PROF. LUIS TEIXEIRA
Física | Matemática

FICHA DE FÍSICA

Acústica

Natureza e propriedades do som

Aluno(a): _____ | **Data:** ___/___/____ | **Prof.:** Luis Teixeira

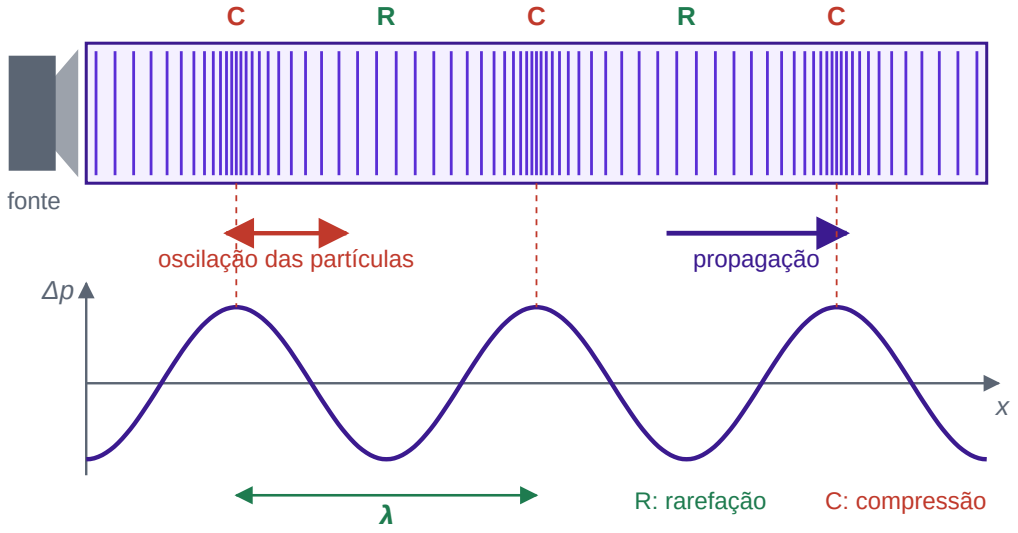
1. TEORIA

Esta é a primeira de três fichas de Acústica. Aqui estudamos o que é o som, como ele se propaga e quais fenômenos ondulatórios ele apresenta. As ondas estacionárias em instrumentos musicais são tratadas na ficha **Cordas vibrantes e tubos sonoros**, e a mudança de frequência causada pelo movimento da fonte ou do observador, na ficha **Efeito Doppler**.

1.1 O som é uma onda mecânica longitudinal

Quando a membrana de um alto-falante avança, empurra a camada de ar à sua frente e cria uma região em que o ar fica comprimido, com pressão um pouco maior que a atmosférica. Quando ela recua, deixa atrás de si uma região de ar rarefeito, com pressão um pouco menor. Essas regiões de **compressão** e de **rarefação** se sucedem e se propagam pelo ar, transportando energia. As moléculas não viajam com a onda: cada uma apenas oscila em torno de sua posição de equilíbrio, na mesma direção em que a onda se propaga.

> **DEFINIÇÃO**
>
> O **som** é uma onda **mecânica** (precisa de um meio material) e, nos fluidos, **longitudinal** (as partículas do meio oscilam na direção de propagação). Ele pode ser descrito pelo deslocamento das partículas ou, de modo equivalente, pela variação de pressão Δp em relação à pressão de equilíbrio.



Onda sonora num tubo: as camadas de ar se aproximam nas compressões (C) e se afastam nas rarefações (R). Embaixo, a variação de pressão Δp ao longo do tubo, no mesmo instante.

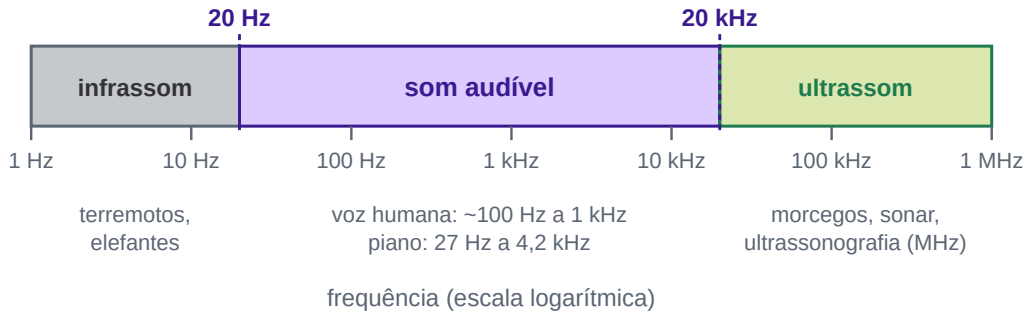
O **comprimento de onda** λ é a distância entre duas compressões consecutivas (ou entre duas rarefações consecutivas). As variações de pressão envolvidas são pequenas: numa conversa comum, Δp é da ordem de 10^{-2} Pa, enquanto a pressão atmosférica vale cerca de 10^{5} Pa.

O som não se propaga no vácuo. Uma campainha elétrica colocada numa campânula de vidro de onde se retira o ar continua vibrando (vê-se o martelo batendo), mas o som vai ficando mais fraco até deixar de ser ouvido. No espaço, uma explosão não seria ouvida por um astronauta próximo; a luz, que é onda eletromagnética, atravessa o vácuo normalmente.

> **ERRO COMUM**
>
> Dizer que o som é sempre longitudinal. Nos gases e nos líquidos ele é longitudinal, porque esses meios não resistem a deformações de cisalhamento. Nos sólidos podem se propagar também ondas mecânicas transversais (as ondas S dos terremotos, por exemplo). Nas questões de vestibular, salvo indicação contrária, o som no ar é tratado como onda longitudinal.

1.2 Faixa audível, infrassom e ultrassom

O ouvido humano percebe, em média, sons com frequências entre **20 Hz e 20 kHz**. Esses limites variam de pessoa para pessoa e o limite superior diminui com a idade. Abaixo de 20 Hz temos o **infrassom**; acima de 20 kHz, o **ultrassom**. Ambos são ondas da mesma natureza que o som audível; a diferença está apenas na frequência.



Faixas de frequência das ondas sonoras. Os limites da faixa audível variam de pessoa para pessoa.

- **Infrassom:** produzido por terremotos, vulcões, ondas do mar e grandes máquinas. Elefantes e baleias usam infrassons para se comunicar a grandes distâncias, já que essas ondas são pouco absorvidas pelo meio.
- **Ultrassom:** cães ouvem até cerca de 45 kHz e morcegos emitem pulsos de 20 kHz a 100 kHz. O morcego localiza obstáculos e presas pelo eco desses pulsos (**ecolocalização**); golfinhos fazem o mesmo na água. O **sonar** dos navios e submarinos emite pulsos sonoros ou ultrassônicos na água e mede o tempo de retorno do eco. A **ultrassonografia** médica usa frequências de 1 MHz a 15 MHz: os ecos produzidos nas superfícies de separação entre tecidos formam a imagem.

1.3 Velocidade de propagação

A velocidade do som depende do meio: de quanto ele resiste à compressão (elasticidade) e de sua densidade. Em geral, o som é mais rápido nos sólidos, menos nos líquidos e menos ainda nos gases.

Meio	Velocidade do som (m/s)
ar a 0 °C	331
ar a 20 °C	343 (nos exercícios, em geral, 340)
hélio (20 °C)	cerca de 1 000
água doce (20 °C)	cerca de 1 480
água do mar	cerca de 1 530
madeira (ao longo das fibras)	cerca de 4 000
vidro	cerca de 5 000
aço	cerca de 5 900
alumínio	cerca de 6 400

Por isso, quem encosta o ouvido no trilho percebe o trem que se aproxima antes de ouvi-lo pelo ar, e uma batida numa barra longa de metal pode ser ouvida duas vezes por quem está na outra ponta: primeiro o som que veio pelo metal, depois o que veio pelo ar.

VELOCIDADE DO SOM NO AR

$$v \approx 331 + 0{,}6\,\theta \quad (\mathrm{m/s},\ \text{com } \theta \text{ em } ^\circ\mathrm{C}) \qquad \frac{v_1}{v_2} = \sqrt{\frac{T_1}{T_2}} \quad (T \text{ em kelvin})$$

A primeira expressão é uma aproximação válida para temperaturas ambientes. A segunda vem da expressão para gases ideais, $v = \sqrt{\dfrac{\gamma R T}{M}}$, em que γ é o coeficiente de Poisson ($1{,}4$ para o ar), R a constante dos gases e M a massa molar. Num mesmo gás, a velocidade do som depende só da temperatura absoluta; não depende da pressão nem da frequência.

Pela expressão para gases ideais, gases de massa molar menor propagam o som mais depressa: no hélio ($M = 4$ g/mol) o som é quase três vezes mais rápido que no ar ($M \approx 29$ g/mol). Esse aumento de velocidade altera as frequências que o trato vocal favorece e torna a voz mais aguda quando se inala hélio.

Como qualquer onda periódica, o som obedece à equação fundamental

$$v = \lambda f.$$

A **frequência é determinada pela fonte**. Quando o som passa de um meio para outro (refração), a frequência não muda; mudam a velocidade e, na mesma proporção, o comprimento de onda. Um som que passa do ar para a água fica com velocidade cerca de 4,4 vezes maior e comprimento de onda 4,4 vezes maior, com a mesma frequência e, portanto, a mesma altura.

ERROS COMUNS

• Achar que sons agudos são mais rápidos que sons graves. No mesmo meio, todos os sons têm a mesma velocidade (se não fosse assim, a música de uma banda distante chegaria com as notas embaralhadas). O que muda com a frequência é o comprimento de onda: $\lambda = v/f$.
• Achar que som mais intenso é mais rápido. A velocidade não depende da amplitude (para sons comuns).
• Usar a temperatura em graus Celsius na relação $v \propto \sqrt{T}$. Nela, T é a temperatura absoluta, em kelvin.

1.4 Qualidades fisiológicas do som

Três características permitem ao ouvido distinguir sons: a **altura**, a **intensidade** (ou volume) e o **timbre**. Cada uma está associada a uma grandeza física da onda.

Qualidade	Grandeza física	Distingue
altura	frequência	som grave (baixa frequência) de som agudo (alta frequência)
intensidade	amplitude (energia transportada)	som forte de som fraco
timbre	forma da onda (harmônicos presentes)	a mesma nota tocada por instrumentos diferentes

Altura. Um som é tanto mais **agudo** (alto) quanto maior a sua frequência, e tanto mais **grave** (baixo) quanto menor. A voz masculina tem, em geral, frequência fundamental menor que a feminina. Na linguagem do dia a dia, falar alto significa falar com volume elevado; em Física, som alto é som agudo. A percepção de altura é logarítmica: duas notas cuja razão de frequências é 2 estão separadas por uma **oitava** e são percebidas como a mesma nota em alturas diferentes. O lá central do piano tem 440 Hz; o lá da oitava acima, 880 Hz, e o da oitava abaixo, 220 Hz. Em geral, o intervalo entre dois sons é medido pela razão f_2/f_1, e não pela diferença.

Intensidade. A **intensidade sonora** I é a potência que atravessa perpendicularmente uma superfície, por unidade de área:

INTENSIDADE SONORA

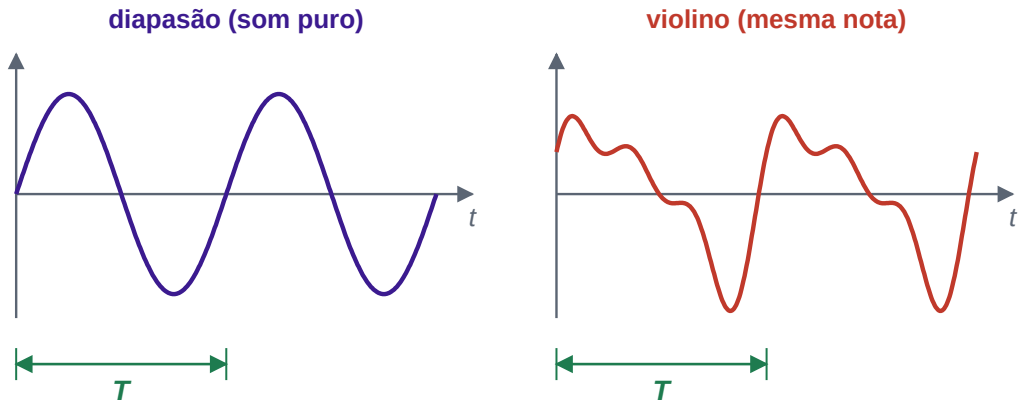
$$I = \frac{P}{A} \quad (\mathrm{W/m^2}) \qquad\qquad I = \frac{P}{4\pi r^2} \quad (\text{fonte puntiforme que emite igualmente em todas as direções})$$

Para uma fonte puntiforme isotrópica, sem perdas, a potência P se distribui sobre a superfície esférica de raio r, cuja área é $4\pi r^2$. A intensidade cai com o **inverso do quadrado da distância**: dobrando a distância, ela fica 4 vezes menor.

