A discreta dança do ar ao som das equações da física acústica

Diogo Amaral de Magalhães
Instituto Federal Catarinense, Campus São Francisco do Sul,
Programa de Pós-Graduação em Educação Científica e Tecnológica - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil
E-mail: diogo.magalhaes@ifc.edu.br

José de Pinho Alves Filho
Departamento de Física, Universidade Federal de Santa Catarina,
Programa de Pós-Graduação em Educação Científica e Tecnológica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil

Com o objetivo de preencher uma lacuna dos livros de Ensino Médio acerca do assunto ondas sonoras, discutimos, neste artigo, algumas equações da física acústica e calculamos as amplitudes de oscilação das moléculas de ar devido à propagação do som. Propomos uma sequência que utiliza aplicativos gratuitos e que já foi aplicada em sala de aula. Esperamos que este trabalho possa subsidiar futuras intervenções didáticas sobre o tema.

Introdução

O tópico de ondas talvez seja um dos mais difíceis de ser ensinado no Ensino Médio. A ideia de entidades não materiais, como energia e momento, que se propagam por aí, é muito abstrata para um adolescente, cuja formação sempre esteve atrelada a "coisas palpáveis", tais como roldanas que giram, corpos que viajam e bolinhas que colidem. Seguindo essa tradição, o tratamento didático dos livros-textos enfatiza, em geral, exemplos de ondas em cordas para a introdução do tema. Em princípio, isso acontece porque os conceitos de comprimento de onda e amplitude de uma onda carregam essa ideia habitual de materialidade, os quais podem ser mais facilmente compreendidos pelos estudantes ao verem cordas sendo sacolejadas.

> **Apesar da dificuldade de se abordar o assunto ondas, que é tanto conceitual quanto matemática, temas como telecomunicações e som constituem exemplos que potencializam sua discussão em sala de aula**

Apesar da dificuldade intrínseca do tema, que é tanto conceitual quanto matemática, as ondas envolvem outras situações que são corriqueiras para a maioria das pessoas. O uso dos telefones celulares e as grandes produções musicais – ou, em geral, as telecomunicações e o som – são exemplos que podem introduzir questões tangíveis à sala de aula e potencializar sua discussão. Particularmente, embora o som seja um assunto sempre presente nos manuais didáticos, inclusive em artigos recentes da área de ensino de física [1-7], há inúmeros aspectos das ondas sonoras que são negligenciados pelos livros-textos destinados ao Ensino Médio e, consequentemente, pelos professores de física em suas aulas.

Neste trabalho, com a intenção de preenchermos algumas dessas lacunas, estimamos as ordens de grandeza envolvidas nas oscilações das moléculas de ar durante a propagação do som, estudando a relação das amplitudes das ondas de deslocamento e de pressão de uma onda sonora com algumas propriedades do meio. Para isso, apresentamos uma sequência didática que utiliza um aplicativo de celular que simula um decibelímetro e um gerador online de funções senoidais. Ressaltamos que a proposta requer um certo esforço do docente que deseje propô-la, pois será necessário transpor conceitos e ideias que são abordados mais matematicamente nos livros universitários; em princípio, os professores poderiam utilizá-los para seus próprios estudos e aprofundamentos. Outrossim, o conteúdo aqui discutido não se faz presente nos livros de Ensino Médio, os quais, muitas vezes, são utilizados pelos professores na preparação das suas aulas e pelos alunos como guia de acompanhamento ou roteiro de estudos. Nesse sentido, com algumas das discussões que são feitas, esperamos que este artigo também auxilie os professores na preparação da atividade, visando sua contextualização e eventuais aprofundamentos, com foco em uma discussão conceitual e valorizando seus aspectos intuitivos.

Primeiras ideias

O som é uma onda mecânica, isto é, precisa de um meio material, como o ar, para se propagar.[1] Qualitativamente, não é tão complicado entender o mecanismo de propagação do som. Um prato passa a vibrar quando um baterista toca com sua baqueta sobre ele (veja a Fig. 1). Assim, o movimento de vibração do prato cria movimentos das camadas subjacentes de ar, gerando regiões de compressão e rarefação do gás. Essas regiões são formadas pelo aumento e pela diminuição, respectivamente, da concentração de moléculas de ar que se deslocam em movimento oscilatório, acompanhando as oscilações do prato, e correspondem a variações da densidade e da pressão, as quais são relevantes porque os gases são muito compressíveis. Essa alta compressibilidade é oriunda do baixo potencial de interação entre suas moléculas.

