

Capítulo 19

Acústica

Os conceitos de onda são aplicados às ondas sonoras. Fundamentais em diversas modalidades de comunicação, elas podem nos proporcionar momentos de grande prazer, como numa música, ou de irritação, como no trânsito caótico de uma cidade.

19.1 Ondas sonoras

Por se tratarem de ondas mecânicas, as ondas sonoras não se propagam no vácuo.

19.2 Qualidades fisiológicas do som

O sistema auditivo humano distingue nos sons três qualidades fisiológicas: altura, intensidade e timbre.

19.3 Propriedades das ondas sonoras

Por não serem ondas transversais, as ondas sonoras não podem ser polarizadas.

19.4 Fontes sonoras

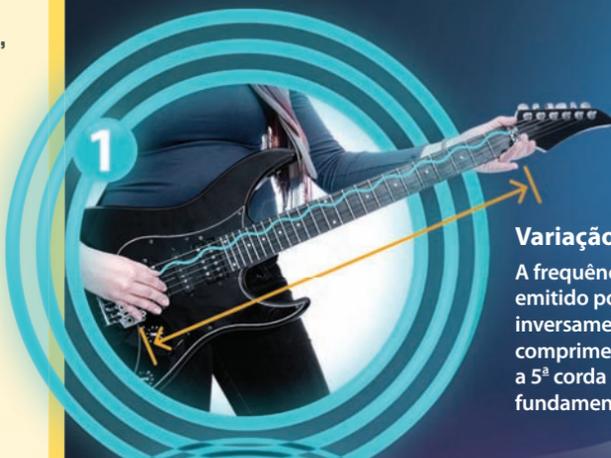
As ondas estacionárias que se formam em cordas vibrantes e nas colunas de ar, no interior de tubos sonoros, originam ondas sonoras.

19.5 Efeito Doppler

Quando há movimento relativo entre o observador e a fonte, a frequência da onda percebida é diferente da frequência real emitida.

A música e a Física

Ao ouvirmos o som de uma guitarra, não pensamos na Física por trás de toda a melodia produzida. A densidade e a tração na corda, somadas à variação de comprimento do encordoamento, determinam a nota emitida e suas respectivas frequências.

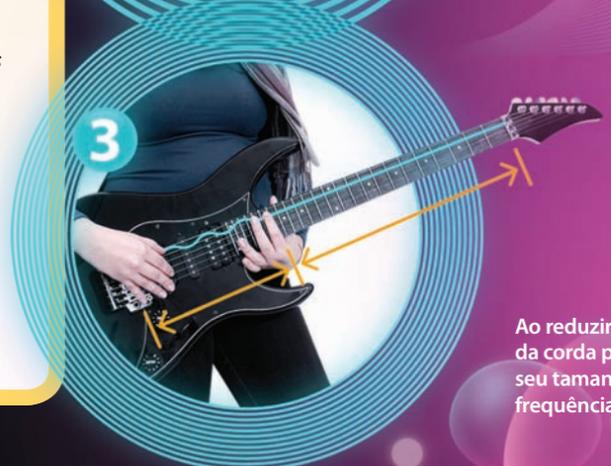


Variação da frequência

A frequência do som fundamental emitido por uma corda vibrante é inversamente proporcional ao seu comprimento. Ao ser dedilhada, a 5ª corda emite um som fundamental de frequência 440 Hz.



Pressionando essa mesma corda na metade de seu comprimento, produz-se um som com o dobro da frequência anterior: 880 Hz.



Ao reduzir o comprimento da corda para um terço do seu tamanho, triplicamos a frequência inicial: 1320 Hz.

As cordas do piano
Um piano também é um instrumento de cordas. Elas são metálicas, possuem diferentes comprimentos e densidades, sendo percutidas por pequenos martelos, os quais são acionados por meio das teclas.

Um conceito fundamental

Quando a corda de um instrumento musical é percutida, diversas frequências múltiplas se superpõem para constituir a nota emitida. O som fundamental está sempre presente e é ele que determina a frequência do som emitido.

Para pensar

1. Na quinta corda do violão, que parcela do tamanho da corda emite som fundamental de frequência 3080 Hz?
2. Olhe no teclado do piano. Considere a nota musical dó de frequência 261,63 Hz. Qual a frequência da nota que está uma oitava acima?

| | |
|-----------|-----|
| 4186,0 Hz | dó |
| 3951,1 Hz | si |
| 3729,3 Hz | lá |
| 3520,0 Hz | sol |
| 3322,4 Hz | fá |
| 3136,0 Hz | mi |
| 2960,0 Hz | ré |
| 2793,0 Hz | dó |
| 2637,0 Hz | si |
| 2489,0 Hz | lá |
| 2349,3 Hz | sol |
| 2217,5 Hz | fá |
| 2093,0 Hz | mi |
| 1975,5 Hz | ré |
| 1864,7 Hz | dó |
| 1396,9 Hz | si |
| 1318,5 Hz | lá |
| 1244,5 Hz | sol |
| 1174,7 Hz | fá |
| 1108,7 Hz | mi |
| 1046,5 Hz | ré |
| 987,77 Hz | dó |
| 932,33 Hz | si |
| 880,00 Hz | lá |
| 830,61 Hz | sol |
| 783,99 Hz | fá |
| 739,99 Hz | mi |
| 698,46 Hz | ré |
| 659,26 Hz | dó |
| 622,25 Hz | si |
| 587,33 Hz | lá |
| 554,37 Hz | sol |
| 523,26 Hz | fá |
| 493,88 Hz | mi |
| 466,16 Hz | ré |
| 440,00 Hz | dó |
| 415,30 Hz | si |
| 392,00 Hz | lá |
| 369,99 Hz | sol |
| 349,23 Hz | fá |
| 329,63 Hz | mi |
| 311,13 Hz | ré |
| 293,66 Hz | dó |
| 277,18 Hz | si |
| 261,63 Hz | lá |

Objetivos

- ▶ Compreender a origem das ondas sonoras.
- ▶ Classificar as ondas sonoras em som, infrassom e ultrassom a partir de sua frequência.
- ▶ Conhecer a velocidade de propagação do som em diferentes meios.

Termos e conceitos

- diapasão
- infrassons
- ultrassons
- barreira do som

O diapasão costuma ser usado para afinação de instrumentos musicais e vozes, emitindo uma onda sonora de frequência conhecida. 



Considere a mola helicoidal da **figura 1A** sendo periodicamente comprimida e expandida em uma extremidade. Verifica-se que uma onda longitudinal se propaga ao longo da mola. A distância entre duas regiões consecutivas de compressão (ou expansão) é o comprimento de onda. Uma onda desse tipo pode ser estabelecida no ar dentro de um tubo pelo movimento periódico de um êmbolo para a frente e para trás, como na **figura 1B**. O ar no tubo é alternadamente comprimido e expandido. O resultado é uma onda longitudinal propagando-se no ar dentro do tubo. A pressão do ar varia com a distância, ao longo do tubo, conforme o gráfico da **figura 1C**. Observe que esse gráfico tem um aspecto transversal, apesar de representar uma onda longitudinal; a subida e a descida da curva representam o aumento ou a diminuição da pressão no ar, e não o movimento do ar.

As **ondas longitudinais de pressão**, que se propagam no ar e nos fluidos em geral, são denominadas **ondas sonoras***.

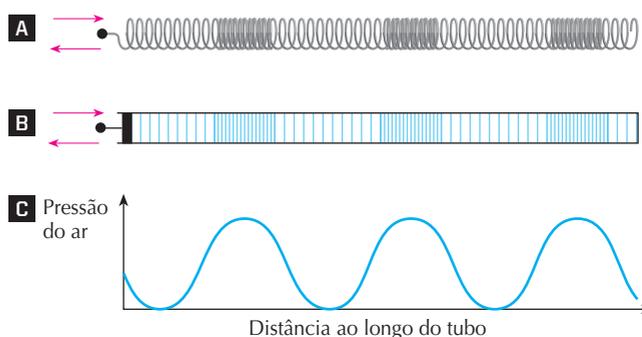


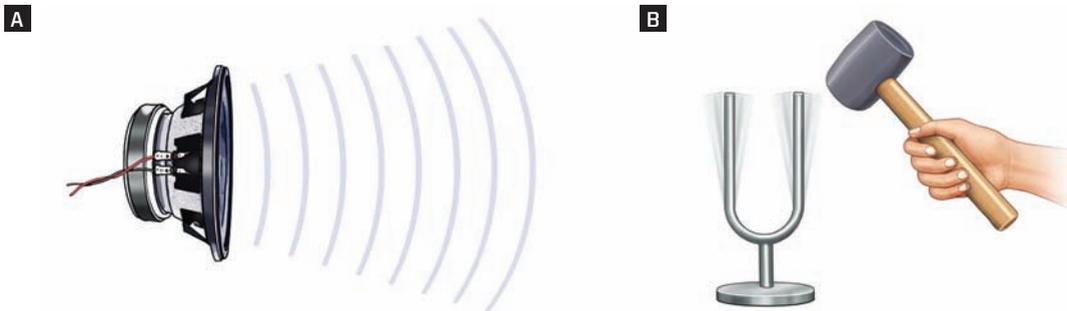
Figura 1. Onda longitudinal estabelecida em uma mola (A) e no ar dentro de um tubo (B). O gráfico (C) indica a pressão do ar ao longo do tubo.

As ondas sonoras têm origem mecânica, pois são produzidas por deformações em um meio elástico. Portanto, as ondas sonoras não se propagam no vácuo.

O ar ou outro meio torna-se alternadamente mais denso ou mais rarefeito quando uma onda sonora se propaga através dele. As variações na pressão fazem com que os nossos tímpanos vibrem com a mesma frequência da onda, o que produz a sensação auditiva.

A maioria das ondas sonoras audíveis é produzida por objetos que estão vibrando. Um exemplo é o diafragma do alto-falante da **figura 2A**, que, quando se movimenta para fora, comprime o ar à sua frente, formando uma região de alta pressão que se propaga no espaço. Quando se movimenta para trás, o diafragma aumenta o volume disponível para as moléculas de ar nas proximidades. Essas moléculas, movimentando-se no sentido do diafragma, originam uma região de baixa pressão que se espalha imediatamente atrás da região de alta pressão. As vibrações periódicas do diafragma enviam para o meio sucessivas camadas de compressão e rarefação. Outro exemplo de fonte sonora é o **diapasão** (fig. 2B).

* As ondas sonoras nos sólidos apresentam duplo caráter — longitudinal e transversal. Isso ocorre em virtude de as ações intermoleculares serem mais intensas nos sólidos que nos fluidos.



▲ **Figura 2.** Ondas sonoras podem ser produzidas por objetos vibrando, como o diafragma de um alto-falante (A) ou um diapasão (B).

O sistema auditivo de uma pessoa normal é sensibilizado por ondas sonoras de frequências entre, aproximadamente, **20 Hz e 20.000 Hz**. As ondas sonoras nesta faixa audível costumam ser denominadas **sons***. Na verdade, esses limites são convencionais, dependendo, entre outros fatores, da idade da pessoa.

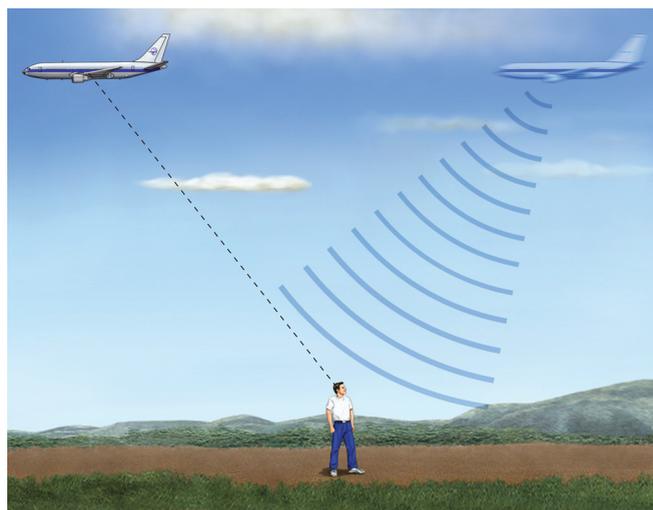
As frequências inferiores a 20 Hz são denominadas **infrassons** e ocorrem, por exemplo, precedendo os abalos sísmicos. Certos animais têm ouvidos sensíveis a essas ondas, como os cavalos e os elefantes. Por isso eles apresentam a ocorrência de terremotos.

Ondas sonoras com frequências superiores a 20.000 Hz constituem os **ultrassons**. Embora não sejam audíveis para o homem, muitos animais podem ouvi-los, como cachorros, gatos, morcegos e outros.

▶ A velocidade do som

Durante uma tempestade, é comum ouvirmos o trovão vários segundos após a visão do relâmpago. Ao ouvirmos o som de um avião a jato, procuramos localizar o aparelho olhando para a direção da qual o som provém e, com surpresa, percebemos que nossa linha de visão fica a uma considerável distância do avião (**fig. 3**). Tais fatos sugerem que o som se propaga através do ar com velocidade bem menor que a da luz.

- A velocidade da luz no ar é próxima de 300.000 km/s.
- A velocidade do som no ar a 15 °C é 340 m/s ou 1.224 km/h.



◀ **Figura 3.** O som se propaga no ar com velocidade pequena quando comparada com a velocidade da luz.

* Alguns autores reservam o termo **som** apenas para indicar a sensação auditiva. Em nosso curso, usaremos com os dois significados: a onda sonora na faixa audível e a sensação sonora.

De modo geral, a velocidade de propagação do som nos sólidos é maior do que nos líquidos, que por sua vez é maior do que nos gases. Por exemplo, na água, a 15 °C, o som se propaga à velocidade de 1.450 m/s e, no ferro, a 4.480 m/s. A velocidade relativamente pequena do som no ar e em outros gases explica-se pelo fato de as moléculas terem de se chocar umas com as outras, a fim de propagarem a onda longitudinal de pressão. Nos líquidos e nos sólidos as moléculas estão mais próximas umas das outras, justificando a maior velocidade de propagação.

Observe que, ao serem citadas as velocidades do som no ar e na água, foi fornecida a temperatura. É que nos fluidos (gases e líquidos) a influência da temperatura não pode ser desprezada, como geralmente acontece nos sólidos.

Particularmente para os gases, o aumento da temperatura produz maior agitação molecular, o que facilita a propagação das ondas sonoras. Esse fato se traduz por um aumento na velocidade do som. É possível demonstrar que, para os gases perfeitos, a velocidade do som varia com a temperatura absoluta T segundo a seguinte fórmula:

$$v = \sqrt{K \cdot T}$$

A constante K que aparece nessa fórmula é dada pela relação $K = \frac{\gamma R}{M}$, em que R é a constante universal dos gases perfeitos, M é a massa molar do gás e $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$ é o expoente de Poisson (ver p. 188, Capítulo 9), sendo c_p e c_v os calores específicos do gás a pressão constante e a volume constante, respectivamente. O expoente de Poisson γ depende da atomicidade do gás (número de átomos por molécula).

Portanto, a velocidade de propagação das ondas sonoras em um gás ideal não depende da pressão nem da densidade do gás.

É importante assinalar ainda que, tratando-se de ondas periódicas, valem para as ondas sonoras as mesmas considerações já feitas a respeito de amplitude a , período T , frequência f , velocidade v e comprimento de onda λ , inclusive a fórmula:

$$v = \lambda \cdot f$$

Lembremos que a amplitude a da onda sonora depende da energia que ela transporta. A frequência f da onda é a frequência da fonte que a emitiu, não dependendo do meio em que ocorre a propagação. Já a velocidade de propagação v , assim como o comprimento de onda λ da onda sonora, dependem das características do meio. Sendo assim, quando uma onda sonora muda seu meio de propagação, alteram-se a velocidade e o comprimento de onda, mas a frequência mantém-se constante.

A barreira do som

A velocidade do som no ar é de aproximadamente 1.220 km/h. Como homenagem ao físico e filósofo austríaco Ernst Mach (1838-1916), o primeiro cientista a medir com precisão a velocidade do som no ar e célebre pelos seus estudos de aerodinâmica, convencionou-se chamar de **número de Mach** a relação entre a velocidade de um veículo no ar e a das ondas sonoras nesse mesmo meio. Assim, quando o veículo se desloca com velocidade igual à do som no ar, diz-se que sua velocidade é Mach 1. Normalmente os aviões desenvolvem uma velocidade menor que Mach 1. Velocidades maiores que Mach 1 são ditas **supersônicas**, e maiores que Mach 5, **hipersônicas**.



Retrato de Ernst Mach



Quando um veículo aéreo (um avião, por exemplo) se desloca na atmosfera com velocidade inferior à do som, ele comprime o ar **ao seu redor**, sobretudo à sua frente, criando ondas de pressão, que se propagam no meio espalhando-se para todos os lados. Como as ondas de pressão viajam mais rapidamente que o veículo, o som vai sempre à frente. Entretanto, se o veículo aumentar sua velocidade para Mach 1, isto é, velocidade igual à de deslocamento das ondas de pressão que produz, ele comprime o ar **à sua frente** e acompanha as ondas de pressão (seu próprio som) com a mesma velocidade de sua propagação. Em consequência, ocorre um acúmulo de ondas no nariz do veículo. Caso este mantenha tal velocidade sônica por algum tempo, forma-se à sua frente uma "muralha de ar", pois todas as ondas formadas continuam no mesmo local em relação a ele. É o fenômeno que se convencionou chamar de **barreira do som**. O nome deve-se ao fato de que, durante muito tempo, foi considerada impossível a ultrapassagem da velocidade do som no ar por um aparelho feito pelo ser humano. Na história da aviação há muitos episódios de pilotos que tentaram realizar voos em velocidades próximas à do som e encontraram grandes dificuldades, como instabilidade do veículo (que pode provocar desde a inversão de comandos até a perda total de controle), fortes turbulências e vibrações tão intensas que provocaram vários acidentes, alguns deles fatais.

Continuando a acelerar, o veículo ultrapassa a velocidade do som, adquirindo velocidades superiores a Mach 1 e deixando para trás as ondas de pressão que produz. Entretanto, para atingir velocidades supersônicas ele deve, entre outras coisas, ter uma aceleração que permita uma passagem rápida pela velocidade Mach 1, para minimizar os efeitos da barreira do som sobre o veículo.



▲ Onda de choque evidenciada pela condensação da umidade do ar, provocada pela quebra da barreira do som por um avião supersônico.

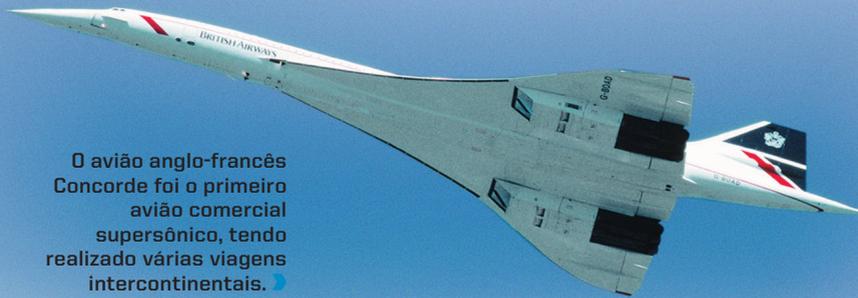


▲ Os marinheiros no convés do porta-aviões devem usar protetores auriculares para prevenir danos decorrentes do estrondo sônico.

No entanto, ao ser comprimido em fluxo supersônico, o ar tem sua pressão e sua densidade aumentadas, determinando a formação de uma **onda de choque**. As ondas de choque produzidas pelo avião supersônico só atingem o solo após algum tempo em relação à passagem do avião, pois este é mais veloz. Então, um observador no solo verá o avião passando e não ouvirá ruído algum. Porém, passado um certo tempo, quando as ondas de choque o alcançarem, ele ouvirá um forte estampido, conhecido como **estrongo sônico**, cuja intensidade depende, entre outros fatores, das dimensões do avião, de sua forma, da velocidade do voo e da altitude. Às vezes, o estrongo é tão violento que produz muitos danos materiais no solo, como quebra de vidros, rachaduras em paredes e outros prejuízos. As pessoas atingidas pelo estrongo podem sofrer lesões irreparáveis em seu sistema auditivo. É por isso que a operação de voos supersônicos sobre regiões habitadas é evitada. As bases aéreas de onde decolam esses aviões se situam sempre em regiões afastadas dos grandes centros urbanos e o voo propriamente dito é realizado sobre os oceanos.