A intensidade é proporcional ao quadrado da amplitude da onda e ao quadrado da frequência ($I \propto A^2 f^2$). Para sons de mesma frequência, a comparação de intensidades se reduz à comparação de amplitudes, e é essa associação (som forte, amplitude grande) que os enunciados costumam usar. Como $I \propto A^2$ e $I \propto 1/r^2$, a amplitude de uma onda esférica cai com $1/r$.

A intensidade é uma grandeza física; o **volume** (ou sonoridade) é a sensação que ela produz. O ouvido não é igualmente sensível a todas as frequências: é mais sensível entre 2 kHz e 5 kHz, e um som de 50 Hz precisa ser muito mais intenso que um de 3 kHz para parecer igualmente forte.

Timbre. Um diapasão produz um som praticamente puro, de uma só frequência, cuja onda é senoidal. A mesma nota tocada num violino, numa flauta ou num piano tem a mesma frequência fundamental, mas vem acompanhada de **harmônicos** (frequências $2f$, $3f$, $4f$, ...) com intensidades relativas diferentes em cada instrumento. A superposição produz formas de onda diferentes, com o mesmo período. É o timbre que permite reconhecer a voz de uma pessoa ao telefone. A origem dos harmônicos em cordas e tubos é estudada na ficha **Cordas vibrantes e tubos sonoros**.



Mesma nota (mesmo período T) com formas de onda diferentes: o timbre depende dos harmônicos presentes.

ERROS COMUNS

• Confundir altura com volume. Aumentar o volume muda a intensidade; a altura só muda se a frequência mudar.
• Achar que o timbre está ligado à frequência fundamental. Dois instrumentos tocando a mesma nota têm a mesma fundamental e timbres diferentes.
• Achar que a intensidade cai com $1/r$. Quem cai com $1/r$ é a amplitude; a intensidade cai com $1/r^2$.

1.5 Nível sonoro: a escala em decibéis

O ouvido humano responde a intensidades que vão de cerca de 10^{-12} W/m² (o som mais fraco audível a 1 kHz) até cerca de 1 W/m², valor em que o som passa a causar dor. São doze ordens de grandeza. Além disso, a sensação de volume cresce aproximadamente com o logaritmo da intensidade (lei de Weber-Fechner). Por isso se usa uma escala logarítmica:

NÍVEL DE INTENSIDADE SONORA

$$\beta = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad (\text{dB}) \qquad I_0 = 10^{-12}\ \text{W/m}^2 \ (\text{limiar de audibilidade})$$

Inversamente, $I = I_0 \cdot 10^{\beta/10}$. O limiar de audibilidade corresponde a 0 dB e o **limiar da dor**, $I \approx 1$ W/m², a 120 dB.

A unidade original é o bel (B), em homenagem a Graham Bell; 1 B $= 10$ dB. Valores típicos:

Fonte (distância típica)	I (W/m²)	β (dB)
limiar de audibilidade	10^{-12}	0
folhas ao vento, respiração	10^{-11}	10
sussurro	10^{-10} a 10^{-9}	20 a 30
conversa normal	10^{-6}	60
trânsito pesado	10^{-4} a 10^{-3}	80 a 90
show de rock, perto das caixas	10^{-1}	110
limiar da dor	1	120
decolagem de jato, a 30 m	10^{2}	140

A exposição prolongada a níveis acima de 85 dB pode causar perda auditiva permanente; por isso a legislação trabalhista limita o tempo de exposição e exige protetores auriculares em ambientes ruidosos.

Operações com decibéis. Como $\beta_2 - \beta_1 = 10 \log \dfrac{I_2}{I_1}$, as variações de nível dependem apenas da **razão** entre as intensidades. Use $\log 2 \approx 0{,}30$ e $\log 3 \approx 0{,}48$.

A intensidade é	O nível sonoro
multiplicada por 2	aumenta $10 \log 2 \approx 3$ dB
multiplicada por 10	aumenta 10 dB
multiplicada por 100	aumenta 20 dB
multiplicada por 10^n	aumenta $10n$ dB
dividida por 2	diminui 3 dB
dividida por 4 (distância dobrada, fonte puntiforme)	diminui $10 \log 4 \approx 6$ dB
dividida por 100 (distância multiplicada por 10)	diminui 20 dB

Várias fontes. Sons de fontes independentes (não coerentes) somam **intensidades**, não níveis. Com N fontes iguais, cada uma produzindo nível β_1 num ponto, a intensidade total é NI_1 e

$$\beta_N = \beta_1 + 10 \log N.$$

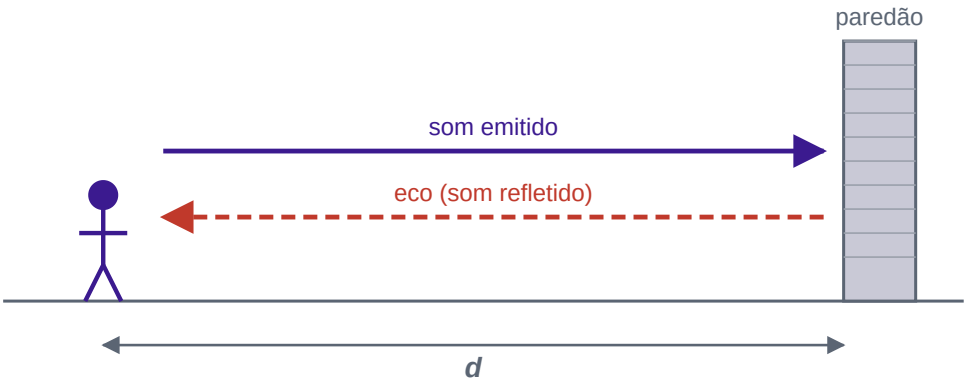
Duas fontes de 80 dB produzem 83 dB, e não 160 dB; dez fontes de 80 dB produzem 90 dB.

ERROS COMUNS

- Somar decibéis. Os níveis não se somam; somam-se as intensidades e depois se calcula o nível.
- Achar que 0 dB significa ausência de som. Significa $I = I_0$, o limiar de audibilidade. Sons de nível negativo existem (são mais fracos que I_0), apenas não são ouvidos.
- Achar que dobrar o nível (de 60 dB para 120 dB) dobra a intensidade. A intensidade fica 10^6 vezes maior.

1.6 Reflexão: eco, reverberação e sonar

O som se reflete ao encontrar um obstáculo, obedecendo às mesmas leis de reflexão das demais ondas (ângulo de reflexão igual ao de incidência). Superfícies duras e lisas (concreto, azulejo) refletem bem; superfícies porosas e macias (cortinas, espuma, carpete) absorvem boa parte da energia sonora.



O som refletido percorre o caminho de ida e volta, $2d$.

O ouvido humano só distingue dois sons breves como separados se o intervalo entre eles for de pelo menos cerca de $0{,}1$ s (**persistência auditiva**). Se o som refletido chega depois desse intervalo, ouve-se um **eco**, isto é, a repetição do som emitido. Para um obstáculo à distância d, o som percorre $2d$ (ida e volta):

ECO

$$\Delta t = \frac{2d}{v} \qquad \Delta t \geq 0{,}1\ \text{s} \Rightarrow d \geq \frac{v \cdot 0{,}1}{2} = \frac{340 \cdot 0{,}1}{2} = 17\ \text{m}$$

Com $v = 340$ m/s, só há eco nítido se o obstáculo estiver a pelo menos **17 m** do ouvinte.

- **Reverberação:** se o obstáculo está a menos de 17 m, o som refletido chega antes de a sensação do som direto se extinguir e os dois se fundem; o som parece prolongado. Em salas fechadas há muitas reflexões sucessivas, e o **tempo de reverberação** (tempo para o nível cair 60 dB) é um parâmetro importante da acústica de auditórios: se for muito curto, a sala soa abafada; se for muito longo, a fala fica confusa.
- **Reforço:** se o som refletido chega praticamente junto com o direto (obstáculo muito próximo), há apenas um aumento da intensidade percebida.
- **Sonar e ecolocalização:** a distância até o obstáculo é obtida medindo o tempo de ida e volta do pulso: $d = \dfrac{v\,\Delta t}{2}$. Na água do mar usa-se $v \approx 1\,500$ m/s.

ERRO COMUM

Esquecer o fator 2. O tempo medido no eco e no sonar corresponde à ida e à volta; a distância ao obstáculo é a metade do caminho percorrido pelo som.

1.7 Refração do som

A refração ocorre quando o som passa de um meio para outro ou atravessa um meio em que a velocidade varia de ponto a ponto. A frequência se mantém e o comprimento de onda varia na mesma proporção que a velocidade:

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{v_1}{v_2}.$$

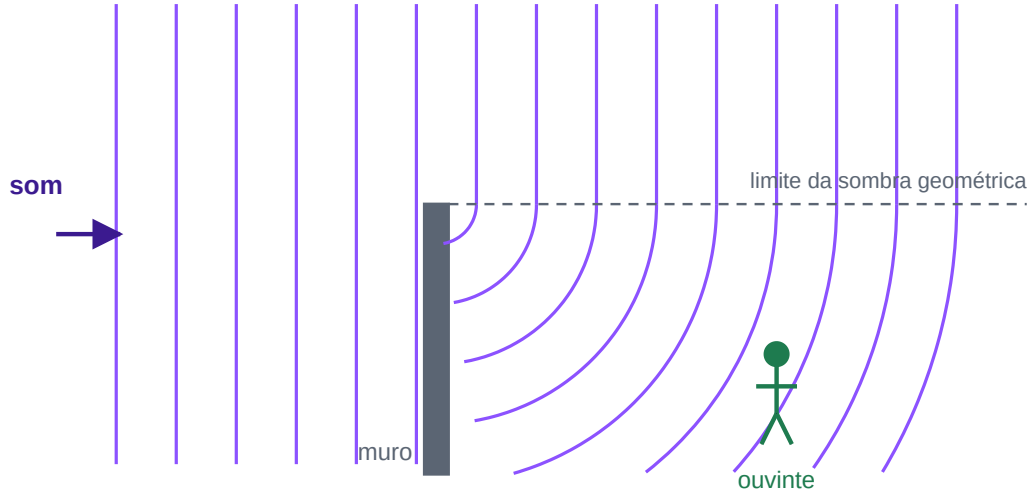
No ar, a velocidade cresce com a temperatura, e a direção de propagação se curva para as regiões de menor

velocidade. Durante o dia, o solo aquecido deixa o ar mais quente embaixo: o som se curva para cima e se perde. À noite, sobre um lago ou um campo, o ar junto ao solo costuma ser mais frio que o de cima: o som se curva de volta para baixo, e conversas e ruídos distantes são ouvidos com mais clareza.

Na passagem do ar para a água, a maior parte da energia sonora é refletida, por causa da grande diferença entre os meios; por isso quem está submerso ouve mal os sons produzidos fora da água.

1.8 Difração

A **difração** é a capacidade de uma onda contornar obstáculos e de se espalhar ao passar por aberturas. Ela é importante quando o comprimento de onda é **comparável ou maior** que as dimensões do obstáculo ou da abertura, e praticamente desprezível quando o comprimento de onda é muito menor.



