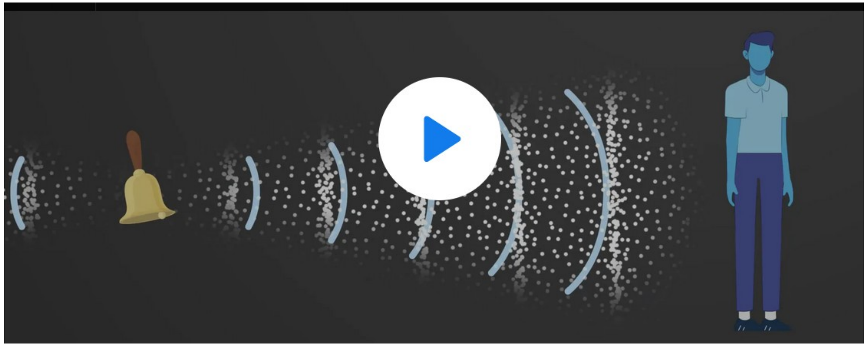
Física IV

Ondas sonoras



Natureza das ondas sonoras

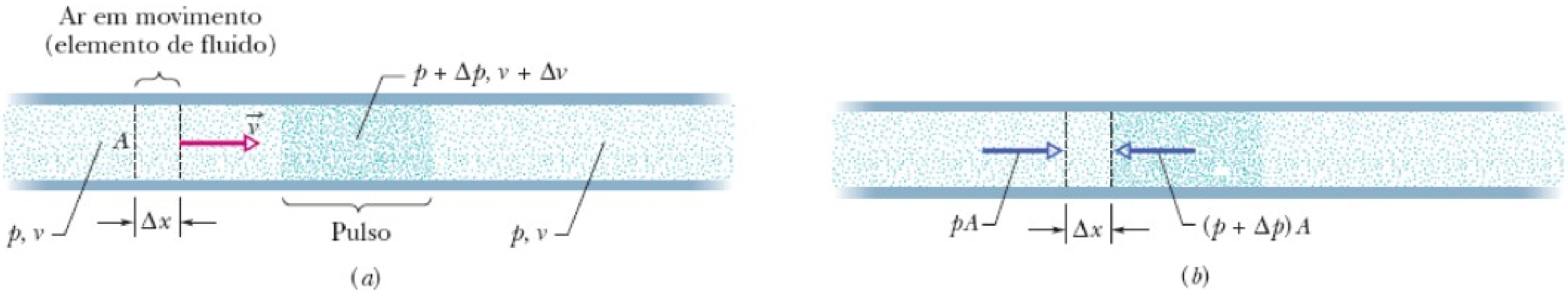
O som é uma onda mecânica longitudinal que se propaga através de compressões e rarefações de um meio elástico (gás, líquido ou sólido).

- Mecânica: Diferente da luz, o som exige um meio material para se propagar; não existe som no vácuo.

- Longitudinal: O deslocamento das moléculas do meio ocorre na mesma direção em que a onda se propaga.

- Frentes de onda: Representam superfícies de fase constante (como cristas). Os raios são retas perpendiculares às frentes de onda que indicam a direção da propagação.

Velocidade de som



Um pulso de compressão se propaga da direita para a esquerda em um tubo longo, cheio de ar. O referencial da figura foi escolhido de tal forma que o pulso permanece em repouso e o ar se move da esquerda para a direita. (a) Um elemento de ar de largura Δx se move em direção ao pulso com velocidade v. (b) A borda dianteira do elemento penetra no pulso. São mostradas as forças (associadas à pressão do ar) que agem sobre as bordas dianteira e traseira.

Velocidade de som

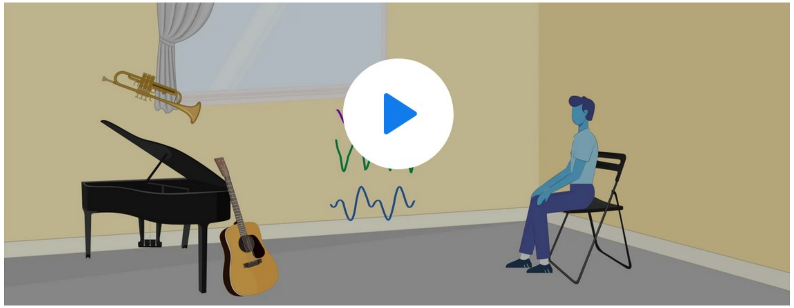
A velocidade do som *v* depende das propriedades de elasticidade e de inércia do meio. De forma geral, para fluidos:

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

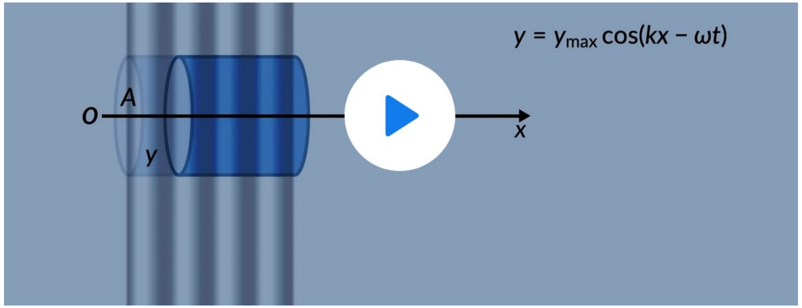
Onde:

- *B* (Módulo de Elasticidade Volumétrico): Mede a resistência do meio à compressão.
- ρ (Densidade): Representa a inércia do meio.

