Exercícios Resolvidos de Física Básica

Jason Alfredo Carlson Gallas, professor titular de física teórica,
Doutor em Física pela Universidade Ludwig Maximilian de Munique, Alemanha
Universidade Federal da Paraíba (João Pessoa, Brasil)
Departamento de Física

Numeração conforme a **SEXTA** edição do "Fundamentos de Física", Halliday, Resnick e Walker.

Esta e outras listas encontram-se em: *http://www.fisica.ufpb.br/∼jgallas*

Contents

Comentários/Sugestões e Erros: favor enviar para `jasongallas @ yahoo.com` (sem "br" no final...)

(`listaq3.tex`)

18 ONDAS - II

18.1 Questionário

18-3. Que evidência experimental existe para afirmarmos que a velocidade do som, no ar, é a mesma para qualquer comprimento de onda?

► O fenômeno do eco evidencia bem este fato. Se o ar fosse um meio dispersivo, o som refletido no eco não reproduziria o som emitido.

18-6. Qual é a função comum das válvulas de um pistom e da vara do trombone?

► As válvulas do pistom e a vara do trombone tem a função de alterar o comprimento da coluna de ar no interior destes instrumentos, para produzir as freqüências correspondentes às notas musicais.

18-9. Quando você bate em um dos dentes de um diapasão, o outro dente também oscila, mesmo que a extremidade inferior do diapasão esteja fixa. Como isto acontece? E como pode o segundo dente oscilar, do mesmo modo que o primeiro (à mesma freqüência)?

► O segundo dente do diapasão oscila - e com a mesma freqüência - porque uma onda se propaga também no interior da estrutura cristalina do metal de que é feito o diapasão.

18-11. Como podemos localizar, numa experiência, as posições dos nós e ventres em uma corda, em uma coluna de ar e em uma superfície vibrante?

► As posições dos nós e ventres em uma corda são facilmente visualizados, se a freqüência não for muito grande. Na coluna de ar, os nós e ventres podem ser determinados pelo dispositivo ilustrado na Fig. 18-29 e descrito no exercício 18-49E. Numa superfície vibrante, podemos espalhar algum pó bem visível e observar onde ele se acumula para diferentes freqüências de oscilação. A Fig. 17-19 mostra alguns modos de vibração da membrana de um tambor.

18-14. Explique o som audível produzido ao passar o dedo úmido pela boca de um cálice de vinho.

► O interior do cálice é como uma coluna de ar e uma ressoância acontece para uma dada freqüência do movimento do dedo. Mudando o nível do vinho no cálice, muda a altura da coluna de ar e a ressonância vai acontecendo para outras freqüências.

18-15. Um relâmpago dissipa uma quantidade enorme de energia e é essencilamente instantâneo pelos padrões de nossa vida diária. Como essa energia se transforma no som do trovão?

► A corrente elétrica no relâmpago produz um aquecimento do ar, que sofre uma brusca expansão, produzindo a propagação de uma onda sonora de grande amplitude.

18-16. Ondas sonoras podem ser usadas para medir a velocidade com que o sangue passa pelas veias e artérias. Explique como.

► Ondas ultra-sônicas atingem e são refletidas pelas estruturas de diferentes densidades presentes no sangue e movendo-se com ele ao longo das veias e artérias. A freqüência refletida será maior ou menor que a emitida, em função do movimento.

18-18. Suponhamos que, no efeito Doppler para o som, a fonte e o receptor estão em repouso em relação a algum ponto de referência, mas o ar está se movendo levando em conta esse ponto. Haverá mudanças no comprimento de onda (ou freqüência) recebido?

► Não. Deve haver um movimento relativo entre fonte e receptor para observarmos mudanças no comprimento de onda.

18-20. De que modo o efeito Doppler pode ser usado em um instrumento para detectar a batida do coração de um feto? (Este procedimento é rotineiro em medicina.)

► O movimento do músculo cardíaco altera a freqüência das ondas ultra-sônicas na reflexão, permitindo assim a detecção das suas batidas.

18.2 Exercícios e Problemas

18.3 A Velocidade do Som

18-2E. Uma coluna de soldados, marchando a 120 passos por minuto, segue a música da banda à frente do pelotão. Observa-se que os soldados atrás da coluna avançam com o pé esquerdo, enquanto os músicos da banda avançam com o direito. Qual o tamanho da coluna, aproximadamente?

► A freqüência da marcha é de 2 passos por segundo e as passadas dos músicos e dos soldados atrás da coluna estão defasadas de meio comprimento de onda:

$$\lambda = \frac{v}{f} = 171.5 \text{ m}.$$

Portanto, o tamanho da coluna é, aproximadamente,

$$\frac{\lambda}{2} = 85.8 \text{ m}.$$

18-5E. A densidade média da crosta terrestre, 10 km abaixo da superfície, é de 2.7 g/cm^3. A velocidade das ondas longitudinais sísmicas a essa profundidade, encontrada a partir da medida do tempo em que chegam, vindas de terremotos distantes, é de 5.4 km/s. Use esta informação para achar o módulo de elasticidade volumétrica da crosta terrestre a essa profundidade. Para comparação, o módulo de elasticidade volumétrica do aço é, aproximadamente, 16×10^{10} Pa.

► Aplicamos diretamente a relação entre a velocidade de propagação, a densidade do meio e o módulo de elasticidade:

$$B = \rho v^2 = 7.87 \times 10^{10} \text{ Pa}.$$

O módulo de elasticidade da crosta à profundidade dada é a metade do do aço.