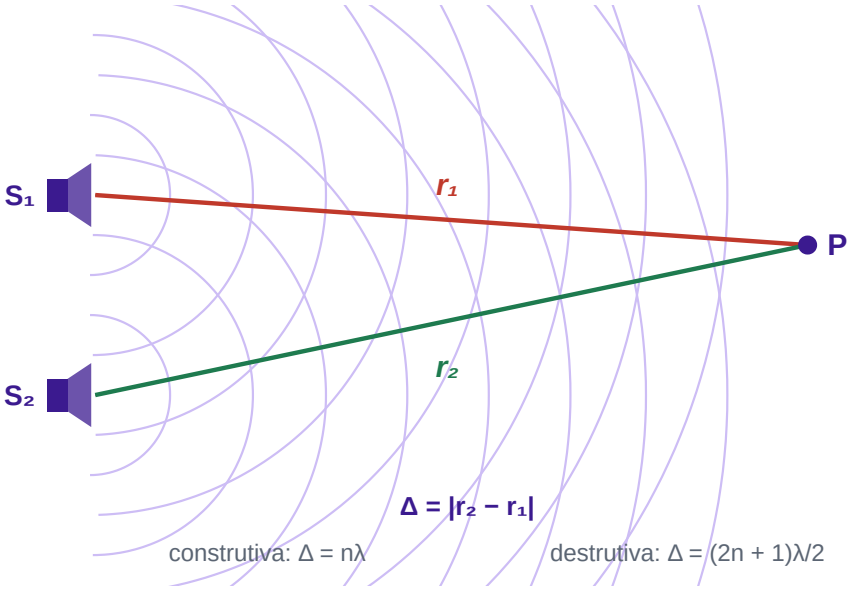
Ao passar pela borda do muro, as frentes de onda se curvam e o som atinge a região de sombra geométrica (vista de cima).

Os sons audíveis no ar têm comprimentos de onda entre $\dfrac{340}{20\,000} = 1{,}7$ cm e $\dfrac{340}{20} = 17$ m, a mesma ordem de grandeza de portas, janelas, muros e pessoas. A luz visível tem comprimentos de onda de 400 nm a 700 nm, cerca de um milhão de vezes menores. Por isso ouvimos uma pessoa que fala atrás de um muro ou do outro lado de uma porta aberta, mas não a vemos: o som contorna o obstáculo e a luz praticamente não.

- Sons graves (grande λ) difratam mais que os agudos. Da rua, ouve-se principalmente o grave da música de uma festa ao lado.
- Na ultrassonografia usam-se frequências de megahertz porque, com comprimentos de onda menores que 1 mm, a difração é pequena e os detalhes da imagem ficam nítidos.

1.9 Interferência

Quando duas ondas sonoras se superpõem num ponto, o efeito resultante é a soma dos efeitos de cada uma (**princípio da superposição**). Considere duas fontes S_1 e S_2 **coerentes**, isto é, de mesma frequência e com diferença de fase constante; aqui, salvo aviso, elas estão em fase. Num ponto P, a uma distância r_1 de S_1 e r_2 de S_2, o que decide o resultado é a **diferença de caminho** $\Delta = |r_2 - r_1|$.



Duas fontes coerentes em fase (os arcos representam as compressões de cada onda). O resultado em P depende da diferença de caminho Δ.

INTERFERÊNCIA DE DUAS FONTES EM FASE

$$\text{construtiva: } \Delta = n\lambda \qquad \text{destrutiva: } \Delta = (2n+1)\frac{\lambda}{2} \qquad (n = 0, 1, 2, \ldots)$$

Na interferência construtiva, as compressões das duas ondas chegam juntas e a amplitude é a soma das amplitudes (som reforçado). Na destrutiva, a compressão de uma chega com a rarefação da outra e as amplitudes se subtraem; se forem iguais, o som se anula naquele ponto. Se as fontes estiverem em **oposição de fase**, as condições se invertem.

Um ouvinte que caminha diante de dois alto-falantes ligados ao mesmo gerador de áudio percebe regiões de som forte e de som fraco alternadas. Nos **fones com cancelamento ativo de ruído**, um microfone capta o ruído externo e o circuito emite um som de mesma amplitude e fase oposta, que interfere destrutivamente com o ruído dentro do ouvido. A interferência é também o mecanismo das **ondas estacionárias**, base da ficha Cordas vibrantes e tubos sonoros.

ERROS COMUNS

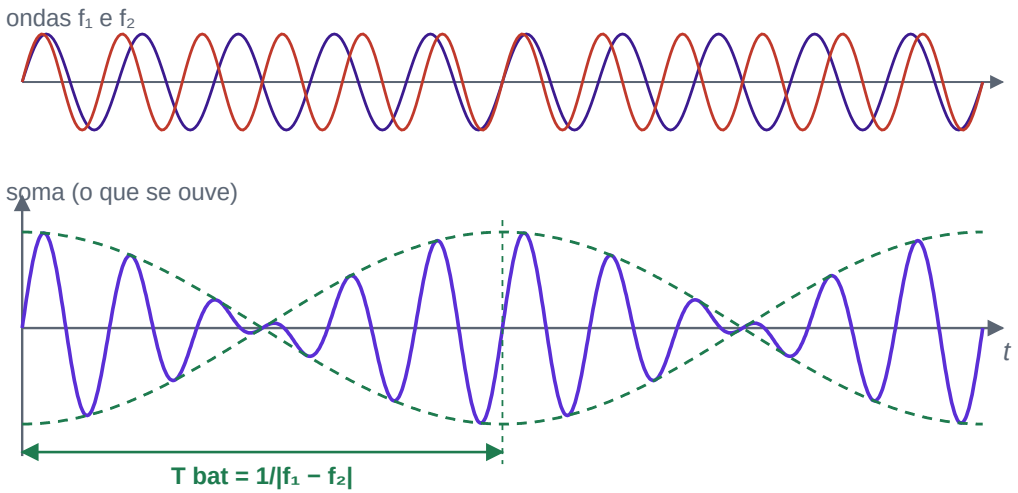
• Aplicar as condições de interferência a fontes independentes (dois carros, duas pessoas falando). Sem coerência não há figura de interferência estável; somam-se as intensidades, como no item 1.5.
• Esquecer que a interferência destrutiva não destrói energia: ela é redistribuída, e o que falta nos pontos de mínimo aparece nos pontos de máximo.

1.10 Batimentos

Quando dois sons de mesma amplitude e frequências **próximas**, f_1 e f_2, se superpõem, as ondas ficam alternadamente em fase e em oposição de fase. O ouvinte percebe um som de frequência intermediária, $\dfrac{f_1 + f_2}{2}$, cuja intensidade aumenta e diminui periodicamente: são os **batimentos**. Matematicamente,

$$\operatorname{sen}(2\pi f_1 t) + \operatorname{sen}(2\pi f_2 t) = 2\cos\left(2\pi\,\frac{f_1 - f_2}{2}\,t\right)\operatorname{sen}\left(2\pi\,\frac{f_1 + f_2}{2}\,t\right).$$

O fator em cosseno funciona como uma amplitude que varia lentamente. Como o volume é máximo tanto quando esse fator vale $+2$ quanto -2, o número de máximos de intensidade por segundo é o dobro da frequência do cosseno.



Superposição de duas ondas de frequências próximas: a amplitude resultante varia periodicamente (envoltória tracejada).

FREQUÊNCIA DE BATIMENTO

$$f_{bat} = |f_1 - f_2| \qquad T_{bat} = \frac{1}{|f_1 - f_2|}$$

O ouvido percebe batimentos como variações de volume quando $|f_1 - f_2|$ é menor que cerca de 10 Hz a 15 Hz; com diferenças maiores, os dois sons passam a ser percebidos como um som áspero ou como duas notas distintas.

Afinação de instrumentos. O músico toca a nota junto com um diapasão (ou um afinador) e ajusta a tensão da corda. Se os batimentos ficam mais lentos, a frequência da corda está se aproximando da do diapasão; quando desaparecem, as frequências são iguais. Os batimentos dão apenas a diferença $|f_1 - f_2|$; para saber se a corda está acima ou abaixo do diapasão, é preciso observar o que acontece com os batimentos quando a frequência da corda é alterada num sentido conhecido.

ERRO COMUM

Usar a fórmula de batimento com $f_1 + f_2$ ou com a média. A frequência **percebida** é a média; a frequência **de batimento** (número de pulsações de volume por segundo) é a diferença.

1.11 Ressonância

Todo corpo capaz de vibrar tem frequências próprias (**frequências naturais**). Se ele recebe estímulos periódicos com frequência igual a uma delas, a energia transferida a cada ciclo se acumula e a amplitude de vibração cresce muito: é a **ressonância**.

- Uma taça de cristal pode se quebrar quando um cantor sustenta, com grande intensidade, uma nota de frequência igual à frequência natural da taça.
- Um diapasão montado sobre uma caixa de madeira aberta numa das faces (caixa de ressonância) soa muito mais forte; o mesmo papel é desempenhado pelo corpo do violão.
- Dois diapasões iguais: ao percutir um deles, o outro, próximo, passa a vibrar sozinho.
- A ponte de Tacoma Narrows (Estados Unidos, 1940) entrou em oscilações de torção cada vez maiores sob a ação de um vento de velocidade moderada e desabou. O caso costuma ser citado como exemplo de ressonância; a explicação atual envolve um fenômeno aerodinâmico (a interação do vento com o movimento do tabuleiro realimentava a oscilação), mas a lição para os projetos de engenharia é a mesma: estruturas precisam ser projetadas para não acumular energia de excitações periódicas.

- Soldados que marcham sobre uma ponte costumam quebrar o passo, para que a frequência das passadas não excite uma frequência natural da estrutura.

As frequências naturais de cordas e de colunas de ar, e a ressonância em tubos sonoros, são o assunto da ficha **Cordas vibrantes e tubos sonoros**.

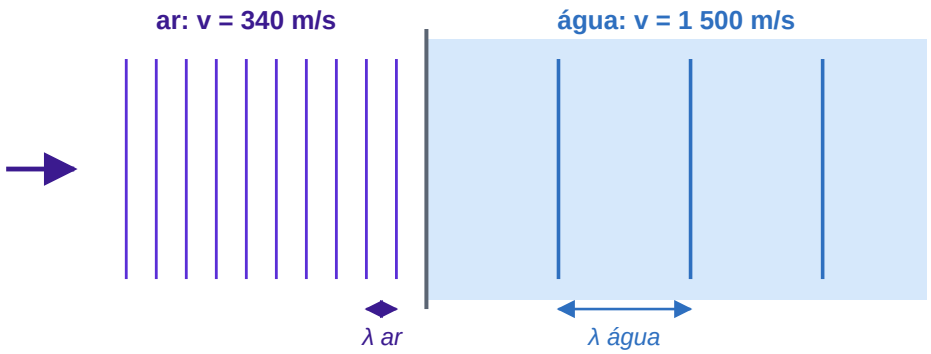
1.12 Quadro-resumo

Assunto	Fórmula / regra
Natureza	onda mecânica, longitudinal nos fluidos; não se propaga no vácuo
Faixa audível	20 Hz a 20 kHz; abaixo, infrassom; acima, ultrassom
Equação fundamental	$v = \lambda f$; a frequência não muda na refração
Velocidade no ar	$v \approx 331 + 0{,}6\,\theta$ (m/s); $v \propto \sqrt{T}$ (T em K)
Altura	frequência (grave: baixa; agudo: alta); oitava: razão 2
Intensidade	$I = \dfrac{P}{A}$; fonte puntiforme: $I = \dfrac{P}{4\pi r^2}$; $I \propto A^2$
Timbre	forma da onda (harmônicos)
Nível sonoro	$\beta = 10 \log \dfrac{I}{I_0}$, $I_0 = 10^{-12}$ W/m²; $\times 2$: $+3$ dB; $\times 10$: $+10$ dB
N fontes iguais (incoerentes)	$\beta_N = \beta_1 + 10 \log N$
Eco / sonar	$d = \dfrac{v\,\Delta t}{2}$; eco nítido no ar: $d \geq 17$ m
Difração	importante se λ for comparável às dimensões do obstáculo
Interferência (fontes em fase)	construtiva: $\Delta = n\lambda$; destrutiva: $\Delta = (2n+1)\dfrac{\lambda}{2}$
Batimentos	$f_{bat} = \lvert f_1 - f_2 \rvert$
Ressonância	excitação na frequência natural: amplitude máxima

2. EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

Salvo indicação contrária, use $v = 340$ m/s para o som no ar e $g = 10$ m/s².

Exercício resolvido 1. Um alto-falante emite um som de 500 Hz no ar. O som atinge a superfície de uma piscina e parte dele passa para a água, onde a velocidade do som é $1\,500$ m/s. Determine (a) o comprimento de onda no ar; (b) a frequência e o comprimento de onda na água.



