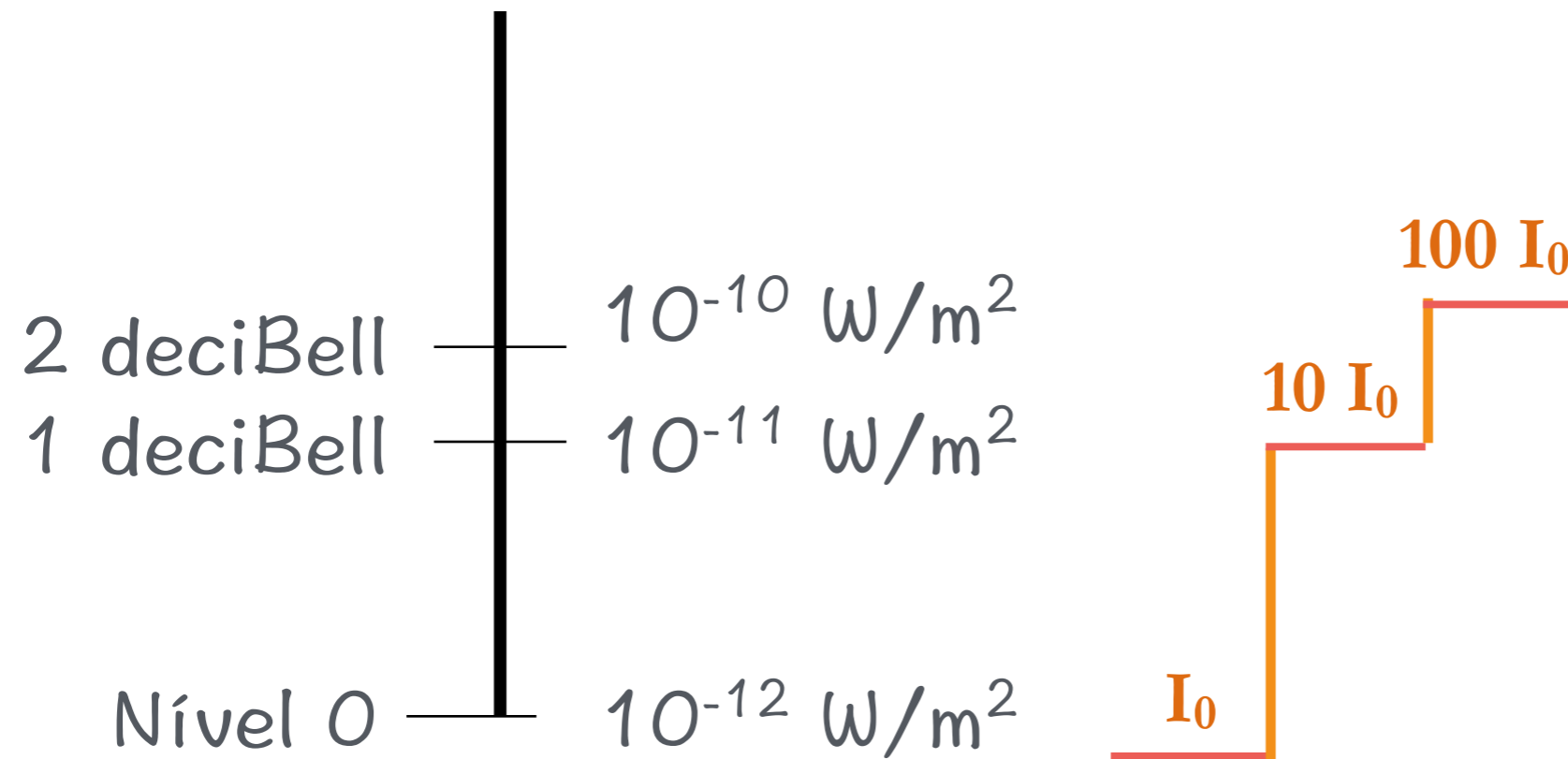
$$v^2 = \frac{B}{\rho}$$

$$\bar{I} = \frac{v \rho u_0^2 k \omega^2}{2}$$

Proporcional à $\left\{ \begin{array}{l} [\text{amplitude}]^2 \\ [\text{frequência}]^2 \end{array} \right.$

