

Introdução às Ondas Sonoras

Aula 02 (Cont.) — Qualidades Fisiológicas

Aula 03 — Fenômenos Acústicos e Fontes Sonoras

Prof. Humberto L. Oliveira
IFSC / Câmpus São José — Técnico Integrado

O sistema auditivo humano distingue o som por altura, intensidade e timbre

Altura (Frequência)

Diferencia sons graves (baixos) de agudos (altos).

- Depende apenas da frequência do som.
- Sons Graves: menor frequência (ex: voz masculina 100-200 Hz).
- Sons Agudos: maior frequência (ex: voz feminina 200-400 Hz).
- Intervalo Musical (i): relação de frequências $i = f_2/f_1$.
- Oitava: quando a frequência dobra ($i = 2$).

Intensidade (Energia)

Diferencia sons fracos de sons fortes.

- Depende da amplitude e da energia transportada pela onda.
- Intensidade Física (I): quociente da potência sobre a área perpendicular à propagação: $I = P_{ot}/A$.
- Limiar de Audição (I_0): menor valor audível ($\sim 10^{-12} \text{ W/m}^2$).
- Limiar da Dor (I_{max}): provoca efeitos dolorosos ($\sim 1 \text{ W/m}^2$).

Timbre (Harmônicos)

Permite diferenciar sons de mesma frequência e mesma intensidade de fontes distintas.

- É a identidade ou 'assinatura' de cada fonte sonora.
- Explicação Física: superposição do som fundamental (1° harmônico, define a nota) com os harmônicos superiores (frequências múltiplas $f_n = n \cdot f_1$).
- O formato resultante da onda determina o timbre.

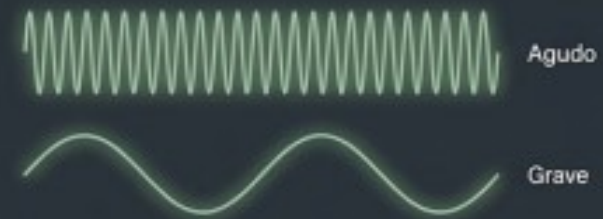
O sistema auditivo humano distingue o som por altura, intensidade e timbre

Altura / Frequência

Diferencia sons graves de agudos. Depende exclusivamente da frequência (ex: a voz masculina é tipicamente mais grave que a feminina).

$$\text{Intervalo musical: } i = \frac{f_2}{f_1}$$

$$\text{Oitava: } i = 2$$



Intensidade / Energia

Diferencia sons fracos de fortes (volume). Depende da amplitude e da energia transportada pela onda.

$$\text{Limiar de audição: } 10^{-12} \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

$$\text{Limiar da dor: } 1 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$



Timbre / Harmônicos

A 'assinatura' exclusiva da fonte sonora. Permite distinguir um violão de um piano tocando a mesma nota.

Som fundamental
(1º harmônico)
+
Harmônicos superiores



A medição logarítmica em decibéis monitora os limites de segurança da audição

Nível de Intensidade Sonora (d)

$$d = 10 * \log_{10}(I / I_0) \text{ [dB]}$$

- d: Nível sonoro medido em decibéis (dB).
- I: Intensidade física do som avaliado (W/m²).
- I₀: Limiar de audibilidade (I₀ = 10⁻¹² W/m²).
- Decibelímetro: Aparelho usado para medir o nível sonoro.

-  ALERTA DE SAÚDE AUDITIVA (NR-15):
- Níveis contínuos acima de 85 dB causam perda permanente.
 - Exposição Máxima Permitida por Dia:
 - 8 horas a 85 dB | 4 horas a 90 dB
 - 1 hora a 100 dB | 15 minutos a 110 dB
 - Acima de 140 dB: Risco imediato de ruptura do tímpano.

Ambiente / Fonte Sonora	Nível (dB)
Silêncio absoluto	0 dB
Conversação em voz baixa	20 - 30 dB
Conversação em voz normal	60 dB
Tráfego intenso / Fábrica têxtil	90 dB
Britadeira / Buzina de caminhão	100 dB
Conjunto de rock (caixas de som)	110 - 125 dB
Decolagem / Aterrissagem de jato	130 - 140 dB

A medição logarítmica em decibéis monitora os limites de segurança da audição

O Nível Sonoro em Decibéis (dB)

$$d = 10 \cdot \log\left(\frac{I}{I_0}\right) \text{ dB}$$

Intensidade do som medido

Intensidade de referência (limiar de audição)



Instrumento de medição:
Decibelímetro

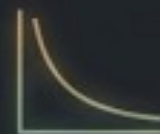
Saúde Auditiva e a Norma NR-15

140 dB - Limiar da dor

85 dB - Limite de tolerância

Níveis contínuos acima de 85 dB provocam perdas auditivas permanentes.