Quando o prato oscila, sua camada superficial de metal transfere quantidade de movimento e energia para a primeira camada de ar subjacente de ar, a qual, por sua vez, colidindo com a subsequente, dá continuidade ao processo de propagação de momento e energia. Feynman, Leighton e Sands [8] e Nussenzveig [9] sintetizam da seguinte maneira o mecanismo de propagação de uma onda sonora:

1. O deslocamento de moléculas do ar altera a densidade de equilíbrio do ar;
2. A mudança de densidade corresponde a uma variação da pressão em relação à pressão de equilíbrio;
3. As diferenças de pressão implicam novos deslocamentos do gás.

E assim sucessivamente.

Matematicamente, tem-se três grandezas que descrevem o problema. Primeiro, o deslocamento $\mathcal{X}$, que não é o movimento de uma ou outra molécula, mas do centro de massa de um pequeno (tão pequeno quanto se queira) volume de gás (um cilindro infinitesimal) que oscila em torno de uma dada posição de equilíbrio. As outras duas grandezas são a pressão e a densidade do referido elemento de volume do ar, designadas neste trabalho, respectivamente, por p e ρ. Logo, podem ser deduzidas três equações de onda para o problema da propagação do som: uma para a onda de deslocamento, outra para a onda de pressão e outra para a onda de densidade.[2] Suas soluções são funções harmônicas nas coordenadas espacial x e temporal t, tal que o comprimento de onda λ e o período P da onda, que é o inverso de sua frequência f, expressam, respectivamente, suas periodicidades espacial e temporal. Todas essas três ondas se propagam com a mesma velocidade v.

As curvas de igual audibilidade representam os níveis de audibilidade obtidos pelo ajuste do nível de intensidade do som de referência até que ele soe com o mesmo volume segundo o julgamento de um típico ouvinte, isto é, aquele que tenha audição normal para tais testes, tal que ele apresente os resultados coerentes com a média obtida a partir de um número maior de tais ouvintes

Particularmente, as ondas de deslocamento terão a forma:

$$\mathcal{X} = \mathcal{X}_0 \cos(kx \pm \omega t), \qquad (1)$$

onde $\mathcal{X}_0$ é a amplitude da onda de deslocamento, k é o número de onda, dado por $k = 2\pi/\lambda$, e ω é a frequência angular da onda, dada por $\omega = 2\pi/P = 2\pi f$. Elas assemelham-se à imagem de ondas sobre uma superfície de um lago, onde percebemos o movimento harmônico da matéria fixando-se a coordenada de equilíbrio do centro de massa de um dado volume extremamente pequeno de gás. Grosso modo, quando fixamos nosso olhar em uma folha, ou seja, quando escolhemos uma coordenada $x \equiv x_1$, estamos acompanhando o seu movimento oscilatório sobre a superfície da água na qual uma pedra fora atirada (em suas proximidades).

A seguir, discutimos alguns aspectos da nossa percepção do som,[3] trazendo conceitos importantes para nossa proposta didática. Na sequência, analisamos algumas equações da acústica, que serão fundamentais para as estimativas desejadas.

Figura 1: Representação de um prato de bateria quando é tocado. Seu movimento vibratório faz com que o ar circundante também passe a vibrar, criando camadas de compressão e rarefação ao seu redor.

Percebendo o som

O nosso ouvido possui algumas características interessantes. Uma delas é que existe uma intensidade mínima, ou limiar de audibilidade, I_0, abaixo da qual o som não é audível. E há outra máxima, ou limiar de dor, I_m, acima da qual o som produz uma sensação de dor ou desconforto. Considerando f = 1000 Hz como valor de referência, tem-se que $I_0 = 10^{-12}$ Wm^{-2} e $I_m = 1$ Wm^{-2} [9-11]. Como podemos perceber, os valores de intensidade variam em muitas ordens de grandeza e, na prática, em acústica, trabalha-se com o nível de intensidade sonora α em vez da intensidade sonora I. O nível de intensidade sonora é expresso em decibéis (dB) e é obtido pela seguinte expressão:

$$\alpha = 10\log_{10}(I/I_0) = 10\log_{10}(I/10^{-12}). \qquad (2)$$

Outra característica é que nosso ouvido "funciona" de forma logarítmica. Isso fica claro com a análise das curvas de igual audibilidade (veja a Fig. 2), construídas originalmente por Fletcher e Munson [11]. O nível de audibilidade é a grandeza que quantifica a audibilidade (sensação) e sua unidade é o fon. O valor de um fon é igual ao nível de intensidade sonora, em dB, da frequência de referência de 1000 Hz. Assim, as curvas de igual audibilidade representam os níveis de audibilidade obtidos pelo ajuste do nível de intensidade do som de referência até que ele soe com o mesmo volume segundo o julgamento de um típico ouvinte, isto é, aquele que tenha audição normal para tais testes, tal que ele apresente os resultados coerentes com a média obtida a partir de um número maior de tais ouvintes.

A região no canto inferior esquerdo da Fig. 2 abaixo da curva de 0 fon retrata nossa pouca sensibilidade para as frequências mais graves, isto é, de menor frequência, para as quais os níveis de intensidade correspondentes estão bastante acima dos níveis das frequências compreendidas entre 1000 Hz e 5000 Hz, ditas médio agudas. Analisando ainda a curva de 0 fon, vemos que uma nota musical a 90 Hz é perceptível pelo ouvido humano a partir de 40 dB, enquanto que para 1000 Hz precisamos somente de 0 dB. Em suma, cada frequência é percebida de maneira diferente pelo ouvido: frequências diferentes precisam de intensidades diferentes para que nos soem igualmente perceptíveis.

Ressaltemos também que os valores negativos dos níveis de intensidade da curva de 0 fon entre 1000 Hz e 5000 Hz não representam problemas físicos, já que o

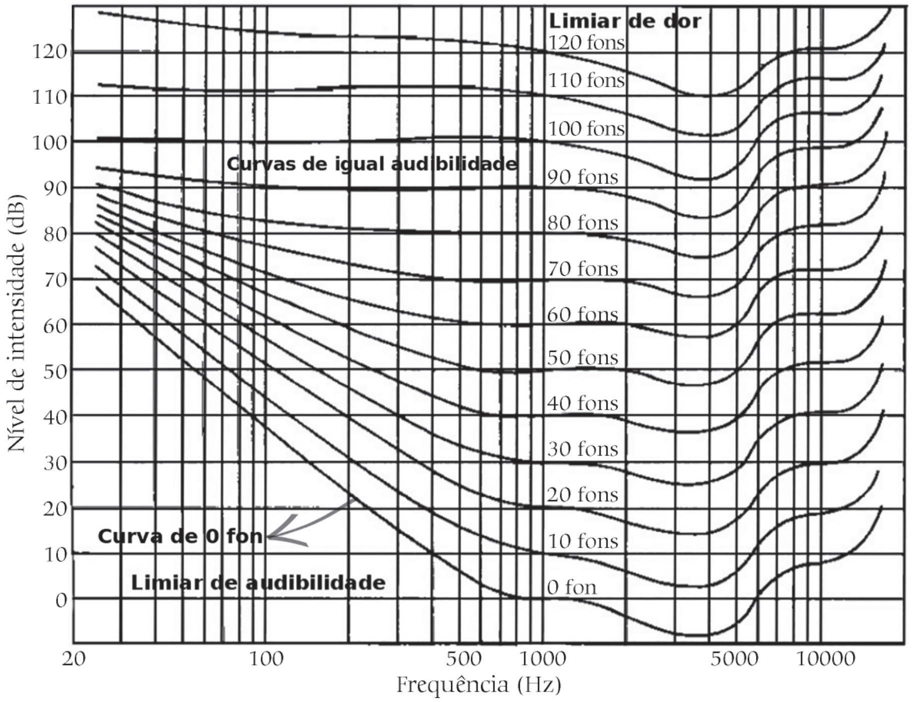

Figura 2: Gráfico em escala logarítmica das curvas de igual audibilidade, adaptado da Ref. [11].

argumento do logaritmo, dado pela razão de intensidades, sempre será positivo. Outra observação refere-se ao fato de que o nível de intensidade de um som cuja intensidade seja dobrada, será 3 dB maior.[4] Assim, para que seja audível, um som a 90 Hz deve ter uma intensidade cerca de 13 vezes maior do que um a 1000 Hz.