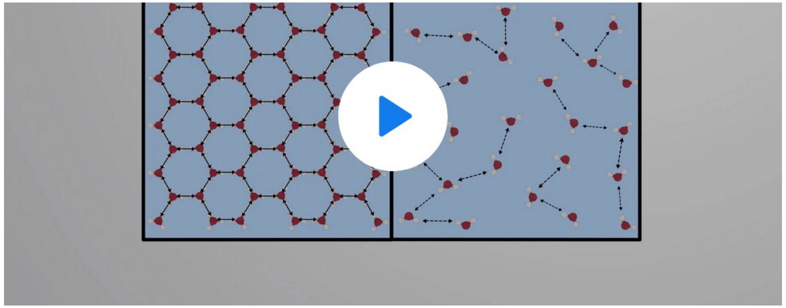
Velocidade do som em gases



Ondas sonoras como ondas de pressão



Velocidade do som em sólidos e líquidos



Deslocamento do ar

Uma coluna horizontal de ar.

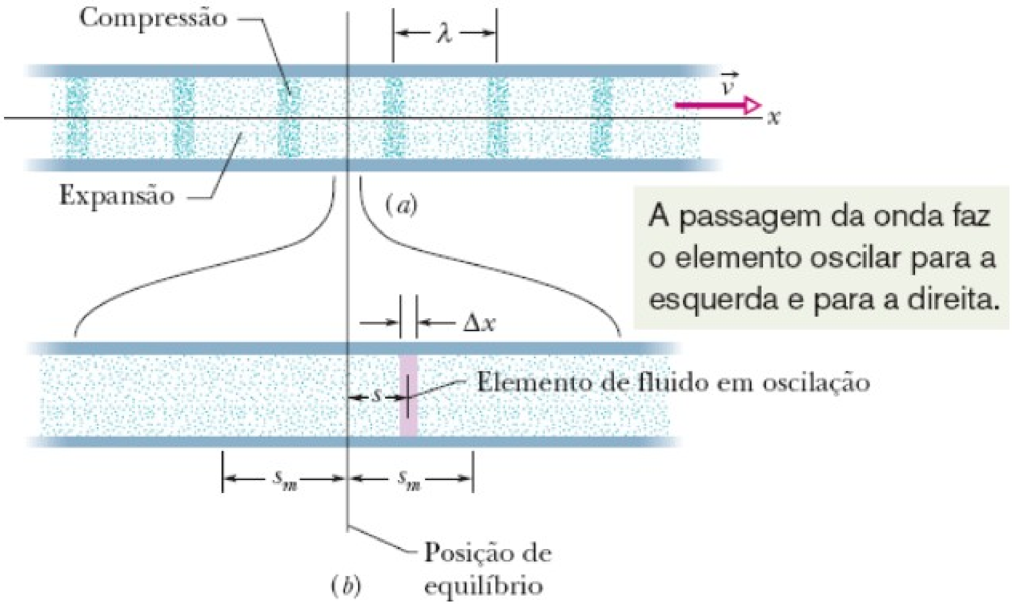
Cada ponto marrom indica a posição do centro de massa de um pequeno bolsão de ar.

A mancha azul destaca o bolsão de ar que está em x = 0.

Deslocamento dos bolsões do ar se propaga ao longo da coluna

A função deslocamento s(x,t) é plotada em um gráfico abaixo.

Ondas sonoras progressivas



Enquanto em cordas medimos o deslocamento *y*, no som analisamos duas grandezas principais:

Deslocamento longitudinal: Descreve o quanto um pequeno elemento de ar se afasta de sua posição de equilíbrio

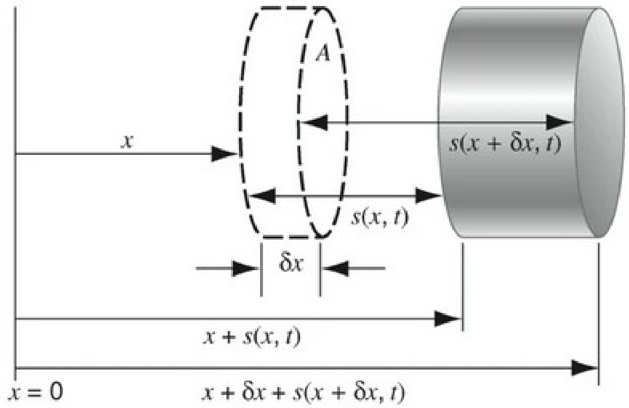
$$s(x,t)=s_m\cos(kx-\omega t)$$

Variação de Pressão: À medida que a onda passa, a pressão oscila em torno da pressão atmosférica. A variação de pressão é o que nossos ouvidos e microfones detectam

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

Ondas sonoras progressivas

Um cilindro de ar com área transversal A e espessura *dx*. O seu volume inicial é $V = A \; dx$. Quando a onda sonora passa, as faces do cilindro sofrem deslocamentos s(x, t).



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

Variação do volume

$$\Delta V = A[s(x+dx,t) - s(x,t)] = A \frac{\partial s}{\partial x} dx$$

Da definição do modulo de elastividade

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

$$\Delta p = -B \frac{A(\partial s / \partial x) dx}{A\, dx} = -B \frac{\partial s}{\partial x}$$

$$\Delta p = -B[-k s_m \sin(kx - \omega t)] = (B k s_m) \sin(kx - \omega t)$$

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

$$v = \sqrt{B/\rho} \qquad B = v^2 \rho \qquad k = \omega / v$$

$$\Delta p_m = B k s_m = (v^2 \rho)\left(\frac{\omega}{v}\right) s_m = (v \rho \omega) s_m$$

Resumindo

- **Amplitude de pressão** Δp_m: Representa o “volume” ou intensidade física detectada pelo ouvido.
- **Frequência** ω: Quanto maior a frequência, maior a pressão necessária para o mesmo deslocamento.
- **Impedância acústica** ρv: Meios mais densos ou com maior velocidade de propagação exigem maiores variações de pressão.

$$s(x,t) = s_m \cos(kx - \omega t) \qquad \Delta p(x,t) = (v \rho \omega) s_m \sin(kx - \omega t)$$

Note: as funções de deslocamento e pressão estão desfasadas de 90°.
Quando o deslocamento é nulo, a variação de pressão é máxima (compressão ou rarefação máxima).