0 dB - Limiar da audição



Tempo de exposição permitido decai exponencialmente conforme os decibéis aumentam (NR-15).

A reflexão sonora gera reforço, reverberação ou eco com base no tempo de retorno

1. Reforço

Ocorre quando o obstáculo está extremamente próximo da fonte.

- Tempo: $dt \sim 0$ s (retorno imediato).
- Efeito: Os sons direto e refletido chegam ao mesmo tempo. O ouvido percebe apenas um único som reforçado e mais robusto.
- Distância: Obstáculo a poucos metros da fonte.



2. Reverberação

Ocorre quando o obstáculo está a uma distância intermediária.

- Tempo: $0 < dt < 0,1$ s.
- Efeito: O som refletido chega antes que a sensação do som direto tenha se extinguido. Causa uma sensação de prolongamento do som.
- Aplicação: Comum em auditórios e igrejas. Se moderada, auxilia a inteligibilidade da fala.



3. Eco

Ocorre quando o obstáculo está suficientemente distante para separar os sons.

- Tempo: $dt \geq 0,1$ s (Persistência Auditiva Humana).
- Efeito: O ouvido distingue claramente o som original e o som refletido.
- Distância Mínima (x):
 - No Ar ($v = 340$ m/s): $x \geq 17$ m
 - Na Água ($v = 1600$ m/s): $x \geq 80$ m
- Sonar: Usa reflexão de ultrassons na água para detectar obstáculos e medir profundidades.

A reflexão sonora gera reforço, reverberação ou eco com base no tempo de retorno

Regra Biológica: A persistência auditiva humana é de 0,1 s

Reforço

$$\Delta t \approx 0 \text{ s}$$

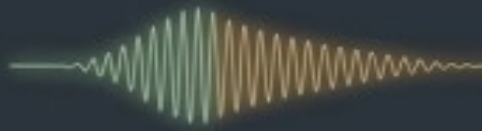
O som refletido soma-se ao direto quase instantaneamente, tornando-o mais forte.



Reverberação

$$0 < \Delta t < 0,1 \text{ s}$$

Causa um prolongamento da sensação sonora (o som "embola").



Eco

$$\Delta t \geq 0,1 \text{ s}$$

O som refletido é percebido separadamente como uma repetição clara.



Aplicações



Eco na Prática

Dedução da distância mínima para eco:
 $x \geq 17 \text{ m}$ no ar (velocidade menor) e $x \geq 80 \text{ m}$ na água (velocidade maior).

Tecnologia

Princípio de funcionamento do Sonar (navegação e mapeamento subaquático).



A tração e a densidade linear determinam as frequências das cordas vibrantes

Equações Físicas das Cordas Vibrantes

Velocidade (Fórmula de Taylor):

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

Frequências dos Harmônicos:

$$f_n = n * (v / 2L) = n * f_1$$

- T: Força de tração na corda (N).
- μ : Densidade linear de massa ($\mu = m/L$, em kg/m).
- L: Comprimento da corda vibrante (m).
- n: Ordem do harmônico ($n = 1, 2, 3...$).
- f_1 : Frequência fundamental (1º harmônico).

Física Prática: Instrumentos e Ressonância

• Formação de Ondas Estacionárias:

As ondas transversais refletem-se nas extremidades fixas da corda, gerando nós nos apoios e ventres oscilantes. A vibração da corda perturba o ar adjacente, gerando a onda sonora de mesma frequência.

• O que define o Timbre?

Ao percutir ou dedilhar uma corda, diversas frequências harmônicas ($f_n = n*f_1$) se superpõem ao som fundamental (f_1). A combinação e amplitude relativa desses harmônicos definem a forma de onda e o timbre característico.