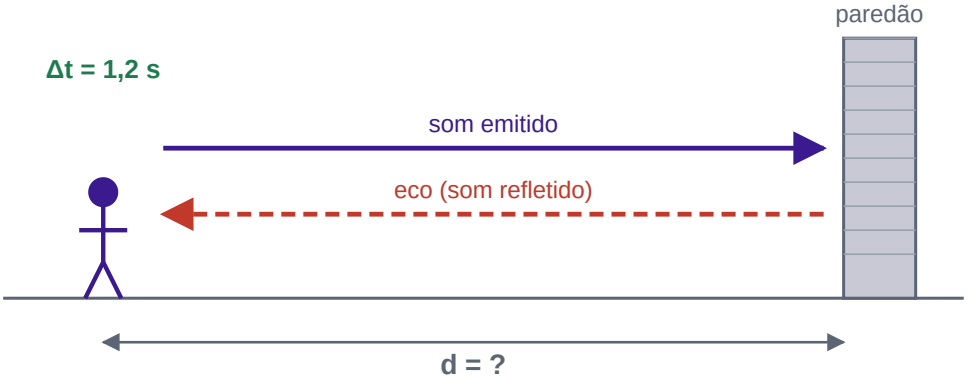
Na refração, a frequência se mantém e o comprimento de onda varia na mesma proporção que a velocidade (figura fora de escala).

Resolução:

1. **(a)** $\lambda_{ar} = \dfrac{v_{ar}}{f} = \dfrac{340}{500} = 0{,}68$ m.
2. **(b)** A frequência é determinada pela fonte e não muda na refração: $f = 500$ Hz.
3. $\lambda_{água} = \dfrac{1\,500}{500} = 3{,}0$ m. A razão $\dfrac{3{,}0}{0{,}68} \approx 4{,}4$ é a mesma razão entre as velocidades.

Resposta: (a) 0,68 m; (b) 500 Hz e 3,0 m

Exercício resolvido 2. Uma pessoa, parada diante de um paredão, bate palmas e ouve o eco $1{,}2$ s depois. (a) A que distância está o paredão? (b) Qual é a menor distância do paredão para que ela ainda perceba o eco separado do som original?

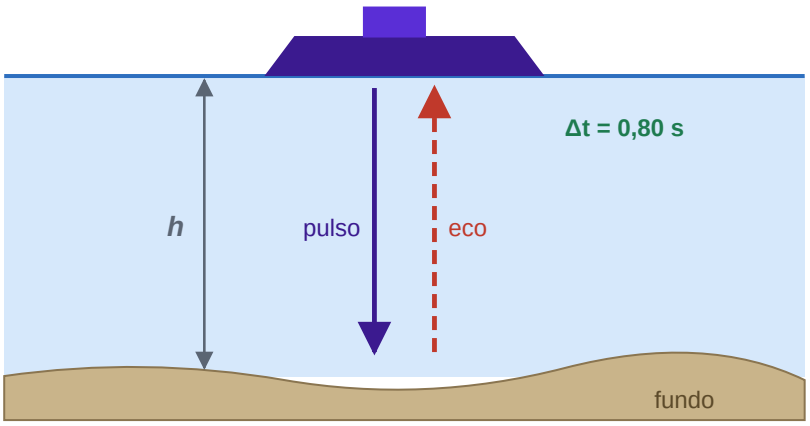


Resolução:

1. **Caminho do som:** ida e volta, $2d$, percorrido em $1{,}2$ s: $2d = 340 \cdot 1{,}2 = 408$ m.
2. **(a)** $d = 204$ m.
3. **(b)** Pela persistência auditiva, o eco precisa chegar pelo menos $0{,}1$ s depois: $2d_{mín} = 340 \cdot 0{,}1 = 34$ m, logo $d_{mín} = 17$ m.

Resposta: (a) 204 m; (b) 17 m

Exercício resolvido 3. O sonar de um navio emite um pulso de ultrassom de 30 kHz verticalmente para baixo e recebe o eco refletido no fundo do mar $0{,}80$ s depois. A velocidade do som na água do mar é $1\,500$ m/s. (a) Qual é a profundidade do local? (b) Qual é o comprimento de onda do pulso na água?



Resolução:

1. **(a)** O pulso desce e sobe: $2h = v\,\Delta t = 1\,500 \cdot 0{,}80 = 1\,200$ m, então $h = 600$ m.
2. **(b)** $\lambda = \dfrac{v}{f} = \dfrac{1\,500}{30\,000} = 0{,}05$ m $= 5$ cm.

Resposta: (a) 600 m; (b) 5 cm

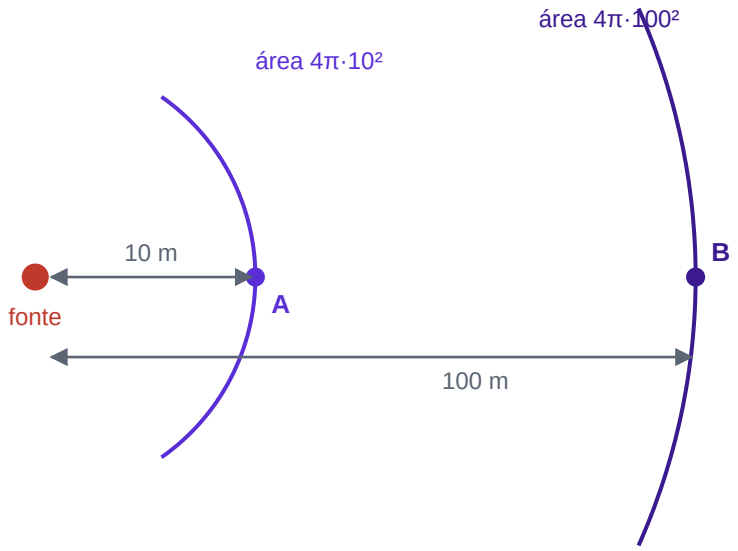
Exercício resolvido 4. (a) Calcule a velocidade do som no ar a 15 °C e a 35 °C, usando $v \approx 331 + 0{,}6\,\theta$. (b) Confira o segundo valor pela relação $v \propto \sqrt{T}$, partindo do primeiro. (c) Qual é o comprimento de onda da nota lá (440 Hz) em cada caso?

Resolução:

1. **(a)** $v_{15} = 331 + 0{,}6 \cdot 15 = 340$ m/s e $v_{35} = 331 + 0{,}6 \cdot 35 = 352$ m/s.
2. **(b)** Em kelvin, $T_1 = 288$ K e $T_2 = 308$ K: $v_{35} = 340\sqrt{\dfrac{308}{288}} = 340 \cdot 1{,}034 \approx 352$ m/s. As duas expressões concordam.
3. **(c)** $\lambda_{15} = \dfrac{340}{440} \approx 0{,}773$ m e $\lambda_{35} = \dfrac{352}{440} = 0{,}800$ m.
4. A frequência é a da fonte. Num instrumento de sopro, porém, o comprimento de onda é fixado pelo tubo, e é a frequência que muda com a temperatura (ficha Cordas vibrantes e tubos sonoros).

Resposta: (a) 340 m/s e 352 m/s; (c) cerca de 0,77 m e 0,80 m

Exercício resolvido 5. Uma fonte sonora puntiforme emite, igualmente em todas as direções, uma potência sonora de 4π W (cerca de $12{,}6$ W). Desprezando a absorção pelo ar, calcule a intensidade e o nível sonoro no ponto A, a 10 m da fonte, e no ponto B, a 100 m.



A mesma potência se espalha por superfícies esféricas cada vez maiores (figura fora de escala).

Resolução:

1. **Em A:** $I_A = \dfrac{P}{4\pi r^2} = \dfrac{4\pi}{4\pi \cdot 10^2} = 10^{-2}$ W/m².
2. $\beta_A = 10 \log \dfrac{10^{-2}}{10^{-12}} = 10 \log 10^{10} = 100$ dB.
3. **Em B:** a distância é 10 vezes maior e a intensidade, 100 vezes menor: $I_B = 10^{-4}$ W/m² e $\beta_B = 10 \log 10^{8} = 80$ dB.
4. Multiplicar a distância por 10 reduz o nível em $10 \log 100 = 20$ dB.

Resposta: A: 10^{-2} W/m² e 100 dB; B: 10^{-4} W/m² e 80 dB

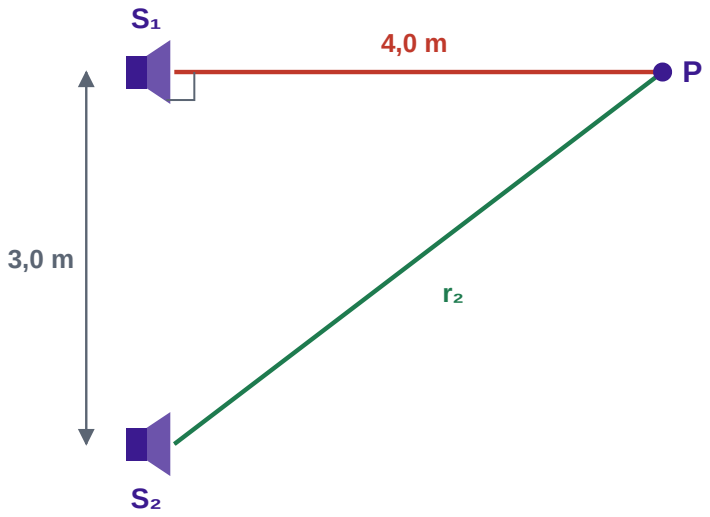
Exercício resolvido 6. Numa oficina, uma máquina produz, num ponto P, nível sonoro de 80 dB. Considere que as máquinas são iguais, ficam praticamente no mesmo lugar e não emitem sons coerentes. Qual é o nível em P quando funcionam (a) duas máquinas; (b) dez máquinas? (c) Quantas máquinas seriam necessárias para atingir 100 dB? Use $\log 2 = 0{,}30$.

Resolução:

1. **Intensidade de uma máquina:** $I_1 = 10^{-12} \cdot 10^{8} = 10^{-4}$ W/m².
2. **(a)** As intensidades se somam: $I = 2 \cdot 10^{-4}$ W/m² e $\beta = 80 + 10 \log 2 = 80 + 3 = 83$ dB.
3. **(b)** $I = 10 \cdot 10^{-4} = 10^{-3}$ W/m² e $\beta = 80 + 10 \log 10 = 90$ dB.
4. **(c)** 100 dB corresponde a $I = 10^{-2}$ W/m², isto é, $\dfrac{10^{-2}}{10^{-4}} = 100$ vezes a intensidade de uma máquina: 100 máquinas.

Resposta: (a) 83 dB; (b) 90 dB; (c) 100 máquinas

Exercício resolvido 7. Dois alto-falantes S_1 e S_2, ligados ao mesmo amplificador, emitem em fase sons de mesma frequência e mesma amplitude. Eles estão a $3{,}0$ m um do outro, e um ouvinte em P está a $4{,}0$ m de S_1, como mostra a figura. (a) Que tipo de interferência ocorre em P para $f = 170$ Hz? (b) E para $f = 340$ Hz? (c) Quais frequências entre 20 Hz e 1 000 Hz produzem interferência destrutiva em P?



Resolução:

1. **Distâncias:** o triângulo S_1S_2P é retângulo em S_1: $r_2 = \sqrt{3{,}0^2 + 4{,}0^2} = 5{,}0$ m. A diferença de caminho é $\Delta = 5{,}0 - 4{,}0 = 1{,}0$ m.
2. **(a)** $\lambda = \dfrac{340}{170} = 2{,}0$ m, e $\Delta = 1{,}0\text{ m} = \dfrac{\lambda}{2}$: interferência **destrutiva**.
3. **(b)** $\lambda = 1{,}0$ m, e $\Delta = \lambda$: interferência **construtiva**.
4. **(c)** Destrutiva: $\Delta = (2n+1)\dfrac{\lambda}{2} = (2n+1)\dfrac{v}{2f} \Rightarrow f = (2n+1)\dfrac{v}{2\Delta} = (2n+1)\cdot 170$ Hz. Abaixo de 1 000 Hz: 170 Hz, 510 Hz e 850 Hz.