O Concorde, conhecido avião comercial supersônico desativado em 2003, normalmente só acelerava até cerca de Mach 2 para atingir velocidade supersônica quando deixava o continente e estava sobre o mar e em altitude elevada, a fim de minimizar os efeitos do estrondo sônico.

A data de 14 de outubro de 1947 é reconhecida internacionalmente como a do primeiro voo supersônico de um veículo aéreo pilotado por um ser humano. A proeza foi realizada pelo capitão Charles "Chuck" Yeager, da Força Aérea dos Estados Unidos, a bordo do avião conhecido por X-1, atingindo a velocidade de Mach 1,06 a uma altitude de aproximadamente 14.000 metros.

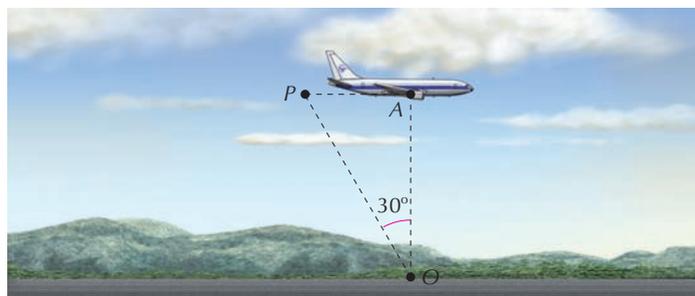


O avião anglo-francês Concorde foi o primeiro avião comercial supersônico, tendo realizado várias viagens intercontinentais. ▶



EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

- R. 131** Um avião a jato passa sobre um observador O em voo horizontal. Quando ele está exatamente na vertical que passa pelo observador O , o som parece vir de um ponto P atrás do avião, numa direção inclinada de 30° em relação à vertical. Calcule a velocidade do avião, sendo a velocidade do som 340 m/s (dado: $\sin 30^\circ = 0,5$).



Solução:

O tempo para o avião ir de P até A é igual ao tempo para o som ir de P até o observador O.

Então, temos:

Para o avião: $PA = v_a t$ ① Para o som: $PO = vt$ ②

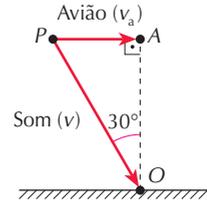
Dividindo ① por ②, obtemos: $\frac{PA}{PO} = \frac{v_a}{v}$

No triângulo retângulo PAO, temos:

$$\text{sen } 30^\circ = \frac{PA}{PO} \Rightarrow \frac{PA}{PO} = 0,5$$

Portanto:

$$\frac{v_a}{v} = 0,5 \Rightarrow v_a = 0,5v \Rightarrow v_a = 0,5 \cdot 340 \Rightarrow v_a = 170 \text{ m/s} \Rightarrow v_a = 170 \cdot 3,6 \text{ km/h} \Rightarrow \boxed{v_a = 612 \text{ km/h}}$$



Resposta: 612 km/h

- R. 132** Um garoto na borda de um poço de profundidade 80 m deixa cair uma pedra. Após quanto tempo o som da pedra atingindo a água no fundo do poço será ouvido pelo garoto? São dadas a velocidade do som no ar ($v = 320 \text{ m/s}$) e a aceleração da gravidade local ($g = 10 \text{ m/s}^2$).

Solução:

O intervalo de tempo entre o instante em que o garoto abandona a pedra e o instante em que o garoto ouve o impacto da pedra na água é a soma de dois intervalos:

$$\Delta t = \Delta t_1 + \Delta t_2$$

Nessa soma, Δt_1 é o intervalo de tempo que a pedra leva para cair até atingir a água e Δt_2 é o intervalo de tempo que o som leva para se propagar da água até o sistema auditivo do garoto.

O intervalo de tempo que a pedra leva para cair (Δt_1) é obtido a partir da equação: $h = \frac{g \cdot (\Delta t_1)^2}{2}$

Sendo $h = 80 \text{ m}$ e $g = 10 \text{ m/s}^2$, vem:

$$80 = \frac{10 \cdot (\Delta t_1)^2}{2} \Rightarrow (\Delta t_1)^2 = 16 \Rightarrow \Delta t_1 = 4 \text{ s}$$

O intervalo de tempo que o som, em movimento uniforme, leva para se propagar desde a superfície da água até o ouvinte é obtido por: $h = v \cdot \Delta t_2$.

$$\text{Como } v = 320 \text{ m/s, obtemos: } 80 = 320 \cdot \Delta t_2 \Rightarrow \Delta t_2 = \frac{80}{320} \Rightarrow \Delta t_2 = 0,25 \text{ s}$$

O intervalo de tempo total será, então:

$$\Delta t = \Delta t_1 + \Delta t_2 \Rightarrow \Delta t = 4 + 0,25 \Rightarrow \boxed{\Delta t = 4,25 \text{ s}}$$

Resposta: 4,25 s

- R. 133** Numa experiência de Física dois alunos se postam um em cada extremidade de uma barra metálica, de comprimento 170 m. Um deles dá uma pancada numa das extremidades. O outro ouve dois sons com uma defasagem de tempo de 0,45 s. Sendo a velocidade do som no ar igual a 340 m/s, determine a velocidade do som na barra metálica.

Solução:

Propagando-se pelo ar, o som atinge o ouvinte num tempo Δt_1 , dado por:

$$L = v_1 \cdot \Delta t_1 \Rightarrow \Delta t_1 = \frac{L}{v_1}$$

Como $L = 170 \text{ m}$ e $v_1 = 340 \text{ m/s}$, vem:

$$\Delta t_1 = \frac{170}{340} \Rightarrow \Delta t_1 = 0,5 \text{ s}$$

Como na barra metálica o som tem maior velocidade (v_2), ele chega ao ouvinte num intervalo de tempo menor (Δt_2):

$$\Delta t_2 = \Delta t_1 - 0,45 \Rightarrow \Delta t_2 = 0,5 - 0,45 \Rightarrow \Delta t_2 = 0,05 \text{ s}$$

Então a velocidade do som na barra metálica será dada por:

$$v_2 = \frac{L}{\Delta t_2} \Rightarrow v_2 = \frac{170}{0,05} \Rightarrow \boxed{v_2 = 3.400 \text{ m/s}}$$

Resposta: 3.400 m/s

R. 134 Certo animal aquático tem órgão auditivo sensível a uma faixa sonora de frequências entre 40 Hz e 250 Hz. Sendo 1.450 m/s a velocidade das ondas sonoras no meio em que ele vive, quais são os comprimentos de onda correspondentes às frequências máxima e mínima audíveis por esse animal?

Solução:

A frequência máxima audível pelo animal é $f_{\text{máx.}} = 250$ Hz e a mínima audível é $f_{\text{mín.}} = 40$ Hz. A velocidade das ondas sonoras no meio é $v_{\text{som}} = 1.450$ m/s. Calculemos os respectivos comprimentos de onda por:

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

Assim, obtemos:

$$\lambda_{\text{mín.}} = \frac{v_{\text{som}}}{f_{\text{máx.}}} \Rightarrow \lambda_{\text{mín.}} = \frac{1.450}{250} \Rightarrow \lambda_{\text{mín.}} = 5,8 \text{ m}$$

$$\lambda_{\text{máx.}} = \frac{v_{\text{som}}}{f_{\text{mín.}}} \Rightarrow \lambda_{\text{máx.}} = \frac{1.450}{40} \Rightarrow \lambda_{\text{máx.}} = 36,25 \text{ m}$$

Observe que à maior frequência (250 Hz) corresponde o menor comprimento de onda (5,8 m) e à menor frequência (40 Hz) corresponde o maior comprimento de onda (36,25 m).

Respostas: 5,8 m e 36,25 m

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

P. 475 Quando um avião a jato passa sobre nós, temos a impressão de que o som provém de um ponto atrás do avião numa direção que forma 45° com a vertical. Determine a velocidade do avião. Considere a velocidade do som no ar igual a 340 m/s e $\text{sen } 45^\circ = 0,7$.

P. 476 (Vunesp) Numa experiência para determinar a velocidade do som, dois observadores colocaram-se a uma distância de 5,0 km um do outro, munidos de um revólver e um cronômetro. O observador em A acionou seu cronômetro no instante em que viu o clarão do disparo de revólver de B, tendo registrado que o som levou 15,5 s para chegar ao seu ouvido. Em seguida, A atirou e B registrou o tempo de 14,5 s até ouvir o estampido. Calcule a velocidade do som e a componente da velocidade do vento ao longo da linha AB.

P. 477 (Ufes) 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 340 m/s, determine a distância entre o atirador e o alvo.

P. 478 (UFG-CE) Uma martelada é dada na extremidade de um trilho. Na outra extremidade encontra-se um indivíduo que ouve dois sons, com uma diferença de tempo de 0,18 s. O primeiro se propaga através do trilho com velocidade de 3.400 m/s e o segundo através do ar com velocidade de 340 m/s. Determine, em metros, o comprimento do trilho.

P. 479 (UnB-DF) Duas pessoas estão sobre um trilho e separadas por uma distância de 2.380 m. Suponha que a velocidade do som através do trilho seja de 4.780 m/s e a velocidade do som no ar seja de 340 m/s. Uma das pessoas dá uma forte pancada no trilho e a outra detecta os sinais chegados até ela. Calcule a diferença de tempo dos sinais recebidos no detector, através do trilho e do ar.

P. 480 (Efei-MG) Considere um diapasão sonoro que vibra à frequência de 440 Hz. Num local onde as condições atmosféricas são tais que a velocidade do som é 330 m/s, qual é o comprimento de onda relativo a esse som?

P. 481 (PUC-SP) As ondas mecânicas longitudinais de frequências compreendidas entre 20 Hz e 20.000 Hz constituem o que nossos ouvidos interpretam como som. Quais são os valores do comprimento de onda nos limites da faixa das ondas sonoras no ar? A velocidade de propagação do som no ar é cerca de 340 m/s.

P. 482 Um diapasão que vibra na frequência de 440 Hz é posto a vibrar dentro da água destilada, onde as ondas sonoras se propagam com a velocidade de 1.404 m/s a 0°C . Determine o comprimento de onda das ondas sonoras produzidas na água destilada a 0°C .



Qualidades fisiológicas do som

Objetivos

- ▶ Relacionar a altura do som à sua frequência.
- ▶ Relacionar a intensidade física sonora à energia transportada pela onda.
- ▶ Compreender o conceito de intensidade auditiva ou nível sonoro e conhecer sua unidade de medida.
- ▶ Compreender o conceito de timbre.
- ▶ Analisar, em diferentes situações, a questão da poluição sonora e seus efeitos sobre o ambiente.

Termos e conceitos

- unísono
- oitava
- intensidade física
- limiar da audição
 - limiar da dor
- som fundamental
- harmônicos

Nosso sistema auditivo distingue no som certas características, denominadas **qualidades fisiológicas**, que são altura, intensidade e timbre.

1 Altura

A qualidade pela qual diferenciamos **sons graves** de **sons agudos** é denominada altura. Ela depende apenas da frequência do som.

O som será tanto mais grave quanto menor for a sua frequência. Ele será tanto mais agudo quanto maior for a sua frequência. Por exemplo, o homem costuma emitir sons entre 100 e 200 Hz, e a mulher, sons entre 200 e 400 Hz. Dizemos então que a voz do homem é **mais grave** que a da mulher ou que a voz da mulher é **mais aguda** que a do homem.

Denomina-se **intervalo** entre dois sons de frequências f_2 e f_1 , sendo $f_2 \geq f_1$, a relação:

$$i = \frac{f_2}{f_1}$$

Quando $i = 1$ (isto é, $f_2 = f_1$), os sons estão em **unísono**; quando $i = 2$ (isto é, $f_2 = 2f_1$), o intervalo é denominado **oitava**.

Em música (veja a leitura na página 474: A escala musical) utilizam-se vários outros intervalos, geralmente chamados **intervalos musicais**. Por exemplo, o intervalo $i = \frac{9}{8}$ é denominado **tom maior**, $i = \frac{10}{9}$ é o **tom menor**, $i = \frac{16}{15}$ é o **semitom** etc.

2 Intensidade

A qualidade fisiológica pela qual diferenciamos os **sons fracos** dos **sons fortes** é denominada intensidade auditiva ou sonoridade, ou ainda nível sonoro do som. Depende da energia transportada pela onda sonora e, portanto, de sua intensidade física.

A **intensidade física*** I de uma onda, como já definimos anteriormente, é o quociente entre a energia ΔE que atravessa uma superfície (perpendicular à direção de propagação) na unidade de tempo e a área A da superfície (fig. 4):

$$I = \frac{\Delta E}{A \cdot \Delta t}$$

O quociente $\frac{\Delta E}{\Delta t}$ constitui a **potência** Pot da onda, isto é, $Pot = \frac{\Delta E}{\Delta t}$.
Nessas condições, temos:

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

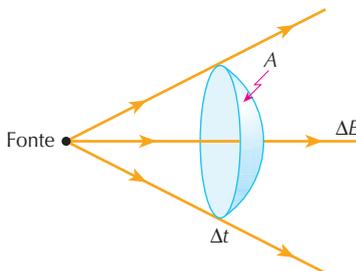


Figura 4. A intensidade física de uma onda é a medida da energia que atravessa uma superfície pela área da superfície na unidade de tempo.

* Para evitar confusão, aqui vamos chamar a intensidade da onda de intensidade física.

No Sistema Internacional de Unidades, sendo ΔE medido em joules, A em m^2 e Δt em segundos, a unidade de intensidade física é o $J/m^2 \cdot s$, ou W/m^2 .

A mínima intensidade física que uma onda sonora deve ter para ser audível (**limiar de audição**) é aproximadamente $10^{-12} W/m^2$. Por outro lado, se a intensidade física exceder aproximadamente $1 W/m^2$, ela provocará efeitos dolorosos (**limiar da dor**).

O sistema auditivo humano não é excitado linearmente pela intensidade física do som. Assim, ao se dobrar a intensidade física de um determinado som, distingue-se um som mais forte, porém não duas vezes mais intenso.

Experiências mostram que, para medir a **intensidade auditiva**, também denominada **nível sonoro** do som, deve-se utilizar uma **escala logarítmica**.

Considerando I_0 a menor intensidade física de som audível (geralmente adota-se $10^{-12} W/m^2$) e I a intensidade física do som que se quer medir, define-se **intensidade auditiva** ou **nível sonoro** β de um som como o expoente a que se deve elevar o número 10 para se obter a relação $\frac{I}{I_0}$. Então:

$$10^\beta = \frac{I}{I_0}$$

Pela definição de logaritmo decimal, podemos escrever:

$$\beta = \log \left(\frac{I}{I_0} \right)$$

Nessa fórmula, β é medida em **bel** (símbolo **B**), nome dado em homenagem a Alexander Graham Bell*, inventor do telefone.

Na prática geralmente medimos β em uma unidade menor, o **decibel (dB)**, sendo $1 \text{ dB} = \frac{1}{10} \text{ B}$. Nesse caso, temos:

$$\beta = 10 \cdot \log \left(\frac{I}{I_0} \right)$$

O som do tráfego na cidade é de 90 dB; um conjunto de *rock*, usando amplificador, produz intensidades audíveis de 125 dB, e o som de um avião a jato aterrissando é de aproximadamente 140 dB. Já está provado que uma exposição prolongada a níveis sonoros acima de 85 dB geralmente ocasiona um dano permanente às estruturas auditivas do ouvinte.

A avaliação do nível sonoro de um ambiente é feita com aparelhos denominados decibelímetros. ▶



Conteúdo digital Moderna PLUS <http://www.modernaplus.com.br>
A Física em nosso Mundo: *O som também polui*

* **BELL**, Alexander Graham (1847-1922), cientista escocês naturalizado norte-americano, fez inúmeros estudos no campo da Acústica. Sua grande contribuição para o desenvolvimento tecnológico de nossa civilização foi a invenção do microfone e, sobretudo, a do telefone.



Os amplificadores em um show de rock produzem intensidades em torno de 125 dB.



O uso de protetores auriculares por operários tem o propósito de evitar danos decorrentes da exposição prolongada a sons mais intensos que 85 dB.

3 Timbre

Quando um instrumento musical emite determinada nota, diversos sons de frequências múltiplas se superpõem para constituir essa nota. Desses sons, o de menor frequência constitui o **som fundamental**, e os demais, com frequências múltiplas, são os **harmônicos**. Assim, sendo f_1 a frequência do som fundamental, podemos ter o segundo harmônico ($f_2 = 2f_1$), o terceiro harmônico ($f_3 = 3f_1$) e assim sucessivamente. A superposição do som fundamental com os harmônicos determina a **forma da onda** emitida pelo instrumento, como se representa na figura 5.

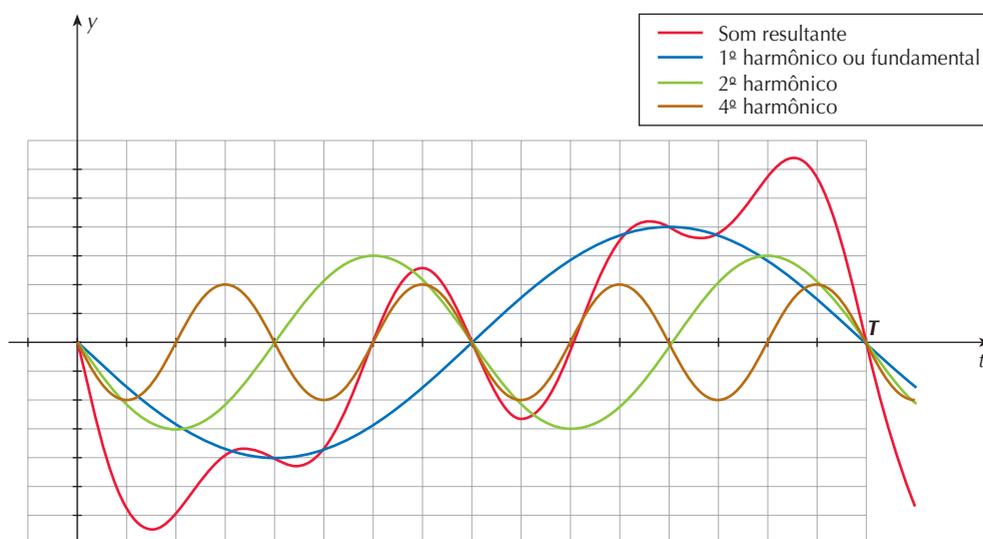


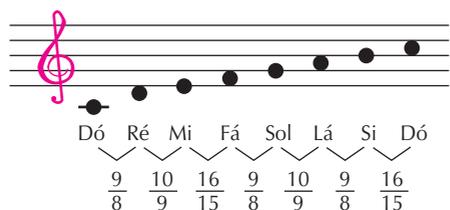
Figura 5. Composição dos sons emitidos por um instrumento.

O som fundamental ou primeiro harmônico está sempre presente e é ele que determina a frequência do som emitido. Os harmônicos que acompanham o som fundamental **variam de instrumento para instrumento**. É essa característica que torna distintos, para o ouvinte, sons de mesma altura (mesma frequência) emitidos por instrumentos diferentes, mesmo que esses sons tenham a mesma intensidade. A essa qualidade fisiológica do som damos o nome de **timbre**.

A escala musical

A denominada escala musical **natural** ou **diatônica** é formada por sons (notas musicais) que guardam entre si intervalos bem definidos na sequência: tom maior, tom menor, semitom, tom maior, tom menor, tom maior, semitom.