18-8P. A velocidade do som em um certo metal é V. Em uma extremidade de um longo tubo deste metal, de comprimento L, se produz um som. Um ouvinte do outro lado do tubo ouve dois sons, um da onda que se propaga pelo tubo e outro da que se propaga pelo ar. (a) Se v é a velocidade do som no ar, que intervalo de tempo t ocorre entre os dois sons? (b) Supondo que $t = 1.00$ s e que o metal é o ferro, encontre o comprimento L.

► (a) O tempo que a onda que se propaga pelo ar leva para percorrer L é $t_1 = L/v$ e o tempo para a que se propaga no metal é $t_2 = L/V$. Portanto,

$$t = t_1 - t_2 = L\,\frac{(V - v)}{vV}$$

(b) Tomando $V = 5900$ m/s, aproximadamente, obtemos $L = 364$ m.

18-11P. Uma pedra é jogada num poço. O som da pedra se chocando com a água é ouvido 3.00 s depois. Qual a profundidade do poço?

► A profundidade do poço é $y = g\,t_q^2/2$, onde t_q é o tempo que a pedra leva para atingir a água. Mas também $y = v\,t_s$, sendo t_s o tempo que o som leva para alcançar a borda do poço. A soma desses tempos é o intervalo medido:

$$t_q + t_s = 3.00 \text{ s}.$$

Igualando as equações para a profundidade y,

$$v(3.00 - t_q) = \frac{1}{2}\,g\,t_q^2,$$

teremos uma equação do segundo grau para t_q, cuja raiz válida, $t_q = 2.88$ s, fornece a profundidade do poço $y = 41.0$ m.

18.4 Propagação de Ondas Sonoras

18-14E. Ultra-som à freqüência de 4.50 MHz é usado para examinar tumores nos tecidos internos. (a) Qual o comprimento de onda no ar dessas ondas sonoras? (b) Se a velocidade do som no tecido é de 1500 m/s, qual o comprimento de onda das ondas no tecido?

► (a) O comprimento de onda é dado por

$$\lambda = \frac{v}{f} \approx 76\,\mu\text{m}.$$

(b) Se $v_t = 1500$ m/s, então o comprimento de onda no tecido é

$$\lambda_t = \frac{v_t}{f} = 0.33 \text{ mm}.$$

18-18P. A pressão em uma onda sonora progressiva é dada pela equação

$$\Delta p = (1.5 \text{ Pa})\; sen\,\pi\;\Big[(1.00 \text{ m}^{-1})x - (330 \text{ s}^{-1})t\Big]\,.$$

Encontre (a) a amplitude de pressão, (b) a freqüência, (c) o comprimento de onda e (d) a velocidade da onda.

► (a) Da equação da onda temos diretamente que a amplitude é de 1.5 Pa.

(b) A freqüência angular é $\omega = 330\pi$ rad/s. Então a freqüência das oscilações é

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = 165 \text{ Hz}.$$

(c) O número de onda angular é $k = \pi$ rad/m. Então o comprimento de onda é

$$\lambda = \frac{2\pi}{k} = 2.0 \text{ m}.$$

(d) A velocidade de propagação da onda é dada por

$$v = \lambda f = \frac{\omega}{k} = 330 \text{ m/s}.$$

18-21P. Na Fig. 18-25, dois alto-falantes, separados por uma distância de 2.00 m, estão em fase. Supondo que a amplitude dos sons dos dois seja, de modo aproximado, a mesma na posição do ouvinte, que está a 3.75 m diretamente à frente de um dos alto-falantes. (a) Para quais freqüências audíveis (20-20000 Hz) existe um sinal mínimo? (b) Para quais freqüências o som fica ao máximo?

► (a) A condição para a ocorrência dos mínimos é que a diferença de percurso entre as fontes e o ouvinte seja um número m inteiro de *meios* comprimentos de onda:

$$\Delta s = s_1 - s_2 = (m + \frac{1}{2})\lambda.$$

onde $s_1 = \sqrt{(3.75)^2 + (2.00)^2} = 4.25$ m e $s_2 = 3.75$ m. Reescrevemos a equação dos mínimos para as freqüências:

$$f = (m + \frac{1}{2})\,\frac{v}{\Delta s},$$

da qual obtemos, para $m = 0$, $f_0 = 343$ Hz, a menor freqüência no intervalo audível. A maior freqüência no intervalo ocorre para $m = 28$, sendo $f_{28} = 19551$ Hz.
(b) A condição para a ocorrência dos máximos é que a diferença de percurso seja um número inteiro de comprimentos de onda

$$\Delta s = m\lambda = \frac{v}{f}.$$

Explicitando a freqüência, temos

$$f = m\,\frac{v}{\Delta s},$$

que fornece $f_1 = 686$ Hz e $f_{29} = 19894$ Hz para a menor e a maior freqüências no intervalo audível.

18-24P. Uma onda sonora de comprimento de onda de 40.0 cm entra no tubo mostrado na Fig. 18-26. Qual deve ser o menor raio r, de modo que um mínimo seja registrado pelo detector?

► Para um mínimo, a diferença de percurso será

$$\pi r - 2r = \frac{\lambda}{2},$$

de modo que obtemos para o raio

$$r = \frac{\lambda}{2(\pi - 2)} = 17.52 \text{ cm}.$$

18-25P. Na Fig. 18-27, uma fonte pontual F de ondas sonoras está próxima a um muro refletor AB. Um detector D intercepta o raio sonoro R_1, vindo diretamente de F. Também intercepta o raio sonoro R_2, que foi refletido pelo muro com um *ângulo de incidência* θ_i igual ao *ângulo de reflexão* θ_r. Encontre as duas freqüências para as quais existe interferência construtiva entre R_1 e R_2 em D. (A reflexão do som no muro não altera a fase da onda sonora.)