Propagação atmosférica

$$\Delta p(x,t) = (v\rho\omega)s_m \sin(kx - \omega t)$$

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

A variação da densidade do ar e da temperatura cria gradientes de velocidade que podem “curvar” o som (refração), afetando como o ruído de uma fábrica chega a uma comunidade vizinha.

- Gradientes de Temperatura:
  - Durante o dia (Inversão Térmica Negativa): O solo está mais quente que o ar acima. O som viaja mais rápido perto do chão e “encurva” para cima. Isso cria “zonas de sombra” onde o ruído da fábrica parece mais baixo.
  - Durante a noite (Inversão Térmica Positiva): O ar perto do solo esfria mais rápido, enquanto o ar acima permanece mais quente. O som viaja mais rápido nas camadas superiores e é “rebatido” para baixo, em direção à comunidade. Isso faz com que o ruído da fábrica seja ouvido com muito mais clareza e a distâncias maiores durante a noite.

Propagação atmosférica

$$\Delta p(x,t) = (v\rho\omega) s_m \sin(kx - \omega t)$$

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

- **Gradientes de vento e densidade**:
  - **Vento a favor**: A velocidade do som em relação ao solo é a soma da velocidade do som no ar parado mais a velocidade do vento. Se o vento sopra da fábrica para a comunidade, o gradiente de velocidade faz com que a frente de onda se curve para baixo, concentrando o som no nível dos ouvintes.
  - **Vento contra**: A frente de onda curva-se para cima, fazendo com que o som “salte” por cima da comunidade vizinha..

Exercício

- Se a amplitude de deslocamento s_m de uma onda sonora for dobrada, mas a frequência for mantida, o que acontece com a amplitude de pressão Δp_m
- Resposta: Como $\Delta p_m \propto s_m$, a amplitude de pressão também dobrará

Problema 1

- Um homem bate com um martelo na ponta de uma barra delgada. A velocidade do som na barra é 15 vezes maior que a velocidade do som no ar. Uma mulher na outra extremidade, com o ouvido próximo da barra, escuta o som da pancada duas vezes, com um intervalo de 0,12 s (um som vem da barra e outro vem do ar em torno da barra). Se a velocidade do som no ar é de 343 m/s, qual é o comprimento da barra?

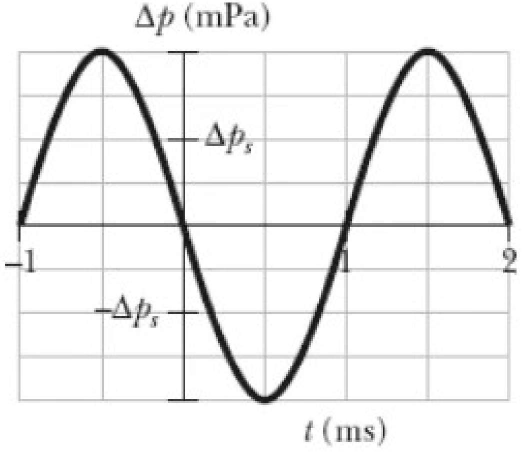
Problema 2

- Uma pedra é deixada cair em um poço. O som produzido pela pedra ao se chocar com a água é ouvido 3,00 s depois. Qual é a profundidade do poço?

Problema 3

- A Figura mostra a leitura de um monitor de pressão montado em um ponto da trajetória de uma onda sonora de uma só frequência, propagando-se a 343 m/s em um ar, de massa específica homogênea 1,21 kg/m^3. A escala do eixo vertical é definida por Δp_s = 4,0 mPa. Se a função deslocamento da onda é $s(x, t) = s_m \cos(kx - \omega t)$, determine s_m, k e ω.

- Quando o ar é resfriado, a massa específica aumenta para 1,35 kg/m^3 e a velocidade da onda sonora diminui para 320 m/s. A fonte emite uma onda com a mesma frequência e a mesma pressão que antes. Qual é o novo valor de s_m, de k e de ω?



Potencia i intensidade

Potência instantânea $$P(x,t)=\frac{dW}{dt}=\frac{Fds}{dt}=\Delta p(x,t)A\frac{\partial s(x,t)}{\partial t}$$

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

Velocidade $$\frac{\partial s(x,t)}{\partial t}=v_p=\omega s_m\sin(kx-\omega t)$$

$$P(x,t)=[\Delta p_m\sin(kx-\omega t)]A[\omega s_m\sin(kx-\omega t)]$$

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

Potência média $$P_{med}=\frac{1}{2}A\omega s_m\Delta p_m$$

Intensidade $$I=\frac{P_{med}}{A}=\frac{1}{2}\omega s_m\Delta p_m=\frac{1}{2}\omega\left(\frac{\Delta p_m}{v\rho\omega}\right)\Delta p_m=\frac{(\Delta p_m)^2}{2\rho v}$$

Nível de Intensidade Sonora - NIS

Som $\quad I = \frac{P}{A} = \frac{(\Delta p_m)^2}{2\rho v}$	*Intensidade* *I* (W/m²)	*Nível de Intensidade Sonoro* (dB)
Limiar da Audição	1×10^{-12}	0
Roçar de folhas	1×10^{-11}	10
Sussurro (a 1 m)	1×10^{-10}	20
Rua urbana, sem tráfego	1×10^{-9}	30
Escritório, sala de aula	1×10^{-7}	50
Conversa normal (a 1 m)	1×10^{-6}	60
Martelada (a 1 m)	1×10^{-3}	90
Grupo de Rock	1×10^{-1}	110
Limiar de dor	1	120
Turbina (a 50 m)	10	130
Motor de nave espacial (a 50 m)	1×10^{8}	200