Por exemplo, considerando a escala natural de dó maior, temos:



A notação musical que usamos (bolinhas sobre o pentagrama) foi criação do monge beneditino Guido de Arezzo, no século XI, que também “batizou” as notas a partir de um hino sacro em homenagem a São João:

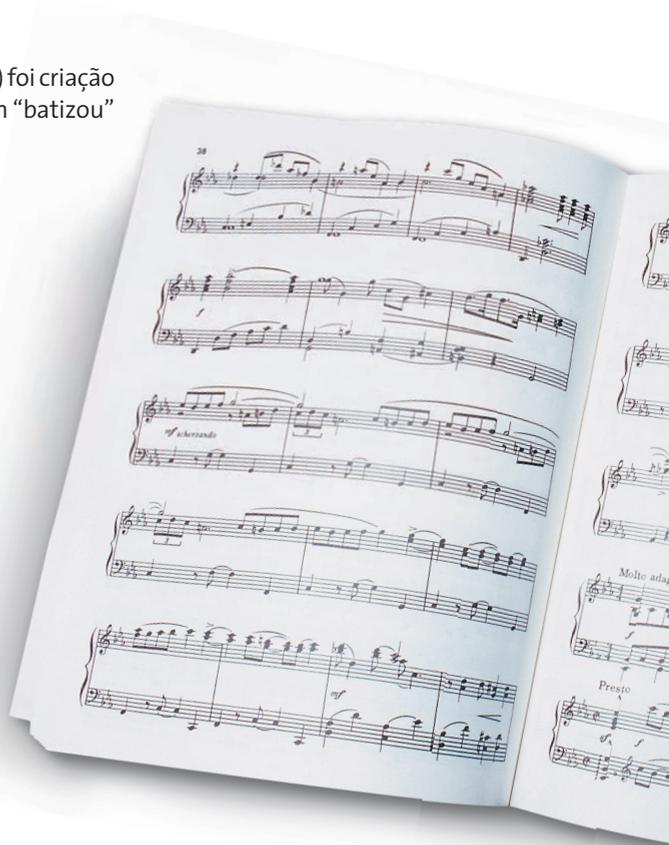
*Ut queant laxis
Ressonare fibris
Mira gestorum
Famuli tuorum*

*Solve polutti
Labi reatum
Sanctis Ioannis*

Com o tempo, “ut” foi substituído por “dó”.



◀ Gravura do século XVI que mostra a identificação de intervalos musicais com as relações entre os comprimentos dos segmentos vibrantes de uma corda.



EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

R. 135 Num festival de rock, os ouvintes próximos às caixas de som recebiam uma intensidade física sonora de 10 W/m^2 . Sendo 10^{-12} W/m^2 a menor intensidade física sonora audível, determine o nível sonoro do som ouvido por eles.

Solução:

Para o nível sonoro β expresso em decibels (dB), podemos escrever: $\beta = 10 \cdot \log \left(\frac{I}{I_0} \right)$

Como $I = 10 \text{ W/m}^2$ e $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$, temos:

$$\beta = 10 \cdot \log \left(\frac{10}{10^{-12}} \right) \Rightarrow \beta = 10 \cdot \log 10^{13} \Rightarrow \boxed{\beta = 130 \text{ dB}}$$

Resposta: 130 dB

R. 136 Num show de rock, uma pessoa a 40 metros de uma caixa acústica ouve sons de nível sonoro 120 dB. Admitindo que a fonte é puntiforme e isotrópica, qual é a potência por ela emitida? Ao nível sonoro de zero decibel corresponde a intensidade física $I_0 = 1,0 \cdot 10^{-12} \text{ W/m}^2$ (adote $\pi = 3$).

Solução:

Calculamos inicialmente a intensidade física I da onda emitida. Sendo $\beta = 120 \text{ dB}$ o nível sonoro e $I_0 = 1,0 \cdot 10^{-12} \text{ W/m}^2$ a intensidade física de referência, teremos:

$$\beta = 10 \log \frac{I}{I_0} \Rightarrow 120 = 10 \log \frac{I}{I_0} \Rightarrow \frac{I}{I_0} = 10^{12} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow I = 10^{12} I_0 \Rightarrow I = 10^{12} \cdot 10^{-12} \Rightarrow I = 1 \text{ W/m}^2$$

Como a onda se distribui a partir da fonte segundo esferas concêntricas, podemos escrever:

$$I = \frac{P}{A} = \frac{P}{4\pi R^2}$$

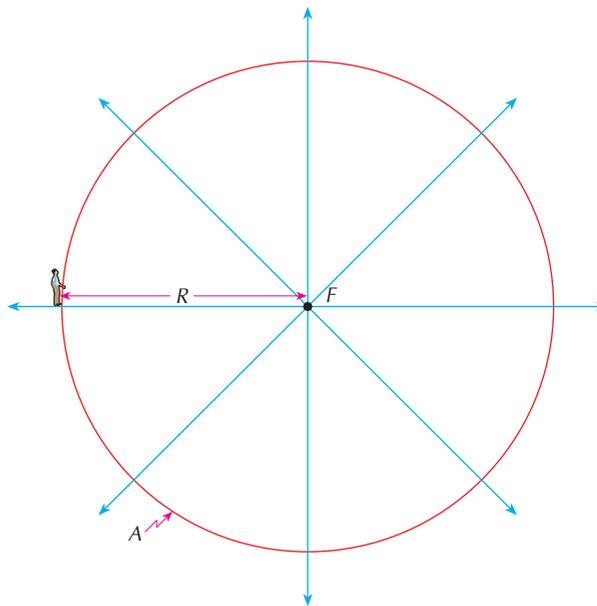
Para $R = 40 \text{ m}$ e $\pi = 3$, vem:

$$P = 4\pi R^2 I$$

$$P = 4 \cdot 3 \cdot 40^2 \cdot 1$$

$$P = 19.200 \text{ W} = 19,2 \text{ kW}$$

Resposta: 19,2 kW



EXERCÍCIOS PROPOSTOS

P. 483 Considere a nota musical de frequência $f = 440 \text{ Hz}$ (o lá₄ ou lá central). Qual é a frequência da nota que está:

- um tom maior acima?
- uma oitava acima?

P. 484 O sustenido corresponde a um intervalo igual a $\frac{25}{24}$. Se a frequência da nota musical ré₄ é 297 Hz, qual é a frequência do ré₄ sustenido?

P. 485 Em um jardim silencioso a intensidade física sonora é da ordem de $10^{-4} \mu\text{W/m}^2$, enquanto em um restaurante tal valor é da ordem de $10^{-1} \mu\text{W/m}^2$. Sabendo que a menor intensidade física sonora audível (limiar de audição) é $10^{-6} \mu\text{W/m}^2$, determine o nível sonoro, em decibels, para o jardim e o restaurante.

P. 486 O nível de ruído no interior de uma estação de metrô é de 100 dB. Calcule a intensidade física sonora no interior da estação. A mínima intensidade física sonora audível é $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$.

P. 487 A mínima intensidade sonora perceptível para o ouvido humano é 10^{-16} W/cm^2 e a máxima intensidade suportável sem dor é 10^{24} W/cm^2 . Uma fonte produz ondas sonoras que se propagam uniformemente em todas as direções do espaço. Um observador aproximando-se da fonte começa a perceber as ondas emitidas a partir de uma distância de 1 km da fonte. Adotando $\pi = 3$, determine:

- a potência sonora da fonte;
- a menor distância a que uma pessoa poderá chegar da fonte sem sentir dor;
- o nível sonoro correspondente a essa posição.



Objetivos

- ▶ Compreender as propriedades das ondas sonoras: reflexão, refração, difração e interferência.
- ▶ Conhecer o funcionamento do sonar.

Termos e conceitos

- persistência auditiva
 - reforço
- reverberação
 - eco
- batimento

As ondas sonoras apresentam as mesmas propriedades dos demais tipos de ondas: **reflexão**, **refração**, **difração** e **interferência**. Elas só **não** podem ser polarizadas porque **não são ondas transversais**.

1 Reflexão sonora. Reforço, reverberação e eco

A **reflexão do som** pode dar origem ao reforço, à reverberação ou ao eco, dependendo do intervalo de tempo entre a percepção, pelo ouvinte, do som direto e do som refletido.

A ocorrência de um ou de outro desses fenômenos deve-se ao fato de só conseguirmos distinguir dois sons que nos chegam com um intervalo de tempo superior a 0,1 s (um décimo de segundo). Esse intervalo de tempo é denominado **persistência auditiva**.

Se o obstáculo que reflete o som estiver muito próximo, o som direto e o som refletido chegam praticamente no mesmo instante. O ouvinte terá então a sensação de um som mais forte. A esse fenômeno se dá o nome de **reforço**.

Quando o obstáculo refletor está mais afastado, de modo que o intervalo entre a percepção do som direto e a do som refletido é menor que 0,1 s, mas não é desprezível, ocorre o fenômeno da **reverberação**. Nesse caso o som refletido chega ao sistema auditivo, enquanto a sensação do som direto ainda não se extinguiu. O ouvinte tem então a impressão de um prolongamento do som. Nos auditórios, a reverberação, desde que não exagerada, auxilia o entendimento do que está sendo falado.

O **eco** ocorre quando o som refletido é recebido pelo ouvinte depois que o som direto já se extinguiu. Assim, o ouvinte percebe dois sons distintos. Para que isso aconteça, o intervalo de tempo entre a percepção dos dois sons (direto e refletido) deve ser maior que 0,1 s. Considere a situação da **figura 6**: uma pessoa situada a uma distância x de uma parede grita um monossílabo. Para haver eco, devemos ter: $\Delta t > 0,1$ s.

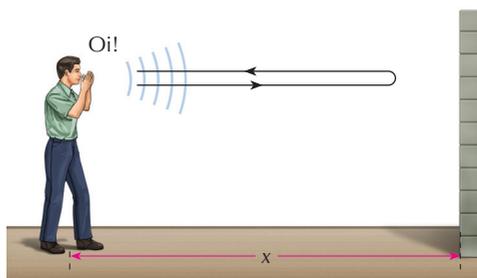


Figura 6. Para haver eco, deve-se ter $x > 17$ m.

$$\text{Mas, de } v = \frac{\Delta s}{\Delta t}, \text{ temos: } \Delta t = \frac{\Delta s}{v}$$

A condição para que ocorra o eco é: $\frac{\Delta s}{v} > 0,1$ s. Sendo $v = 340$ m/s a velocidade do som no ar e $\Delta s = 2x$ (ida e volta), vem:

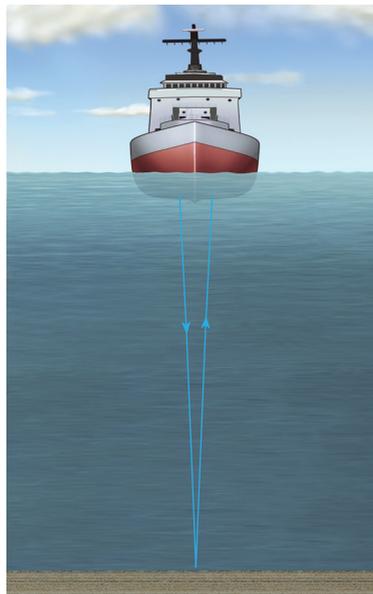
$$\frac{2x}{340} > 0,1 \Rightarrow x > 17 \text{ m}$$

Portanto, um ouvinte percebe o eco desde que sua distância ao obstáculo refletor seja superior a 17 m no ar.

O sonar

O **sonar** (Sound Navigation And Ranging) é um dispositivo que, instalado em navios e submarinos, possibilita medir profundidades oceânicas e detectar a presença de obstáculos. Originalmente foi desenvolvido com finalidades bélicas, durante a Segunda Guerra Mundial (1939-1945), como um meio de localizar submarinos e outras embarcações do inimigo.

Seu funcionamento baseia-se na reflexão de ondas sonoras. O sonar emite ultrassons e capta as ondas que se refletem no eventual obstáculo, medindo o intervalo de tempo entre a emissão e a recepção. Conhecida a velocidade de propagação das ondas sonoras na água, é possível determinar a que distância se encontra o obstáculo refletor.



Esquema do sonar.



Emitindo ultrassons e recebendo as ondas refletidas, os morcegos localizam alimentos, como flores, frutos e insetos, e evitam colisões com obstáculos enquanto voam, mesmo em total escuridão.

2 Refração e difração sonora

A **refração do som** ocorre quando uma onda sonora produzida em um meio passa para outro meio em que sua velocidade é diferente. Nesse caso, **a frequência do som permanece a mesma, modificando-se seu comprimento de onda.**

A **difração do som** possibilita que as ondas sonoras contornem obstáculos com dimensões de até 20 m. Considerando que a velocidade do som no ar, em determinadas condições, é $v = 340$ m/s, e que o sistema auditivo humano distingue sons de frequências $f_{\text{mín.}} = 20$ Hz até $f_{\text{máx.}} = 20.000$ Hz, o comprimento de onda do som no ar pode variar entre:

$$\lambda_{\text{máx.}} = \frac{v}{f_{\text{mín.}}} = \frac{340}{20} \Rightarrow \lambda_{\text{máx.}} = 17 \text{ m} \quad \lambda_{\text{mín.}} = \frac{v}{f_{\text{máx.}}} = \frac{340}{20.000} = 0,017 \text{ m} \Rightarrow \lambda_{\text{mín.}} = 1,7 \text{ cm}$$

Na prática considera-se essa variação entre 2 cm e 20 m. Assim, a difração das ondas sonoras audíveis no ar é bem perceptível quando os obstáculos a serem contornados têm dimensões dessa ordem de grandeza.

3 Interferência sonora

A **interferência do som** pode ocorrer quando um ponto do meio recebe dois ou mais sons originados por várias fontes ou por reflexões em obstáculos.

Valem, para a interferência das ondas sonoras, as mesmas condições estabelecidas para as ondas em geral. Chamando de d a diferença entre as distâncias percorridas pelas ondas desde as respectivas fontes até o ponto de superposição, temos:

Fontes em concordância de fase (ou em fase)

- $d = p \frac{\lambda}{2}$ (sendo $p = 0, 2, 4, 6\dots$): **interferência construtiva**
- $d = i \frac{\lambda}{2}$ (sendo $i = 1, 3, 5, 7\dots$): **interferência destrutiva**

Fontes em oposição de fase

- $d = p \frac{\lambda}{2}$ (sendo $p = 0, 2, 4, 6, \dots$): **interferência destrutiva**
- $d = i \frac{\lambda}{2}$ (sendo $i = 1, 3, 5, 7, \dots$): **interferência construtiva**

Um caso importante de interferência sonora é o denominado **batimento**, que ocorre quando há interferência de ondas sonoras de **frequências ligeiramente diferentes**. A intensidade varia de um som forte, que se ouve em dado instante, para um silêncio quase total; a seguir novamente o som forte, e assim por diante. A razão desse comportamento é mostrada na **figura 7**: os sons fortes ocorrem quando as ondas interferem construtivamente, reforçando-se umas às outras, e o silêncio, quando há interferência destrutiva e as ondas se anulam total ou parcialmente. **A frequência do batimento (f_b) é igual à diferença entre as frequências componentes:**

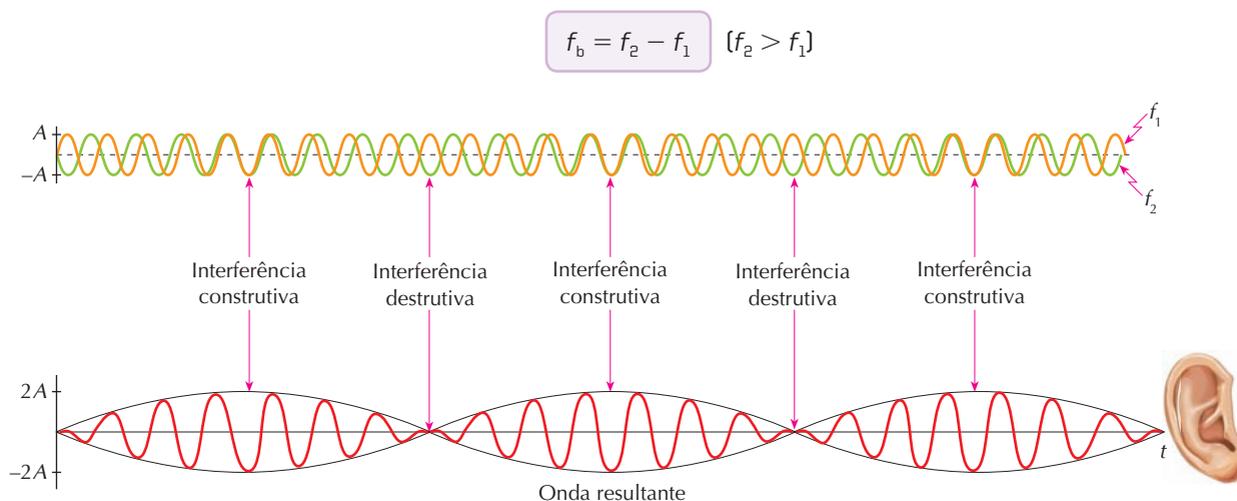


Figura 7. Batimentos.

O ser humano distingue batimentos até uma frequência $f_b \approx 7$ Hz.

É comum os músicos de uma orquestra afinarem seus instrumentos utilizando o fenômeno de batimentos. Enquanto as frequências (do instrumento e da fonte afinadora) são diferentes, mas próximas, ouvem-se os batimentos. À medida que o instrumento vai sendo afinado, a frequência de batimento vai diminuindo até desaparecer quando as frequências se tornam iguais.

A tecnologia do silêncio

A eliminação de ruídos indesejáveis pode ser feita utilizando-se o fenômeno da **interferência**. Microfones captam os ruídos do ambiente e os enviam a um computador. Este analisa o som recebido e emite outro, em oposição de fase relativamente ao som captado. Da superposição das duas ondas resulta uma interferência destrutiva e, conseqüentemente, o silêncio.

Essa técnica vem sendo desenvolvida em vários países com a finalidade de eliminar os elevados níveis de ruído produzidos pelas turbinas, no interior de caças-bombardieiros, ou por motores a explosão, nos carros de combate. Os intensos ruídos, além de dificultar o enten-

dimento das instruções que os tripulantes recebem pelo rádio, provocam danos auditivos irreversíveis.

Seguindo essa mesma diretriz, algumas indústrias do setor automotivo têm instalado em veículos pesados, como caminhões de grande tonelage, um silenciador eletrônico para motores a explosão. Esse dispositivo consiste em um microprocessador que produz ondas sonoras de mesma frequência que as emitidas pelo motor, mas em oposição de fase. Essas ondas se superpõem às originais e determinam uma interferência destrutiva, isto é, o silêncio, garantindo o conforto sonoro para os usuários do veículo e para a população em geral.

EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

R. 137 É necessário que o som no ar, onde sua velocidade é 340 m/s, percorra uma distância superior a 34 m para que exista o efeito de eco. A velocidade do som na água é aproximadamente 1.600 m/s. Calcule a partir de que distância de um mergulhador deve estar um obstáculo para que ele perceba o eco de um som produzido por si mesmo.

Solução:

Por facilidade, vamos considerar a situação limite, ou seja, o som deve percorrer a distância $\Delta s = 34$ m para se ouvir eco no ar ($v_{\text{ar}} = 340$ m/s). O intervalo de tempo entre o som direto e o refletido deve ser, portanto:

$$\Delta t = \frac{\Delta s}{v_{\text{ar}}} \Rightarrow \Delta t = \frac{34}{340} \Rightarrow \Delta t = 0,1 \text{ s}$$

Seja L a distância do mergulhador ao obstáculo na água. O mergulhador percebe o eco do som por ele emitido se este percorrer a distância $2L$ no intervalo de tempo $\Delta t = 0,1$ s. Portanto:

$$2 \cdot L = v_{\text{água}} \cdot \Delta t \Rightarrow 2 \cdot L = 1.600 \cdot 0,1 \Rightarrow L = 80 \text{ m}$$



Resposta: O obstáculo deve estar a uma distância superior a 80 m em relação ao mergulhador.

R. 138 As velocidades do som no ar e na água destilada a 0 °C são, respectivamente, 332 m/s e 1.404 m/s. Faz-se um diapasão de 440 Hz vibrar nas proximidades de um reservatório de água àquela temperatura. Determine o quociente dos comprimentos de onda dentro e fora da água.

Solução:

A frequência do som emitido pelo diapasão $f = 440$ Hz é a mesma tanto no ar como na água. O comprimento de onda $\lambda = \frac{v}{f}$ muda devido à mudança na velocidade de propagação do som no ar e na água.