► Observando a geometria da Fig. 18-27, temos para o raio R_1:

$$R_1 = \sqrt{80^2 + 50^2} = 94.34 \text{ ft}.$$

O raio R_2 é refletido pelo muro AB num ponto que está à distância b verticalmente abaixo de F. Da semelhança dos triângulos estabelecemos

$$\frac{b}{10} = \frac{50 - b}{90},$$

que nos fornece o valor $b = 5$ ft. Agora podemos determinar R_2:

$$R_2 = \sqrt{45^2 + 90^2} = 100.62 \text{ ft}.$$

A distância d, de F até o ponto do muro de onde R_2 é refletido, é

$$d = \sqrt{5^2 + 10^2} = 11.18 \text{ ft}.$$

Agora podemos calcular a diferença de percurso Δl nos caminhos de R_1 e R_2 até D:

$$\Delta l = d + R_2 - R_1 = 17.46 \text{ ft}.$$

Para os máximos de interferência devemos ter

$$\Delta l = m\lambda, \text{ com } m = 0,\ 1,\ 2, \ldots$$

Explicitando essa relação para a freqüência, temos

$$f_1 = \frac{v}{\Delta l} = \frac{1125}{17.46} = 64.5 \text{ Hz e}$$

$$f_2 = \frac{2v}{\Delta l} = \frac{2250}{17.46} = 129 \text{ Hz.}$$

18.5 Intensidade e Nível do Som

18-29E. Uma nota de freqüência 300 Hz tem uma intensidade de 1.00 μW/m^2. Qual a amplitude das oscilações do ar, causadas por este som?

► Tirando s_m da relação da intensidade, vem

$$s_m = \left(\frac{2I}{\rho v \omega^2}\right)^{1/2} = 36.8 \text{ nm.}$$

18-30E. Dois sons diferem em nível por 1.00 dB. Por que número ficam multiplicadas (a) sua intensidade e (b) sua amplitude?

► Se a diferença em nível é de 1.00 dB, então

$$(10 \text{ dB})\, log\, \frac{I_2}{I_1} = 1.0 \text{ dB},$$

$$log\, \frac{I_2}{I_1} = 0.1.$$

(a) Então o fator entre as intensidades é

$$I_2 = 1.26\, I_1.$$

(b) E o fator entre as amplitudes é

$$\frac{s_{m,2}}{s_{m,1}} = \sqrt{1.26} = 1.12.$$

18-34E. Uma fonte de ondas sonoras tem uma potência de 1.00 μW. Se for uma fonte pontual (a) qual a intensidade a 3.00 m de distância e (b) qual o nível do som em decibéis a essa distância?

► (a) Dada a potência, calculamos a intensidade por

$$I = \frac{P}{4\pi r^2} = 8.84 \times 10^{-9} \text{ W/m}^2.$$

(b) O nível sonoro para a distância pedida, com $I_0 = 10^{-12}$ W/m^2, será

$$\begin{aligned} \beta &= (10 \text{ dB })\, log\, \frac{I}{I_0} \\ &= (10 \text{ dB })\, log\, \frac{8.84 \times 10^{-9}}{1.0 \times 10^{-12}} \\ &= (10 \text{ dB })(3.95) = 39.5 \text{ dB} \end{aligned}$$

18.36P (a) Mostre que a intensidade I de uma onda é o produto da energia da onda por unidade de volume u e sua velocidade v. (b) Ondas de rádio viajam à velocidade de 3.00×10^8 m/s. Encontre u para uma onda de rádio distando 480 km de uma fonte de potência 50000 W, considerando as ondas esféricas.

► (a) Podemos recorrer à análise dimensional. Na relação da intensidade, $I = \rho v \omega^2 s_m^2/2$, o fator $\rho\omega^2 s_m^2/2$ tem dimensão de energia por unidade de volume (verifique!), portanto, podemos expressar a intensidade em termos de u como $I = uv$.
(b) Com os dados fornecidos, calculamos a intensidade:

$$I = \frac{P}{4\pi r^2} = 1.73 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2.$$

E com a relação do ítem (a), obtemos

$$u = \frac{I}{v} = 5.77 \times 10^{-17} \text{ J/m}^3.$$

18-39P. Encontre as razões das (a) intensidades, (b) amplitudes de pressão e (c) amplitudes de deslocamentos de partículas para dois sons cujos níveis diferem por 37 dB.

► (a) Para a razão entre as intensidades, temos

$$log\, \frac{I_2}{I_1} = 3.7$$

$$\frac{I_2}{I_1} = 5012.$$

(b) Explicitando a razão entre as intensidades, temos

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{\omega^2 s_{m,2}^2}{\omega^2 s_{m,1}^2},$$

que fornece para a razão entre as amplitudes de pressão

$$\frac{\Delta p_2}{\Delta p_1} = \frac{\omega s_{m,2}}{\omega s_{m,1}} = \sqrt{\frac{I_2}{I_1}} = 70.8$$

(c) A razão entre as amplitudes de deslocamento é a mesma razão entre as amplitudes de pressão.

18-40P. A uma distância de 10 km, um berrante de 100 Hz, considerado como uma fonte pontual, é ouvido muito baixo. A que distância começará a causar dor nos ouvidos?

► O limiar da audição dolorosa é de 120 dB, de acordo com a Tabela 18-3. Esse nível sonoro corresponde à intensidade

$$log\,\frac{I}{I_0} = 12,$$

$$I = 10^{12}\,I_0 = 1.0\text{ W/m}^2.$$

Para as distâncias em questão, com $r_0 = 10^4$ m, temos

$$I_0 r_0^2 = I r^2,$$

que fornece $r = 10^{-2}$ m.