Resposta: (a) destrutiva; (b) construtiva; (c) 170 Hz, 510 Hz e 850 Hz

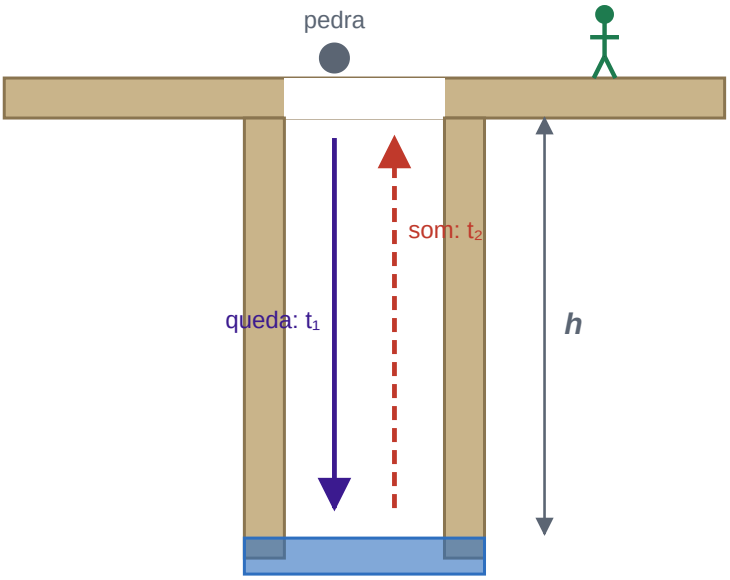
Exercício resolvido 8. Para afinar a corda lá de um violão, um músico a toca junto com um diapasão de 440 Hz e ouve 3 batimentos por segundo. Ao aumentar levemente a tração da corda, o que aumenta a sua frequência, os batimentos ficam mais lentos. (a) Qual era a frequência da corda? (b) Qual é o intervalo entre dois máximos de volume consecutivos? (c) O que o músico deve fazer para terminar a afinação?

Resolução:

1. **Possibilidades:** $|f - 440| = 3 \Rightarrow f = 437$ Hz ou $f = 443$ Hz.
2. **(a)** Aumentando f, a diferença diminuiu. Se fosse 443 Hz, a diferença aumentaria. Logo $f = 437$ Hz.
3. **(b)** $T_{bat} = \dfrac{1}{3}$ s $\approx 0{,}33$ s.
4. **(c)** Continuar aumentando a tração até os batimentos desaparecerem, o que indica $f = 440$ Hz.

Resposta: (a) 437 Hz; (b) cerca de 0,33 s; (c) aumentar a tração até cessarem os batimentos

Exercício resolvido 9. Uma pedra é abandonada na boca de um poço seco, e o som do impacto no fundo é ouvido $3{,}0$ s depois. Despreze a resistência do ar. (a) Qual é a profundidade do poço? (b) Qual seria o valor obtido se o tempo de propagação do som fosse desprezado? Use $\sqrt{5\,440} \approx 73{,}76$.

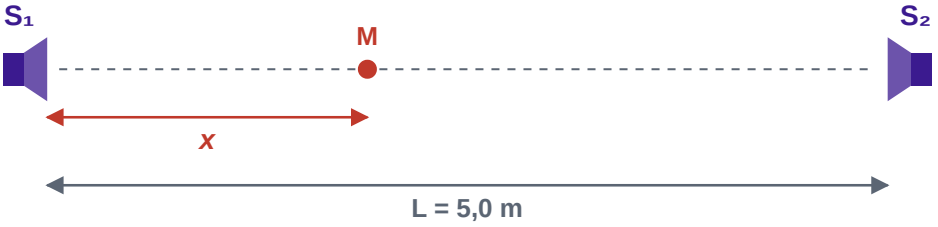


Resolução:

1. **Dois trechos:** o tempo total é a queda da pedra, t_1, mais a subida do som, t_2: $t_1 + t_2 = 3{,}0$ s, com $h = 5t_1^2$ e $h = 340\,t_2$.
2. **Equação em t_1:** $t_2 = \dfrac{5t_1^2}{340} = \dfrac{t_1^2}{68}$. Então $t_1 + \dfrac{t_1^2}{68} = 3 \Rightarrow t_1^2 + 68\,t_1 - 204 = 0$.
3. **Raiz positiva:** $t_1 = \dfrac{-68 + \sqrt{68^2 + 4\cdot 204}}{2} = \dfrac{-68 + \sqrt{5\,440}}{2} \approx \dfrac{-68 + 73{,}76}{2} = 2{,}88$ s.
4. **(a)** $h = 5 \cdot 2{,}88^2 \approx 41$ m. Conferência: $t_2 = \dfrac{41{,}4}{340} \approx 0{,}12$ s e $2{,}88 + 0{,}12 = 3{,}0$ s.
5. **(b)** Com $t_1 = 3{,}0$ s: $h = 5 \cdot 9 = 45$ m, valor cerca de 9% acima do correto.

Resposta: (a) cerca de 41 m; (b) 45 m

Exercício resolvido 10 [nível ITA/IME]. Dois alto-falantes S_1 e S_2, voltados um para o outro e separados por $L = 5{,}0$ m, emitem em fase sons de 170 Hz e mesma amplitude. Um microfone M é deslocado sobre o segmento S_1S_2, a uma distância x de S_1. Despreze a variação de amplitude com a distância. (a) Em que posições o microfone registra mínimos de intensidade? (b) Qual é a distância entre dois mínimos consecutivos? (c) Onde ficam os mínimos se a ligação de S_2 for invertida (fontes em oposição de fase)?



Resolução:

1. **Comprimento de onda:** $\lambda = \dfrac{340}{170} = 2{,}0$ m.
2. **Diferença de caminho:** $r_1 = x$ e $r_2 = L - x$, logo $\Delta = |L - 2x| = |5{,}0 - 2x|$, que varia de 0 (no ponto médio) a 5,0 m (nas fontes).

3 **(a)** Mínimos: $|5{,}0 - 2x| = (2n+1)\cdot 1{,}0$, isto é, $1{,}0$ m ou $3{,}0$ m (o valor $5{,}0$ m corresponde às próprias fontes). Para $5 - 2x = \pm 1$: $x = 2{,}0$ m ou $3{,}0$ m; para $5 - 2x = \pm 3$: $x = 1{,}0$ m ou $4{,}0$ m.

4 **(b)** Deslocar M de δ altera Δ de 2δ. Entre dois mínimos consecutivos Δ varia λ, logo $\delta = \dfrac{\lambda}{2} = 1{,}0$ m. Os máximos ficam no meio: $x = 0{,}5;\ 1{,}5;\ 2{,}5;\ 3{,}5;\ 4{,}5$ m.

5 **(c)** Com as fontes em oposição de fase, as condições se invertem: os mínimos passam para $x = 0{,}5;\ 1{,}5;\ 2{,}5;\ 3{,}5;\ 4{,}5$ m, incluindo o ponto médio.

6 A distribuição de máximos e mínimos fixos, separados por $\lambda/2$, é uma **onda estacionária**, estudada na ficha Cordas vibrantes e tubos sonoros.

Resposta: (a) $x = 1{,}0;\ 2{,}0;\ 3{,}0;\ 4{,}0$ m; (b) 1,0 m; (c) $x = 0{,}5;\ 1{,}5;\ 2{,}5;\ 3{,}5;\ 4{,}5$ m

3. EXERCÍCIOS PROPOSTOS

Quando necessário, use $v = 340$ m/s para o som no ar, $g = 10$ m/s², $I_0 = 10^{-12}$ W/m², $\log 2 = 0{,}30$ e $\log 3 = 0{,}48$.

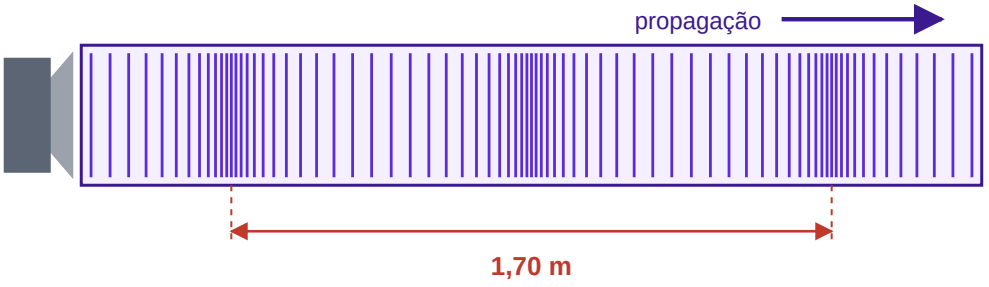
Nível 1 básico

01 Num filme de ficção científica, a explosão de uma nave no espaço é acompanhada de um estrondo ouvido pelos tripulantes de outra nave próxima. Do ponto de vista da Física, essa cena é incorreta porque o som:

(A) tem frequência baixa demais para ser ouvida no espaço.
(B) é uma onda transversal.
(C) é absorvido pela radiação solar.
(D) é uma onda mecânica e precisa de um meio material para se propagar.
(E) tem velocidade menor que a da luz.

02 (a) Classifique como infrassom, som audível ou ultrassom, para um ser humano, ondas sonoras de 8 Hz, 200 Hz, 15 kHz e 50 kHz. (b) Qual é o comprimento de onda, no ar, da onda de 50 kHz?

03 A figura representa, num certo instante, a distribuição das camadas de ar num tubo por onde se propaga uma onda sonora, com as regiões de compressão e de rarefação. Determine o comprimento de onda e a frequência desse som.

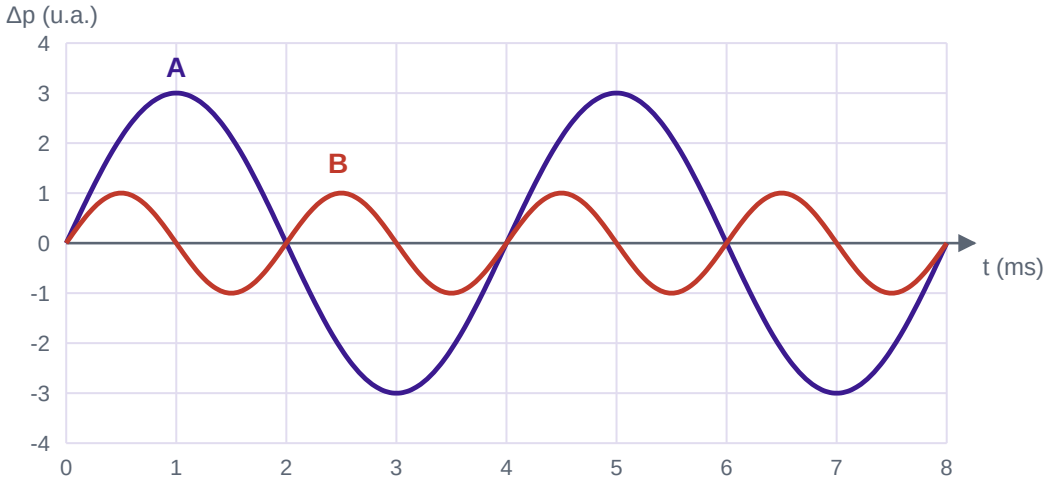


04 Uma flauta e um violino tocam a mesma nota musical, com o mesmo volume. Um ouvinte consegue distinguir os dois instrumentos porque os sons diferem quanto:

(A) à altura.
(B) à intensidade.
(C) ao timbre.
(D) à frequência fundamental.
(E) à velocidade de propagação.

05 Durante uma tempestade, uma pessoa vê um relâmpago e ouve o trovão correspondente $6{,}0$ s depois. (a) A que distância caiu o raio? (b) Por que se pode desprezar o tempo que a luz leva para chegar à pessoa?

06 O gráfico mostra a variação de pressão em função do tempo, num mesmo ponto do ar, para dois sons A e B (pressão em unidades arbitrárias).



