

Ondulatória e Acústica

Definição de Ondas

As ondas são perturbações que se propagam em um meio, transportando **energia** sem transportar matéria de forma permanente. Elas podem ser classificadas de várias maneiras:

- **Ondas Mecânicas:** Necessitam de um meio material para se propagar (como água ou ar). Exemplos: ondas sonoras, ondas em cordas.
- **Ondas Eletromagnéticas:** Não precisam de um meio material, podendo se propagar no vácuo. Exemplos: luz, ondas de rádio.
- **Ondas Transversais:** A vibração das partículas ocorre **perpendicularmente** à direção de propagação da onda. Exemplo: ondas em cordas, ondas eletromagnéticas.
- **Ondas Longitudinais:** A vibração das partículas ocorre na **mesma direção** de propagação da onda. Exemplo: ondas sonoras em gases.
- **Ondas Tridimensionais:** Propagam-se em todas as direções no espaço. Exemplo: som emitido por uma fonte pontual no ar.

Relação entre Ondulatória e Acústica

A **ondulatória** é a parte da física que estuda as propriedades e comportamentos das ondas em geral. A **acústica** é um ramo da ondulatória focado nas ondas sonoras, explorando como o som é gerado, transmitido e percebido.

Ondas Sonoras

O **som** é uma onda mecânica **longitudinal** e **tridimensional**:

- **Longitudinal:** As partículas do meio vibram na mesma direção em que a onda se propaga, criando regiões de compressão e rarefação.
- **Tridimensional:** O som se propaga em todas as direções a partir da fonte, formando frentes de onda esféricas.

Propagação do Som

- **Compressões:** Regiões onde as partículas do meio estão mais próximas, resultando em alta pressão.
- **Rarefações:** Regiões onde as partículas estão mais afastadas, resultando em baixa pressão.

Essas variações de pressão são o que nossos ouvidos detectam como som.

Meios de Propagação

Por que o som não se propaga no vácuo?

O som requer um meio material (sólido, líquido ou gás) para se propagar, pois depende da vibração das partículas desse meio. No vácuo, não há partículas, portanto, o som não pode se propagar.

Velocidades do Som em Diferentes Meios

A velocidade do som varia conforme o meio devido às diferenças na densidade e no módulo de elasticidade:

- **Ar (gases):** ~340 m/s
- **Água (líquidos):** ~1.500 m/s
- **Aço (sólidos):** ~5.000 m/s

Explicação

- **Sólidos:** As partículas estão muito próximas e interligadas fortemente, permitindo que a perturbação se propague rapidamente.
- **Gases:** As partículas estão mais afastadas, e as interações são mais fracas, resultando em velocidades menores.

2. Propriedades Fundamentais das Ondas

Velocidade de Propagação

A velocidade com que uma onda se propaga em um meio é determinada pelas propriedades físicas desse meio:

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

Onde:

- v : Velocidade da onda (m/s).
- E : Módulo de elasticidade do meio (Pa).
- ρ : Densidade do meio (kg/m³).

Interpretação dos Elementos da Fórmula

- **Módulo de Elasticidade (E):** Mede a rigidez do meio. Quanto maior E , mais rígido é o meio, facilitando a propagação da onda.
- **Densidade (ρ):** Representa a inércia do meio. Quanto maior ρ , mais difícil é mover as partículas, reduzindo a velocidade da onda.

Exemplos de Cálculo da Velocidade

- **No ar:** Com $E \approx 1,4 \times 10^5$ Pa e $\rho \approx 1,2$ kg/m³:

$$v = \sqrt{\frac{1,4 \times 10^5}{1,2}} \approx 340 \text{ m/s}$$

- **Na água:** Com $E \approx 2,2 \times 10^9$ Pa e $\rho \approx 1,0 \times 10^3$ kg/m³:

$$v = \sqrt{\frac{2,2 \times 10^9}{1,0 \times 10^3}} \approx 1,483 \times 10^3 \text{ m/s}$$

Frequência (f), Período (T) e Comprimento de Onda (λ)

Definições

- **Frequência (f):** Número de ciclos completos que ocorrem por unidade de tempo. Unidade: Hertz (Hz).
- **Período (T):** Tempo que leva para completar um ciclo. Relação: $T = \frac{1}{f}$.
- **Comprimento de Onda (λ):** Distância entre dois pontos equivalentes consecutivos na onda (por exemplo, crista a crista).