• Ressonância e Amplificação:

O som emitido por uma corda isolada é fraco. Por isso, instrumentos como violão e piano possuem caixas de ressonância de ar ou madeira. O ar interno vibra na mesma frequência natural da corda, amplificando o som projetado no ambiente.

A tração e a densidade linear determinam as frequências das cordas vibrantes

IFSC | São José
Física - Cap. 19

A Física da Corda

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

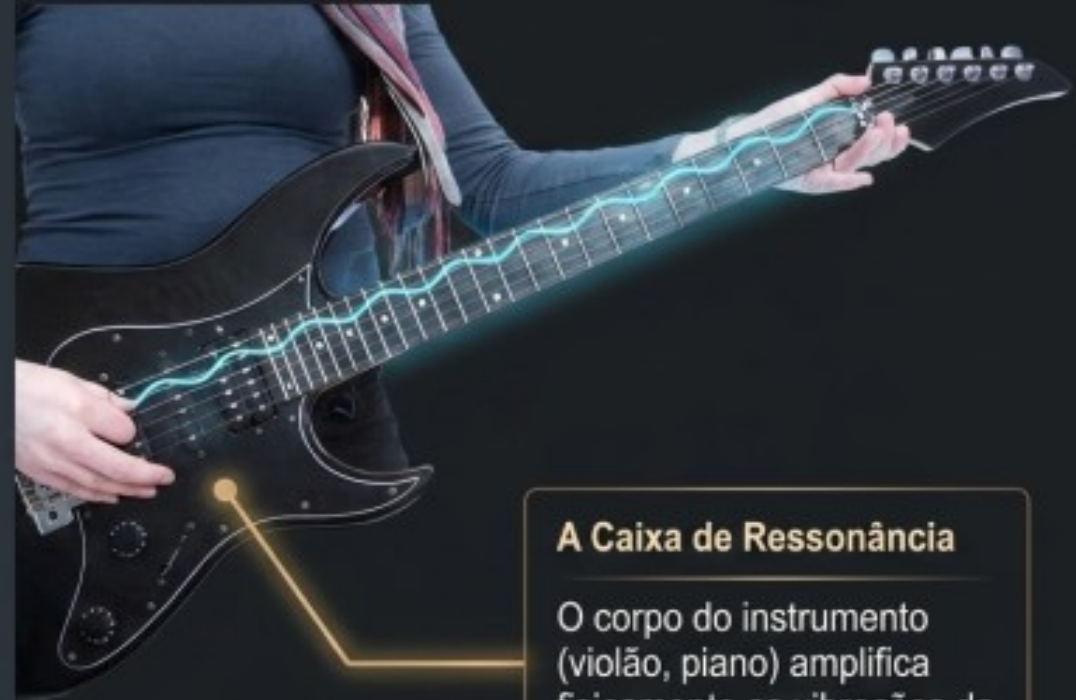
A velocidade de propagação depende da tração (T) e da densidade linear (μ).

$$f_n = n \cdot \frac{v}{2L} = n \cdot f_1$$

Frequência dos harmônicos: $f_n = n \cdot \frac{v}{2L} = n \cdot f_1$

As ondas estacionárias se formam com nós (pontos fixos) e ventres (amplitude máxima). Os harmônicos resultantes definem o timbre do instrumento.

A Engenharia do Instrumento



A Caixa de Ressonância

O corpo do instrumento (violão, piano) amplifica fisicamente as vibrações da corda através do fenômeno de ressonância acústica.

A geometria do tubo acústico define quais harmônicos podem ser excitados

Tubos Sonoros Abertos

- **Condição Geométrica:**
Apresentam ventres de oscilação em ambas as extremidades do tubo.
- **Comprimentos de Onda:**
 $\lambda_n = 2L / n$ (com $n = 1, 2, 3, \dots$).
- **Frequências dos Harmônicos:**
 $f_n = n * (v / 2L) = n * f_1$.
- **Série de Harmônicos:**
Admite TODOS os harmônicos (tanto de ordem par quanto ímpar): $f_1, 2f_1, 3f_1, 4f_1, \dots$
- **Exemplos Práticos:**
Flautas transversais, flauta doce e tubos de órgãos com ambas as pontas abertas.