18-41P. Você está parado a uma distância D de uma fonte que emite ondas sonoras, de forma igual, em todas as direções. Caminha 50.0 m em direção à fonte e observa que a intensidade das ondas foi dobrada. Calcule a distância D.

► Com a equação $P = I(4\pi r^2)$, relacionamos as intensidades nas duas distâncias,

$$ID^2 = 2I(D-50)^2,$$

obtendo uma equação do segundo grau para a variável D, cuja raiz válida fornece $D = 171$ m.

18-45P. A Fig. 18-28 mostra um interferômetro acústico, cheio de ar, usado para demonstrar a interferência de ondas sonoras. F é um diafragma; D é um detector de som, como o nosso ouvido ou um microfone. O comprimento FBD pode ser variado, enquanto o comprimento FAD é fixo. Em D, a onda sonora vinda de FBD interfere com a vinda de FAD. A intensidade do som em D tem um valor mínimo de 100 unidades em uma certa posição de B e cresce, de maneira contínua, até um valor máximo de 900 unidades quando B é deslocado de 1.65 cm. Encontre (a) a freqüência do som emitido pela fonte e (b) a razão que a amplitude da onda de FAD tem com a amplitude da onda de FBD em D. (c) Como podem essas ondas terem diferentes amplitudes, se foram originadas pela mesma fonte F?

► (a) Do mínimo para o máximo, o deslocamento de FDB é tal que faz crescer a diferença de percurso de meio comprimento de onda para um comprimento de onda inteiro, isto é,

$$\frac{\lambda}{2} = 2\times 1.65\text{ cm}.$$

Portanto, $\lambda = 6.6$ cm e a freqüência do som emitido pela fonte é então

$$f = \frac{v}{\lambda} = \frac{343}{0.066} = 5197\text{ Hz}.$$

(b) Chamemos de A a amplitude da onda que chega em D vindo por FAD e B a amplitude da onda que vem pelo caminho FBD. A intensidade é proporcional à amplitude ao quadrado. Então,

$$I_{\text{máx.}} = k(A+B)^2 = 900,$$

$$I_{\text{mín.}} = k(A-B)^2 = 100.$$

Tomando a razão das intensidades, temos

$$\frac{(A+B)^2}{(A-B)^2} = 9,$$

que nos leva ao resultado

$$\frac{A}{B} = 2.$$

(c) O atrito entre o ar e as paredes do tubo reduz a energia das ondas no percurso. Como o percurso é diferente para as duas ondas que se encontram em D, suas amplitudes são diferentes.

18-46P*. Dois alto-falantes, F_1 e F_2, estão a 7.0 m um do outro e oscilam em fase, cada um emitindo som na freqüência de 200 Hz, de modo uniforme, em todas as direções. F_1 emite a uma potência de 1.2×10^{-3} W e F_2 a 1.8×10^{-3} W. Seja um ponto *P*, que está 4.0 m de F_1 e 3.0 m de F_2. (a) Como as fases das duas ondas passando por P se realcionam? (b) Qual a intensidade do som em *P* com F_1 e F_2 ligadas? (c) Qual a intensidade do som em *P*, se F_1 está desligado (F_2 ligado)? (d) Qual a intensidade do som em *P*, se F_2 está desligado (F_1 ligado)?

► (a) A distância de F_1 a P é $r_1 = 4.0$ m e a distância de F_2 a P é $r_2 = 3.0$ m, tal que a diferença de percurso é $\Delta d = 1.0$ m. Então a diferença de fase entre as ondas em P é

$$\Phi = \frac{2\pi\Delta d}{\lambda} = 1.17\pi\text{ rad} = 210^o$$

Lembrando que as ondas que se combinam em P viajam em sentidos opostos, a diferença de fase é de fato

$$\delta = \Phi - 180^o = 30^o.$$

(b) A intensidade do som com ambas as fontes ligadas depende da amplitude da onda que resulta da superposição das ondas no ponto P. Como essas ondas fazem percursos diferentes, as amplitudes em P também são diferentes. Suponhamos que em P temos $x = 0$. As ondas que vamos somar são então

$$y_1 = A\ sen\omega t \text{ e}$$

$$y_2 = B\ sen(\omega t + \delta),$$

onde A e B são as amplitudes das ondas. Usando a identidade trigonométrica

$$sen(\omega t + 30^o) = sen\omega t cos 30^o + cos\omega t sen 30^o$$

chegamos à expressão

$$\begin{aligned} y &= Asen\omega t + B(0.87 sen\omega t + 0.5 cos\omega t) \\ &= (A + 0.87B) sen\omega t + 0.5B cos\omega t \\ &= (A + 0.87B)\left[sen\omega t + \frac{0.5B}{A + 0.87B} cos\omega t\right] \end{aligned}$$

A onda y tem a forma geral da onda progressiva

$$\begin{aligned} y &= Y_m sen(\omega t + \beta) \\ &= Y_m (sen\omega t cos\beta + cos\omega t sen\beta) \end{aligned}$$

18.6 Fontes Sonoras Musicais

18-49E. Na Fig. 18-29, um bastão R está fixado pelo seu centro; um disco D, preso a um extremo do bastão, está dentro de um tubo de vidro que tem pedaços de cortiça enfileirados no seu interior. Um êmbolo P é colocado no outro extremo. Fazemos então o bastão oscilar, longitudinalmente, à freqüência f para produzir ondas sonoras dentro do tubo, e o êmbolo P é ajustado até que uma onda estacionária seja conseguida no interior do tubo. Quando isto acontece, os pedaços de cortiça se acumulam nas regiões correspondentes aos nós das ondas produzidas naquele interior. Mostre que, se d é a distância média entre os pontos de acumulação, a velocidade do som v no gás, dentro do tubo, é dada por

$$v = 2fd.$$

Este é o *método de Kundt* para determinar a velocidade do som nos gases.