Escala Bell / deciBell

Escala logarítmica



$$\beta = 10 \log \left(\frac{I}{I_0} \right) \rightarrow \text{Nível do som em deciBell}$$

$$I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$$

I = Intensidade do Som em W/m^2

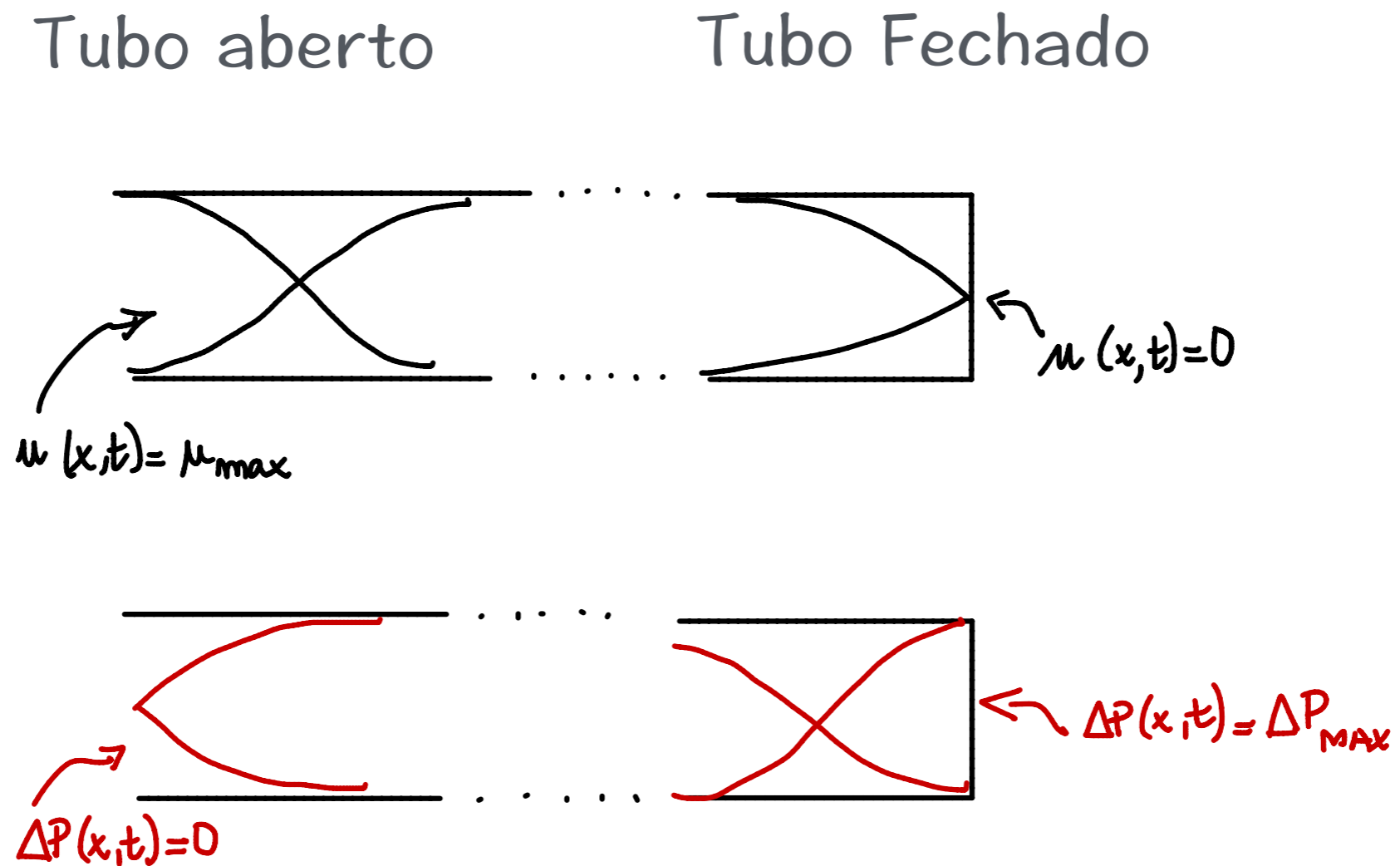
Fonte sonora	Intensidade do Som (W/m^2)	Nível do Som (dB)
Avião a jato (30 m de distancia)	10^2	140
Sirene de Ambulância	1	120
Música em Amplificador	10^{-1}	115
Trânsito em rua movimentada	10^{-5}	70
Conversação em casa	10^{-6}	60

Ondas estacionárias em tubos

Condições de Contorno:

Extremidades fechadas, o deslocamento é nulo

Extremidades abertas - a variação de pressão é nula (igual a pressão externa)



Tubo com uma extremidade fechada

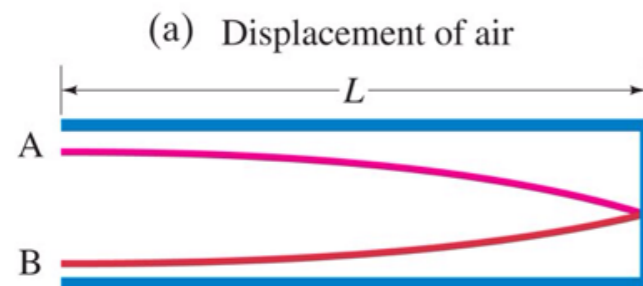
Somente alguns modos de oscilação são compatíveis com as condições de contorno:

$$\lambda_n = \frac{4L}{n} \rightarrow f_n = \frac{v}{\lambda_n} = \frac{nv}{4L}$$

$n=1,3,5\dots$

Apenas harmônicos ímpares!