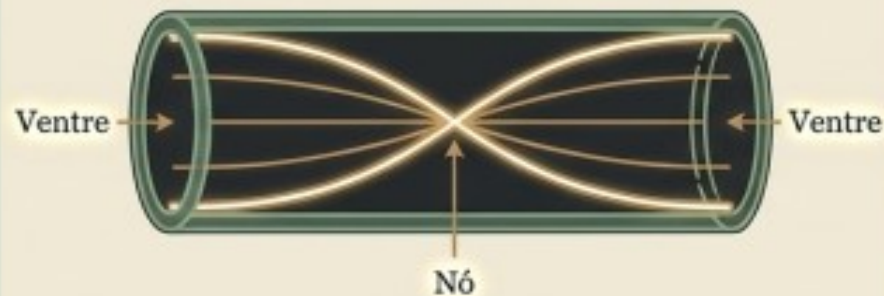
Tubos Sonoros Fechados

- **Condição Geométrica:**
Apresentam um nó no fundo fechado e um ventre na ponta aberta.
- **Comprimentos de Onda:**
 $\lambda_i = 4L / i$ (com $i = 1, 3, 5, \dots$).
- **Frequências dos Harmônicos:**
 $f_i = i * (v / 4L) = i * f_1$.
- **Série de Harmônicos:**
Admite APENAS harmônicos de ordem ÍMPAR: $f_1, 3f_1, 5f_1, \dots$
(harmônicos de ordem par não se estabelecem).
- **Exemplos Práticos:**
Clarinetas, conduto auditivo humano (~2,5 cm de profundidade) e provetas em laboratório.

A geometria do tubo acústico define quais harmônicos podem ser excitados

Colunas de Ar em Tubos Sonoros

Tubos Abertos



- Possuem ventres em ambas as pontas.

Admitem comprimentos de onda: $\lambda_n = \frac{2L}{n}$

- Série harmônica completa (pares e ímpares: $f_1, 2f_1, 3f_1, \dots$)
- Exemplos: Flautas

Tubos Fechados



- Possuem um nó no fundo fechado e ventre na boca aberta.

Admitem comprimentos de onda: $\lambda_i = \frac{4L}{i}$

- Apenas harmônicos de ordens ímpares ($f_1, 3f_1, 5f_1, \dots$)
- Exemplos: Clarineta e o conduto auditivo humano

O movimento relativo entre fonte e observador altera a frequência aparente

A Equação Geral do Efeito Doppler

$$f_A = f * [(v \pm v_O) / (v \mp v_F)]$$

- f_A : Frequência aparente percebida pelo observador (Hz).
- f : Frequência real emitida pela fonte (Hz).
- v : Velocidade de propagação do som no meio (m/s).
- v_O : Velocidade do observador (m/s).
- v_F : Velocidade da fonte sonora (m/s).



CONVENÇÃO DE SINAIS DO REFERENCIAL:

O eixo de referência é orientado positivamente do Observador para a Fonte (O -> F).

- Sentido O -> F: velocidade entra com sinal POSITIVO (+).
- Sentido F -> O: velocidade entra com sinal NEGATIVO (-).

Doppler Cósmico e Medicina Diagnóstica

- O Efeito Doppler para a Luz:
As ondas luminosas também sofrem Doppler, detectável a velocidades altíssimas em galáxias distantes.
 - Desvio para o Vermelho (Redshift): Ocorre se a fonte está se afastando ($f_e < f$). Isso prova que o Universo está em contínua expansão!
 - Desvio para o Violeta (Blueshift): Ocorre se a fonte se aproxima.
- Aplicação na Medicina (Ecografia Doppler):
Combina-se a ultrassonografia com o efeito Doppler.
As ondas de ultrassom refletem-se nas hemácias sanguíneas em movimento. O desvio de frequência recebido de volta permite que o computador do aparelho calcule em tempo real a velocidade e direção do fluxo sanguíneo nos vasos do paciente.
- Vantagem Médica:
Diagnóstico não invasivo, sem efeitos colaterais biológicos e sem radiação ionizante.

O movimento relativo entre fonte e observador altera a frequência aparente

O Efeito Doppler



Variação aparente de frequência devido ao movimento relativo.

$$f_e = f \cdot \frac{(v \mp v_F)}{(v \pm v_O)}$$

Convenção de sinais baseada na orientação Observador $\rightarrow$ Fonte (O $\rightarrow$ F).