Relação Básica

$$v = f \cdot \lambda$$

Explicação

- A velocidade de propagação (v) é igual ao produto da frequência (f) pelo comprimento de onda (λ). Isso significa que, para uma onda se propagando com velocidade constante, se a frequência aumenta, o comprimento de onda diminui, e vice-versa.

Exemplo

Problema

Um som com frequência de 440 Hz se propaga no ar com velocidade de 340 m/s. Qual o comprimento de onda?

Resolução

Utilizando a fórmula:

$$\lambda = \frac{v}{f}$$

Substituindo os valores:

$$\lambda = \frac{340 \text{ m/s}}{440 \text{ Hz}} \approx 0,773 \text{ m}$$

Interpretação

O comprimento de onda desse som é aproximadamente 0,773 metros, o que representa a distância entre duas compressões consecutivas no ar causadas pela onda sonora.

3. Intensidade Sonora e Decibéis

Intensidade Sonora (I)

A intensidade sonora é a potência transmitida por unidade de área perpendicular à direção de propagação da onda:

$$I = \frac{P}{A}$$

Onde:

- I : Intensidade sonora (W/m^2).
- P : Potência da onda (W).
- A : Área pela qual a onda se propaga (m^2).

Significado dos Elementos

- Potência (P): Quantidade de energia sonora emitida por segundo pela fonte.
- Área (A): Superfície através da qual a energia está sendo distribuída.

Classificação dos Sons

- Sons "Fortes": Alta intensidade sonora; mais energia por unidade de área.
- Sons "Fracos": Baixa intensidade sonora; menos energia por unidade de área.

Nível de Intensidade Sonora (Decibéis)

O nível sonoro em decibéis é uma medida logarítmica da intensidade sonora em relação a uma intensidade de referência mínima audível (I_0):

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

Onde:

- L : Nível sonoro (dB).
- I : Intensidade sonora medida (W/m^2).
- I_0 : Intensidade mínima audível, aproximadamente $1 \times 10^{-12} \text{ W}/\text{m}^2$.

Por que Usamos o Logaritmo?

O ouvido humano percebe sons em uma escala logarítmica; ou seja, uma multiplicação da intensidade é percebida como uma adição de uma quantidade constante ao nível sonoro.

Aplicação Prática

Sons acima de **85 dB** podem causar danos auditivos permanentes se a exposição for prolongada.

Exercício de Aplicação

Problema

A potência sonora de uma fonte é 600 W, distribuída uniformemente em um hemisfério. Um ouvinte está a 10 m da fonte e o tímpano tem uma área de 50 mm². Qual a intensidade sonora e a energia transferida por segundo para o tímpano?

Resolução

1. Cálculo da Área de Distribuição (A)

Como a potência é distribuída em um hemisfério:

$$A = 2\pi r^2$$

Onde:

- $r = 10$ m.

$$A = 2\pi(10)^2 = 200\pi \text{ m}^2$$

2. Cálculo da Intensidade Sonora (I)

$$I = \frac{P}{A} = \frac{600 \text{ W}}{200\pi \text{ m}^2} = \frac{3}{\pi} \text{ W/m}^2$$

$$I \approx 0,955 \text{ W/m}^2$$

3. Cálculo da Energia Transferida para o Tímpano (E)

Primeiro, converta a área do tímpano para metros quadrados:

$$A_{\text{tímpano}} = 50 \text{ mm}^2 = 50 \times 10^{-6} \text{ m}^2 = 5 \times 10^{-5} \text{ m}^2$$

A energia transferida por segundo é:

$$E = I \cdot A_{\text{tímpano}}$$

$$E = 0,955 \text{ W/m}^2 \times 5 \times 10^{-5} \text{ m}^2$$

$$E = 4,775 \times 10^{-5} \text{ W}$$

Interpretação

O tímpano do ouvinte recebe aproximadamente $4,775 \times 10^{-5}$ joules de energia sonora por segundo.