Ademais, lembrando que nosso ouvido é altamente não linear e responde mal às frequências mais graves e muito agudas, tipicamente acima de 10000 Hz, como mostra a Fig. 2, fica o seguinte questionamento: por que ouvimos um som equalizado durante shows musicais, isto é, um som equilibrado de graves, médios e agudos?

Além da afinação dos instrumentos pelos músicos, os técnicos e engenheiros de som praticam o que no meio musical é chamado de alinhamento de som: um ajuste do sistema de sonorização, feito antes de cada show, que leva em conta a acústica do local, dentre outros fatores. Com o alinhamento, então, corrigem-se deficiências acústicas (por exemplo, o local pode otimizar demasiadamente certas frequências e atenuar outras), tal que se pode compensar, inclusive, as limitações auditivas humanas para os sons mais graves e muito agudos. Dito de outra maneira, com equipamentos específicos, que não discutiremos neste artigo, equilibra-se a percepção dos sons emitidos a diferentes frequências, de forma que os percebamos de forma mais homogênea, dando a sensação de equilíbrio sonoro.[5]

Um último item a ser considerado sobre a percepção do som é o decibelímetro, aparelho que mede o nível de intensidade sonora. Ele não distingue se o som é um ruído, como o de um giz escrevendo sobre um quadro, ou um tom puro, como um oriundo de um diapasão. Outra característica desse instrumento é que ele deve medir uma grandeza que não dependa explicitamente da frequência do som, visto que o nosso cotidiano é uma grande confusão sonora, composta por conversas, ruídos de máquinas e automóveis, sons da natureza, etc. Esse aspecto é fundamental para os fins deste trabalho. Mas, antes, precisamos olhar de perto algumas relações da acústica.

Equações da física acústica

Primeiramente, analisemos a intensidade I da onda sonora. Por definição, a intensidade é o fluxo médio de energia por unidade de área e tempo, $I \equiv vE$, onde E é a densidade volumétrica de energia do elemento de volume [10]. Se lembrarmos que a energia mecânica total de um oscilador harmônico é dada por $\frac{1}{2}m\omega^2A^2$ e observando que, em nossa situação, a amplitude da onda de deslocamento $\mathcal{X}_0$ faz o papel da amplitude do oscilador harmônico A e a densidade de equilíbrio do ar ρ_0 o da massa do oscilador m [10], a intensidade I de uma onda sonora pode ser reescrita da seguinte maneira:

$$I = 2\pi^2\rho_0 v\mathcal{X}_0^2 f^2. \tag{3}$$

O decibelímetro é um aparelho que não distingue se o som é um ruído, como o de um giz escrevendo sobre um quadro, ou um tom puro, como um oriundo de um diapasão

Como acabamos de mencionar, devido à mistura frenética de ruídos e sons com frequências distintas em nosso dia a dia, um decibelímetro não trabalha diretamente com a relação dada pela Eq. (3). Quando um baterista toca a pele de um tambor, o som resultante é uma combinação de sons com inúmeras frequências diferentes, cujo resultado final depende do diâmetro do tambor, da madeira que é utilizada na sua construção, do tipo de pele escolhida pelo baterista, do local da pele que é tocado, do modelo da baqueta utilizada, da tensão da pele, da acústica local, etc. Dito de outra maneira, essa superposição de frequências define cada som que escutamos durante uma música, como o dos batuques dos tambores ou o das notas de um solo da guitarra, tal que cada nota (onda sonora) é dada por uma combinação entre sua frequência fundamental e várias ondas menores, chamadas de harmônicos.[6]

Consideremos um baterista que toca com sua baqueta na pele superior de um tambor. Quanto maior for a intensidade do toque, isto é, quanto mais energia e momento forem transferidos da baqueta para a pele do tambor, maior será o volume da nota, ou seja, a pressão sonora será maior. Com o toque de maior intensidade, a pele do tambor, ou mesmo o prato, passará a vibrar com maior amplitude.

De outra maneira, podemos fazer uma análise quantitativa e intuitiva dessa situação utilizando a técnica da análise dimensional[7] e ir além de apenas dizer que há uma relação de proporcionalidade entre $\mathcal{P}_0$ (amplitude da onda de pressão) e $\mathcal{X}_0$. Assim, evitamos as deduções matemáticas que são feitas nos livros universitários que abordam esse assunto e advogamos sobre a importância do ensino da análise dimensional, tanto no nível médio quanto no universitário.