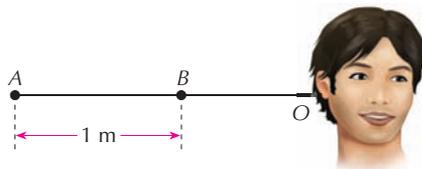
$$\text{Então: } \lambda_{\text{água}} = \frac{v_{\text{água}}}{f} \quad \textcircled{1} \quad \lambda_{\text{ar}} = \frac{v_{\text{ar}}}{f} \quad \textcircled{2}$$

Dividindo $\textcircled{1}$ por $\textcircled{2}$, obtemos:

$$\frac{\lambda_{\text{água}}}{\lambda_{\text{ar}}} = \frac{v_{\text{água}}}{v_{\text{ar}}} \Rightarrow \frac{\lambda_{\text{água}}}{\lambda_{\text{ar}}} = \frac{1.404}{332} \Rightarrow \frac{\lambda_{\text{água}}}{\lambda_{\text{ar}}} \approx 4,23$$

Resposta: $\approx 4,23$

R. 139 Nos pontos A e B da figura estão dois alto-falantes que emitem sons de mesma frequência e em fase. A velocidade do som no ar é 340 m/s. A frequência dos sons vai aumentando, a partir de 20 Hz, e atinge um valor em que o observador O à direita de B deixa de ouvir o som. Determine essa frequência.



Solução:

Para que o observador O deixe de ouvir o som, as ondas provenientes dos alto-falantes em A e B devem chegar em oposição de fase. Assim, a diferença dos caminhos percorridos pelo som $(OA - OB)$ deve ser igual a um número ímpar de meios comprimentos de onda:

$$OA - OB = i \frac{\lambda}{2}$$

Considerando $i = 1$, temos:

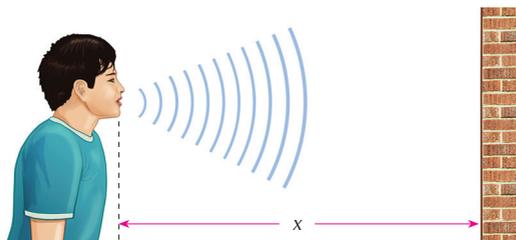
$$OA - OB = \frac{\lambda}{2} \Rightarrow 1 = \frac{\lambda}{2} \Rightarrow \lambda = 2 \text{ m}$$

$$\text{Então: } f = \frac{v}{\lambda} \Rightarrow f = \frac{340}{2} \Rightarrow f = 170 \text{ Hz}$$

Resposta: 170 Hz

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

P. 488 (Unicamp-SP) O menor intervalo de tempo entre dois sons percebido pelo ouvido humano é de 0,10 s. Considere uma pessoa defronte a uma parede num local onde a velocidade do som é de 340 m/s.



- Determine a distância x para a qual o eco é ouvido 3,0 s após a emissão da voz.
- Determine a menor distância para que a pessoa possa distinguir a sua voz e o eco.

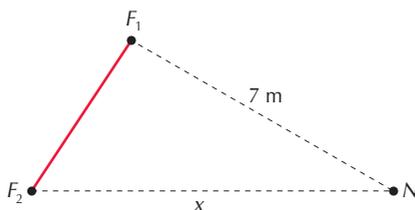
P. 489 Para perceber o eco de um som no ar, onde a velocidade de propagação é 340 m/s, há necessidade de a fonte sonora e o obstáculo refletor estarem separados por uma distância superior a 17 m. Qual é a condição para haver eco num meio em que a velocidade do som é 2.000 m/s?

P. 490 (Vunesp) Um submarino é equipado com um aparelho denominado **sonar**, que emite ondas acústicas de frequência $4,00 \cdot 10^4$ Hz. As velocidades das ondas emitidas no ar e na água são, respectivamente, $3,70 \cdot 10^2$ m \cdot s $^{-1}$ e $1,40 \cdot 10^3$ m \cdot s $^{-1}$. Esse submarino, quando em repouso na superfície, emite um sinal na direção vertical através do oceano e o eco é recebido após 0,80 s. Pergunta-se:

- Qual é a profundidade do oceano nesse local?
- Qual é a razão entre o comprimento de onda do som no ar e na água?

P. 491 (PUC-SP) Uma fonte emite onda sonora de frequência 500 Hz, próximo à superfície de um lago, e ela sofre refração na água. Determine seu comprimento de onda no ar e na água, admitindo que as velocidades dessa onda no ar e na água sejam, respectivamente, 330 m/s e 1.500 m/s.

P. 492 Dois alto-falantes pequenos e iguais encontram-se nos pontos F_1 e F_2 , como mostra a figura, e emitem sons de mesma frequência e em fase. O comprimento de onda do som emitido é 2 m. O ponto N (ponto nodal) está a 7 m de F_1 . Calcule a menor distância x que pode separar N de F_2 (considere $x > 7$ m).



P. 493 Dois alto-falantes, um em P e outro em Q , emitem sons de mesma frequência (3.400 Hz) e em fase. A velocidade do som no ar é 340 m/s. Um observador em R ouve um som forte (interferência construtiva). A partir de um dado momento, a frequência dos alto-falantes começa a aumentar contínua e simultaneamente, até que num dado instante o observador percebe um notável enfraquecimento do som. Determine, nesse instante, a nova frequência dos alto-falantes.



P. 494 Ouvem-se 5 batimentos por segundo quando um diapasão de frequência 528 Hz é posto a vibrar próximo de um outro já em vibração. Que valores pode ter a frequência do segundo diapasão?

Objetivos

- ▶ Compreender como a formação de ondas estacionárias nas cordas vibrantes origina as ondas sonoras.
- ▶ Conhecer os harmônicos de uma corda vibrante.
- ▶ Analisar o fenômeno da ressonância e as situações cotidianas nas quais ela ocorre.
- ▶ Compreender o funcionamento dos tubos sonoros fechados e abertos.
- ▶ Conhecer a frequência fundamental e os harmônicos de um tubo sonoro.

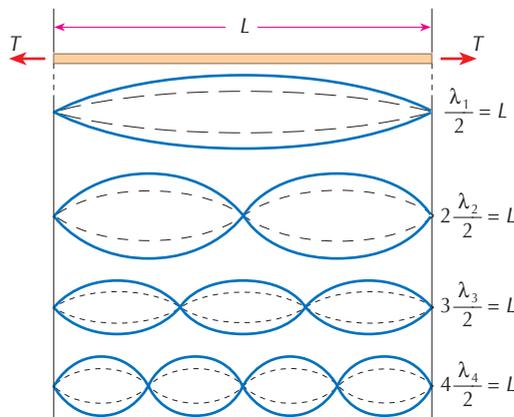
Termos e conceitos

- frequência natural de vibração
- caixa de ressonância
- concha acústica

1 Cordas vibrantes. Ressonância

Considere a corda de massa m , comprimento L e, portanto, densidade linear $\mu = \frac{m}{L}$ da **figura 8**, fixada nas extremidades e submetida à força de tração T . Provocando-se ondas transversais nessa corda, por exemplo, mediante uma percussão, elas se propagam com velocidade:

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



◀ **Figura 8.** Ondas estacionárias em uma corda vibrante.

A propagação dessas ondas e sua reflexão nas extremidades determinam a formação de ondas estacionárias, com nós nas extremidades. Essas **ondas estacionárias** provocam no ar regiões de compressão e rarefação, isto é, originam ondas sonoras.

Em vista da formação de nós nas extremidades fixas (**fig. 8**), as ondas que se propagam na corda apresentam comprimentos de onda iguais a:

$$\frac{\lambda_1}{2} = L \Rightarrow \lambda_1 = 2L$$

$$2\frac{\lambda_2}{2} = L \Rightarrow \lambda_2 = \frac{2L}{2} \Rightarrow \lambda_2 = L$$

$$3\frac{\lambda_3}{2} = L \Rightarrow \lambda_3 = \frac{2L}{3}$$

$$4\frac{\lambda_4}{2} = L \Rightarrow \lambda_4 = \frac{2L}{4} \Rightarrow \lambda_4 = \frac{L}{2}$$

e assim por diante.

A condição de formação de nós em cada extremidade restringe, portanto, os possíveis comprimentos de onda das ondas que originam as ondas estacionárias a:

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

A menor frequência f_1 de vibração da corda corresponde ao comprimento de onda $\lambda_1 = 2L$. Fazendo $n = 1$ na expressão anterior, temos:

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

Frequências maiores corresponderão a comprimentos de onda menores. De maneira geral:

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

Essas frequências maiores podem ser indicadas em função da menor frequência f_1 por:

$$f_n = n f_1 \text{ (sendo } n = 1, 2, 3, \dots)$$

A vibração que corresponde à frequência f_1 é chamada de **fundamental** ou **primeiro harmônico**, e as vibrações de frequência f_2, f_3, \dots são os **harmônicos da fundamental**. Então f_2 é o segundo harmônico, f_3 é o terceiro harmônico, e assim por diante.

A frequência fundamental e os harmônicos de uma corda vibrante são suas **frequências naturais de vibração**. É importante observar que, se a corda for percutida arbitrariamente, uma ou mais dessas frequências poderão ser estimuladas. Os harmônicos se superpõem, determinando a **forma da onda** e caracterizando o **timbre** do som emitido.

A resistência do meio onde a corda se encontra fará com que as vibrações desapareçam aos poucos. Pode-se fazer com que as vibrações persistam percutindo-se periodicamente a corda com frequência igual a uma de suas frequências naturais. As ondas estacionárias continuarão enquanto a percussão periódica fornecer energia à corda.

Qualquer fonte sonora produz no ar vibrações que estimulam oscilação em corpos situados nas proximidades. Quando a frequência da fonte coincide com uma frequência natural de oscilação do corpo, a amplitude de oscilação deste atinge valores elevados, pois a fonte progressivamente cede energia ao corpo. Esse fenômeno é denominado **ressonância**. Um exemplo de ressonância é a quebra de uma taça de cristal quando um violino, nas proximidades, é tocado com frequência igual a uma das frequências naturais de vibração da taça.



Com a mesma corda de um violão podem-se obter notas musicais diferentes alterando-se o comprimento da parte vibrante.



No violino, as cordas entram em vibração ao serem friccionadas com um arco apropriado.



Na harpa, as cordas mais longas emitem sons mais graves, e as mais curtas, sons mais agudos.

Outros exemplos de ressonância

Sempre que um sistema vibrante recebe energia periodicamente com frequência igual a uma de suas frequências naturais de vibração, esse sistema entra em ressonância. Portanto pode ocorrer ressonância em muitas situações, sem que ondas estejam envolvidas.

1. Empurrando-se periodicamente um balanço com frequência igual à do balanço, este oscila com amplitudes cada vez maiores.
2. A ponte do rio Tacoma, nos Estados Unidos, ruiu em 1940, quando uma ventania lhe imprimiu impulsos periódicos com frequência igual a uma frequência natural de vibração da ponte.
3. Ao sintonizar uma emissora de rádio, fazemos com que o circuito do aparelho entre em ressonância com a frequência das ondas da emissora.
4. Num violão, o ar da **caixa de ressonância** vibra com frequência igual à da corda tocada, intensificando o som.
5. A **concha acústica**, presente em muitos auditórios ao ar livre, tem a função de melhorar a audição, por parte da plateia, dos sons emitidos. Seu funcionamento baseia-se no fenômeno da ressonância. As características geométricas da concha é que determinam as frequências sonoras que são intensificadas.
6. Se uma ampola com vapor de mercúrio for posta ao lado de uma lâmpada de vapor de mercúrio acesa, a ampola passa a emitir luz em virtude da ressonância.



▶ A destruição da ponte do rio Tacoma (Washington, Estados Unidos) é um bom exemplo de ressonância. Inaugurada em 1º de julho de 1940, foi destruída quatro meses após, por vibração provocada pelo vento.



▶ Conchas acústicas da Ópera de Sidney, na Austrália.

Reprodução proibida. Art. 184 do Código Penal e Lei 9.610 de 19 de fevereiro de 1998.

EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

R. 140 Numa corda de comprimento 120 cm, as ondas formadas se propagam com velocidade de 90 m/s. Determine o comprimento da onda e a frequência para a vibração fundamental, o segundo e o terceiro harmônico que se estabelecem nessa corda.

Solução:

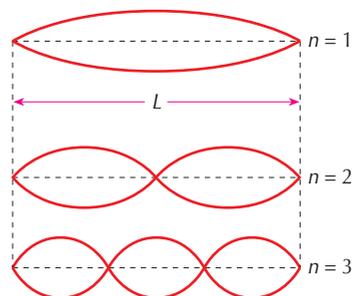
O comprimento da corda é $L = 120 \text{ cm} = 1,20 \text{ m}$.

Os comprimentos de onda obedecem à fórmula geral: $\lambda_n = \frac{2L}{n}$

$$\text{Para a vibração fundamental } (n = 1): \lambda_1 = \frac{2 \cdot 1,20}{1} \Rightarrow \lambda_1 = 2,40 \text{ m}$$

$$\text{Para o 2º harmônico } (n = 2): \lambda_2 = \frac{2 \cdot 1,20}{2} \Rightarrow \lambda_2 = 1,20 \text{ m}$$

$$\text{Para o 3º harmônico } (n = 3): \lambda_3 = \frac{2 \cdot 1,20}{3} \Rightarrow \lambda_3 = 0,80 \text{ m}$$



Sendo $v = 90 \text{ m/s}$ a velocidade de propagação das ondas na corda, a frequência delas será dada por:

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

Então:

$$f_1 = \frac{v}{\lambda_1} \Rightarrow f_1 = \frac{90}{2,40} \Rightarrow \boxed{f_1 = 37,5 \text{ Hz}} \quad f_2 = \frac{v}{\lambda_2} \Rightarrow f_2 = \frac{90}{1,20} \Rightarrow \boxed{f_2 = 75,0 \text{ Hz}}$$

$$f_3 = \frac{v}{\lambda_3} \Rightarrow f_3 = \frac{90}{0,80} \Rightarrow \boxed{f_3 = 112,5 \text{ Hz}}$$

Respostas: 2,40 m; 1,20 m; 0,80 m; 37,5 Hz; 75,0 Hz; 112,5 Hz

R. 141 Uma corda de 75 cm de comprimento e densidade linear $1,44 \cdot 10^{-4} \text{ g/cm}$ está fixa nas extremidades. Ao vibrar, ela emite o som fundamental quando submetida a uma força de tração 10 N.

- Determine a frequência do som fundamental.
- Calcule o fator pelo qual se deve multiplicar a intensidade da força de tração para que a frequência do novo som fundamental seja igual à do segundo harmônico do caso anterior.

Solução:

a) A densidade linear da corda vale:

$$\mu = 1,44 \cdot 10^{-4} \frac{\text{g}}{\text{cm}} \Rightarrow \mu = 1,44 \cdot 10^{-4} \cdot \left(\frac{10^{-3} \text{ kg}}{10^{-2} \text{ m}} \right) \Rightarrow \mu = 1,44 \cdot 10^{-5} \text{ kg/m}$$

Sendo $T = 10 \text{ N}$, as ondas se propagam na corda com velocidade dada por:

$$v = \sqrt{\frac{T}{\mu}} = \sqrt{\frac{10}{1,44 \cdot 10^{-5}}} = \sqrt{\frac{10^6}{1,44}} = \sqrt{\frac{10^8}{144}} \Rightarrow v = \frac{10^4}{12} \text{ m/s}$$

Sendo $L = 75 \text{ cm} = 0,75 \text{ m}$ o comprimento da corda, a frequência fundamental será:

$$f_1 = \frac{v}{2L} = \frac{10^4}{12 \cdot 2 \cdot 0,75} = \frac{10^4}{18} \Rightarrow f_1 \approx 556 \text{ Hz}$$

A vibração da corda faz vibrar o ar adjacente, originando um som de mesma frequência. Portanto, a frequência do som fundamental emitido será: $\boxed{f_1 \approx 556 \text{ Hz}}$

b) Temos: $f_2 = 2f_1 \Rightarrow \frac{v_2}{2L} = 2 \cdot \frac{v_1}{2L} \Rightarrow v_2 = 2v_1$

Aplicando a fórmula $v = \sqrt{\frac{T}{\mu}}$ para as velocidades v_1 e v_2 , obtemos:

$$\sqrt{\frac{T_2}{\mu}} = 2 \sqrt{\frac{T_1}{\mu}} \Rightarrow \frac{T_2}{\mu} = 4 \frac{T_1}{\mu} \Rightarrow \boxed{T_2 = 4T_1}$$

Respostas: a) $\approx 556 \text{ Hz}$; b) 4

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

P. 495 (UFU-MG) Uma corda de comprimento $L = 2,0 \text{ m}$ tem as duas extremidades fixas. Procura-se estabelecer um sistema de ondas estacionárias com frequência igual a 120 Hz, obtendo-se o terceiro harmônico. Determine:

- o comprimento de onda;
- a velocidade de propagação;
- a distância entre um nó e um ventre consecutivo.

P. 496 (Fuvest-SP) Considere uma corda de violão com 50 cm de comprimento que está afinada para vibrar com uma frequência fundamental de 500 Hz.

- Qual é a velocidade de propagação da onda nessa corda?
- Se o comprimento da corda for reduzido à metade, qual será a nova frequência do som emitido?

P. 497 (UFPR) Uma onda estacionária de frequência igual a 24 Hz é estabelecida sobre uma corda vibrante fixada nos extremos. Sabendo-se que a frequência imediatamente superior a essa, que pode ser estabelecida na mesma corda, é de 30 Hz, qual é a frequência fundamental da corda?

P. 498 (UFC-CE) Duas cordas de diâmetros iguais foram construídas de um mesmo material, uma de comprimento $L_1 = 60 \text{ cm}$ e outra de comprimento $L_2 = 40 \text{ cm}$. A primeira é submetida a uma tensão $T_1 = 40 \text{ N}$, e a segunda, a uma tensão $T_2 = 90 \text{ N}$. Quando postas em oscilação, verifica-se que a de comprimento L_1 tem frequência fundamental de 36 Hz. A partir desses dados, determine, em Hz, para a corda L_2 a sua frequência fundamental.



P. 499 (Fuvest-SP) A frequência fundamental do som emitido por uma corda vibrante é dada pela expressão:

$$f = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{F}{\mu}}$$

em que T é a tração, μ é a densidade linear e L o comprimento da corda.

Uma corda de 0,50 m com densidade linear 10^{-2} kg/m está submetida a uma tração de 100 N.

- Calcule a frequência fundamental do som emitido pela corda.
- O que se deve fazer com essa corda para dobrar a frequência do som fundamental?

P. 500 Uma corda vibrante de comprimento 1 m emite o som fundamental ao ser submetida a uma força de tração de 2 kgf. Para que a mesma corda emita como som fundamental o segundo harmônico anterior, determine a nova força de tração.

P. 501 (UFV-MG) A corda ré de um violão tem a densidade linear de 0,60 g/m e está fixada entre o cavalete e o extremo do braço, separados por uma distância de 85 cm. Sendo 294 Hz a frequência da vibração fundamental da corda, calcule:

- a velocidade de propagação da onda transversal na corda;
- a tração na corda.

P. 502 (Vunesp) Uma corda de violão, de comprimento L e massa por unidade de comprimento igual a μ , tensionada pela força F , quando excitada, pode produzir frequências de vibração dadas por

$$f_n = \left(\frac{n}{2L}\right) \cdot \sqrt{\frac{F}{\mu}} \text{ com } n = 1, 2, 3, 4, \dots \text{ A velocidade de propagação da onda na corda é } v = \sqrt{\frac{F}{\mu}}.$$

- Obtenha uma expressão que relacione os possíveis comprimentos de onda com o número n .
- Desenhe os 4 primeiros modos de vibração para a corda.

2 Colunas de ar vibrante. Tubos sonoros

Considere uma fonte sonora, por exemplo um diapasão, vibrando sobre a extremidade aberta de um tubo de vidro parcialmente preenchido com água.

Em certas condições, o som emitido pelo diapasão é reforçado, aumentando sua intensidade: quando o reservatório R da **figura 9** é levantado, o nível da água no tubo sobe e verifica-se existirem determinadas posições do nível da água para as quais a coluna de ar no tubo vibrando entra em **ressonância** com o som emitido pelo diapasão.

As ondas sonoras emitidas pelo diapasão propagam-se pelo ar no tubo e interferem com as ondas refletidas na superfície da água, originando ondas estacionárias no ar.