► Se d é a separação entre os nós da onda estacionária, então $\lambda = 2d$ e a velocidade da onda sendo $v = \lambda f$, nos leva diretamente ao resultado pedido,

$$v = 2df.$$

18-54E. Um tubo de um órgão A, com as duas extremidades abertas, tem uma freqüência fundamental de 300 Hz. O terceiro harmônico de um órgão B, com uma extremidade aberta, tem a mesma freqüência que o segundo harmônico do A. Qual o comprimento (a) do tubo do órgão A e (b) do B?

► Para um tubo com as duas extremidades abertas, temos as freqüências de ressonância dadas por

$$f_A = n_A \frac{v}{2L_A}, \text{ com } n_A = 1,\ 2,\ 3, ...$$

Para um tubo com uma extremidade aberta, as freqüências são

$$f_B = n_B \frac{v}{4L_B}, \text{ com } n_B = 1,\ 3,\ 5, ...$$

(a) A freqüência fundamental fornecida leva diretamente ao comprimento L_A:

$$L_A = \frac{v}{2f_{A1}} = \frac{343}{600} = 0.57 \text{ m}.$$

(b) Sabemos que $f_{B3} = f_{A2}$, ou seja,

$$\frac{3v}{4L_B} = \frac{v}{L_A},$$

que nos fornece o comprimento $L_B = 0.43$ m.

18-56P. Uma certa corda de violino tem 30 cm de comprimento, está fixa nas suas duas extremidades e tem massa de 2.0 g. A corda emite uma nota A (440 hz), quando tocada sem se colocar o dedo. (a) Onde se deve colocar o dedo para que a corda passe a emitir uma nota C (523 Hz)? (b) Qual a razão entre os comprimentos de onda da onda da corda necessário para uma nota A e para uma C? (c) Qual a razão entre o comprimento de onda da onda sonora, quando é tocada uma nota A e uma C?

► (a) Quando tocada sem colocar o dedo, a corda vibra na sua freqüência fundamental, $f_A = 440$ Hz, com $\lambda_A = 2L = 0.60$ m e a velocidade é $v = \lambda_A f_A = 264$ m/s. Com o dedo posicionado, o comprimento de onda na corda passa a ser $\lambda_C = v/f_C = 0.505$ m. Sendo L' o novo comprimento da corda, temos

$$\lambda_C = \frac{2L'}{n},$$

e, se $n = 1$, vamos ter

$$L' = \frac{\lambda_C}{2} = 0.25 \text{ m}.$$

Portanto, o dedo deve ser posicionado a

$$\Delta L = L - L' = 5.0 \text{ cm}$$

da extremidade da corda.
(b) A razão entre os comprimentos de onda na corda é

$$\frac{\lambda_A}{\lambda_C} = \frac{60}{50.5} = 1.19.$$

(c) A razão entre os comprimentos de onda das ondas sonoras é a mesma do ítem (b).

18-57P. Uma corda de um violoncelo tem comprimento L, para o qual a freqüência fundamental é f. (a) De qual comprimento l precisa a corda ser diminuída com o dedo, para mudar a freqüência fundamental para rf? (b) Qual o valor de l para $L = 0.80$ m e $r = 6/5$? (c) Para $r = 6/5$, qual a razão entre o comprimento de onda da nova onda sonora emitida pela corda e a emitida antes da colocação do dedo?

► As freqüências de ressoância da corda fixa nas duas extremidades são

$$f = \frac{v}{2L}\, n, \text{ com } n = 1,\ 2,\ 3, ...$$

Se f é a freqüência fundamental, $f = v/2L$. A nova freqüência fundamental é $rf = v/2(L - l)$.
(a) Tomando a razão entre as freqüências rf e f, temos

$$r = \frac{L}{L - l},$$

que nos fornece

$$l = L\,(1 - \frac{1}{r}).$$

(b) Com os dados fornecidos e o resultado do ítem (a), vem

$$l = 0.8(1 - 0.83) = 0.14 \text{ m}.$$

(c) Para a freqüência f, $\lambda = 2L$ e para a freqüência rf, $\lambda' = 2L'$. Mas, $L' = L - l = r/L$. Então, para $r = 6/5$,

$$\frac{\lambda'}{\lambda} = \frac{1}{r} = \frac{5}{6}.$$

E 18-60 (∄ na 6ª edição)

Uma palma no palco de um anfiteatro (Fig. 18-31) produz ondas sonoras que se dispersam em uma arquibancada com degraus de largura $L = 0.75$ m. O som retorna ao palco como uma série de pulsos periódicos, um de cada degrau; os pulsos soam juntos como uma nota. (a) A que freqüência os pulsos retornarão (isto é, qual a freqüência da nota percebida)? (b) Se a largura L dos degraus fosse menor, a freqüência percebida seria maior ou menor?

► (a) Para interferir construtivamente, as ondas refletidas pelos degraus devem conter um número inteiro de comprimentos de onda na diferença de percurso, ou seja,

$$\Delta d = m\lambda, \text{ com } m = 0,\ 1,\ 2, ...$$

Para dois degraus consecutivos, $\Delta d = 2L$ e, para $m = 1$, $\lambda = 2L$. Então, a menor freqüência ($n = 1$) dos pulsos refletidos será

$$f = \frac{v}{2L} = \frac{343}{(2)(0.75)} = 229 \text{ Hz}.$$

(b) Como $f \propto 1/L$, a freqüência percebida seria maior se L fosse menor.