Aplicações Além do Som

Astronomia (Óptica)

Desvio para o vermelho (Redshift) indica o afastamento das galáxias.
Desvio para o violeta (Blueshift) indica aproximação.

Medicina Diagnóstica

A ecografia Doppler é usada para mapear fluxos sanguíneos móveis de forma não invasiva. As hemácias funcionam como a fonte móvel refletora da onda.

Problemas Propostos (Livro Ramalho)

PROBLEMA 1 (Eco e Cinemática — P.477):

Um atirador ouve o ruído da bala atingindo um alvo 3 s após dispará-la com velocidade de 680 m/s. Sabendo que a velocidade do som no ar é de 340 m/s, determine a distância entre o atirador e o alvo.

PROBLEMA 2 (Cordas Vibrantes — P.496):

Uma corda de violão com 50 cm de comprimento está afinada para vibrar com uma frequência fundamental de 500 Hz. Se o comprimento da corda for reduzido à metade (25 cm), qual será a nova frequência fundamental do som emitido?

Resoluções Passo a Passo

Resolução do Problema 1:

1. O tempo total ($St = 3$ s) é o tempo de ida da bala ($St1$) mais o de volta do som ($St2$).
 $St = St1 + St2 = (x / v_{\text{bala}}) + (x / v_{\text{som}}) = 3$
2. Substituindo os valores conhecidos:
 $(x / 680) + (x / 340) = 3$
3. Multiplicando toda a equação por 680 (m.m.c):
 $x + 2x = 3 * 680 \Rightarrow 3x = 2040$
 $x = 680$ metros

Resolução do Problema 2:

1. A frequência fundamental de uma corda é inversamente proporcional ao seu comprimento L :
 $f_1 = v / 2L$
2. Se reduzirmos L à metade ($L' = L/2$), a velocidade de propagação v permanece constante (pois a tração T e densidade μ não mudaram).
3. Logo, a nova frequência f'_1 será:
 $f'_1 = v / [2 * (L/2)] = 2 * (v / 2L) = 2 * f_1$
 $f'_1 = 2 * 500 \text{ Hz} = 1.000 \text{ Hz}$

A aplicação das equações soluciona problemas de eco e fontes estacionárias

Problema 1 (Eco e Cinemática)

Enunciado

Um atirador ouve o estampido da bala no alvo 3 s após o disparo.

Dados: $v_{\text{bala}} = 680 \text{ m/s}$,
 $v_{\text{som}} = 340 \text{ m/s}$.

Modelo Visual



Solução Passo a Passo

$$t_{\text{total}} = 3 \text{ s}$$

$$x = 680 \cdot t_1 \text{ e } x = 340 \cdot t_2$$

Como v_{bala} é o dobro de v_{som} ,
 $t_1 = 1 \text{ s}$ e $t_2 = 2 \text{ s}$.

$$\text{Distância } x = 680 \text{ m}$$

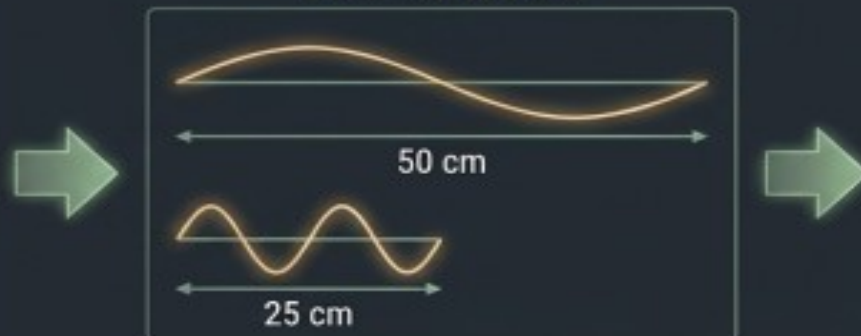
Problema 2 (Cordas Vibrantes)

Enunciado

Corda de violão de 50 cm vibra com frequência fundamental de 500 Hz.

Se reduzirmos o comprimento à metade (25 cm), qual a nova frequência?

Modelo Visual



Solução Passo a Passo

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

A frequência é inversamente proporcional ao comprimento.
 L cai pela metade $\rightarrow f$ dobra.

$$\text{Nova frequência} = 1.000 \text{ Hz}$$