TUBE CLOSED AT ONE END



First harmonic = fundamental
 $L = \frac{1}{4} \lambda_1$
 $f_1 = \frac{v}{4L}$

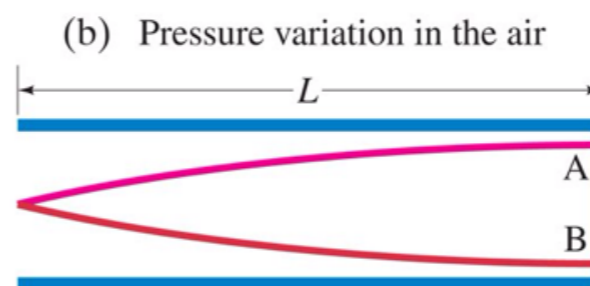


Third harmonic
 $L = \frac{3}{4} \lambda_3$
 $f_3 = \frac{3v}{4L} = 3f_1$



Fifth harmonic
 $L = \frac{5}{4} \lambda_5$
 $f_5 = \frac{5v}{4L} = 5f_1$

Overtones



$$f_1 = \frac{v}{4L}$$



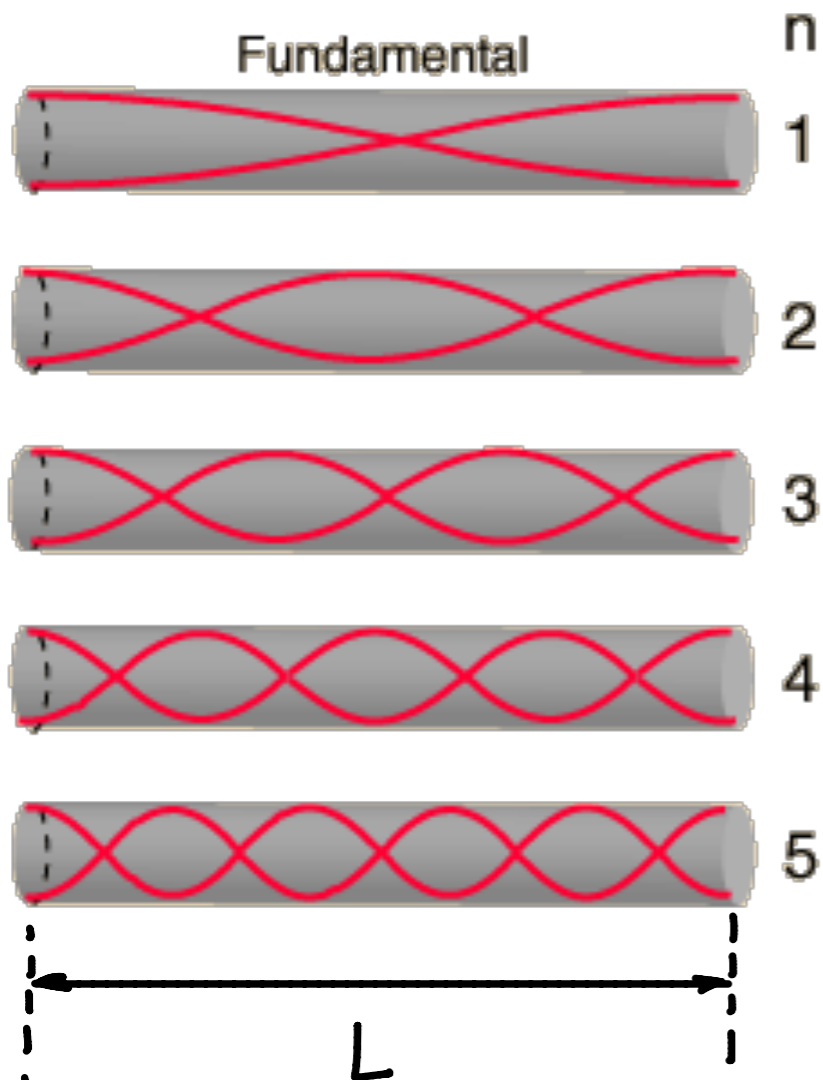
$$f_3 = \frac{3v}{4L} = 3f_1$$



$$f_5 = \frac{5v}{4L} = 5f_1$$

Tubo de comprimento L

Tubo com extremidades abertas



$$\lambda_1 = 2L \quad f_1 = \frac{v}{2L}$$