4. Altura, Timbre e Harmônicos

Altura do Som

A altura é a percepção que temos se um som é **grave** ou **agudo**, relacionada diretamente com a frequência:

- **Sons Graves:** Frequências baixas (ex: tuba).
- **Sons Agudos:** Frequências altas (ex: flauta).

Harmônicos e Modos de Vibração

Os harmônicos são múltiplos inteiros da frequência fundamental e ocorrem devido aos modos naturais de vibração de instrumentos musicais.

Em Cordas Vibrantes

- Frequência Fundamental (f_1):

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

Onde:

- v : Velocidade da onda na corda.
- L : Comprimento da corda.

Por que Usamos Essa Fórmula?

- A corda fixa nas extremidades forma ondas estacionárias com nós nas extremidades e ventres no meio.

Modos Superiores (n harmônico)

- Frequências dos harmônicos:

$$f_n = n \cdot f_1$$

Onde:

- n : Número inteiro (1, 2, 3, ...).

Em Tubos Sonoros

- **Tubo Aberto:**

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

- Possui ventres nas extremidades.

- **Tubo Fechado em uma Extremidade:**

$$f_n = (2n - 1) \cdot \frac{v}{4L}$$

- Possui um nó em uma extremidade e um ventre na outra.

Exercício de Aplicação

Problema

Um tubo fechado de comprimento 0,5 m ressoa em seu modo fundamental com velocidade do som no ar de 340 m/s. Qual a frequência fundamental?

Resolução

Usando a fórmula para tubo fechado:

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

Substituindo os valores:

$$f_1 = \frac{340 \text{ m/s}}{4 \times 0,5 \text{ m}}$$

$$f_1 = \frac{340}{2}$$

$$f_1 = 170 \text{ Hz}$$

Interpretação

A frequência fundamental é 170 Hz, que é o som mais grave que o tubo pode produzir.

5. Fenômenos Acústicos

Reflexão

A reflexão ocorre quando uma onda sonora encontra uma superfície e retorna ao meio de origem.

- Eco:

Ocorre quando a diferença de tempo entre a emissão do som e sua reflexão é maior que 0,1 segundos:

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

Permite que o ouvido humano distinga o som refletido do original.

- Reverberação:

Quando $0 < \Delta t < 0,1 \text{ s}$, o som refletido se sobrepõe ao original, prolongando sua duração.

Explicação

- A velocidade do som no ar é aproximadamente 340 m/s. Em 0,1 s, o som percorre:

$$d = v \times \Delta t = 340 \text{ m/s} \times 0,1 \text{ s} = 34 \text{ m}$$

Portanto, para ocorrer um eco, o obstáculo deve estar a pelo menos 17 m de distância (ida e volta).

Efeito Doppler

O efeito Doppler é a variação aparente da frequência de uma onda quando há movimento relativo entre a fonte e o observador.

Fórmula Geral

$$f' = f \cdot \frac{v + v_o}{v - v_f}$$

Onde:

- f' : Frequência percebida (Hz).
- f : Frequência emitida (Hz).
- v : Velocidade do som no meio (m/s).
- v_o : Velocidade do observador (m/s) (positiva se se aproximando da fonte).
- v_f : Velocidade da fonte (m/s) (positiva se se afastando do observador).

Interpretação dos Elementos

- $v + v_o$: Ajusta a frequência percebida quando o observador está em movimento.
- $v - v_f$: Ajusta a frequência percebida quando a fonte está em movimento.