Intensidades e níveis sonoras

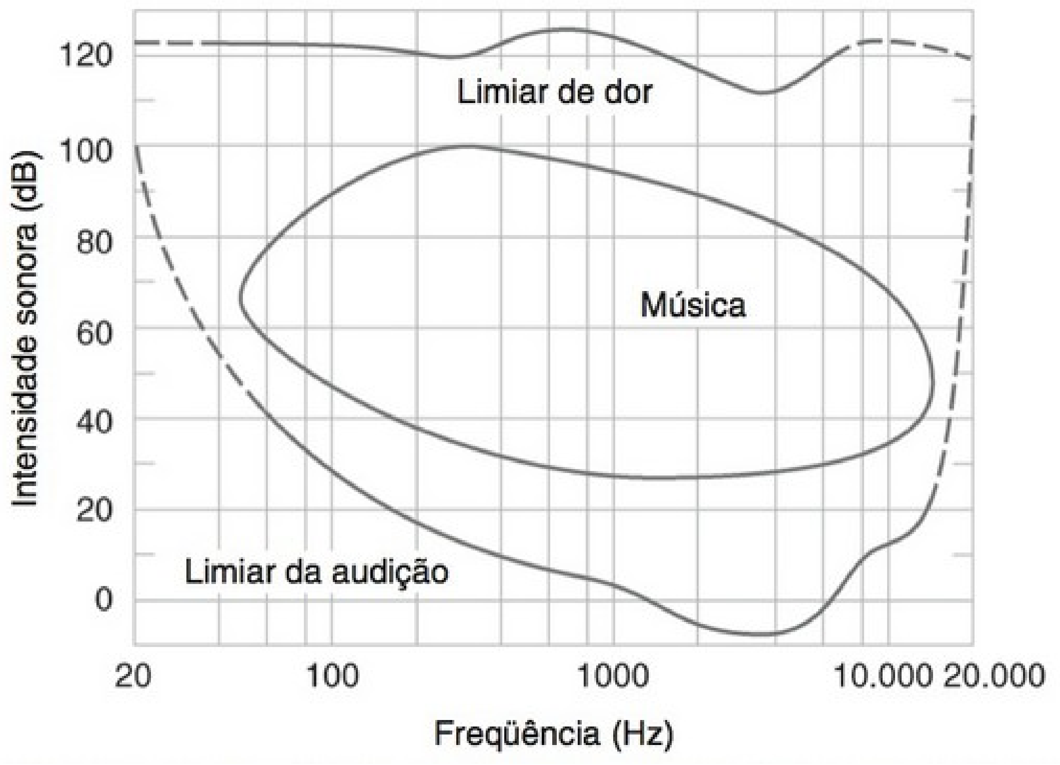
Devido à enorme faixa de intensidades que o ouvido humano alcança, utilizamos uma escala logarítmica

$$\mathrm{NIS} = 10 \log_{10}\left(\frac{I}{I_0}\right)$$

Onde $I_0 = 10^{-12}$ W/m² é o limiar da audição humana.

- Se a distância dobrar, a intensidade cai para 1/4 do valor original.
- Se a amplitude dobrar, a intensidade e a potência aumentam 4 vezes.

Nível de Intensidade Sonora - NIS

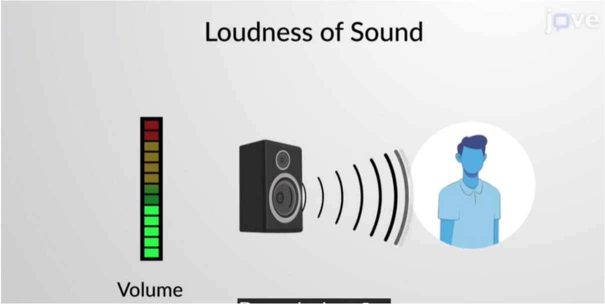


Faixa média dos níveis sonoras

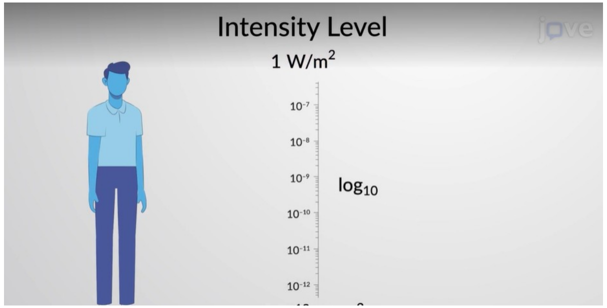
$$NIS = 10\log_{10}\left(\frac{I}{I_0}\right)$$