18-63P. Uma corda de violino de 30.0 cm de comprimento com densidade linear de 0.650 g/m é colocada próxima de um alto-falante, que está conectado a um oscilador de áudio de freqüência variável. Descobre-se que a corda oscila somente nas freqüências 880 Hz e 1320 Hz, quando a freqüência do oscilador varia entre 500 e 1500 Hz. Qual a tensão na corda?

► As freqüências dadas correspondem a dois harmônicos da corda, com números n_1 e n_2, respectivamente. Com $f = nv/2L$, tomamos a razão entre os harmônicos:

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{1320}{880} = 1.5$$

Os valores que satisfazem esta razão são $n_1 = 2$ e $n_2 = 3$. A velocidade da onda na corda, para $n_1 = 2$, é

$$v = \frac{2Lf}{n} = (0.30)(880) = 264 \text{ m/s}.$$

E, finalmente,

$$\tau = \mu v^2 = (0.65 \times 10^{-3})(264)^2 = 45.3 \text{ N}.$$

18.7 Batimentos

18-65E. A corda A de um violino está frouxa. Quatro batimentos por segundo são ouvidos, quando a corda é tocada junto a um diapasão, cuja freqüência corresponde à nota A (440 hz). Qual o período da oscilação da corda do violino?

► Com $f_{\text{bat.}} = f_1 - f_2$, e $f_2 = 440$ Hz, a freqüência de vibração da corda é $f_1 = 444$ Hz. Potanto, o período das vibrações da corda é

$$T = f^{-1} = 2.25 \text{ ms}.$$

E 18-66 (∄ na 6^a edição)

São-lhe dados quatro diapasões. O diapasão com a freqüência mais baixa oscila a 500 Hz. Fazendo-se oscilar dois diapaões simultaneamente ouvem-se as seguinte freqüências de batimento: $1, 2, 3, 5, 7$ e 8 Hz. Quais as possíveis freqüências dos outros dois diapasões?

► Chamemos $f_1 = 500$ Hz e as demais freqüências procuradas de f_2, f_3 e f_4. Com as freqüências de batimentos ouvidas, chegamos às procuradas:

$$f_4 - f_1 = 8 \text{ Hz}, \qquad f_4 = 508 \text{ Hz}$$
$$f_3 - f_1 = 7 \text{ Hz}, \qquad f_3 = 507 \text{ Hz}$$
$$f_2 - f_1 = 5 \text{ Hz}, \qquad f_2 = 505 \text{ Hz}.$$

As combinações possíveis dessas freqüências produzem os demais batimentos (em Hz):

$$f_4 - f_3 = 1, \qquad f_3 - f_2 = 2, \qquad f_4 - f_2 = 3.$$

18-67P. Duas cordas de piano idênticas tem uma freqüência fundamental de 600 Hz, quando colocadas sob a mesma tensão. Que aumento fracionário na tensão de uma corda irá levar à ocorrência de 6 batimentos, quando as cordas oscilarem juntas?

► A corda mais tensionada vibrará a $f_1 = f_{\text{bat.}} + f_2 = 606$ Hz. Para a freqüência fundamental, $v = \lambda f = 2Lf$. Com $\tau = \mu v^2$, as tensões serão $\tau_1 = 4\mu L^2 f_1^2$ e $\tau_2 = 4\mu L^2 f_2^2$. A razão entre as tensões é

$$\begin{aligned}\frac{\tau_1}{\tau_2} &= \left(\frac{f_1}{f_2}\right)^2\\ &= \left(\frac{606}{600}\right)^2\\ &= 1.02\end{aligned}$$

Portanto, para produzir os batimentos, a tensão de uma das cordas deve ser incrementada em 2%.

18.8 O Efeito Doppler

18-71E. Um apito usado para chamar cães tem uma freqüência de 30 kHz. O cão, entretanto, o ignora. O dono do cão, que não pode escutar freqüências acima de 20 kHz, decide usar o efeito Doppler para descobrir se o apito funciona de maneira adequada. Pede a um amigo que sopre o apito no interior de um carro em movimento, enquanto ele permanece parado ouvindo. (a) Qual precisa ser a velocidade do carro e qual a direção para que o dono escute o apito a 20 kHz (se ele estiver funcionando)? O experimento em questão é prático? (b) Refaça para uma freqüência do apito igual a 22 kHz, em vez de 30 kHz.

► (a) Para termos essa redção na freqüência, o carro deve afastar-se do dono:

$$\frac{f''}{f} = \frac{v}{v+v_c}$$
$$\frac{20k}{30k} = \frac{343}{343 - v_c},$$

que fornece $v_c = 617.4$ km/h! Essa velocidade corresponde às 380 mi/h apresentada na resposta do livro. O experimento não é realizável, porque carros não são tão velozes.

(b) Refazendo os cálculos para a freqüência $f = 22$ kHz, vamos encontrar $v_c = 123.5$ km/h, que corresponde às 77 mi/h. Com essa velocidade o experimento pode ser realizado.

18-73E. Uma ambulância tocando sua sirene a 1600 Hz ultrapassa um ciclista, que estava pedalando a 8.00 ft/s. Depois da ambulância ultrapassá- lo, o ciclista escuta a sirene a 1590 Hz. Qual a velocidade da ambulância?

► Fonte e detetor estão em movimento e, após a ultrapassagem, o detetor move-se em direção à fonte:

$$f' = f\,\frac{v + v_D}{v + v_F}.$$

Trabalhando com $v = 1125$ ft/s, obtemos

$$\frac{1590}{1600} = \frac{1125 + 8.00}{1125 + v_F},$$

que fornece $v_F = 15.1$ ft/s.