Exercício de Aplicação

Problema

Uma ambulância com sirene de frequência 800 Hz aproxima-se de um pedestre a 20 m/s. Velocidade do som no ar: 340 m/s. Qual a frequência percebida pelo pedestre?

Resolução

1. Identificar os Dados

- $f = 800 \text{ Hz}$
- $v = 340 \text{ m/s}$
- $v_o = 0 \text{ m/s}$ (pedestre parado)
- $v_f = -20 \text{ m/s}$ (negativo porque a fonte está se aproximando)

2. Aplicar a Fórmula

$$f' = f \cdot \frac{v + v_o}{v - v_f}$$

$$f' = 800 \cdot \frac{340 + 0}{340 - (-20)}$$

$$f' = 800 \cdot \frac{340}{360}$$

$$f' = 800 \times \frac{17}{18}$$

$$f' \approx 755,56 \text{ Hz}$$

Observação Importante

O resultado acima indica uma frequência menor, o que não faz sentido físico, já que a fonte está se aproximando e, portanto, a frequência percebida deve ser maior.

Correção dos Sinais

Quando a fonte se aproxima, v_f deve ser **positivo**:

$$v_f = +20 \text{ m/s}$$

Agora, recalculando:

$$f' = 800 \cdot \frac{340 + 0}{340 - 20}$$

$$f' = 800 \cdot \frac{340}{320}$$

$$f' = 800 \times \frac{17}{16}$$

$$f' = 800 \times 1,0625$$

$$f' = 850 \text{ Hz}$$

Interpretação Correta

O pedestre perceberá uma frequência de 850 Hz, maior que a emitida, devido à aproximação da ambulância.

6. Aplicações Práticas

Ultrassom

O ultrassom utiliza ondas sonoras com frequências acima do limite audível humano (maiores que 20.000 Hz) para aplicações como diagnóstico médico e limpeza ultrassônica.

Uso em Diagnósticos Médicos

- **Ultrassonografia:** Permite a visualização de órgãos internos sem o uso de radiação ionizante.

Fórmulas Relevantes

- Comprimento de Onda no Ultrassom:

$$\lambda = \frac{v}{f}$$

Onde:

- v : Velocidade do som no tecido humano (~ 1.540 m/s).
- f : Frequência do ultrassom.

Exemplo

Para um ultrassom de 3 MHz:

$$\lambda = \frac{1.540 \times 10^3 \text{ m/s}}{3 \times 10^6 \text{ Hz}} \approx 0,000513 \text{ m}$$

Interpretação

O comprimento de onda é muito pequeno, permitindo a resolução de detalhes finos no diagnóstico.

Ondas de Choque

As ondas de choque ocorrem quando uma fonte se move através de um meio a uma velocidade superior à velocidade do som nesse meio.

Cone de Mach

- Definição:** Forma cônica criada pelas ondas de choque atrás de um objeto supersônico.
- Ângulo de Mach (θ):**

$$\sin \theta = \frac{v_{\text{som}}}{v_{\text{objeto}}}$$

Estrondo Sônico

- O som alto produzido quando a onda de choque passa por um observador, resultando de uma súbita mudança na pressão do ar.

Extra: prefixos comuns

Nome	Símbolo	Fator de Multiplicação	Exemplo de Unidade
Giga	G	10^9	Gigahertz (GHz)
Mega	M	10^6	Megawatt (MW)
Kilo	k	10^3	Quilograma (kg)
Hecto	h	10^2	Hectômetro (hm)
Deca	da	10^1	Decalitre (daL)
Base		10^0	Metro (m)
Deci	d	10^{-1}	Decímetro (dm)
Centi	c	10^{-2}	Centímetro (cm)
Milli	m	10^{-3}	Milímetro (mm)
Micro	μ	10^{-6}	Micrômetro (μm)
Nano	n	10^{-9}	Nanômetro (nm)
Pico	p	10^{-12}	Picosegundo (ps)