Quando uma onda sonora perturba um elemento de gás, a pressão p do lado A do pequeno cilindro será maior do que a pressão p' exercida sobre A' (base oposta do cilindro), gerando uma força sobre o elemento de altura $A\,dx$, que passa a se deslocar de uma quantidade $\mathcal{X}$; já A' se desloca $\mathcal{X}'$, tal que a altura do cilindro deslocado é $dx + d\mathcal{X}$ (veja a Fig. 3). Assim, a variação da pressão de um elemento de volume de

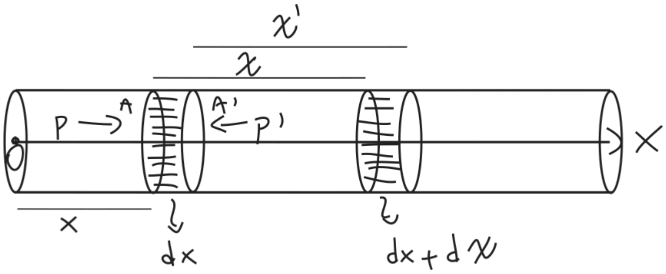

Figura 3: Onda de pressão em uma coluna de gás, baseada na Ref. [10].

gás dependerá da taxa de variação do seu deslocamento em relação à sua posição, ou seja, de $\partial\mathcal{X}/\partial x$. Admitindo, então, a forma harmônica da onda de deslocamento dada pela Eq. (1), sua derivada com relação à posição x nos mostra que a amplitude da onda de pressão $\mathcal{P}_0$ depende da amplitude da onda de deslocamento $\mathcal{X}_0$ e do número de onda k, que por sua vez depende de f e v. Ademais, devido à alta compressibilidade do gás, a densidade de equilíbrio do ar ρ_0 também é relevante para o problema.

Essa análise nos indica que $\mathcal{P}_0$ é quantidade que depende, em princípio, das variáveis $\mathcal{X}_0$, f, ρ_0 e v, tal que escrevemos a seguinte relação funcional: $\mathcal{P}_0 = g(\mathcal{X}_0, f, \rho_0, v)$. De fato, essa é a parte mais complicada do processo: "enxergar" quais são as quantidades que podem ser relevantes para o problema. Em seguida, escrevemos $\mathcal{P}_0$ como um monômio dessas grandezas [12]:[8]

$$\mathcal{P}_0 = C\mathcal{X}_0^{\alpha 1} f^{\alpha 2} \rho_0^{\alpha 3} v^{\alpha 4}, \tag{4}$$

onde C é uma constante adimensional e os expoentes α_1, α_2, α_3 e α_4 são inteiros ou racionais, positivos ou negativos, a serem determinados. Do lado esquerdo da Eq. (4), as dimensões de pressão são dadas em termos das dimensões de força e de área:[9] $[\mathcal{P}_0] = [F][\text{área}]^{-1} = MLT^{-2}L^{-2} = L^{-1}MT^{-2}$. Do lado direito, $[\mathcal{X}_0]^{\alpha 1} = L^{\alpha 1}$, $[f]^{\alpha 2} = T^{-\alpha 2}$, $[\rho_0]^{\alpha 3} = M^{\alpha 3}T^{-3\alpha 3}$ e $[v]^{\alpha 4} = L^{\alpha 4}T^{-\alpha 14}$, além de $[C] = 1$. Precisamos, então, resolver o seguinte sistema de três equações para quatro incógnitas:

$$L^{-1} M\, T^{-2} = L^{\alpha 1 - 3\alpha 3 + \alpha 4} M^{\alpha 3}\, T^{-\alpha 2 - \alpha 4}. \tag{5}$$