O tubo da **figura 9** terá um **nó na extremidade fechada** e um **ventre na extremidade aberta**, conforme ilustrado na **figura 10**. De fato, na extremidade fechada, as moléculas de ar do tubo são impedidas de se movimentarem pela superfície da água, enquanto, na extremidade aberta, elas se movimentam facilmente para o espaço aberto.

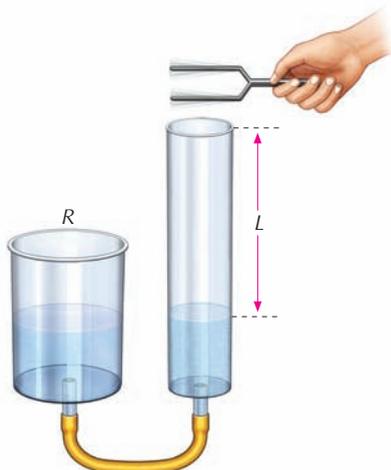


Figura 9. Ressonância de uma coluna de ar com um diapasão.

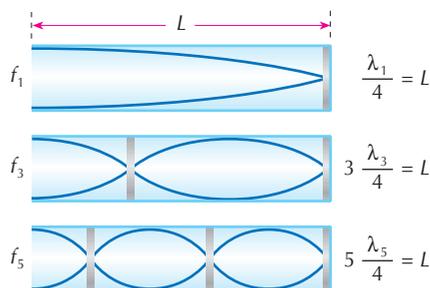


Figura 10. Modos naturais de vibração de uma coluna de ar em um tubo fechado numa extremidade. As regiões mais escuras, onde a pressão do ar é maior, correspondem aos nós.

Então o ar no tubo somente entra em ressonância para ondas que se encaixam no comprimento L do tubo, com um nó na extremidade fechada e um ventre na aberta, como esquematizado na **figura 10**. Como a distância entre um nó e um ventre é igual a um quarto do comprimento de onda, têm-se os seguintes comprimentos de onda:

$$\frac{\lambda_1}{4} = L \Rightarrow \lambda_1 = 4L$$

$$3\frac{\lambda_3}{4} = L \Rightarrow \lambda_3 = \frac{4L}{3}$$

$$5\frac{\lambda_5}{4} = L \Rightarrow \lambda_5 = \frac{4L}{5}$$

e assim por diante.

A condição de formação de nó na extremidade fechada e de ventre na aberta restringe portanto os possíveis comprimentos de onda das ondas que originam as ondas estacionárias no tubo fechado a:

$$\lambda_i = \frac{4L}{i} \text{ (sendo } i = 1, 3, 5, 7, \dots \text{)}$$

A frequência fundamental f_1 corresponde ao comprimento de onda $\lambda_1 = 4L$, em que $i = 1$.

Como:

$$f_1 = \frac{v}{\lambda_1} \Rightarrow f_1 = \frac{v}{4L}$$

A frequência dos demais harmônicos será:

$$f_i = \frac{v}{\lambda_i} \Rightarrow f_i = \frac{v}{\frac{4L}{i}}$$

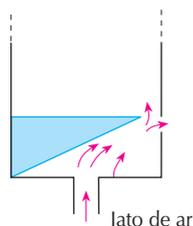
Portanto:

$$f_i = i \frac{v}{4L} \quad \text{ou} \quad f_i = if_1 \text{ (sendo } i = 1, 3, 5, 7, \dots \text{)}$$

Nesse tubo só podemos estabelecer harmônicos de **frequências ímpares da frequência fundamental**, isto é, o terceiro harmônico $f_3 = 3f_1$, o quinto harmônico $f_5 = 5f_1$, e assim por diante.

Conhecendo-se a frequência do diapasão, a ressonância no tubo da **figura 9** pode ser usada para medir a velocidade de propagação v do som no ar.

Os **tubos sonoros fechados** funcionam de modo idêntico à coluna de ar vibrando no tubo que acabamos de estudar (**fig. 10**). Em vez da fonte sonora, a vibração do ar é estimulada soprando-se em um dispositivo especial, denominado **embocadura** (**fig. 11**), no qual sempre se forma um ventre.

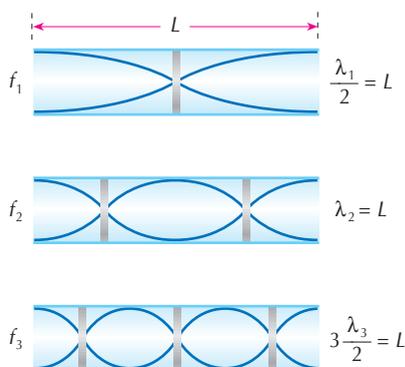


◀ **Figura 11.** Na embocadura dos tubos sonoros (e demais instrumentos de sopro), o ar assoprado é forçado a um turbilhonamento que faz vibrar todo o conteúdo do tubo, produzindo o som.



▶ Os instrumentos de sopro, como a clarineta, têm seu funcionamento baseado na vibração de colunas de ar.

Nos **tubos sonoros abertos**, a extremidade oposta à embocadura é aberta e as ondas estacionárias apresentam ventres em ambas as extremidades (**fig. 12**).



◀ **Figura 12.** Modos naturais de vibração de uma coluna de ar num tubo aberto. A natureza longitudinal é sugerida pelas regiões mais escuras. Onde a pressão do ar é maior formam-se os nós.

Em razão de se formarem ventres nas extremidades (**fig. 12**), as ondas que se propagam no tubo têm comprimentos de onda iguais a:

$$\frac{\lambda_1}{2} = L \Rightarrow \lambda_1 = 2L$$

$$2 \frac{\lambda_2}{2} = L \Rightarrow \lambda_2 = L$$

$$3 \frac{\lambda_3}{2} = L \Rightarrow \lambda_3 = \frac{2L}{3}$$

e assim sucessivamente.

Portanto, os possíveis comprimentos de onda são dados por:

$$\lambda_n = \frac{2L}{n} \text{ (sendo } n = 1, 2, 3, \dots \text{)}$$

A frequência fundamental correspondente a $n = 1$ é dada por:

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

Generalizando, para um harmônico qualquer de ordem n a frequência será dada por:

$$f_n = \frac{v}{\lambda_n} \Rightarrow f_n = \frac{v}{\frac{2L}{n}} \Rightarrow f_n = n \frac{v}{2L} \text{ (sendo } n = 1, 2, 3, \dots \text{)}$$

ou

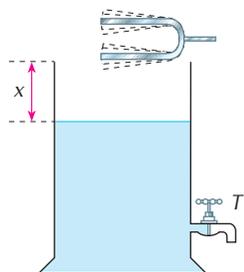
$$f_n = n f_1 \text{ (sendo } n = 1, 2, 3, \dots \text{)}$$

Portanto, nos tubos sonoros abertos, todos os harmônicos podem estar presentes, à semelhança do que ocorre com as cordas vibrantes.

EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

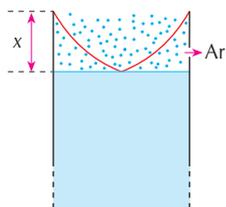
R.142 Uma proveta é enchida com água até a borda. Em seguida, põe-se a vibrar um diapasão na boca da proveta, ao mesmo tempo em que se faz a água escoar lentamente, mediante a abertura da torneira T. Quando o nível da água na proveta atinge a distância $x = 20$ cm da borda, ouve-se pela primeira vez um aumento na intensidade do som. O meio acima da água é o ar, onde o som se propaga com velocidade 340 m/s.

- Como explicar fisicamente o aumento na intensidade do som do diapasão?
- Qual é o comprimento de onda, no ar, do som que o diapasão emite?
- Qual é a frequência do som do diapasão?



Solução:

- A explicação física para o aumento na intensidade do som é que a coluna de ar acima da água entrou em **ressonância** com o som emitido pelo diapasão.
- Na coluna de ar de comprimento $x = 20$ cm, formam-se ondas estacionárias como se representa esquematicamente na figura abaixo. Como o modo de vibração é o fundamental ($i = 1$), vem:



$$\lambda = 4x \Rightarrow \lambda = 4 \cdot 20 \Rightarrow \lambda = 80 \text{ cm}$$

$$\text{ou } \lambda = 0,8 \text{ m}$$

- Se $v = 340$ m/s a velocidade do som no ar do tubo, podemos calcular a frequência por:

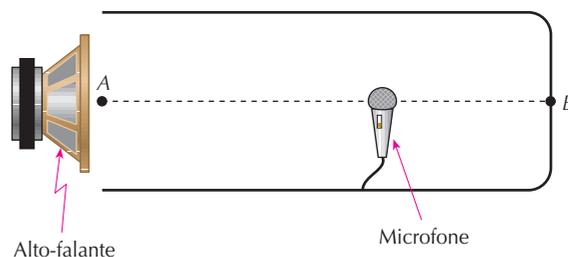
$$f = \frac{v}{\lambda} \Rightarrow f = \frac{340}{0,8} \Rightarrow f = 425 \text{ Hz}$$

Chegaríamos ao mesmo resultado aplicando a fórmula $f = i \frac{v}{4L}$, com $i = 1$:

$$f = 1 \cdot \frac{340}{4 \cdot 0,2} \Rightarrow f = 425 \text{ Hz}$$

Respostas: a) ressonância; b) 80 cm ou 0,8 m; c) 425 Hz

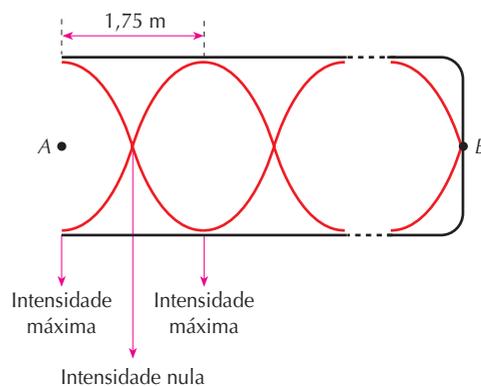
R.143 Um alto-falante é colocado no ponto A, emitindo um som de frequência 100 Hz. Ao longo do tubo AB, fechado em B, é deslocado um microfone ligado a um aparelho capaz de medir a intensidade sonora. Verifica-se que, a partir de A, e a cada 1,75 m, ouve-se uma intensidade máxima e, a meia distância desses pontos, nada se ouve.



- Calcule o comprimento de onda do som emitido.
- Calcule a velocidade de propagação do som no meio considerado.
- Que intensidade indicaria o microfone colocado em B?
- Calcule o menor comprimento que o tubo AB deverá ter para serem mantidas as condições observadas.
- Se o tubo fosse aberto em B, qual seria o menor comprimento para que novamente as condições observadas fossem mantidas?

Solução:

- No interior do tubo temos a formação de uma onda estacionária, conforme a figura abaixo.



Então, temos:

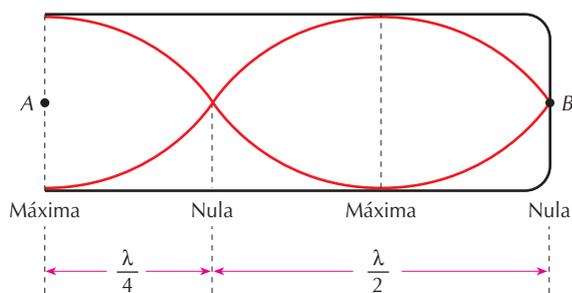
$$\frac{\lambda}{2} = 1,75 \text{ m} \Rightarrow \lambda = 3,50 \text{ m}$$

- Se $f = 100$ Hz e $\lambda = 3,50$ m, temos:

$$v = \lambda f = 3,50 \cdot 100 \Rightarrow v = 350 \text{ m/s}$$

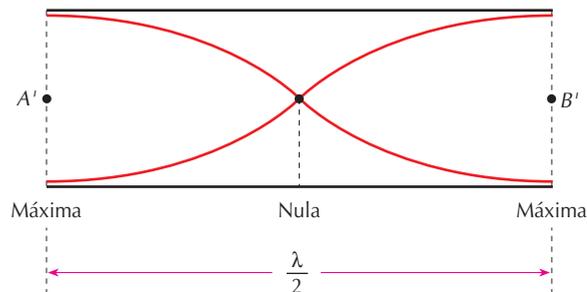
- No ponto B temos um nó da onda estacionária que se estabelece no tubo. Logo, a intensidade indicada pelo microfone é nula.

d) Para serem mantidas as condições observadas, a onda estacionária no interior do tubo deve obedecer à figura abaixo. O menor comprimento do tubo será:



$$AB = \frac{\lambda}{4} + \frac{\lambda}{2} \Rightarrow AB = 3\frac{\lambda}{4} \Rightarrow AB = \frac{3 \cdot 3,50}{4} \Rightarrow AB \approx 2,62 \text{ m}$$

e) Se o tubo fosse aberto em B, as ondas estacionárias obedeceriam ao novo esquema abaixo. O menor comprimento do tubo seria então:



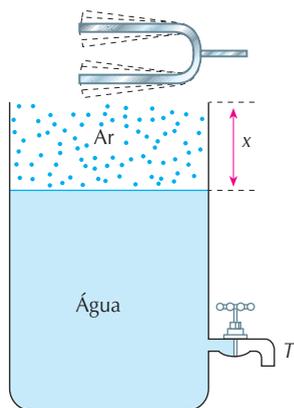
$$A'B' = \frac{\lambda}{2} \Rightarrow A'B' = \frac{3,50}{2} \Rightarrow A'B' = 1,75 \text{ m}$$

Respostas: a) 3,50 m; b) 350 m/s; c) nula; d) $\approx 2,62$ m; e) 1,75 m

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

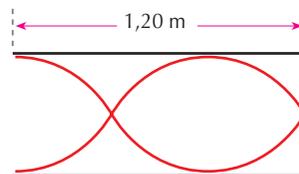
P. 503 Uma proveta tem 60 cm de profundidade e recebe a maior quantidade de água possível para que o ar restante entre em ressonância com o som emitido por um diapasão. Esse diapasão emite ondas de 100 cm de comprimento no ar. Calcule a altura da água na proveta.

P. 504 Um diapasão emite som de certa frequência. Ele é colocado sobre um tubo de vidro que contém água, conforme a figura. O nível de água pode ser variado no tubo e observa-se que, para certos comprimentos x da coluna de ar no tubo, a intensidade do som é muito maior do que para outros. Esses comprimentos em que há ressonância são $x_1 = 11$ cm; $x_2 = 33$ cm e $x_3 = 55$ cm. Calcule o comprimento de onda da onda sonora emitida pelo diapasão.



P. 505 No exercício anterior, sendo $v = 330$ m/s a velocidade do som na coluna de ar acima do nível da água, determine a frequência do som emitido pelo diapasão.

P. 506 (FEI-SP) A figura representa uma onda estacionária que se forma em um tubo sonoro fechado. A velocidade do som no ar é 340 m/s. Calcule a frequência do som emitido pelo tubo.



P. 507 Um tubo aberto de 50 cm de comprimento entra em ressonância com um som cuja frequência é de 1.360 Hz. A velocidade do som no ar é 340 m/s. Calcule a que harmônico corresponde o som emitido.

P. 508 Três frequências sucessivas de um tubo de órgão aberto em ambas as extremidades são as seguintes: 222 Hz, 296 Hz e 370 Hz. Determine a frequência (em Hz) do harmônico fundamental.

P. 509 (UFC-CE) Considere um tubo sonoro aberto de 40 cm de comprimento, cheio de ar, onde as ondas sonoras se propagam com velocidade de 340 m/s. Sabendo-se que a capacidade de audição de uma pessoa vai de 20 Hz a 20.000 Hz, determine quantos e quais harmônicos produzidos no tubo essa pessoa pode ouvir.

P. 510 Qual é o menor comprimento de um tubo aberto e de outro fechado para que entrem em ressonância com um diapasão de frequência $f = 400$ Hz? Suponha que os tubos estejam preenchidos por um gás no qual a velocidade do som é $v = 500$ m/s.

Efeito Doppler

Objetivos

- ▶ Compreender a variação aparente da altura do som emitido por uma fonte em movimento em relação a um observador.
- ▶ Relacionar a frequência real e a frequência aparente do som com as velocidades da onda, da fonte e do observador.
- ▶ Conhecer como acontece o Efeito Doppler nas ondas luminosas.

Termos e conceitos

- frequência real
- frequência aparente
- ultrassonografia

Considere um observador O parado na calçada de uma rua quando uma ambulância passa com a sirene ligada. O observador nota que a altura do som da sirene diminui repentinamente depois que a ambulância o ultrapassa. Uma observação mais detalhada revela que a **altura sonora** da sirene é **maior quando a ambulância se aproxima** do observador e **menor quando a ambulância se afasta**. Esse fenômeno, junto com outras situações físicas nas quais ele ocorre, é denominado **efeito Doppler***.

Na **figura 13**, considere o observador O parado na calçada e a sirene (fonte sonora) aproximando-se dele com velocidade v_F . No instante $t = 0$ a fonte emitiu a frente de onda ①. Seja v a velocidade de propagação do som. Considere que essa frente de onda atinge o observador no intervalo de tempo igual ao período T de emissão de ondas sonoras pela fonte. A frente de onda ① percorreu, nesse intervalo de tempo, a distância vT na direção e sentido do observador, enquanto a fonte percorreu a distância $v_F T$ na mesma direção e sentido, e está agora emitindo a frente de onda ②. A distância entre as frentes de onda ① e ② será o comprimento de onda λ' das ondas sonoras recebidas pelo observador O .

Temos $\lambda' = vT - v_F T = (v - v_F) \cdot T$ e, para o observador, as ondas sonoras terão **frequência aparente**:

$$f' = \frac{v}{\lambda'} \Rightarrow f' = \frac{v}{(v - v_F) \cdot T}$$

Como a **frequência real** f do som emitido pela fonte vale $f = \frac{1}{T}$, decorre:

$$f' = f \cdot \left(\frac{v}{v - v_F} \right)$$

Então a **frequência aparente** f' do som, que atinge o observador partindo de uma fonte em movimento que se aproxima dele, é maior que a frequência real f do som.



Figura 13. O observador parado recebe o som emitido pela ambulância com frequência aparente f' maior que a frequência f real.

* **DOPPLER**, Christian Johann (1803-1853), físico austríaco, descreveu o fenômeno que leva seu nome (efeito Doppler) para o som e para a luz. O efeito Doppler para a luz foi explicado corretamente pelo físico francês Armand Hyppolyte Louis Fizeau (1819-1896), em 1848. Fizeau foi o primeiro cientista a determinar experimentalmente a velocidade da luz, em 1849, sem usar um método astronômico, como fizera Roemer no século XVII.

Se a ambulância estiver se afastando do observador, seguindo o mesmo raciocínio anterior, concluímos que:

$$f' = f \cdot \left(\frac{v}{v + v_F} \right)$$

Nesse caso, **a frequência aparente f' do som ouvido de uma fonte que está se afastando do observador é menor que a frequência real f do som.**

Observa-se também uma mudança na altura do som se a fonte está em repouso e o observador é que se movimenta. Nesse caso, **a frequência aparente do som é maior que a real quando o observador se aproxima, e menor quando ele se afasta.**

De modo geral, podemos concluir a seguinte relação entre a frequência aparente f' do som que atinge o observador e a frequência real f do som emitido pela fonte:

$$f' = f \cdot \left(\frac{v \pm v_0}{v \pm v_F} \right)$$

em que v é a velocidade do som, v_F é a velocidade da fonte e v_0 a velocidade do observador.

O sinal que precede v_0 ou v_F é definido em relação a um eixo orientado do observador para a fonte:



Evidentemente, se o observador estiver parado, $v_0 = 0$ e, se a fonte estiver parada, $v_F = 0$.

➤ O efeito Doppler para a luz

As ondas luminosas também podem sofrer o efeito Doppler. Entretanto, como a velocidade da luz é muito elevada, ele só é perceptível se a fonte for extremamente veloz. É o caso de estrelas ou galáxias que se afastam da Terra.

Quando a fonte está se **afastando**, a luz recebida por nós tem frequência aparente f' **menor** que a frequência real f emitida. Dizemos, então, que houve um **desvio para o vermelho** (no espectro visível, a luz vermelha é a de menor frequência).

Caso a fonte esteja se **aproximando**, recebemos uma luz cuja frequência aparente f' é **maior** que a frequência real emitida f , tendo havido então **desvio para o violeta** (no espectro visível, a luz violeta é a de maior frequência).