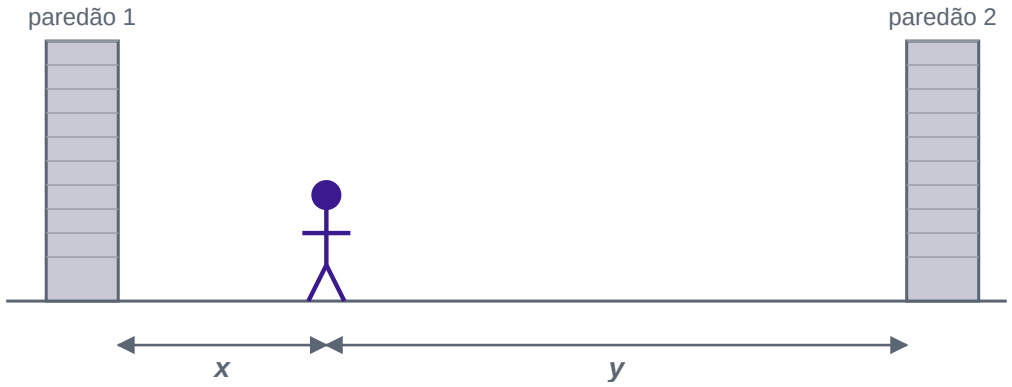
Comparado com o som A, o som B é:

(A) mais agudo e mais intenso.
(B) mais agudo e menos intenso.
(C) mais grave e mais intenso.
(D) mais grave e menos intenso.
(E) de mesma altura e menos intenso.

Nível 2 intermediário

07 Um diapasão de 680 Hz é usado num dia de inverno, com o ar a 0 °C, e num dia de verão, com o ar a 40 °C. Usando $v \approx 331 + 0{,}6\,\theta$, calcule a velocidade do som e o comprimento de onda nos dois dias. A frequência do diapasão muda?

08 Uma pessoa está num vale entre dois paredões paralelos, mais perto do paredão 1. Ela dispara um apito curto e ouve o primeiro eco $0{,}40$ s depois e o segundo eco $1{,}0$ s depois.

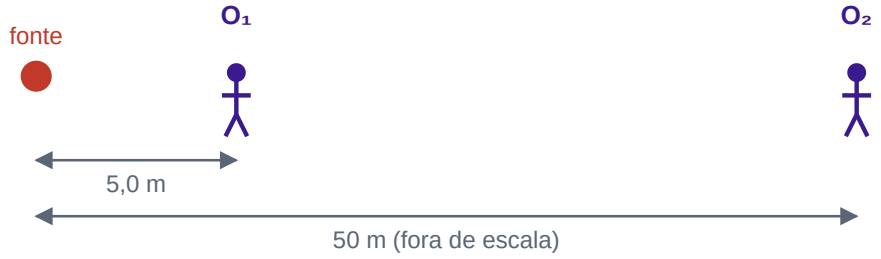


(a) Calcule as distâncias x e y e a distância entre os paredões. (b) Em que instante chega o eco do som que se refletiu nos dois paredões (primeiro num, depois no outro)?

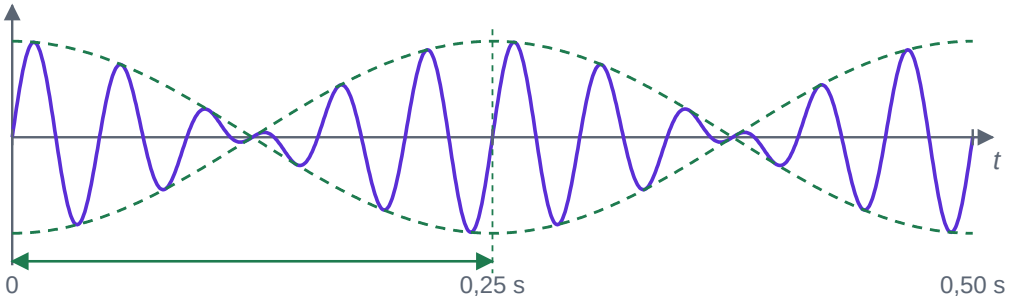
09 O nível sonoro num escritório é de 50 dB. Se a intensidade sonora for multiplicada por $1\,000$, o novo nível sonoro será de:

(A) 53 dB
(B) 150 dB
(C) 80 dB
(D) 500 dB
(E) 50 000 dB

10 Uma fonte puntiforme emite som igualmente em todas as direções. O observador O_1, a $5{,}0$ m da fonte, mede 80 dB. Desprezando a absorção pelo ar, determine (a) a intensidade sonora em O_1; (b) a potência sonora da fonte; (c) o nível sonoro medido pelo observador O_2, a 50 m da fonte.

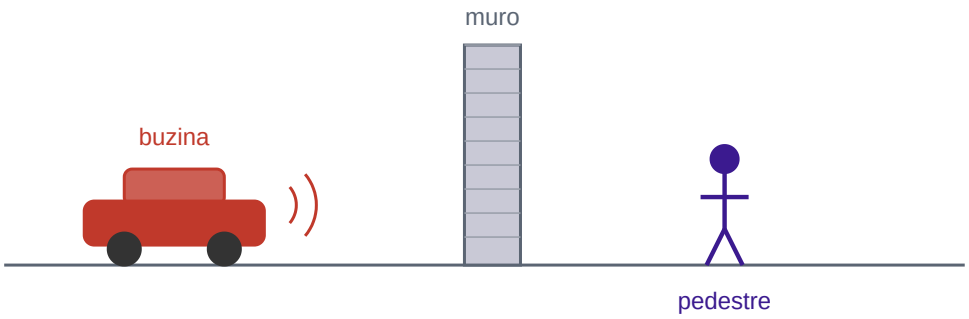


11 Dois diapasões tocam juntos. Um deles tem frequência conhecida, 512 Hz. O gráfico mostra a variação de pressão resultante num ponto, com o tempo em segundos.



(a) Qual é a frequência dos batimentos? (b) Quais são os valores possíveis da frequência do outro diapasão? (c) Prende-se um pouco de cera no diapasão desconhecido, o que diminui a sua frequência, e os batimentos passam a 6 por segundo. Qual era a frequência dele antes da cera?

12 Um pedestre, atrás de um muro, ouve a buzina de um carro que está do outro lado, embora não consiga ver o carro.



A explicação mais adequada para o fato de o som contornar o muro e a luz não é que:

(A) o som se reflete no muro e a luz não se reflete.

(B) a velocidade do som é muito menor que a da luz.

(C) o som é uma onda longitudinal e a luz é uma onda transversal.

(D) os comprimentos de onda do som audível são comparáveis às dimensões do muro, enquanto os da luz são muito menores.

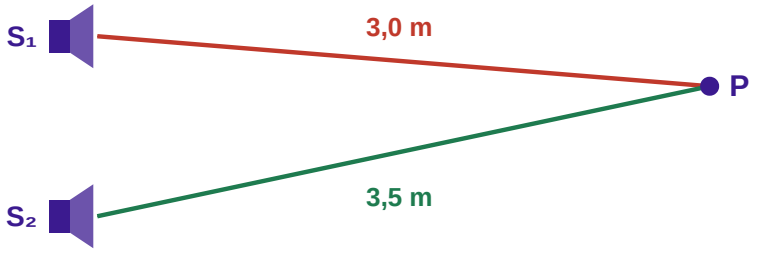
(E) a luz não sofre difração.

Nível 3 avançado

13 Duas fontes puntiformes A e B, de mesma potência e não coerentes, estão alinhadas com um ponto P, como na figura. Quando só a fonte A está ligada, o nível sonoro em P é 70 dB. Determine o nível sonoro em P (a) quando só B está ligada; (b) quando as duas estão ligadas.



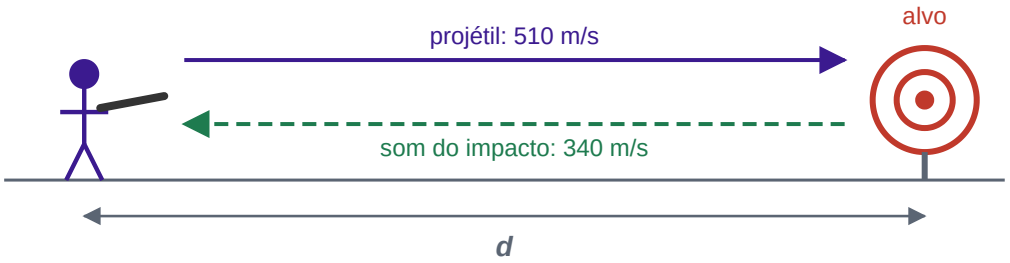
14 Dois alto-falantes S_1 e S_2 emitem em fase sons de mesma frequência, que pode ser ajustada. Um ponto P está a $3{,}0$ m de S_1 e a $3{,}5$ m de S_2.



fontes em fase, mesma frequência

(a) Qual é a menor frequência para a qual há interferência destrutiva em P? (b) Qual é a menor frequência para a qual há interferência construtiva em P? (c) Quais frequências entre 20 Hz e 2 000 Hz produzem silêncio (mínimo) em P?

15 Num treinamento de tiro, o atirador ouve o som do impacto do projétil no alvo $2{,}5$ s depois do disparo. O projétil se move com velocidade horizontal constante de 510 m/s e o som, com 340 m/s. (a) Qual é a distância d até o alvo? (b) Quanto tempo o projétil leva para chegar ao alvo?



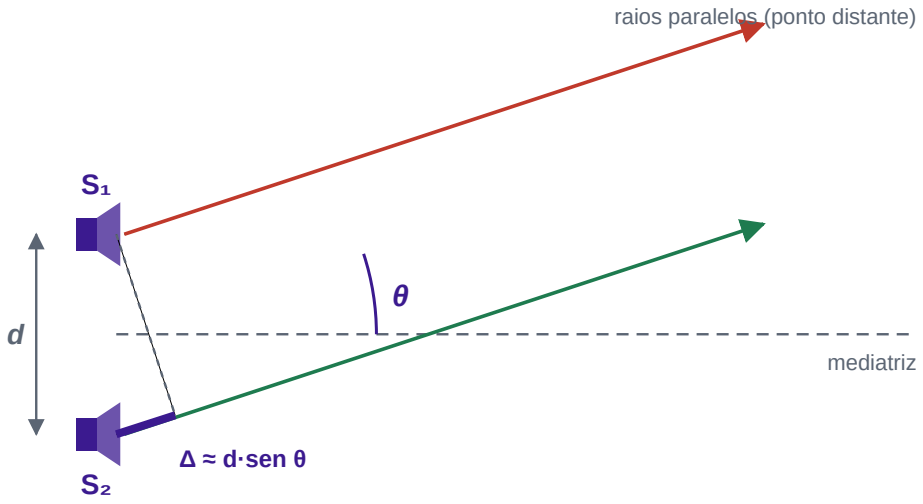
16 Num exame de ultrassonografia, usa-se uma onda de $2{,}0$ MHz que se propaga nos tecidos do corpo com velocidade de $1\,540$ m/s. O comprimento de onda nos tecidos é, aproximadamente:

(A) 0,77 mm
(B) 1,3 mm
(C) 7,7 mm
(D) 0,77 m
(E) 1,3 m

17 Um ouvinte a $3{,}0$ m de um alto-falante (fonte puntiforme, sem absorção) mede 86 dB. (a) Qual é o nível a $6{,}0$ m do alto-falante? (b) A que distância o nível é 66 dB? (c) Coloca-se outro alto-falante idêntico, não coerente, ao lado do primeiro. Qual passa a ser o nível a $3{,}0$ m?

Nível ITA/IME olímpico

18 Dois alto-falantes S_1 e S_2, separados por $d = 1{,}0$ m, emitem em fase um som de $1\,700$ Hz. Um ouvinte se desloca ao longo de uma circunferência de grande raio centrada no ponto médio entre eles, na região à frente dos alto-falantes; a direção do ouvinte forma um ângulo θ com a mediatriz de S_1S_2. Para um ponto distante, os raios que vêm das duas fontes são praticamente paralelos e a diferença de caminho vale $\Delta \approx d\,\operatorname{sen}\theta$.