Potencia i intensidade

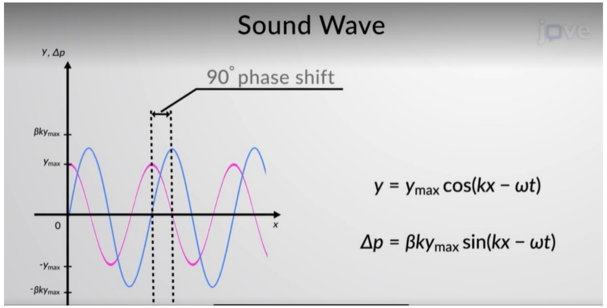
Intensidade do Som



Nível de Intensidade Sonora

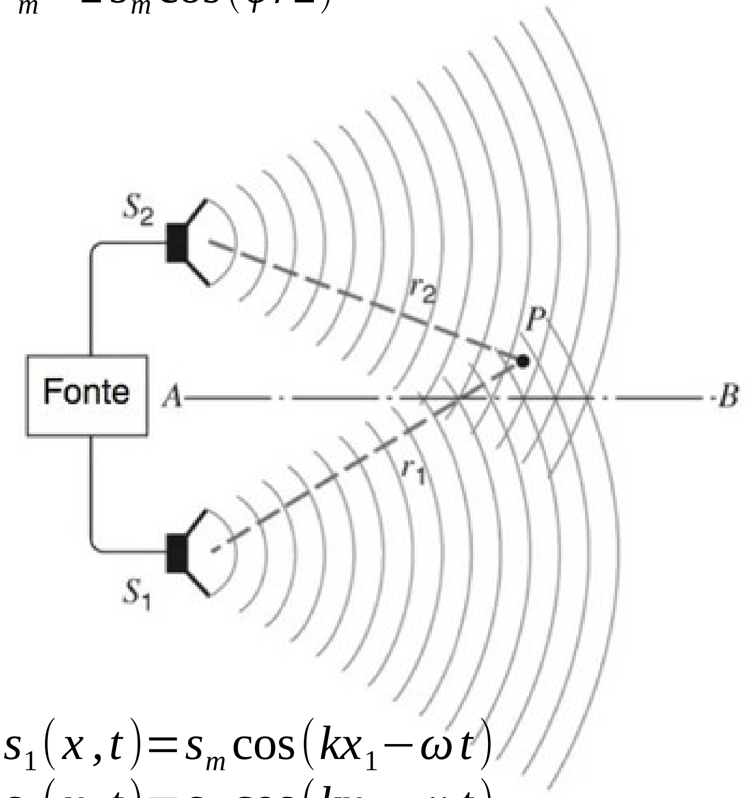


Intensidade e Pressão



Interferência de Ondas Sonoras

$$s'_m = 2 s_m \cos(\phi/2)$$



$$s_1(x,t) = s_m \cos(kx_1 - \omega t)$$
$$s_2(x,t) = s_m \cos(kx_2 - \omega t)$$

Quando duas fontes sonoras coerentes emitem ondas que percorrem caminhos diferentes até um ponto de observação, a fase relativa entre elas muda

- **Diferença de fase** ϕ é proporcional à razão entre a diferença de percurso $\Delta L = |r_2 - r_1|$ e o comprimento de onda λ

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta L = k \Delta L$$

- **Interferência Construtiva (Som Máximo)**

$$\Delta L = n\lambda$$

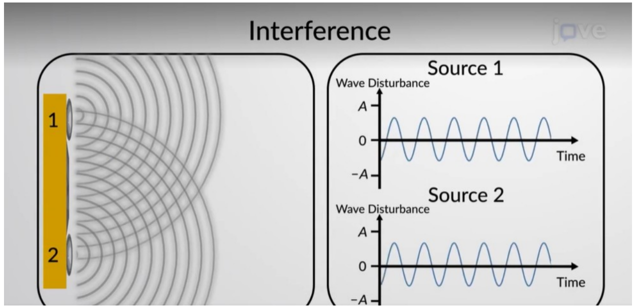
- **Interferência Destrutiva (Silêncio/Mínimo)**

$$\Delta L = \left(n + \frac{1}{2}\right)\lambda$$

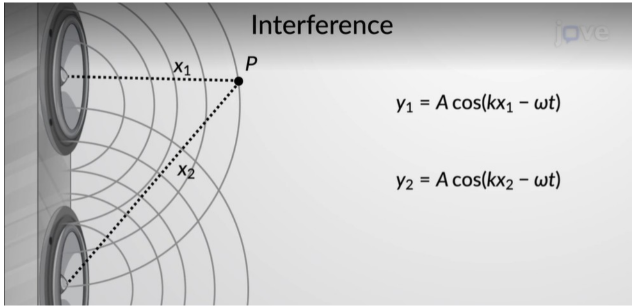
onde n = 0, 1, 2, ...

Interferência de Ondas Sonoras

Ondas Sonoras: Interferência



Nível de Intensidade Sonora



Ondas longitudinais estacionárias: Nós e Ventres

Em tubos sonoros e cavidades, as ondas estacionárias podem ser descritas pelo **deslocamento das partículas**, *s*, ou pela **variação de pressão**, Δp.

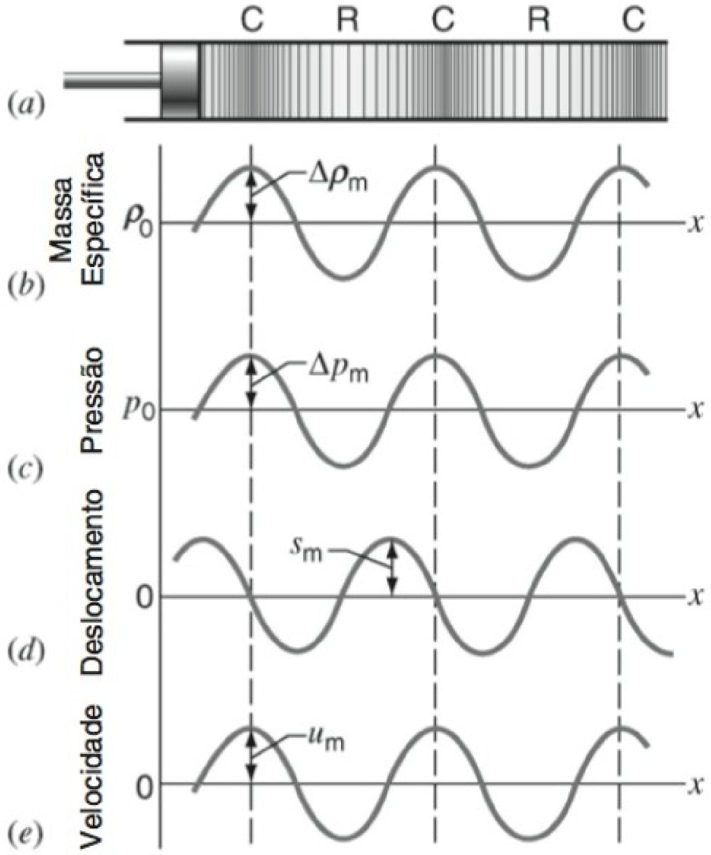
- Definições
  - Nó (Node): Ponto de oscilação nula (amplitude zero).
  - Ventre ou Antinó (Antinode): Ponto de oscilação máxima (amplitude máxima).
- Dualidade deslocamento vs. Pressão
  - As duas descrições estão defasadas em π/2 rad. Onde o ar não se move, a pressão é máxima.