Em resumo:

| | | |
|-------------------|----------|------------------------|
| Fonte se afasta | $f' < f$ | Desvio para o vermelho |
| Fonte se aproxima | $f' > f$ | Desvio para o violeta |

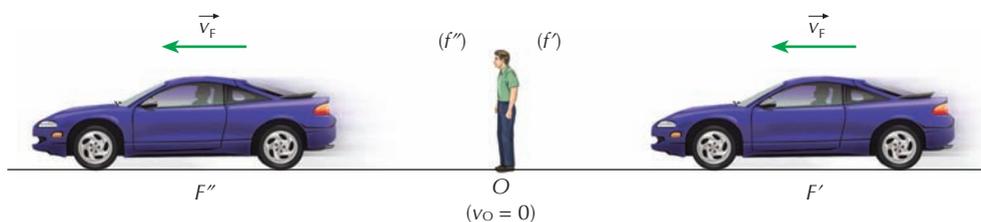
EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

- R. 144** Um observador, parado à beira de um trecho retilíneo da estrada, observa um automóvel que se aproxima e ouve o som produzido pela sucessão das explosões do motor (ronco do motor). Quando o carro passa pelo observador, a frequência do som que este ouve passa a ser $\frac{7}{8}$ da frequência anterior. A velocidade de propagação do som no ar mede 333 m/s. Calcule a velocidade com que o carro passou pelo observador.

Solução:

Seja f a frequência do som emitido pelo automóvel (fonte) e $v = 333$ m/s a velocidade do som no ar. Quando a fonte (F') se aproxima do observador, ele ouve um som de frequência aparente:

$$f' = f \cdot \left(\frac{v}{v - v_F} \right)$$



Quando a fonte se afasta, o observador ouve um som de frequência aparente: $f'' = f \cdot \left(\frac{v}{v + v_F} \right)$

Sendo $f'' = \frac{7}{8} \cdot f'$, temos:

$$f \cdot \left(\frac{v}{v + v_F} \right) = \frac{7}{8} \cdot f \cdot \left(\frac{v}{v - v_F} \right) \Rightarrow 7 \cdot (v + v_F) = 8 \cdot (v - v_F) \Rightarrow 7v_F + 8v_F = 8v - 7v$$

$$15v_F = v \Rightarrow v_F = \frac{v}{15} \Rightarrow v_F = \frac{333}{15} \Rightarrow v_F = 22,2 \text{ m/s} \Rightarrow v_F = 22,2 \cdot 3,6 \text{ km/h} \Rightarrow v_F \approx 80 \text{ km/h}$$

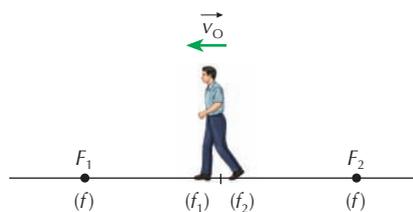
Resposta: ≈ 80 km/h

- R. 145** Um observador desloca-se entre duas fontes sonoras estacionárias que emitem sons de mesma frequência. A velocidade do som no ar é 340 m/s. Determine a velocidade do observador para que ele tenha a sensação de que o intervalo dos sons recebidos é 9:8.

Solução:

As fontes F_1 e F_2 estacionárias ($v_F = 0$) emitem sons de mesma frequência (f), que se propagam no ar com velocidade $v = 340$ m/s. Se o observador se aproxima de F_1 com velocidade v_o , o som da fonte parece ao observador ter uma frequência aparente:

$$f_1 = f \cdot \left(\frac{v + v_o}{v} \right)$$



Ao mesmo tempo, o som emitido por F_2 parecerá ao observador ter frequência aparente:

$$f_2 = f \cdot \left(\frac{v - v_o}{v} \right)$$

Sendo $\frac{f_1}{f_2} = \frac{9}{8}$ temos:

$$\frac{v + v_o}{v - v_o} = \frac{9}{8} \Rightarrow \frac{340 + v_o}{340 - v_o} = \frac{9}{8} \Rightarrow v_o = 20 \text{ m/s}$$

Resposta: 20 m/s

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

- P. 511** Uma fonte sonora que emite um som de frequência 528 Hz se aproxima de um observador parado com a velocidade de 72 km/h. Sendo a velocidade do som no ar de 340 m/s, calcule a frequência do som recebido pelo observador.
- P. 512** Uma fonte sonora estacionária emite um som de frequência 340 Hz. A velocidade do som no ar é de 340 m/s. Determine em que sentido, em relação à fonte, e com que velocidade deve se mover um observador para ouvir um som de frequência 360 Hz.
- P. 513** Uma fonte sonora que emite um som de frequência 1.000 Hz se aproxima de um observador com a velocidade de 40 m/s. O observador se aproxima da fonte com a velocidade de 5 m/s. Sendo a velocidade do som no ar de 340 m/s, determine a frequência ouvida pelo observador.

A ultrassonografia

Na Medicina moderna, a ultrassonografia tornou-se um recurso indispensável para o diagnóstico de muitas doenças e o acompanhamento do desenvolvimento do feto durante a gestação. Em princípio, nos aparelhos de ultrassom essas ondas são emitidas por um dispositivo especial e recebidas de volta após refletirem-se nos órgãos internos da pessoa. Com a técnica é possível visualizar num monitor imagens que, devidamente interpretadas pelo médico, possibilitam a constatação de eventuais anormalidades nas regiões examinadas.

Com a utilização combinada do efeito Doppler, é possível ainda determinar pela ultrassonografia a velocidade de partes móveis do interior do organismo, como o fluxo sanguíneo e a abertura e o fechamento das valvas cardíacas (ecografia Doppler).

Os aparelhos de ultrassom têm uma grande vantagem em relação aos aparelhos de raios X usados com finalidade diagnóstica: os ultrassons não apresentam efeitos prejudiciais ao organismo do paciente.



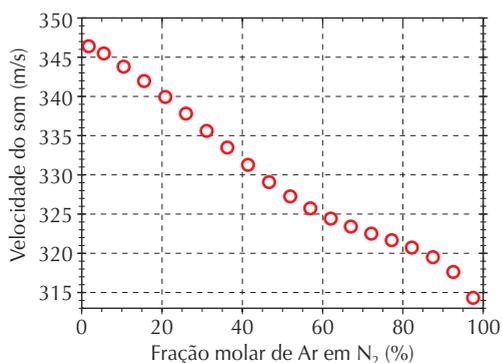
▲ Gestante submetida a um exame de ultrassonografia.



▲ Imagem do feto gerada pelo aparelho de ultrassonografia.

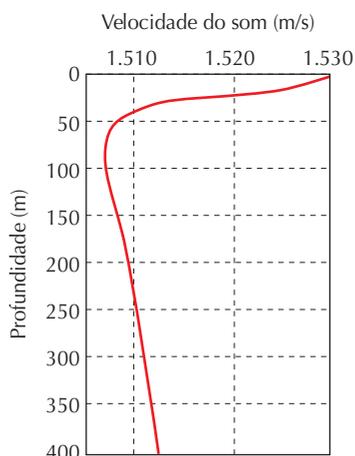
EXERCÍCIOS PROPOSTOS DE RECAPITULAÇÃO

P. 514 (Unicamp-SP) Uma das formas de se controlar misturas de gases de maneira rápida, sem precisar retirar amostras, é medir a variação da velocidade do som no interior desses gases. Uma onda sonora com frequência de 800 kHz é enviada de um emissor a um receptor (ver esquema), sendo então medida eletronicamente sua velocidade de propagação em uma mistura gasosa. O gráfico abaixo apresenta a velocidade do som para uma mistura de argônio e nitrogênio em função da fração molar de Ar em N_2 .



- Qual o comprimento de onda da onda sonora no N_2 puro?
- Qual o tempo para a onda sonora atravessar um tubo de 10 cm de comprimento contendo uma mistura com uma fração molar de Ar de 60%?

P. 515 (Unifesp) O gráfico representa a profundidade (y) no mar em função da velocidade do som (v). A frequência do som é de 3.000 Hz; essa curva é válida para condições determinadas de pressão e salinidade da água do mar.

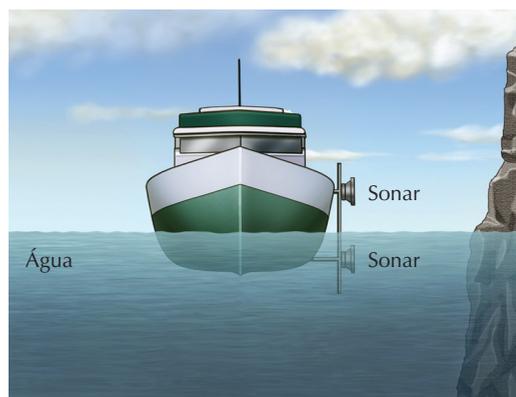


- Nessas condições, faça uma avaliação aproximada do valor mínimo atingido pela velocidade do som no mar e da profundidade em que isso ocorre.
- Desenhe o esboço do correspondente gráfico profundidade (y) em função do comprimento de onda (λ) do som. Adote o mesmo eixo e a mesma escala para a profundidade e coloque o comprimento de onda no eixo das abscissas. Represente três valores de λ , escritos com três algarismos significativos.

P. 516 (Vunesp) Nas últimas décadas, o cinema tem produzido inúmeros filmes de ficção científica com cenas de guerras espaciais, como *Guerra nas estrelas*. Com exceção de *2001, uma odisseia no espaço*, essas cenas apresentam explosões com estrondos impressionantes, além de efeitos luminosos espetaculares, tudo isso no espaço interplanetário.

- Comparando *Guerra nas estrelas*, que apresenta efeitos sonoros e explosão, com *2001, uma odisseia no espaço*, que não os apresenta, qual deles está de acordo com as leis da Física? Justifique.
- E quanto aos efeitos luminosos que todos apresentam? Justifique.

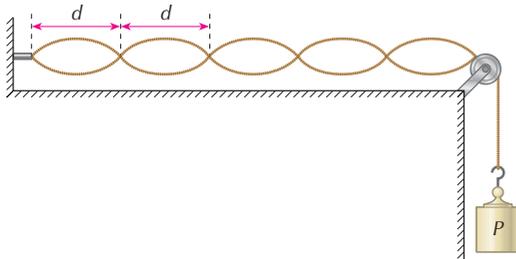
P. 517 (Uerj) Um geotécnico a bordo de uma pequena embarcação está a uma certa distância de um paredão vertical que apresenta uma parte submersa. Usando um sonar que funciona tanto na água quanto no ar, ele observa que, quando o aparelho está emerso, o intervalo de tempo entre a emissão do sinal e a recepção do eco é de 0,731 s, e que, quando o aparelho está imerso, o intervalo de tempo entre a emissão e a recepção diminui para 0,170 s.



Calcule:

- a razão $\frac{v_{\text{água}}}{v_{\text{ar}}}$ entre a velocidade do som na água e a velocidade do som no ar.
- a razão $\frac{\lambda_{\text{água}}}{\lambda_{\text{ar}}}$ entre o comprimento de onda do som na água e o comprimento de onda do som no ar.

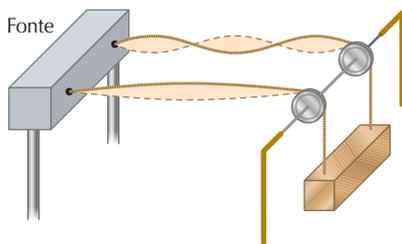
P. 518 (Unifesp) A figura representa uma configuração de ondas estacionárias produzida num laboratório didático com uma fonte oscilante.



- Seja $d = 12 \text{ cm}$ a distância entre dois nós sucessivos, qual o comprimento de onda da onda que se propaga no fio?
- O conjunto P de cargas que traciona o fio tem massa $m = 180 \text{ g}$. Sabe-se que a densidade linear do fio é $\mu = 5,0 \times 10^{-4} \text{ kg/m}$. Determine a frequência de oscilação da fonte (dados: a velocidade de propagação de uma onda numa corda é dada por $v = \sqrt{\frac{T}{\mu}}$; $g = 10 \text{ m/s}^2$).

P. 519 (UFG-GO) Na experiência de ressonância em cordas representada na figura, dois fios de densidades diferentes estão tensionados, através de roldanas ideais, por um bloco que pende deles dois. As extremidades esquerdas de ambos estão ligadas a uma fonte que produz pequenas vibrações com frequência conhecida. A distância entre a fonte e as roldanas é ℓ . Verifica-se que, quando a frequência da fonte atinge o valor f , ambos os fios entram em ressonância, o mais denso no terceiro harmônico e o outro, na frequência fundamental. Dados: $v = \sqrt{\frac{T}{\mu}}$

(velocidade da onda na corda); g (aceleração da gravidade).



Conhecendo a densidade linear de massa μ_1 do fio mais denso, determine:

- a densidade linear de massa do outro fio;
- a massa do bloco responsável pela tensão T em cada corda.

P. 520 (Unifesp) Quando colocamos uma concha junto ao ouvido, ouvimos um "ruído de mar", como muita gente diz, talvez imaginando que a concha pudesse ser um gravador natural. Na verdade, esse som é produzido por qualquer cavidade colocada junto ao ouvido — a nossa própria mão em forma de concha ou um canudo, por exemplo.

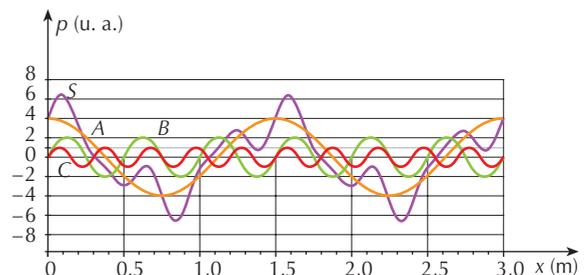
- Qual é a verdadeira origem desse som? Justifique.
- Se a cavidade for um canudo de $0,30 \text{ m}$ aberto nas duas extremidades, qual será a frequência predominante desse som?

(Dados: velocidade do som no ar: $v = 330 \text{ m/s}$; frequências de ondas estacionárias em um tubo de comprimento L , aberto em ambas as extremidades: $f = \frac{nv}{2L}$)

- P. 521** (Unicamp-SP) Podemos medir a velocidade v do som no ar de uma maneira relativamente simples. Um diapasão que vibra na frequência f de 440 Hz é mantido junto à extremidade aberta de um recipiente cilíndrico contendo água até um certo nível. O nível da coluna de água no recipiente pode ser controlado por meio de um sistema de tubos. Em determinadas condições de temperatura e pressão, observa-se um máximo na intensidade do som quando a coluna de ar acima da coluna de água mede $0,6 \text{ m}$. O efeito se repete pela primeira vez quando a altura da coluna de ar atinge $1,0 \text{ m}$. Considere esses resultados e lembre-se que $v = \lambda f$, em que λ é o comprimento de onda.
- Determine o comprimento de onda do som produzido pelo diapasão.
 - Determine a velocidade do som no ar nas condições da medida.
 - Desenhe esquematicamente o modo de vibração que ocorre quando a coluna de ar mede $0,6 \text{ m}$.

P. 522 (Mackenzie-SP) Um túnel possui uma extremidade fechada e outra aberta. Na extremidade aberta existe uma fonte sonora que emite um som de 200 Hz . Uma pessoa que caminha no interior do túnel com velocidade constante ouve, a cada $1,7 \text{ s}$, o som com intensidade mínima. Sendo a velocidade do som no ar igual a 340 m/s , determine a velocidade da pessoa.

P. 523 (Fuvest-SP) O som produzido por um determinado instrumento musical, longe da fonte, pode ser representado por uma onda complexa S , descrita como uma sobreposição de ondas senoidais de pressão, conforme a figura. Nela, está representada a variação de pressão P em função da posição, num determinado instante, estando as três componentes de S identificadas por A, B e C.



Note e adote

u.a = unidade arbitrária

Velocidade do som $\approx 340 \text{ m/s}$

A intensidade I de uma onda senoidal é proporcional ao quadrado da amplitude de sua onda de pressão.

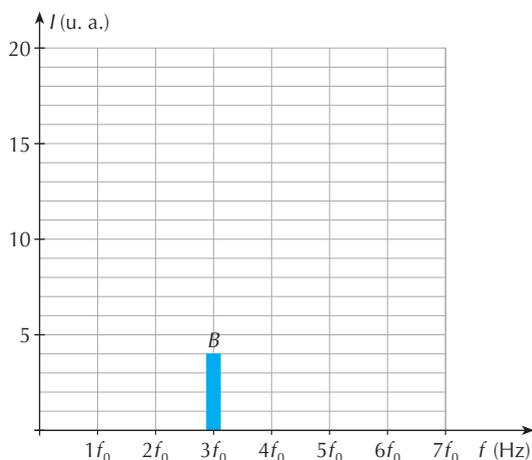
A frequência f_0 corresponde à componente que tem menor frequência.



- a) Determine os comprimentos de onda, em metros, de cada uma das componentes A, B e C, preenchendo o quadro abaixo.

| | λ [m] |
|---|---------------|
| A | |
| B | |
| C | |

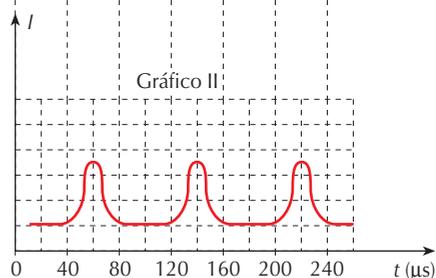
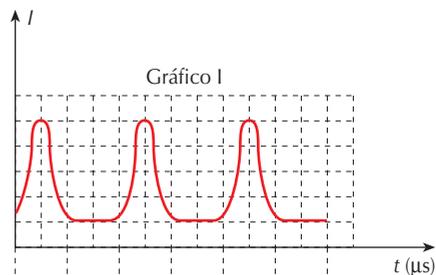
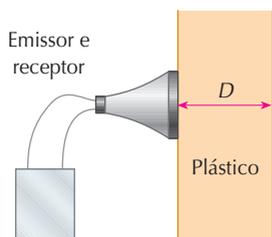
- b) Determine o comprimento de onda λ_0 , em metros, da onda S.
 c) Represente, no gráfico apresentado abaixo, as intensidades das componentes A e C. Nesse mesmo gráfico, a intensidade da componente B já está representada, em unidades arbitrárias.



P. 524 (ITA-SP) Dois tubo sonoros A e B emitem sons simultâneos de mesma amplitude, de frequências $f_A = 150$ Hz e $f_B = 155$ Hz, respectivamente.

- a) Calcule a frequência do batimento do som ouvido por um observador que se encontra próximo aos tubos e em repouso em relação a eles.
 b) Calcule a velocidade que o tubo B deve possuir para eliminar a frequência do batimento calculada no item a e especifique o sentido desse movimento em relação ao observador (considere a velocidade do som = 300 m/s).

P. 525 (Fuvest-SP) Imagens por ultrassom podem ser obtidas a partir da comparação entre o pulso de um sinal emitido e o pulso proveniente da reflexão em uma superfície do objeto que se quer analisar. Em um teste de controle de qualidade, para conferir a espessura de uma placa de plástico, são usados pulsos de ondas com frequência $f = 1,5$ MHz. Os gráficos I e II representam, respectivamente, as intensidades em função do tempo dos pulsos emitidos e dos pulsos captados no receptor, em uma certa parte da placa.



- a) Determine o intervalo de tempo Δt , em μs , entre os pulsos emitidos e os pulsos captados.
 b) Estime a espessura D , em mm, da placa.
 c) Determine o comprimento de onda λ , em mm, das ondas de ultrassom utilizadas.

Note e adote

$1 \mu\text{s} = 10^{-6}$ s; $1 \text{ MHz} = 10^6$ Hz

Velocidade do ultrassom no plástico = 1.200 m/s

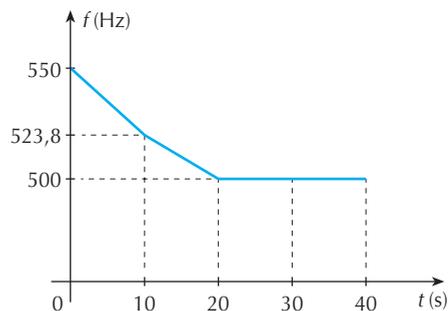
Os gráficos representam a intensidade I em uma escala arbitrária.