$$\lambda_2 = L \quad f_2 = \frac{v}{L}$$

$$\lambda_3 = \frac{2L}{3} \quad f_3 = \frac{3v}{2L}$$

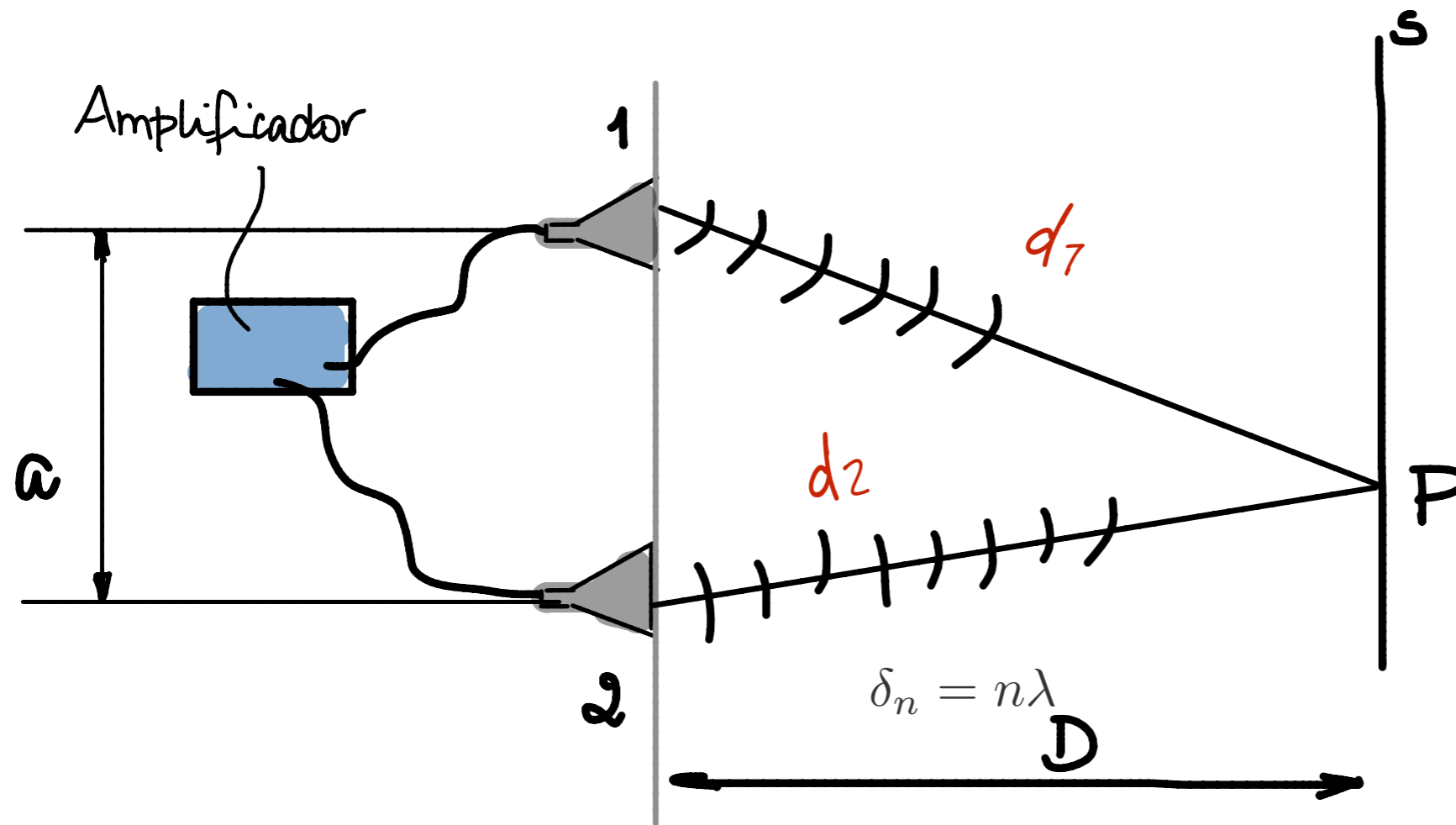
$$\lambda_4 = \frac{L}{2} \quad f_4 = \frac{2v}{L}$$

$$\lambda_5 = \frac{2L}{5} \quad f_5 = \frac{5v}{2L}$$

$$\lambda_n = \frac{2L}{n}$$

$$f_n = \frac{nv}{2L}$$

Interferência de Ondas Sonoras



Diferença de caminho entre as ondas no ponto P: $\delta = |d_2 - d_1|$

$$\delta = |d_2 - d_1|$$

$\delta_n = n\lambda$ interferência construtiva (crista com crista)

$\delta_n = (2n + 1)\frac{\lambda}{2}$ interferência destrutiva (crista com vale)