Localização	Deslocamento (s)	Pressão (Δp)
Extremidade Fechada	**Nó**: Partículas fixas contra a parede.	**Ventre**: Compressão/rarefação máxima.
Extremidade Aberta	**Ventre**: Ar oscila livremente para fora.	**Nó**: Pressão igual à atmosférica Δp = 0.

Ondas longitudinais estacionárias: Nós e Ventres

Propriedades importantes

- **Energia**: Em um nó de deslocamento, a velocidade da partícula é zero, mas a energia potencial elástica é máxima (ventre de pressão).
- **Transporte**: A potência média líquida transmitida através de um nó é zero; a energia permanece "aprisionada" entre os nós.
- **Distância**: A distância entre dois nós adjacentes (ou dois ventres) é sempre $\lambda/2$.



Ondas longitudinais estacionárias

Tubos Abertos vs. Fechados:

Abertos: Possuem ventres nas duas extremidades.
Harmônicos:

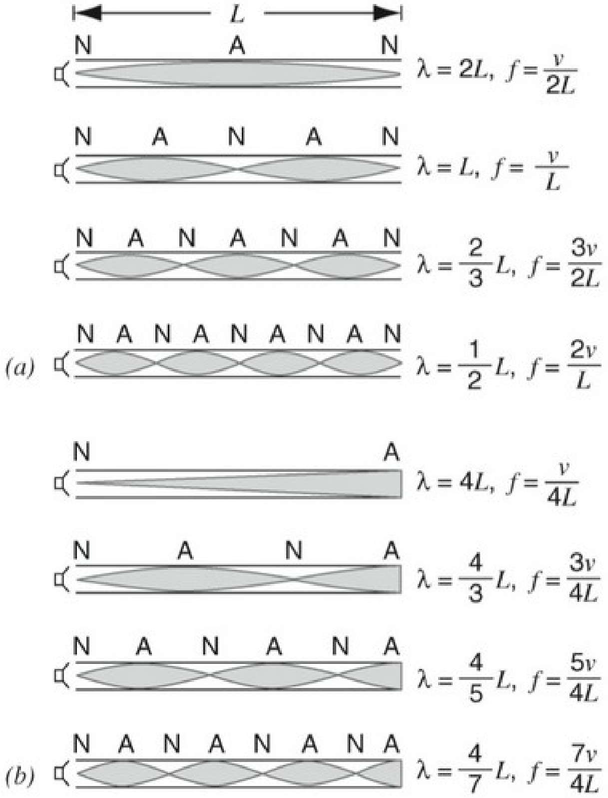
$$\lambda_n = \frac{2L}{n} \quad (n = 1, 2, 3...)$$

$$f_n = n\frac{v}{2L}$$

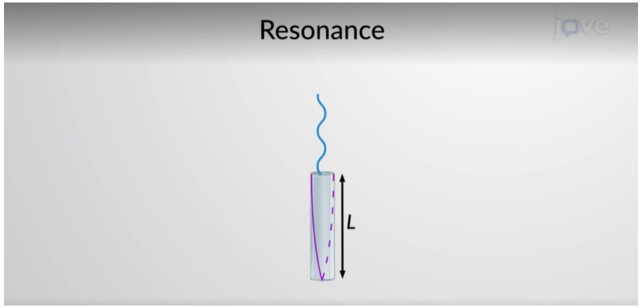
Fechados: Possuem um nó na extremidade fechada e um ventre na aberta. Harmônicos apenas ímpares:

$$\lambda_n = \frac{4L}{n} \quad (n = 1, 3, 5...)$$

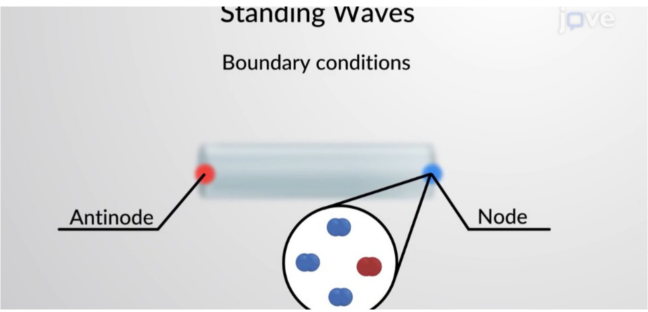
$$f_n = n\frac{v}{4L}$$



Ondas Sonoras: Ressonância



Modos de onda longitudinal



Batimentos

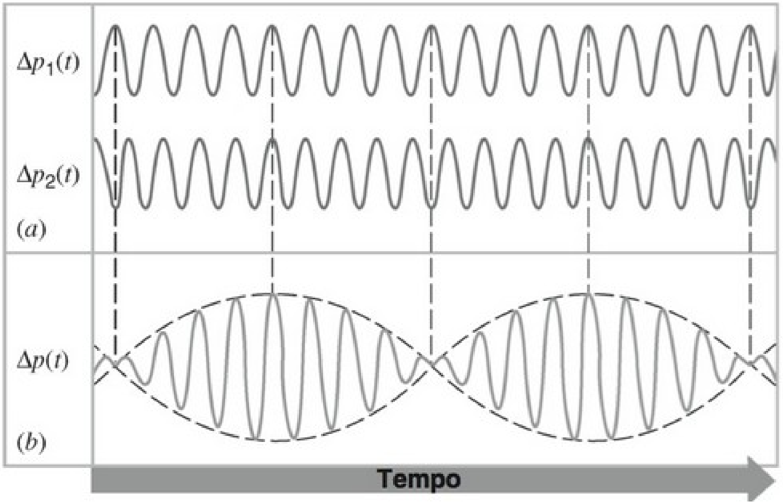
O fenômeno de batimento surge da interferência de duas ondas com frequências ligeiramente diferentes.