18-79P. Dois diapasões idênticos podem oscilar a 440 Hz. Uma pessoa está localizada em algum lugar na linha entre os dois diapasões. Calcule a freqüência de batimentos captada por esse indivíduo se (a) permanece parado e os diapasões se movem para a direita a 30 m/s, e (b) os diapasões estiverem parados e o indivíduo se movendo para a direita a 30 m/s.

► (a) Um diapasão aproxima-se do detetor e o outro afasta-se. Os batimentos resultam da diferença entre as freqüências ouvidas devido ao movimentos dos diapasões:

$$\begin{aligned} f_{\text{aprox.}} &= f\,\frac{v}{v-v_F} \\ &= 440\,\frac{343}{343-30} \\ &= 482.2 \text{ Hz.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f_{\text{afast.}} &= f\,\frac{v}{v+v_F} \\ &= 440\,\frac{343}{343+30} \\ &= 404.6 \text{ Hz.} \end{aligned}$$

Portanto, $f_{\text{bat.}} = f_{\text{aprox.}} - f_{\text{afast.}} = 77.6$ Hz.
(b) Agora é o detetor que se aproxima de uma fonte e se afasta da outra:

$$\begin{aligned} f_{\text{aprox.}} &= f\,\frac{v+v_D}{v} \\ &= 440\,\frac{343+30}{343} \\ &= 478.5 \text{ Hz.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f_{\text{afast.}} &= f\,\frac{v-v_D}{v} \\ &= 440\,\frac{343-30}{343} \\ &= 401.5 \text{ Hz.} \end{aligned}$$

Assim, $f_{\text{bat.}} = f_{\text{aprox.}} - f_{\text{afast.}} = 77$ Hz.

P 18-80 (18-60/6^a edição)

Um avião voa a $5/4 = 1.25$ da velocidade do som. A explosão sônica alcança um homem no solo exatamente 1 min depois do avião ter passado sobre sua cabeça. Qual a altitude do avião? Considere a velocidade do som como 330 m/s.

► A velocidade do avião é $v_A = (1.25)(330) = 412.5$ m/s. Após 1 minuto, o avião percorreu a distância

$$x = v_A t = (412.5)(60) = 24750 \text{ m.}$$

O ângulo do cone de Mach é dado por

$$sen\,\theta = \frac{v}{v_A} = \frac{330}{412.5} = 0.80,$$

donde obtemos $\theta = 53^o$. A altitude h do avião é tal que

$$\frac{h}{x} = tan\,\theta,$$

fornecendo

$$h = x \tan\theta = (24750) \tan 53^0 = 32844 \simeq 33 \text{ km.}$$

P 18-82 ($\nexists$ na 6^a edição)

A Fig. 18-33 mostra um transmissor e um receptor de ondas contidos em um único instrumento. Ele é usado para medir a velocidade u de um objeto (idealizado por uma lâmina lisa) que se move diretamente na direção do instrumento, analisando as ondas refletidas no alvo. (a) Mostre que a freqüência f_r, das ondas refletidas ao receptor, se relaciona com a freqüência emitida f_s por

$$f_r = f_s\left(\frac{v+u}{v-u}\right),$$

onde v é a velocidade das ondas. (b) Em muitas situações práticas, $u << v$. Neste caso, mostre que a equação acima se torna

$$\frac{f_r - f_s}{f_s} \approx \frac{2u}{v}.$$

► (a) A alteração na freqüência devida à aproximação do objeto é

$$f' = f_s\,\frac{v+u}{v}.$$

Na reflexão, o objeto passa a ser uma fonte móvel, enquanto o detetor, estacionário, recebe a freqüência

$$f_r = f'\,\frac{v}{v-u}.$$

Combinando estas equações, obtemos

$$\begin{aligned} f_r &= f_s\,\frac{v+u}{v}\,\frac{v}{v-u} \\ &= f_s\,\frac{v+u}{v-u} \end{aligned}$$

(b) Se $u << v$, usamos a expansão binomial para obter

$$\frac{f_r}{f_s} = \left(1 + \frac{u}{v}\right)\left(1 - \frac{u}{v}\right)^{-1} \approx \left(1 + \frac{u}{v}\right)\left(1 + \frac{u}{v}\right),$$

e chegar ao resultado pedido,

$$\frac{f_r - f_s}{f_s} \approx \frac{2u}{v}.$$

Veremos mais à frente que os problemas **18.84P**, **18.89P** e **18.101P** são aplicações deste resultado.

P 18-84 (18-53/6ª edição)

Um alarme acústico contra roubos consiste em uma fonte que emite ondas à freqüência de 28 kHz. Qual será a freqüência dos batimentos refletidos por um intruso andando a uma velocidade média de 0.950 m/s, na direção oposta ao alarme?

► Aqui o intruso *afasta-se* da fonte com uma velocidade $u = -0.95$ m/s que satisfaz $|u| \ll |v|$, onde $v = 343$ m/s é a velocidade do som no ar a 20^o (veja Tabela 18.1).
Portanto, usando o resultado no item (b) do problema 18-82 acima, encontramos que

$$\begin{aligned} f_{\text{bat}} = |f_r - f_s| &\approx \frac{2|u|}{v} f_s \\ &\approx \frac{2(0.95)}{343}(28 \times 10^3) = 155 \text{ Hz}. \end{aligned}$$

18-89P. Em uma discussão sobre deslocamentos Doppler de ondas ultra-sônicas, usados em diagnósticos médicos, o autor comenta: "Para cada milímetro por segundo que uma estrutura do corpo se move, a freqüência das ondas ultra-sônicas incidentes sofre uma variação de, aproximadamente, 1.30 Hz/MHz." Que velocidade de ondas ultra-sônicas em tecidos você deduz, a partir dessa afirmativa?