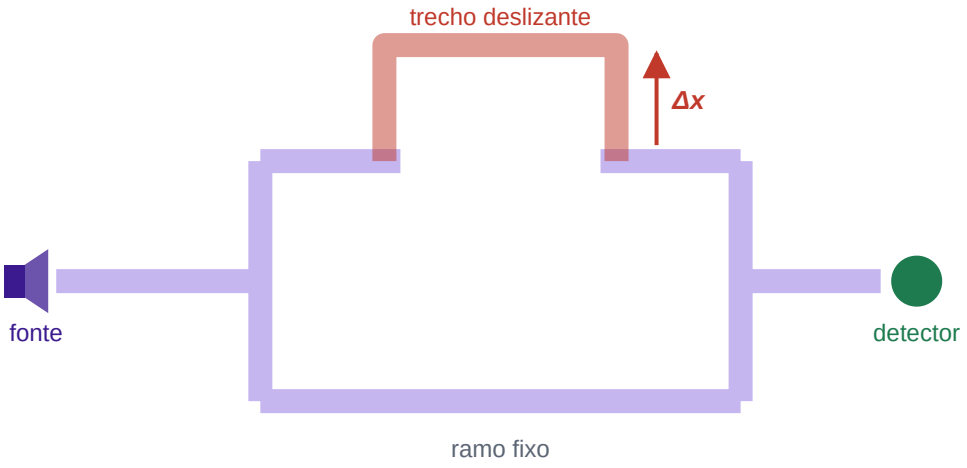


(a) Para que valor de $\operatorname{sen}\theta$ o ouvinte encontra o primeiro mínimo? (b) Quantas direções de mínimo ele encontra ao percorrer o semicírculo de $\theta = -90^\circ$ a $\theta = +90^\circ$? (c) Mostre que, se a frequência for reduzida para 136 Hz, não haverá nenhuma direção de mínimo.

19 Uma fonte puntiforme emite uma potência sonora de $0{,}4\pi$ W, igualmente em todas as direções. Despreze a absorção. (a) A que distância da fonte o nível sonoro atinge o limiar da dor (120 dB)? (b) Qual é o nível sonoro a 10 m da fonte? (c) Junto à primeira, coloca-se uma segunda fonte idêntica e não coerente. A que distância das duas o nível é 100 dB? Use $\sqrt{10} \approx 3{,}16$ e $\sqrt{20} \approx 4{,}47$.

20 Um diapasão A de 440 Hz e um diapasão B, tocados juntos, produzem 4 batimentos por segundo. Prende-se um pequeno pedaço de massa de modelar a B, o que diminui a sua frequência, e os batimentos passam a 6 por segundo. (a) Qual era a frequência de B? Qual passou a ser? (b) Um terceiro diapasão C produz 5 batimentos por segundo com A e 1 batimento por segundo com B sem a massa de modelar. Qual é a frequência de C? Mostre que a resposta é única.

21 No tubo de Quincke, o som de uma fonte entra no tubo, divide-se em dois ramos e volta a se juntar diante de um detector. Um dos ramos tem um trecho em U que pode deslizar, como uma vara de trombone, alterando o comprimento desse ramo.



Com uma fonte de $1\,000$ Hz, verifica-se que o trecho deslizante precisa ser deslocado $\Delta x = 17$ cm para passar de um mínimo de intensidade no detector ao mínimo seguinte. (a) Determine a velocidade do som no ar do laboratório. (b) Usando $v \approx 331 + 0{,}6\,\theta$, estime a temperatura do ar. (c) Qual seria o deslocamento entre dois mínimos consecutivos se a temperatura fosse 40 °C?

4. QUESTÕES OFICIAIS DE VESTIBULARES E CONCURSOS

Questões oficiais de provas anteriores da EFOMM e da Escola Naval, selecionadas do banco de questões da Trilha Militares.

22 [EFOMM 2015]

Analise a tabela a seguir onde constam valores de amplitude e frequência de 5 sons:

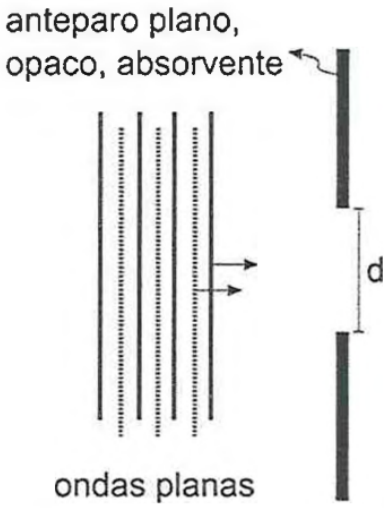
Som	Frequência (kHz)	Amplitude (mm)
I	0,2	3
II	0,3	7
III	0,8	1
IV	1,0	5
V	1,2	4

O som de maior intensidade e o som mais agudo são, respectivamente,

(A) II e V.
(B) I e II.
(C) IV e III.
(D) II e I.
(E) V e II.

23 [Escola Naval 2018]

Considere duas ondas planas, uma de luz visível e outra de som audível, oscilando com comprimento de onda iguais a $\lambda_L = 10^{-4}$ cm e $\lambda_S = 1{,}7$ cm, respectivamente. No mesmo instante, ambas incidem perpendicularmente sobre um mesmo lado do anteparo plano, opaco e bom absorvente acústico mostrado na figura acima. Atravessando o orifício circular de diâmetro d pode-se afirmar que, na região do outro lado do anteparo:



(A) apenas a onda sonora pode ser detectada se d ≪ 1,7 cm, devido à difração.
(B) apenas a onda luminosa pode ser detectada se d ≪ 1,7 cm, devido à refração.
(C) a propagação das duas ondas é aproximadamente retilínea se d ≫ 1,7 cm.
(D) a propagação das duas ondas é aproximadamente esférica se d ≫ 1,7 cm.
(E) nenhuma das ondas pode ser plana.

24 [Escola Naval 2022]

Com intuito de melhorar o conforto acústico dos militares embarcados nos navios da Marinha, instalou-se um decibelímetro na Praça de Máquinas de um navio patrulha fluvial que opera na região amazônica e verificou-se que o nível de intensidade sonora registrado foi de 80 dB (som 1). O comandante do navio instalou um dispositivo acústico que reduziu esse nível para 60 dB (som 2). Sendo I_1 e I_2 as intensidades sonoras, respectivamente, dos sons 1 e 2, determine a razão I_1/I_2 e assinale a opção correta.

(A) 2
(B) 10
(C) 14
(D) 20
(E) 100

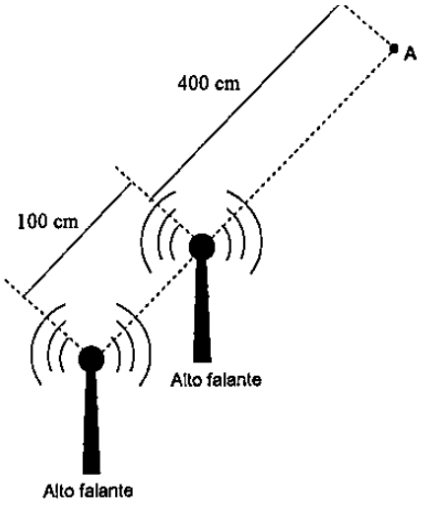
25 [Escola Naval 2019]

Uma fonte sonora puntiforme emite ondas harmônicas e esféricas em um meio homogêneo e isotrópico. Para duas distâncias da fonte, d_1 e d_2, as amplitudes da onda correspondentes são, respectivamente, a_1 e a_2. Sabendo-se que $a_2 = 3a_1$, qual a razão d_1/d_2?

(A) 1/9
(B) 1/3
(C) 1
(D) 3
(E) 9

26 [Escola Naval 2021]

Dois alto falantes emitindo ondas sonoras idênticas, em fase uma com a outra, estão posicionados conforme a figura abaixo. Sabendo que a frequência e, portanto, o comprimento de onda das ondas emitidas podem variar, calcule a menor frequência emitida para a qual as ondas sonoras irão interferir destrutivamente no ponto A indicado na figura e assinale a opção correta. Dado: $v_{som} = 340$ m/s.



(A) 85,0 Hz
(B) 170 Hz
(C) 340 Hz
(D) 425 Hz
(E) 510 Hz

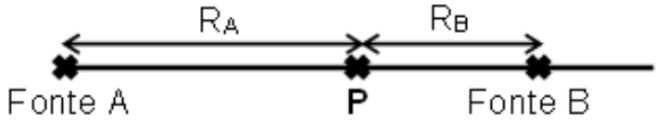
27 [Escola Naval 2023]

Os protetores auriculares são equipamentos de proteção individual (EPI) extremamente importantes em ambientes ou situações em que haverá exposição a elevados níveis sonoros, evitando assim desconforto (dor) ou perda de audição a longo prazo. Suponha que o som emitido durante um exercício de tiro em um navio se propague como uma onda esférica, e que o oficial de segurança está a uma distância r_1 (em linha reta) do canhão (fonte sonora). Desse modo, desconsiderando-se as perdas de energia durante a propagação da onda sonora, o uso de um protetor auricular capaz de reduzir em 36 dB o nível sonoro terá efeito similar a se afastar quantas vezes do canhão, em termos de r_1?

(A) $6{,}0\, r_1$
(B) $10^{1{,}8}\, r_1$
(C) $10^{3{,}6}\, r_1$
(D) $10^{18}\, r_1$
(E) $10^{36}\, r_1$

28 [EFOMM 2025]

Duas fontes sonoras A e B emitem ondas esféricas de mesma potência. A fonte A está a uma distância R_A de um ponto P, enquanto a fonte B está a uma distância R_B, como mostra a figura abaixo. O nível sonoro da onda gerada pela fonte A, no ponto P, é de 80 dB. A fonte B pode ser posicionada em cinco diferentes posições em relação ao ponto P:

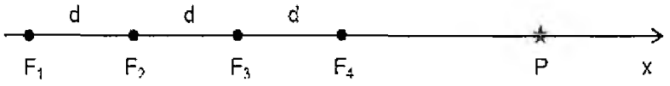


I. $R_B = 1{,}0 \cdot R_A$. II. $R_B = 5{,}0 \cdot 10^{-1} R_A$. III. $R_B = 2{,}5 \cdot 10^{-1} R_A$. IV. $R_B = 1{,}0 \cdot 10^{-1} R_A$. V. $R_B = 1{,}0 \cdot 10^{-3} R_A$. Considerando que, para ondas sonoras, a intensidade da onda resultante é a soma das intensidades de cada onda, assinale a alternativa do(s) valor(es) de R_B, listados acima, para o(s) qual(is) o nível sonoro da onda resultante no ponto P ultrapassa o limiar da dor (120dB). Considere o limiar de audibilidade $I_0 = 10^{-12}\ \mathrm{W/m^2}$

(A) I, II, III, IV e V
(B) II, III, IV e V
(C) III, IV e V
(D) IV e V
(E) V

29 [Escola Naval 2017]

A figura acima ilustra quatro fontes sonoras pontuais (F_1, F_2, F_3 e F_4), isotrópicas, uniformemente espaçadas de d = 0,2 m, ao longo do eixo x. Um ponto P também é mostrado sobre o eixo x. As fontes estão em fase e emitem ondas sonoras na frequência de 825 Hz, com mesma amplitude A e mesma velocidade de propagação, 330 m/s. Suponha que, quando as ondas se propagam até P, suas amplitudes se mantêm praticamente constantes. Sendo assim a amplitude da onda resultante no ponto P é



(A) zero
(B) A/4
(C) A/2
(D) A

(E) 2A

5. GABARITO COMENTADO

Exercícios propostos

Q	Resp.	Q	Resp.	Q	Resp.	Q	Resp.
01	D	04	C	06	B	09	C
12	D	16	A				

▼ **Nível 1 (01 a 06)**

01 (D). O som é uma onda mecânica: precisa de matéria que vibre para se propagar. No espaço praticamente vazio entre as naves não há meio, e o estrondo não poderia ser ouvido. A luz da explosão, que é onda eletromagnética, seria vista.

02. (a) 8 Hz: infrassom; 200 Hz e 15 kHz: audíveis (o primeiro grave, o segundo bem agudo); 50 kHz: ultrassom. (b) $\lambda = \dfrac{340}{50\,000} = 6{,}8 \times 10^{-3}$ m $= 6{,}8$ mm.

03. A distância indicada vai de uma compressão até a segunda compressão seguinte, ou seja, abrange dois comprimentos de onda: $2\lambda = 1{,}70$ m e $\lambda = 0{,}85$ m. Então $f = \dfrac{v}{\lambda} = \dfrac{340}{0{,}85} = 400$ Hz.

04 (C). Mesma nota significa mesma frequência fundamental (mesma altura); mesmo volume significa mesma intensidade. O que diferencia os instrumentos é o timbre, isto é, a forma da onda, determinada pelos harmônicos presentes. A velocidade de propagação é a mesma para todos os sons no ar.

05. (a) $d = 340 \cdot 6{,}0 = 2\,040$ m, cerca de 2 km. (b) A luz percorre 2 km em $\dfrac{2\,040}{3 \times 10^8} \approx 7 \times 10^{-6}$ s, tempo desprezível diante de 6 s. Daí a regra prática: o número de segundos dividido por 3 dá a distância aproximada em quilômetros.