$$\Delta p_1(t) = \Delta p_m \sin(\omega_1 t)$$

$$\Delta p_2(t) = \Delta p_m \sin(\omega_2 t)$$

$$\Delta p(t) = \Delta p_1(t) + \Delta p_2(t) = \Delta p_m (\sin(\omega_1 t) + \sin(\omega_2 t))$$

$$\Delta p(t) = \underbrace{2 \Delta p_m \cos\left(\frac{\omega_1 - \omega_2}{2} t\right)}_{\text{amplitude}} \underbrace{\sin\left(\frac{\omega_1 + \omega_2}{2} t\right)}_{\text{frequência}}$$



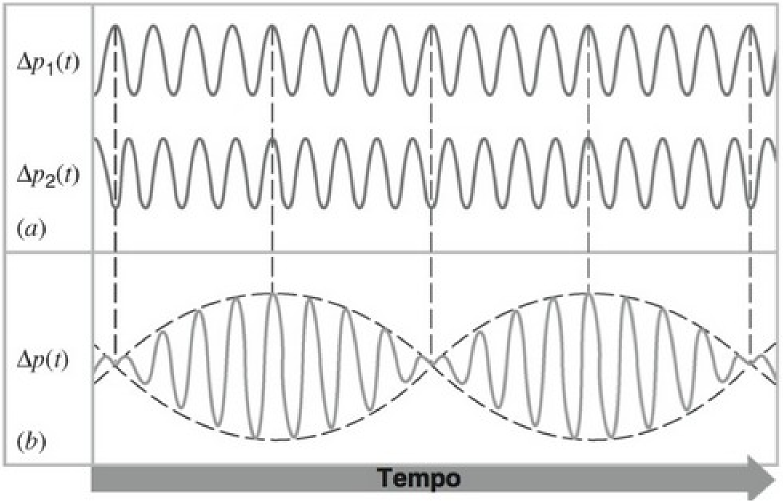
Batimentos

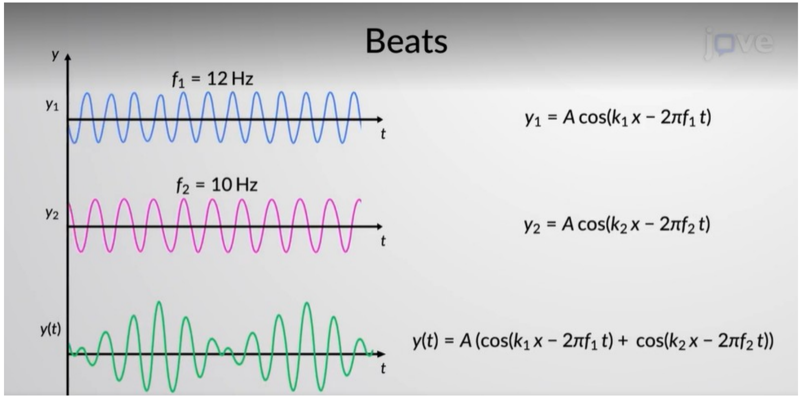
O batimento corre toda vez que $\omega_{amp}\, t$ vale +1 ou -1

- **Percepção sonora**: O ouvido percebe uma única frequência média cuja amplitude "pulsa" ou oscila no tempo.
- **Frequência de batimento**: O batimento corre toda vez que $\omega_{amp}\, t$ vale +1 ou -1. É a diferença absoluta entre as duas frequências originais: $f_{bat} = |f_1 - f_2|$.

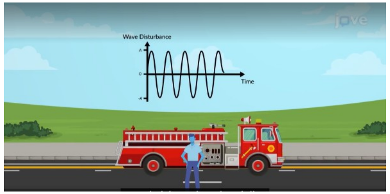
$$\omega_{batimento} = 2\,\omega_{amplitude} = |\omega_1 - \omega_2| = 2\,\pi\,f$$

- **Aplicação prática**: Muito utilizado por músicos para afinar instrumentos (o batimento para quando as frequências se igualam).





Efeito Doppler



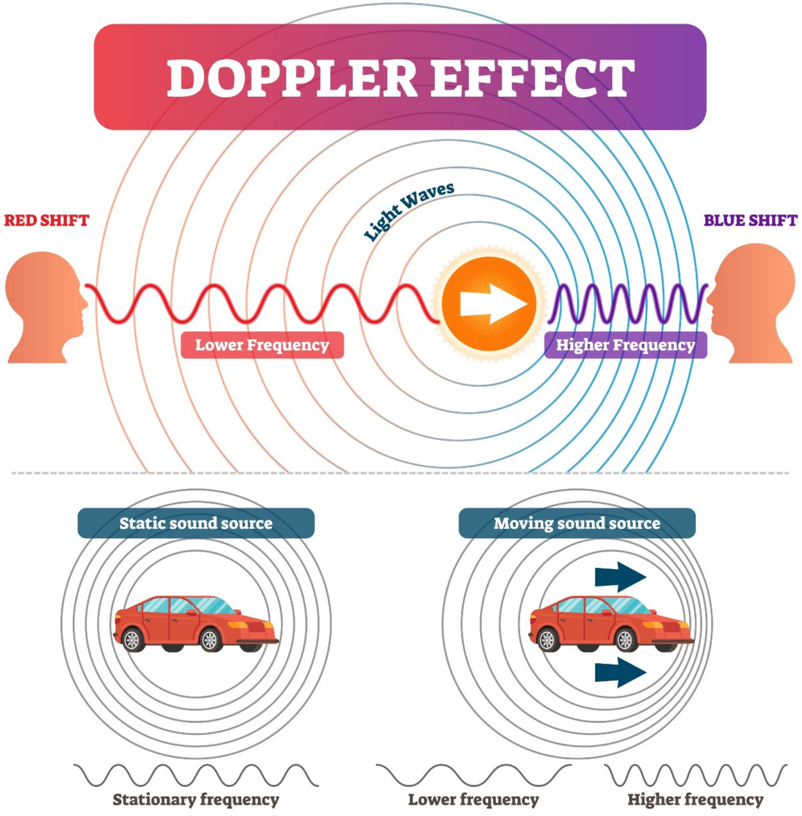
É a alteração na frequência percebida por um observador devido ao movimento relativo entre a fonte sonora e o observador.