► A variação fracional da freqüência das ondas é

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{1.30}{10^6}.$$

No problema 18.82P obtivemos

$$\frac{\Delta f}{f} \approx \frac{2u}{v}.$$

Com $u = 10^{-3}$ m/s, chegamos à velocidade das ondas ultra-sônicas nos tecidos, $v = 1540$ m/s.

P 18-92 (18-56/6ª edição)

Uma sirene de 2000 Hz e um oficial da defesa civil estão em repouso em relação à Terra. Que freqüência o oficial irá ouvir, se o vento estiver soprando a 12 m/s (a) da fonte para o oficial e (b) do oficial para a fonte?

► (a) A fórmula do deslocamento Doppler é válida apenas quando as velocidades da sirene e do oficial, u_s e u_o, forem medidas em relação a um meio estacionário (i.e., sem vento). Para modificar a fórmula de modo a levar o vento em consideração basta mudar para um novo referencial no qual não exista vento.
Quando o vento sopra da fonte para o observador com uma velocidade w, temos $u'_s = u'_o = w$ no novo referencial que se move junto com o vento. Como neste referencial o observador aproxima-se da fonte enquanto que a fonte dele se afasta, temos, no novo sistema de referência

$$f' = f\,\frac{v + u'_o}{v + v'_s} = f\,\frac{v + w}{v + w} = f = 2000 \text{ Hz}.$$

(b) Neste caso, basta trocar o sinal de u'_o e u'_s. O resultado é que, novamente, não ha deslocamento Doppler:

$$f' = f\,\frac{v - u'_o}{v - v'_s} = f\,\frac{v - w}{v - w} = f = 2000 \text{ Hz}.$$

Em geral, nunca existirá deslocamento Doppler quando não houver movimento relativo entre observador e fonte, independentemente de existir ou não vento presente.

P 18-94 (18-55/6ª edição)

Uma menina está sentada próxima a uma janela aberta de um trem, que está se movendo a uma velocidade de 10.00 m/s para o leste. A tia da menina está próxima aos trilhos, observando o trem partir. O apito da locomotiva emite um som à freqüência de 500.0 Hz. Não há ventos. (a) Que freqüência a tia da menina irá ouvir? (b) Que freqüência a menina irá ouvir? (c) Com um vento soprando para oeste a 10.00 m/s, que freqüência a tia da menina irá ouvir? (d) E a menina?

► (a) Como o trem está se afastando da observadora, temos

$$f' = f\,\frac{v}{v + v_F} = 500\,\frac{343}{343 + 10} = 485.8 \text{ Hz}.$$

(b) Como não há movimento relativo entre a fonte e o observador, a menina ouve a freqüência emitida, $f = 500$ Hz.
(c) Com o vento soprando para oeste, teremos as velocidades relativas

$$v_{D,\text{ar}} = 10 \text{ m/s e}$$

$$v_{F,\text{ar}} = 20 \text{ m/s}.$$

Como a fonte se afasta da observadora, temos

$$f' = f\,\frac{v + v_{D,\text{ar}}}{v + v_{F,\text{ar}}} = 500\,\frac{343+10}{343+20} = 486.2 \text{ Hz}.$$

(d) Pela mesma razão do ítem (b), a freqüência ouvida pela menina é $f = 500$ Hz.

18.9 O Efeito Doppler para a Luz

18-96E. Certos comprimentos de onda, característicos na luz vinda de uma galáxia na constelação de Virgem, são 0.4% maiores do que a luz correspondente de fontes terrestres. Qual a velocidade radial dessa galáxia com respeito à Terra? Ela está se aproximando ou se afastando?

► Aplicando a equação (18-55), temos

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{u}{c} = 0.004$$

Portanto, $u = 0.004c = 1.2 \times 10^6$ m/s, afastando-se.

18-99P. O período de rotação do Sol no seu equador é de $24,7$ d e o seu raio é de 7.00×10^5 km. Que deslocamento Doppler no comprimento de onda é esperado para a luz de 550 nm, emitida da superfície do Sol?

► O período dado corresponde a 2.134×10^6 s . A velocidade de qualquer ponto equatorial da superfície do Sol é

$$v = \frac{2\pi r}{T} = 2.062 \times 10^3 \text{ m/s},$$

que vem a ser a velocidade da fonte. Com a equação (18-55) vem

$$\frac{v}{c} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = 6.87 \times 10^{-6}.$$

O deslocamento Doppler é então

$$\Delta\lambda = \pm\, 3.78 \text{ pm}.$$

18-101P. Microondas, que viajam à velocidade da luz, são refletidas por um avião distante, que está se aproximando da fonte. Sabe-se que, quando as ondas refletidas se cruzam com as emitidas, a freqüência dos batimentos é de 990 Hz. Se as microondas tem 0.100 m de comprimento de onda, qual a velocidade aproximada do avião?

► Este problema é uma aplicação do resultado do problema 18.82P, onde substituimos v por c, a velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas no vácuo, 3.0×10^8 m/s. A freqüência das microondas é $f = c/\lambda = 3.0 \times 10^9$ Hz. Escrevemos

$$f'' \approx f + \frac{2uf}{c},$$

sendo $f'' - f = 990$ Hz. Portanto,

$$\begin{aligned} u &\approx \frac{990c}{2f} \\ &\approx 49.5 \text{ m/s}. \end{aligned}$$