Cada pulso é composto por inúmeros ciclos da onda de ultrassom.

Cada pulso só é emitido depois da recepção do pulso anterior.

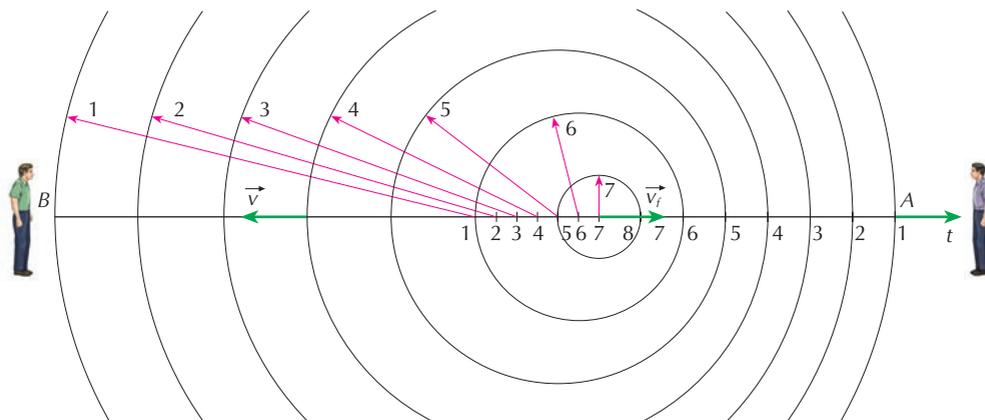
P. 526 (Olimpíada Brasileira de Física) A sirene de uma ambulância emite sons na frequência de 550 Hz. Um detetor estacionário registra as frequências vindas da sirene.

O gráfico abaixo ilustra o fenômeno. A velocidade do som no ar é de 340 m/s.



- a) Com as informações fornecidas, é possível afirmar se a ambulância está se aproximando ou se afastando do detetor? Justifique.
 b) Construa um gráfico da velocidade da ambulância em função do tempo de 0 até 40 s.

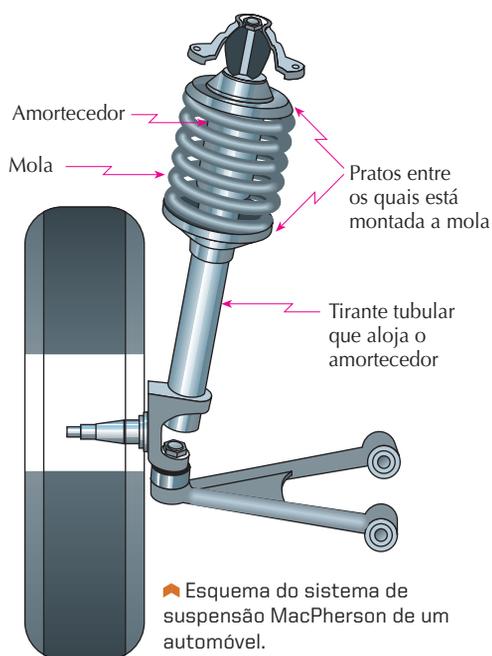
P. 527 (UFC-CE) A figura seguinte mostra frentes de onda sucessivas emitidas por uma fonte puntiforme em movimento, com velocidade v_f para a direita. Cada frente de onda numerada foi emitida quando a fonte estava na posição identificada pelo mesmo número. A distância percorrida em 0,9 segundo pela fonte, medida a partir da posição indicada pelo número 1 até a posição indicada pelo número 8, é de 9,0 m, e a velocidade da onda é de 20,0 m/s.



Determine:

- a velocidade v_f da fonte;
- o comprimento de onda medido pelo observador A;
- a frequência medida pelo observador B;
- a frequência da fonte.

A FÍSICA EM NOSSO MUNDO



Oscilações amortecidas e forçadas

No estudo dos osciladores consideramos apenas as forças restauradoras. No entanto, por causa da existência de forças dissipativas (atrito e resistência do ar), a amplitude de oscilação vai gradativamente diminuindo até o oscilador atingir o repouso. As oscilações são, nesse caso, denominadas **amortecidas**. Quando fornecemos energia ao oscilador de modo a manter constante a amplitude de oscilação, fazendo-o oscilar com uma frequência diferente de sua frequência própria, as oscilações são denominadas **forçadas**.

O sistema de suspensão dos automóveis consta basicamente de molas e amortecedores. As molas oscilam de um modo forçado quando o carro passa por pistas irregulares, isto é, com saliências ou buracos. Os amortecedores (absorvedores de vibrações) atenuam os movimentos das molas, produzindo oscilações amortecidas. Sem os amortecedores as molas continuariam a oscilar e o carro vibraria por um tempo muito maior a cada solavanco. Um amortecedor ideal eliminaria completa e rapidamente as oscilações e o carro retornaria diretamente à sua posição de equilíbrio.

Teste sua leitura

L.44 (Unicentro-PR) Amortecedores de carros são itens essenciais para garantir conforto e segurança aos passageiros de veículos de transporte. Eles devem, por um lado, evitar que as oscilações provocadas pelas irregularidades dos terrenos por onde passa o carro tornem a viagem desconfortável sem, por outro lado, comprometer a estabilidade do automóvel, dissipando o mais rapidamente possível a energia. Assinale a alternativa que caracteriza corretamente um amortecedor ideal.

- a) Absorve rapidamente as vibrações provocadas por acidentes do terreno, voltando, sem oscilar, à posição de equilíbrio.
- b) Não dissipa a energia das vibrações provocadas por acidentes do terreno, evitando assim a fadiga do material e o desconforto dos passageiros.
- c) Tem frequência de oscilação variável, que depende da amplitude de oscilação, diferenciando assim as grandes e pequenas vibrações provocadas pelos acidentes no terreno.
- d) Tem alta frequência de oscilação, fazendo com que o carro fique macio e confortável.
- e) Tem um grande período de oscilação, para que a dissipação das vibrações não seja transmitida ao carro e aos passageiros.

L.45 (Funrei-MG) A suspensão de um automóvel contém, entre outras peças, molas e amortecedores. Estes últimos são necessários porque, sem eles, o carro, a cada solavanco, vibraria durante muito tempo. Suponha que um automóvel de massa igual a 1.800 kg possua **em cada roda** uma mola de constante elástica igual a 450 N/m. Se os amortecedores não funcionassem, o carro oscilaria para cima e para baixo com uma frequência angular ω , em radianos por segundo, igual a:

- a) 0,25
- b) 1,25
- c) 0,5
- d) 1,0
- e) 2,0

L.46 Um carro percorre um trecho de estrada cuja superfície é ondulada. Como a vida útil dos amortecedores de seu carro está vencida, o motorista realiza um movimento harmônico simples vertical de amplitude 4,0 cm ao atravessar tal trecho. Sendo a aceleração da gravidade 10 m/s² e considerando $\pi^2 \approx 10$, a maior frequência de vibração do carro para que o motorista não perca contato com o assento é, aproximadamente, igual a:

- a) 5,0 Hz
- b) 4,0 Hz
- c) 2,5 Hz
- d) 2,0 Hz
- e) 1,0 Hz

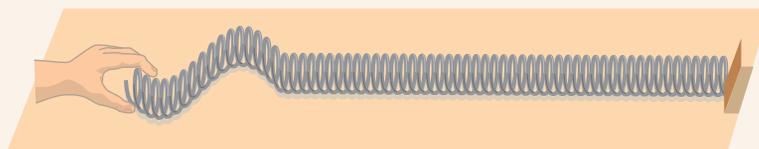
Atividade experimental

Realize a experiência com supervisão do seu professor

Observando fenômenos ondulatórios

Com uma mola *slinky* você pode observar diversos fenômenos ondulatórios.

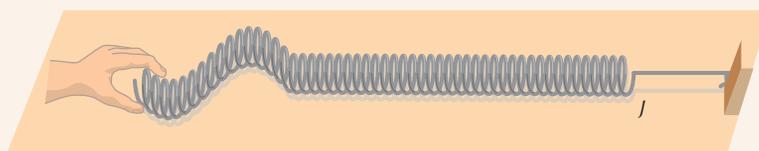
1º) Coloque a mola no chão, fixe uma extremidade e estique-a aproximadamente 3 m. Segure a outra extremidade e produza em seguida uma perturbação, isto é, um pulso, movimentando a mão para um lado (paralelamente ao chão) e voltando à posição inicial. Observe que a perturbação se propaga ao longo da mola.



Resposta

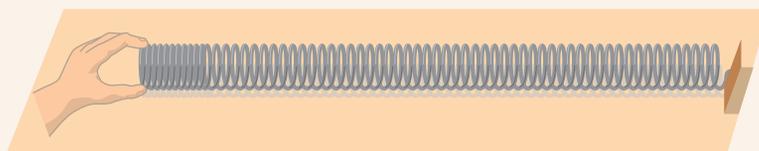
- Qual é o nome dado a uma perturbação que se propaga num meio?
- Ao se produzir a perturbação, todas as espiras da mola se movimentam ao mesmo tempo?
- Durante a propagação da perturbação, ocorre transporte de matéria? E de energia? Justifique.
- As espiras da mola vibram na mesma direção de propagação?
- A onda que se estabelece na mola é transversal ou longitudinal?
- Ao atingir a extremidade fixa, o pulso sofre reflexão. Observe o que ocorre com o pulso refletido. Ele volta invertido ou sem inversão?

2º) Prenda, à extremidade da mola que estava fixa, um fio leve (de náilon, por exemplo) de aproximadamente 40 cm de comprimento e fixe a outra extremidade do fio. Provoque na extremidade livre da mola um pulso idêntico ao anterior. Observe o pulso refletido no ponto de junção *J* da mola com o fio.



Resposta

- O pulso sofreu reflexão com ou sem inversão de fase?
- 3º) Volte, agora, à situação descrita no 1º item, isto é, uma extremidade da mola está fixa e a outra está livre. Produza na extremidade livre uma rápida compressão. Observe como essa perturbação se propaga.



Resposta

- As espiras da mola vibram na mesma direção de propagação?
- A onda que se estabelece na mola é transversal ou longitudinal?

A FÍSICA EM NOSSO MUNDO

O Sol: fonte de energia

O Sol é uma fonte de ondas eletromagnéticas, emitindo praticamente todas as radiações do espectro eletromagnético, mas principalmente luz, radiações ultravioleta e infravermelhas.

A emissão de energia pelo Sol ocorre continuamente por meio da conversão de matéria em energia. A energia E liberada pela conversão de certa massa m relaciona-se com essa massa pela chamada **equação de Einstein**:

$$E = mc^2$$

Nessa equação, c é a velocidade de propagação da luz no vácuo.

Devido à alta temperatura reinante no Sol, 630 milhões de toneladas de hidrogênio sofrem fusão nuclear **a cada segundo**, originando 625,4 milhões de toneladas de hélio. A diferença de massa (4,6 milhões de toneladas) se transforma em energia.

As frentes de onda emitidas pelo Sol são esféricas (figura a).

Considere uma frente de onda de raio d e seja A uma pequena área dessa superfície (figura b). Durante um intervalo de tempo Δt , a área A é atravessada por uma quantidade de energia ΔE . Observe que os raios de onda são perpendiculares à superfície.

Por definição, a **intensidade da onda** através da área A é a grandeza I , dada por:

$$I = \frac{\Delta E}{A \cdot \Delta t}$$

O quociente $\frac{\Delta E}{\Delta t}$ constitui a **potência Pot** da onda através da área A , isto

$$\text{é: } Pot = \frac{\Delta E}{\Delta t}$$

Nessas condições, temos:

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

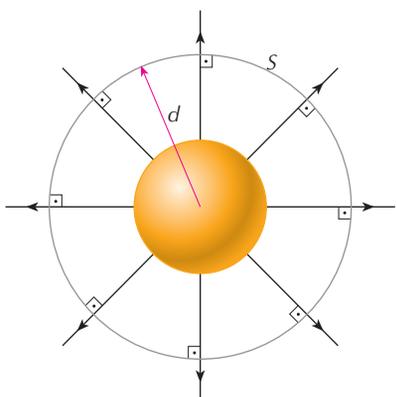
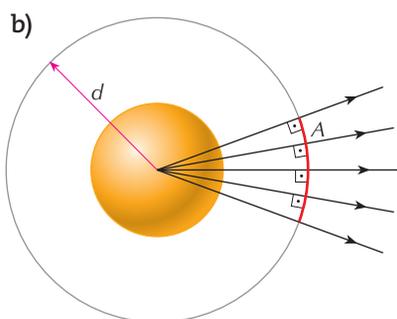
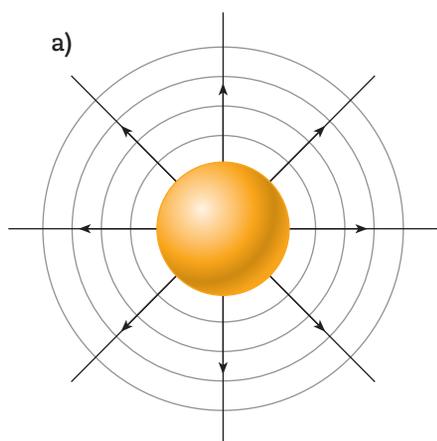
No Sistema Internacional de Unidades, sendo ΔE medido em joules (J), A em m^2 e Δt em segundos (s), a unidade de intensidade da onda será $J/m^2 \cdot s$ ou W/m^2 .

A intensidade da onda através de toda a superfície esférica S de raio d , sendo Pot_{sol} a potência total do Sol, é dada por:

$$I = \frac{Pot_{sol}}{4\pi d^2}$$

Note que a **intensidade da onda é inversamente proporcional ao quadrado da distância d** .

As considerações apresentadas para o Sol sobre intensidade de onda aplicam-se a todas as ondas esféricas — inclusive para as ondas sonoras.



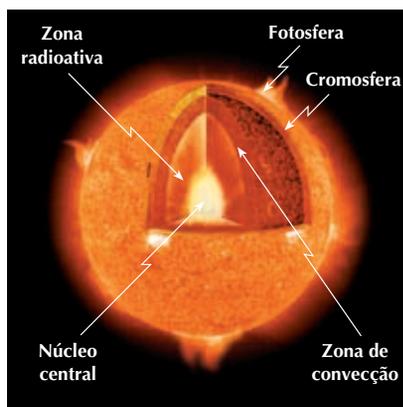
PHOTODISC/GETTY IMAGES

Teste sua leitura

O enunciado a seguir refere-se às questões L.47 e L.48.

(Ufes) A energia solar é gerada no núcleo do Sol. Lá, a temperatura (15.000.000 °C) e a pressão (340 bilhões de vezes a pressão atmosférica da Terra ao nível do mar) são tão intensas que ocorrem reações nucleares. Essas reações transformam quatro prótons em uma partícula alfa. A partícula alfa é aproximadamente 0,7% menos massiva do que quatro prótons. A diferença em massa é expelida como energia e carregada até a superfície do Sol, através de um processo conhecido como convecção, e é liberada em forma de luz e calor. A energia gerada no interior do Sol leva 1 milhão de anos para chegar à superfície. A cada segundo, 700 milhões de toneladas de hidrogênio são convertidos em hélio. Durante esse processo, 4,4 milhões de toneladas de energia pura são liberados; portanto, com o passar do tempo, o Sol está se tornando mais leve.

(Disponível em: <http://www.if.ufrgs.br/ast/solar/portug/sun.htm>. Acesso em: 1º jul. 2007. Adaptado.)



L.47 Considerando os dados fornecidos no texto (sendo $3 \cdot 10^8$ m/s a velocidade da luz no vácuo), pode-se afirmar que a potência irradiada pelo Sol é:

- a) 13×10^{15} W d) $1,1 \times 10^{23}$ W
b) $1,1 \times 10^{20}$ W e) $3,96 \times 10^{25}$ W
c) $3,96 \times 10^{20}$ W

L.48 Com base nos dados fornecidos no texto e considerando que a luz proveniente do Sol leva cerca de 8 minutos e 20 segundos para atingir a Terra, calcule a intensidade média aproximada da onda que transmite a energia gerada no Sol ao atingir a superfície da Terra. A resposta correta é:

- a) $1,4 \times 10^3$ W/m²
b) $5,6 \times 10^3$ W/m²
c) $8,9 \times 10^{23}$ W/m²
d) $1,4 \times 10^{23}$ W
e) $5,6 \times 10^{23}$ W

L.49 (Olimpíada Paulista de Física) A quantidade média de energia do Sol, por unidade de área e por unidade de tempo, que atinge a atmosfera superior da Terra, é chamada de constante solar e vale $1,35$ kW/m². Num dia límpido, em virtude de absorções e reflexões na atmosfera, chega ao solo apenas 1 kW/m² dessa energia.

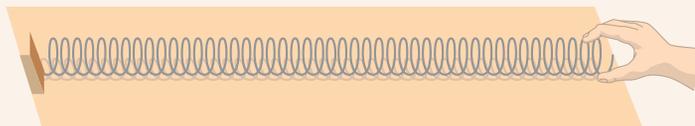
- a) Que quantidade de energia (em calorías) será recolhida, em 8 horas, por um aquecedor solar de 1 m por 2 m, montado de modo a estar sempre perpendicular à direção dos raios solares?
- b) Que quantidade de água, em litros, essa energia poderia aquecer, supondo uma variação de temperatura de 40 °C? (Considere 1 caloría = 4,2 joules, o calor específico da água $c = 1$ cal/g · °C e a densidade da água $d = 1$ kg/ℓ)

Atividade experimental

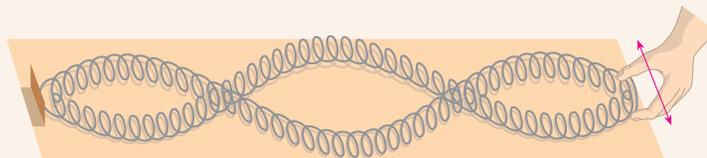
Realize a experiência com supervisão do seu professor

Produzindo ondas estacionárias

Prenha uma mola *slinky* por uma de suas extremidades e estique-a no chão até que adquira um comprimento de aproximadamente 3 m.



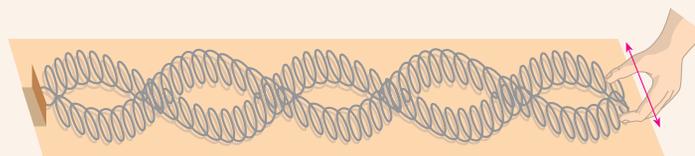
Movimente a extremidade livre para um lado e para o outro, paralelamente ao chão, de modo a produzir na mola uma onda transversal. Note que, entre a onda produzida e a onda refletida na extremidade fixa, ocorre uma **interferência**. A mola adquire o aspecto:



Responda

- Qual é o nome da figura de interferência resultante da superposição das duas ondas?
- Observe que existem pontos que não vibram e pontos que vibram com amplitude máxima. Quais são, respectivamente, seus nomes?

Em seguida, aumente a frequência de vibração da extremidade livre até que a mola adquira o seguinte aspecto:



Responda

Comparando esta última situação com a anterior:

- O que ocorre com o comprimento de onda das ondas que se propagam na mola — aumenta, diminui ou permanece o mesmo?

HISTÓRIA DA FÍSICA

A evolução da óptica e da ondulatória

A propagação retilínea da luz e sua reflexão já eram conhecidas pelos antigos gregos. A lei básica da reflexão luminosa, que estabelece a igualdade dos ângulos de incidência e de reflexão de um raio de luz, foi descoberta experimentalmente por HERON DE ALEXANDRIA, no século I. A refração da luz foi estudada e bem descrita pelo matemático árabe ABU-ALI AL-HASSAN ALHAZEN (987-1038), em seu livro *Óptica*, mas foi apenas no século XVII que o matemático holandês WILLEBRORD SNELL (1580-1626) formulou a lei que relaciona os ângulos de incidência e de refração. Coube ao físico e filósofo francês RENÉ DESCARTES (1596-1650), em sua obra *Dioptrica*, de 1637, divulgar a lei, que passou a ser conhecida com o nome dos dois cientistas: lei de Snell-Descartes.