- **Fonte em repouso e observado móvel**: o fenômeno é explicado pela variação na velocidade relativa com que as frentes de onda atingem o observador

O número de ondas recebidas

$$f' = \frac{\frac{ut}{\lambda} + \frac{u_o t}{\lambda}}{t} = \frac{u + u_o}{\lambda} = \frac{u + u_o}{u/f} = f\left(1 + \frac{u_o}{u}\right)$$

$$\boxed{f' = f\left(1 \pm \frac{u_o}{u}\right)}$$



Efeito Doppler

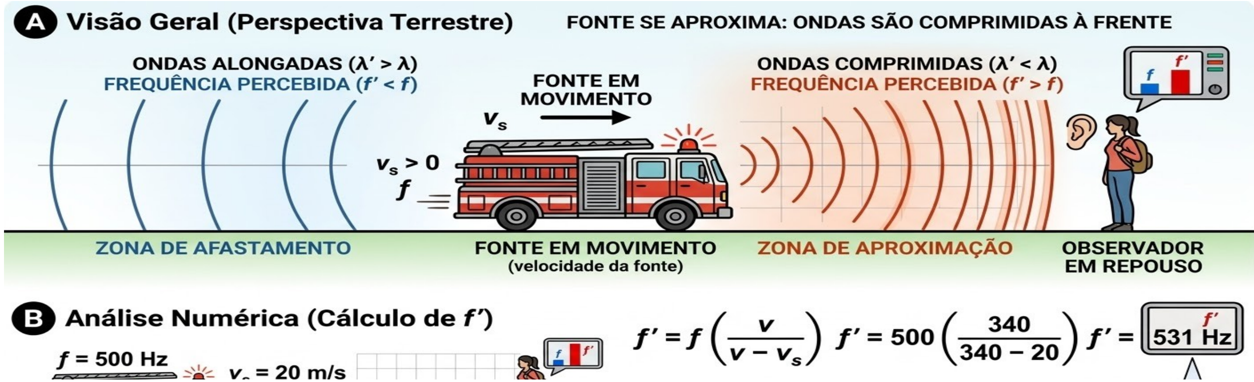
- **Observador em repouso e fonte em movimento.** É a alteração na frequência percebida por um observador devido ao movimento relativo entre a fonte sonora e o observador.

Comprimento de onda chegando no observador

Fonte está se aproximando

$$\lambda' = \frac{u}{f} - \frac{u_s}{f}$$

$$f' = \frac{u}{\lambda'} = \frac{u}{\frac{u}{f} - \frac{u_s}{f}} = f\,\frac{u}{u - u_s}$$



Fonte está se afastando

$$f' = f\,\frac{u}{u + u_s}$$

$$\boxed{f' = f\,\frac{u}{u \mp u_s}}$$

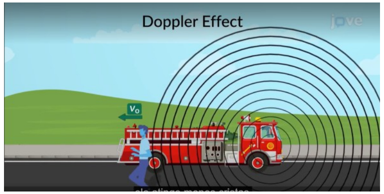
Efeito Doppler

É a alteração na frequência percebida por um observador devido ao movimento relativo entre a fonte sonora e o observador.

- Fonte em Aproximação: As frentes de onda são “comprimidas”, resultando em um comprimento de onda menor e frequência percebida mais alta (som agudo).
- Fonte em Afastamento: As frentes de onda são “alongadas”, resultando em frequência percebida mais baixa (som grave).
- Equação Geral:

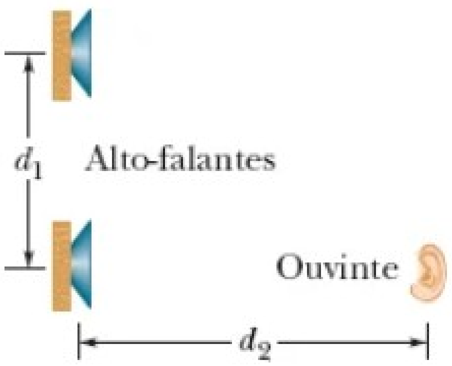
$$\boxed{f' = f\left(\frac{v \pm v_o}{v \mp v_s}\right)}$$

Aqui v é a velocidade do som, v_o do observador e v_s da fonte.



Problema 1

Dois alto-falantes separados por uma distância d_1 = 2,00 m estão em fase. Suponha que as amplitudes das ondas sonoras emitidas pelos alto-falantes são aproximadamente iguais para um ouvinte que se encontra diretamente à frente do alto-falante da direita, a uma distância d_2 = 3,75 m. Considere toda a faixa de audição de um ser humano normal, 20 Hz a 20 kHz.



(a) Qual é a menor frequência, $f_{mín,1}$, para a qual a intensidade do som é mínima (interferência destrutiva) na posição do ouvinte? Por qual número a frequência $f_{mín,1}$ deve ser multiplicada para se obter (b) a segunda menor frequência, $f_{mín,2}$, e (c) a terceira menor frequência, $f_{mín,3}$?

(d) Qual é a menor frequência, $f_{máx,1}$, para a qual a intensidade do som é máxima (interferência construtiva) na posição do ouvinte? Por qual número $f_{máx,1}$ deve ser multiplicada para se obter (e) a segunda menor frequência, $f_{máx,2}$, e (f) a terceira menor frequência, $f_{máx,3}$?

Problema 2

Uma fonte pontual emite 30,0 W de som isotropicamente. Um pequeno microfone intercepta o som em uma área de 0,750 cm2, a 200 m de distância da fonte. Calcule

(a) a intensidade sonora nessa posição e

(b) a potência interceptada pelo microfone.