06 (B). Pelo gráfico, o período de A é 4 ms ($f_A = 250$ Hz) e o de B é 2 ms ($f_B = 500$ Hz): B é mais agudo (uma oitava acima de A). A amplitude de A é 3 e a de B é 1: B é menos intenso. Mesmo levando em conta que $I \propto A^2 f^2$, a intensidade de B ($1^2 \cdot 500^2$) é menor que a de A ($3^2 \cdot 250^2$).

▼ **Nível 2 (07 a 12)**

07. A 0 °C: $v = 331$ m/s e $\lambda = \dfrac{331}{680} \approx 0{,}487$ m. A 40 °C: $v = 331 + 24 = 355$ m/s e $\lambda = \dfrac{355}{680} \approx 0{,}522$ m. A frequência é a do diapasão e não muda; no verão o comprimento de onda é maior porque a velocidade é maior.

08. (a) O primeiro eco vem do paredão mais próximo: $2x = 340 \cdot 0{,}40$, logo $x = 68$ m. O segundo: $2y = 340 \cdot 1{,}0$, logo $y = 170$ m. Distância entre os paredões: $68 + 170 = 238$ m. (b) O som que vai ao paredão 1, volta, passa pela pessoa, vai ao paredão 2 e volta percorre $2x + 2y = 476$ m: chega em $\dfrac{476}{340} = 1{,}4$ s. (O som que vai primeiro ao paredão 2 percorre o mesmo caminho e chega junto.)

09 (C). $\Delta\beta = 10 \log 1\,000 = 10 \cdot 3 = 30$ dB. O novo nível é $50 + 30 = 80$ dB.

10. (a) $I_1 = 10^{-12} \cdot 10^8 = 10^{-4}$ W/m². (b) $P = I \cdot 4\pi r^2 = 10^{-4} \cdot 4\pi \cdot 25 = \pi \times 10^{-2} \approx 3{,}1 \times 10^{-2}$ W. (c) A distância é 10 vezes maior, a intensidade é 100 vezes menor e o nível cai 20 dB: 60 dB.

11. (a) Pelo gráfico, os máximos de amplitude se repetem a cada $0{,}25$ s: $f_{bat} = \dfrac{1}{0{,}25} = 4$ Hz. (b) $f = 512 \pm 4$: 508 Hz ou 516 Hz. (c) Diminuindo a frequência, os batimentos aumentaram, logo a diferença em relação a 512

Hz aumentou: o diapasão estava abaixo de 512 Hz, em 508 Hz (com a cera, 506 Hz). Se estivesse em 516 Hz, a cera aproximaria sua frequência de 512 Hz e os batimentos diminuiriam.

12 (D). A difração é acentuada quando o comprimento de onda é comparável às dimensões do obstáculo. Os sons audíveis têm λ de 1,7 cm a 17 m; a luz visível, de 400 nm a 700 nm. A luz também sofre difração (E é falsa), mas ela só é perceptível em aberturas e obstáculos muito pequenos. A alternativa A é falsa (a luz também se reflete); B e C são verdadeiras, mas não explicam por que o som contorna o muro.

▼ Nível 3 (13 a 17)

13. Só A: $I_A = 10^{-12} \cdot 10^{7} = 10^{-5}$ W/m². B está ao dobro da distância de A, então $I_B = \dfrac{I_A}{4} = 2{,}5 \times 10^{-6}$ W/m². (a) $\beta_B = 70 - 10\log 4 = 70 - 6 = 64$ dB. (b) $I = I_A + I_B = 1{,}25 \times 10^{-5}$ W/m² e $\beta = 70 + 10\log 1{,}25$. Como $\log 1{,}25 = \log \dfrac{10}{8} = 1 - 3\log 2 = 0{,}10$, $\beta = 71$ dB. A fonte mais distante quase não altera o nível.

14. $\Delta = 3{,}5 - 3{,}0 = 0{,}5$ m. (a) Destrutiva com $n = 0$: $\dfrac{\lambda}{2} = 0{,}5$ m, $\lambda = 1{,}0$ m e $f = 340$ Hz. (b) Construtiva com $n = 1$: $\lambda = 0{,}5$ m e $f = 680$ Hz. (c) $f = (2n+1)\dfrac{v}{2\Delta} = (2n+1)\cdot 340$ Hz: 340 Hz, 1 020 Hz e 1 700 Hz (o seguinte, 2 380 Hz, passa do limite).

15. (a) O tempo total é a ida do projétil mais a volta do som: $\dfrac{d}{510} + \dfrac{d}{340} = 2{,}5$. Com denominador comum $1\,020$: $\dfrac{2d + 3d}{1\,020} = 2{,}5$, logo $d = \dfrac{2{,}5 \cdot 1\,020}{5} = 510$ m. (b) $t_p = \dfrac{510}{510} = 1{,}0$ s (e o som leva $1{,}5$ s para voltar). Em geral, $d = \dfrac{v_p\, v_s\, \Delta t}{v_p + v_s}$.

16 (A). $\lambda = \dfrac{v}{f} = \dfrac{1\,540}{2{,}0 \times 10^{6}} = 7{,}7 \times 10^{-4}$ m $= 0{,}77$ mm. Comprimentos de onda tão pequenos sofrem pouca difração nas estruturas do corpo, o que permite imagens com detalhes da ordem do milímetro.

17. (a) Distância dobrada: intensidade 4 vezes menor e $\beta = 86 - 10\log 4 = 86 - 6 = 80$ dB. (b) Queda de 20 dB: intensidade 100 vezes menor, distância 10 vezes maior: 30 m. (c) Intensidade dobrada: $86 + 3 = 89$ dB.

▼ Nível ITA/IME (18 a 21)

18. $\lambda = \dfrac{340}{1\,700} = 0{,}20$ m. (a) Primeiro mínimo: $d\,\mathrm{sen}\,\theta = \dfrac{\lambda}{2}$, então $\mathrm{sen}\,\theta = \dfrac{0{,}10}{1{,}0} = 0{,}10$ ($\theta \approx 5{,}7°$). (b) Mínimos: $\mathrm{sen}\,\theta = (2n+1)\dfrac{\lambda}{2d} = (2n+1)\cdot 0{,}10$, com $|\mathrm{sen}\,\theta| \le 1$: $\mathrm{sen}\,\theta = \pm 0{,}1;\ \pm 0{,}3;\ \pm 0{,}5;\ \pm 0{,}7;\ \pm 0{,}9$. São 10 direções de mínimo. (c) Com 136 Hz, $\lambda = 2{,}5$ m e o primeiro mínimo exigiria $\mathrm{sen}\,\theta = \dfrac{\lambda}{2d} = 1{,}25 > 1$, o que é impossível. Quando $\lambda > 2d$, a diferença de caminho nunca chega a meio comprimento de onda e não há direção de cancelamento.

19. (a) $I = 1$ W/m²: $r^2 = \dfrac{P}{4\pi I} = \dfrac{0{,}4\pi}{4\pi} = 0{,}1$ m², logo $r = \sqrt{0{,}1} = \dfrac{\sqrt{10}}{10} \approx 0{,}32$ m. (b) $I = \dfrac{0{,}4\pi}{4\pi \cdot 100} = 10^{-3}$ W/m² e $\beta = 10\log 10^{9} = 90$ dB. (c) 100 dB corresponde a $I = 10^{-2}$ W/m². Com potência total $0{,}8\pi$ W: $r^2 = \dfrac{0{,}8\pi}{4\pi \cdot 10^{-2}} = 20$ m², logo $r = \sqrt{20} \approx 4{,}47$ m.

20. (a) $|f_B - 440| = 4$: $f_B = 436$ Hz ou 444 Hz. A massa diminui f_B e os batimentos aumentam, então f_B se afastou de 440 Hz para baixo: $f_B = 436$ Hz, que passou a 434 Hz. (Se fosse 444 Hz, diminuir a frequência reduziria os batimentos.) (b) Com A: $f_C = 435$ Hz ou 445 Hz. Com B (436 Hz): $f_C = 435$ Hz ou 437 Hz. O único valor comum é $f_C = 435$ Hz.

21. (a) Deslocar o trecho em U de Δx aumenta o caminho naquele ramo de $2\Delta x$, pois os dois lados do U se alongam. Entre dois mínimos consecutivos, a diferença de caminho varia de um comprimento de onda: $2\Delta x =$

λ, logo $\lambda = 34$ cm e $v = \lambda f = 0{,}34 \cdot 1\,000 = 340$ m/s. (b) $340 = 331 + 0{,}6\,\theta$, logo $\theta = 15$ °C. (c) A 40 °C, $v = 331 + 24 = 355$ m/s e $\lambda = 0{,}355$ m; o deslocamento entre mínimos é $\dfrac{\lambda}{2} \approx 17{,}8$ cm.

Questões oficiais

Q	Resp.	Q	Resp.	Q	Resp.	Q	Resp.
22	A	23	C	24	E	25	D
26	B	27	B	28	E	29	A

▼ 22 a 29 – Questões oficiais

22 (A) · EFOMM 2015.

A intensidade (volume) está ligada à amplitude: o maior é o som II (7 mm). A altura está ligada à frequência: o mais agudo é o de maior frequência, o som V (1,2 kHz).

Observação: a intensidade física de uma onda sonora é proporcional a $A^2 f^2$; por esse critério o som IV ($Af = 5{,}0$) superaria o II ($Af = 2{,}1$). A questão segue a associação usual intensidade ↔ amplitude.

23 (C) · Escola Naval 2018.

A difração é importante quando a abertura é comparável ao comprimento de onda ou menor. Se d ≫ 1,7 cm, d é muito maior que os dois comprimentos de onda e as duas ondas passam praticamente em linha reta (C).

Com d ≪ 1,7 cm o orifício ainda pode ser muito maior que o comprimento de onda da luz, que também passa (A e B falsas).

24 (E) · Escola Naval 2022.

$$\beta_1 - \beta_2 = 10 \log \frac{I_1}{I_2} = 20 \text{ dB} \;\Rightarrow\; \frac{I_1}{I_2} = 10^2 = 100$$

25 (D) · Escola Naval 2019.

A intensidade cai com $\frac{1}{d^2}$ e é proporcional ao quadrado da amplitude: a amplitude cai com $\frac{1}{d}$.

$$\frac{a_2}{a_1} = \frac{d_1}{d_2} = 3$$

26 (B) · Escola Naval 2021.

Pela figura, a diferença de caminho até A é de 100 cm. A menor frequência com interferência destrutiva corresponde a meio comprimento de onda:

$$\frac{\lambda}{2} = 1{,}0 \text{ m} \;\Rightarrow\; \lambda = 2{,}0 \text{ m} \;\Rightarrow\; f = \frac{340}{2} = 170 \text{ Hz}$$

27 (B) · Escola Naval 2023.

36 dB a menos significa intensidade $10^{3{,}6}$ vezes menor. Como $I \propto \frac{1}{r^2}$:

$$r = \sqrt{10^{3{,}6}}\, r_1 = 10^{1{,}8}\, r_1$$

28 (E) · EFOMM 2025.

$80\,\text{dB}$ correspondem a $I_A = 10^{-12} \cdot 10^{8} = 10^{-4}\,\text{W/m}^2$. Para passar de $120\,\text{dB}$, a intensidade total precisa passar de $1\,\text{W/m}^2$.

Com a mesma potência, $I_B = I_A \left(\frac{R_A}{R_B}\right)^2$. É preciso $I_B > 1 - 10^{-4}$, ou seja, $\left(\frac{R_A}{R_B}\right)^2 \gtrsim 10^4$: $R_B \lesssim 10^{-2} R_A$.

Só a posição V ($R_B = 10^{-3} R_A$, com $I_B = 10^2\ \mathrm{W/m^2}$) atende. Na IV, $I_B = 10^{-2}\ \mathrm{W/m^2}$, ainda abaixo do limiar.

29 (A) · Escola Naval 2017.

$$\lambda = \frac{330}{825} = 0{,}4\ \mathrm{m} \ \Rightarrow\ d = \frac{\lambda}{2}$$

Fontes vizinhas chegam a P com diferença de caminho de meio comprimento de onda, ou seja, em oposição de fase. F_1 cancela F_2 e F_3 cancela F_4: a amplitude resultante é zero.