Quanto à natureza da luz, quem formulou a primeira teoria científica a respeito foi ISAAC NEWTON (1642-1727). Em sua **teoria corpuscular**, Newton propunha que as fontes luminosas emitiam minúsculas partículas extremamente velozes em todas as direções, capazes de atravessar os meios transparentes, sofrendo refração e refletindo-se em superfícies polidas. Pela teoria de Newton, a luz deveria ter velocidade de propagação maior na água que no ar.

Mais ou menos na mesma época, o físico holandês CHRISTIAN HUYGENS (1629-1695) propôs a **teoria ondulatória** para explicar a natureza da luz. Segundo essa teoria, a luz se propaga por meio de ondas, do mesmo modo que o som. Para contornar o problema da propagação da luz no vácuo, que não acontece com o som, Huygens imaginou a existência de um meio elástico e imponderável a que deu o nome de **éter**. Por essa teoria, a velocidade da luz na água deveria ser menor que no ar, ao contrário do estabelecido por Newton.



René Descartes expõe suas teorias à rainha Cristina.



Huygens.

Durante praticamente todo o século XVIII a teoria corpuscular prevaleceu, principalmente em razão do maior prestígio de Newton no meio científico. Entretanto, em 1803, THOMAS YOUNG (1773-1829) realizou sua famosa experiência, mostrando que a luz pode sofrer interferência, contribuindo para firmar o caráter ondulatório da luz. Já em meados do século XIX,

o cientista francês LÉON FOUCAULT (1819-1868) verificou experimentalmente que a luz tem velocidade **menor** na água que no ar. A partir de então, passou a predominar a teoria ondulatória, que foi sendo gradativamente aperfeiçoada, até culminar com a **teoria ondulatória eletromagnética** do físico escocês JAMES CLERK MAXWELL (1831-1879), que propõe ser a luz constituída pelas denominadas **ondas eletromagnéticas**.

Com essa teoria ficou resolvido inclusive o problema da propagação da luz no vácuo: essas ondas podem fazê-lo, porque são geradas por variações de campo elétrico e de campo magnético.

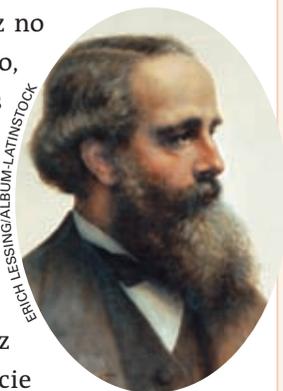
Em 1887, o físico alemão HEINRICH-RUDOLF HERTZ (1857-1894) descobriu o **efeito fotoelétrico**, pelo qual, em certas condições, a luz pode arrancar elétrons da superfície de um metal. Esse efeito não é explicável pela teoria ondulatória.

Para explicar o novo efeito, o renomado físico alemão ALBERT EINSTEIN (1879-1955) retomou a teoria corpuscular, mas sem o caráter mecânico imaginado por Newton. Para Einstein, a luz e toda radiação eletromagnética são emitidas ou absorvidas de modo descontínuo, na forma de **corpúsculos energéticos**, ou **fótons**, cada um transportando uma quantidade definida de energia denominada **quantum**.

Admite-se atualmente que a luz tem **dupla natureza**, corpuscular e ondulatória. Somente assim é possível explicar todos os fenômenos ópticos — uns com a teoria ondulatória, outros com a teoria corpuscular.



Young.



Maxwell.



Einstein.

Enquanto isso...

Consulte a **Linha do tempo**, nas páginas finais do livro, onde são assinalados os principais acontecimentos históricos que ocorreram na época em que viveram Young, Foucault, Maxwell, Hertz e Einstein, estendendo-se do século XIX ao século XX e os personagens importantes, em vários ramos de atividades, que viveram nesse mesmo período.

Dentre eles, salientamos:

Abraham **Lincoln** (1809-1865)

Foi o décimo sexto presidente dos Estados Unidos, governando o país de 1861 a 1865. Sua eleição para a presidência dos Estados Unidos, em 1860, provocou manifestações que levariam à Guerra de Secessão. Entretanto, conseguiu preservar a unidade do país.

Mahatma **Gandhi** (1869-1948)

Líder pacifista indiano e principal defensor da independência da Índia do domínio inglês. Foi ferrenho defensor do Satyagraha (princípio da não agressão, forma não violenta de protesto) como um meio de revolução.

Erwin **Schrödinger** (1887-1961)

Físico austríaco, famoso por suas contribuições à Mecânica Quântica, com destaque para a equação de Schrödinger, que lhe valeu o prêmio Nobel de Física de 1933, juntamente com Paul Adrien Maurice Dirac.

Enrico **Fermi** (1901-1954)

Físico italiano. Dedicou-se à Mecânica Estatística das partículas. Recebeu o prêmio Nobel de Física em 1938, por seus trabalhos sobre a formação de elementos transurânicos. O elemento químico de número atômico 100 foi denominado **férmio** em sua homenagem.

José **Oswald de Souza Andrade** (1890-1954)

Poeta, romancista, dramaturgo e jornalista literário paulista. Participou da Semana de Arte Moderna. Foi um dos fundadores do Movimento Antropofágico, cuja proposta era que o Brasil se “alimentasse” da cultura estrangeira para criar uma estética e uma cultura brasileira genuína. Suas obras mais conhecidas são o romance *Memórias sentimentais de João Miramar* e a peça teatral *O rei da vela*.

Jean-Paul **Sartre** (1905-1980)

Filósofo existencialista francês. Em 1929 conheceu a também célebre escritora Simone de Beauvoir, que se tornaria sua companheira e colaboradora até o fim da vida. Em 1964, recusou o prêmio Nobel de Literatura.

Heitor **Villa-Lobos** (1887-1959)

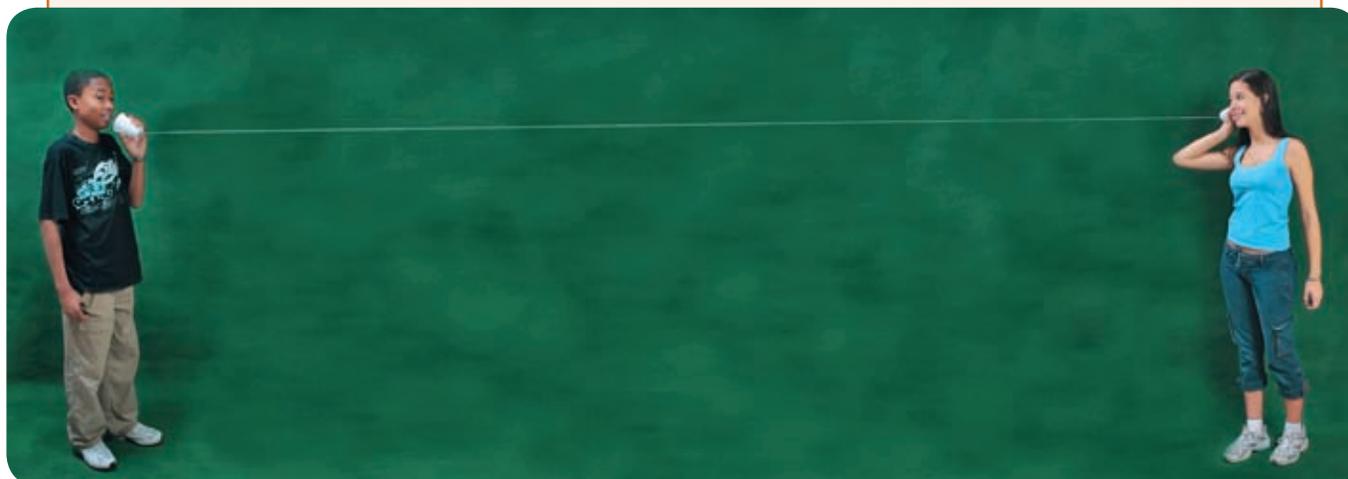
Um dos maiores maestros e compositores brasileiros, autor de vários gêneros musicais, como concertos, sinfonias e sonatas. Foi o primeiro presidente da Academia Brasileira de Música. Regeu onze orquestras brasileiras e quase setenta em todo o mundo.

Atividade experimental

Realize as experiências com supervisão do seu professor

Telefone de barbante

Pegue dois copos de iogurte vazios e faça um orifício no fundo de cada um. Passe um barbante de mais ou menos 5 m pelos orifícios dos copos e faça um nó nas extremidades, de modo a manter os copos ligados.



SÉRGIO DOTTA JR/CID



SÉRGIO DOTTA JR/CID



SÉRGIO DOTTA JR/CID

Procure usar esse “telefone” com um colega. Um de vocês falará num dos copos enquanto o outro colocará o copo junto à orelha. Assim, vocês manterão uma conversação em voz relativamente baixa.

- Explique por que, numa conversa a distância, é mais fácil a comunicação com o dispositivo construído do que sem ele.
- Mudando o material do fio que une os copos a eficiência do “telefone” pode aumentar? Por quê?

Os copos cantantes

Consiga cinco copos iguais (sugestão: copos de requeijão vazios). Coloque-os alinhados. De início, bata com uma colher em cada um deles para se certificar de que, quando vazios, eles emitem o mesmo som.



SÉRGIO DOTTA JR/CD

Agora coloque água no primeiro copo até a metade. Você vai verificar que, ao ser percutido com a colher, o som que ele vai dar é diferente do inicial.

- Como você explica esse fato? Por que se alterou o som emitido pelo copo?

Agora aumente a quantidade de água no copo e novamente percute o copo com a colher.

- O som ouvido é mais grave ou mais agudo que o som anterior?
- Por que isso aconteceu?

Coloque agora quantidades diferentes de água nos cinco copos, o primeiro com pouca água, o segundo com mais um pouco, até o último, que entretanto não deve ficar completamente cheio. Observe que cada um emite, ao ser percutido com a colher, um som diferente.



SÉRGIO DOTTA JR/CD

- É possível criar um instrumento musical rudimentar com esses cinco copos? De que maneira?
- Você conhece algum instrumento musical que tem o mesmo princípio de funcionamento? Qual?
- Se você dispuser de um instrumento musical (um violão ou um piano, por exemplo) procure “criar” uma escala de dó a sol, variando convenientemente as quantidades de água nos copos.

A FÍSICA EM NOSSO MUNDO

O som também polui



JOSEF P. WILLEMS/LOOKGETTY IMAGES

Por medida de segurança, os profissionais sujeitos a níveis sonoros muito elevados devem utilizar protetores auditivos.

Um dos problemas mais preocupantes de nossa sociedade é a poluição sonora. Vivemos num mundo em que o normal é o ruído, o barulho constante. O silêncio é uma rara exceção. Por isso aumenta rapidamente o número de pessoas com deficiências auditivas causadas pela exposição prolongada a sons muito intensos.

O nível sonoro de um som está relacionado com a energia sonora que ele transporta. Quando é submetido continuamente a sons de nível sonoro superior a 85 decibels, o sistema auditivo humano sofre lesões irreparáveis e irreversíveis, que causam uma diminuição na audição. Se os níveis sonoros forem maiores, as consequências serão muito mais graves. Verifica-se, por exemplo, que uma curta exposição a 110 decibels causa uma diminuição transitória da sensibilidade auditiva. Exposições mais prolongadas a esses mesmos 110 decibels (ou curtas a 140 decibels) podem causar lesões aos nervos auditivos e conseqüente surdez definitiva. Uma exposição repentina a sons com níveis sonoros superiores a 140 decibels pode provocar ruptura do tímpano e danos à orelha média. Existem ainda casos em que a lesão dos nervos auditivos acarreta um zumbido permanente e irreversível.

Considerando que existem profissões em que os operários ficam expostos a sons muito intensos, o Ministério do Trabalho e Emprego fixou a máxima exposição diária permitida conforme o nível sonoro. Assim, por exemplo, 8 horas é o período máximo de exposição para sons de 85 dB, 4 horas para 90 dB, 1 hora para 100 dB, 30 minutos para 105 dB, 15 minutos para 110 dB e apenas 7 minutos para 115 dB. No entanto, a fiscalização nas indústrias é muito precária, e a lei, embora existente, não é obedecida de modo satisfatório; em consequência, a surdez é uma das doenças profissionais mais frequentes no Brasil.

Existem ainda outros males causados pelo excesso de ruído que não estão relacionados com danos no sistema auditivo, como dilatação das pupilas, maior produção de hormônios pela tireoide, aumento na produção de adrenalina pelas glândulas suprarrenais, aceleração do ritmo cardíaco e aumento da pressão arterial.

Se os problemas físicos são intensos e altamente prejudiciais, não menos graves são os efeitos psicológicos e sociais do excesso de som. Realmente a poluição sonora, além dos males físicos, interfere na comunicação, provoca a fadiga, reduz a eficiência no trabalho e neurotiza a população.

Uma simples consulta aos dados das tabelas da página seguinte mostra como é prejudicial grande parte dos sons tão comuns em nossa vida diária. Frequentemente nem percebemos que estamos submetidos de modo contínuo a sons de níveis sonoros acima dos toleráveis. E é comum ainda nos submetermos voluntariamente a um excesso absurdo de nível sonoro ao assistirmos a espetáculos de conjuntos musicais que tocam “a todo volume”. A surdez progressiva de músicos já é considerada uma doença profissional.

Do mesmo modo que os demais tipos de poluição, a poluição sonora degrada a qualidade de vida das pessoas. Por isso, em diversos países, o combate ao excessivo nível sonoro tem sido considerado prioritário. Campanhas de conscientização do público e leis severas com fiscalização eficiente são indispensáveis para que essa luta contra o ruído excessivo dê resultados.

Todos precisamos nos engajar nessa cruzada contra o barulho, limitando a intensidade dos sons que nos cercam, em casa, no trânsito, na escola, no trabalho.



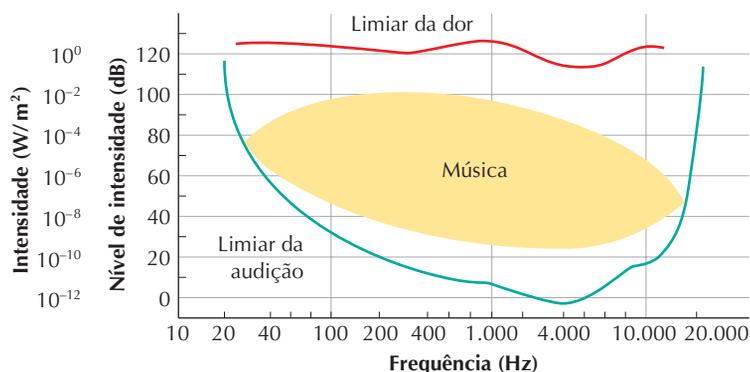
NIELS ANDREAS/FOLHA IMAGEM

🔥 O ruído do trânsito nas grandes cidades é um dos fatores que aumentam o estresse da população.

| Som | Nível sonoro |
|----------------------------|--------------|
| Silêncio absoluto | 0 dB |
| Interior de uma igreja | 10 dB |
| Conversação em voz baixa | 20 dB |
| Respiração ofegante | 30 dB |
| Bairro residencial à noite | 40 dB |
| Automóvel bem regulado | 50 dB |
| Conversação em voz normal | 60 dB |
| Interior de um restaurante | 70 dB |

| Som | Nível sonoro |
|------------------------------|--------------|
| Aspirador de pó | 80 dB |
| Interior de fábrica têxtil | 90 dB |
| Buzina de caminhão | 100 dB |
| Britadeira | 100 dB |
| Conjunto de <i>rock</i> | 110 dB |
| Trovão | 120 dB |
| Decolagem de avião | 130 dB |
| Aterrissagem de avião a jato | 140 dB |

I.52 (Vunesp) O gráfico da figura indica, no eixo das ordenadas, a intensidade de uma fonte sonora, I , em watts por metro quadrado (W/m^2), ao lado do correspondente nível de intensidade sonora, β , em decibels (dB), percebido, em média, pelo ser humano. No eixo das abscissas, em escala logarítmica, estão representadas as frequências do som emitido. A linha superior indica o limiar da dor – acima dessa linha, o som causa dor e pode provocar danos ao sistema auditivo das pessoas. A linha inferior mostra o limiar da audição – abaixo dessa linha, a maioria das pessoas não consegue ouvir o som emitido.



Suponha que você assessorie o prefeito de sua cidade para questões ambientais.

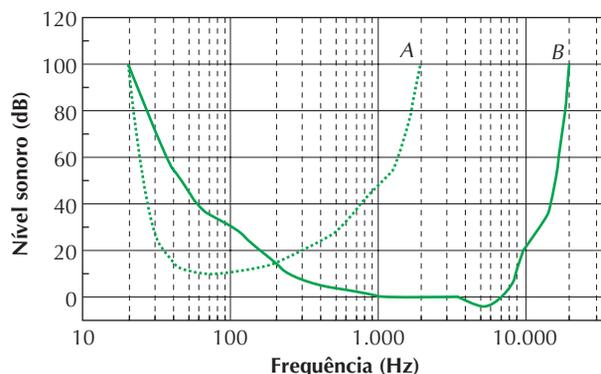
- Qual é o nível de intensidade máximo que pode ser tolerado pela municipalidade? Que faixa de frequências você recomenda que ele utilize para dar avisos sonoros que sejam ouvidos pela maior parte da população?
- A relação entre a intensidade sonora, I , em W/m^2 , e o nível de intensidade, β , em dB, é $\beta = 10 \cdot \log\left(\frac{I}{I_0}\right)$, onde $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$. Qual a intensidade de um som, em W/m^2 , num lugar onde o seu nível de intensidade é 50 dB? Consultando o gráfico, você confirma o resultado que obteve?

I.53 (Unicamp-SP) É usual medirmos o nível de uma fonte sonora em decibels (dB). O nível em dB é relacionado à intensidade I da fonte pela fórmula:

nível sonoro (dB) = $10 \cdot \log\left(\frac{I}{I_0}\right)$ em que $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$ é um valor padrão de intensidade

muito próximo do limite de audibilidade humana.

Os níveis sonoros necessários para uma pessoa ouvir variam de indivíduo para indivíduo. No gráfico a seguir esses níveis estão representados em função da frequência do som para dois indivíduos, A e B. O nível sonoro acima do qual um ser humano começa a sentir dor é aproximadamente 120 dB, independentemente da frequência.



- Que frequência o indivíduo A consegue ouvir melhor que o indivíduo B?
- Qual é a intensidade I mínima de um som (em W/m^2) que causa dor em um ser humano?
- Um beija-flor bate as asas 100 vezes por segundo, emitindo um ruído que atinge o ouvinte com um nível de 10 dB. Em quanto a intensidade I deste ruído precisa ser amplificada para ser audível pelo indivíduo B?

Atividade experimental

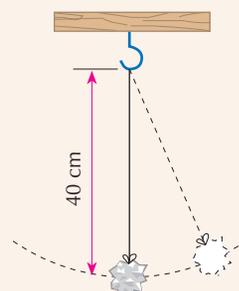
Realize a experiência com supervisão do seu professor

O pêndulo simples

Com um pedaço de barbante e uma pequena pedra, construa um pêndulo de 40 cm de comprimento. Amarre a pedra numa das extremidades do barbante e fixe a outra.

• Determinação do período de oscilação do pêndulo

Para determinar o período de oscilação do pêndulo, faça com que ele realize 10 oscilações completas de pequena abertura e, com um cronômetro, determine o intervalo de tempo correspondente. Divida o valor encontrado por 10. Que valor você encontrou para o período de oscilação?



Substitua a pedra por outra, de massa diferente, e determine novamente o período, ainda considerando oscilações de pequena abertura.

O que você conclui a respeito do novo valor encontrado para o período? É maior, menor ou igual ao valor encontrado anteriormente? O período depende da massa da pequena pedra que oscila?

• Determinação do valor da aceleração local da gravidade

Com o valor encontrado para o período, determine a aceleração local da gravidade (g). Lembre-se de que o período do pêndulo é dado por: $T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$, em que L é o comprimento do fio.

• Mudando o comprimento do fio

Troque o barbante por outro, de modo que o comprimento do pêndulo passe a ser de 60 cm, e repita a experiência, determinando o novo período de oscilação. Esse valor é maior ou menor que o encontrado com o barbante mais curto (de 40 cm)? Com o valor de g encontrado no item anterior, conhecendo o comprimento L do fio, determine, por meio da fórmula, o período de oscilação do pêndulo. Compare o valor obtido experimentalmente com o valor obtido por meio da fórmula.