O sistema admite infinitas soluções, mas estamos interessados em somente uma, a que relaciona adequadamente essas grandezas. Vejamos o que nos é razoável. Imediatamente, constatamos que $\alpha_3 = 1$. Daí, segue que $\alpha_1 + \alpha_4 = 2$ e $\alpha_2 + \alpha_4 = 2$, o que nos fornece $\alpha_2 = \alpha_4$. Neste momento, lembremos que, em princípio, esperamos que quanto maior for $\mathcal{X}_0$, maior será $\mathcal{P}_0$. Supondo uma relação de proporção linear entre essas grandezas, ou seja, escolhendo $\alpha_1 = 1$, obtemos $\alpha_2 = \alpha_4 = 1$. Dessa forma, por meio da técnica da análise dimensional, concluímos que a relação

$$\mathcal{P}_0 = C\, \mathcal{X}_0\, f\, \rho_0 v \tag{6}$$

é uma solução possível para o sistema. O valor de C não pode ser obtido seguindo esse raciocínio. A relação exata é dada por [9, 10]:

$$\mathcal{P}_0 = 2\pi\, v\, \rho_0 f\, \mathcal{X}_0, \tag{7}$$

onde $C = 2\pi$. De fato, a escolha $\alpha_1 = 1$ foi adequada. Essa equação é extremamente útil em acústica e podemos resolvê-la tanto para $\mathcal{P}_0$ como para $\mathcal{X}_0$.[10]

As Eqs. (3) e (7) relacionam, respectivamente, a intensidade e a amplitude da onda de pressão com a amplitude da onda de deslocamento, e ambas dependem da frequência. E isso não é interessante para fins práticos, conforme já mencionamos. Contornamos o problema resolvendo a Eq. (7) para f e substituindo na Eq. (3), o que nos leva a uma outra importante relação da acústica, agora entre a intensidade e a amplitude da onda de pressão:

$$I = \frac{\mathcal{P}_0^2}{2\rho_0 v}. \tag{8}$$

Observemos que esse resultado não depende das frequências. E era justamente isso que desejávamos, pois o decibelímetro não mede uma intensidade para cada frequência do meio no qual se faz a medida e depois compila todos os resultados em um único número final. O decibelímetro mede pressão, ou variações de pressão, independentemente da frequência de cada som, o que é muito mais inteligente do ponto de vista prático.

Com todas essas relações da acústica em mãos, organizamos uma sequência na próxima seção com o objetivo final de estimarmos a ordem de grandeza das amplitudes das ondas de deslocamento; em outras palavras, pretendemos analisar quantitativamente o movimento vibratório do ar que se dá quando energia e momento se propagam da fonte sonora até o ouvinte.

A proposta

O decibelímetro mede o nível da intensidade sonora em dB. Com o valor de α em mãos, a Eq. (2 nos permite calcular a intensidade da onda sonora:

$$I = 10^{\left(\frac{\alpha}{10} - 12\right)}. \tag{9}$$

Uma vez que tenhamos a intensidade calculada, com a Eq. (8), encontramos a amplitude da onda de pressão correspondente por meio da relação:

$$\mathcal{P}_0 = \sqrt{2\rho_0 v I}\ . \tag{10}$$

Por fim, a Eq. (7) pode ser resolvida para a amplitude da onda de deslocamento:

$$\mathcal{X}_0 = \frac{\mathcal{P}_0}{2\pi\, v \rho_0 f}. \tag{11}$$

Esse é o percurso teórico da atividade, cuja intenção é calcular a amplitude da onda de deslocamento $\mathcal{X}_0$ para cada frequência f ou som desejado. Pretendemos estimar a ordem de grandeza de vibração

Figura 4: Representação de um decibelímetro em uso. Na prática, o aparelho compila, simultaneamente, pressões sonoras oriundas de ruídos e sons de diferentes frequências.

das moléculas do ar durante a propagação do som e, consequentemente, o grau de precisão que nosso ouvido é capaz de detectar. A parte prática é dividida em três momentos. No primeiro, são coletadas medidas de níveis de intensidade. No segundo, são analisados esses valores, bem como as curvas de igual audibilidade (Fig. 2), com base nessas equações. No terceiro e último, é proposta uma atividade para os alunos.

O primeiro passo é escolher a(s) fonte(s) sonora(s) que será(ão) utilizada(s) na atividade. Embora tenhamos argumentado ao longo do texto acerca do fato de estarmos expostos a uma mistura de ruídos e sons, para fins didáticos sugerimos trabalhar com medidas de fontes virtuais com emissão de ondas senoidais, o que simplifica significativamente a atividade.[11] Utilizamos o "*Online Tone Generator*", disponível gratuitamente na internet. Sua interface limpa otimiza sua utilização e o torna agradável para os alunos (veja a Fig. 5).[12] Se a maioria dos alunos possui *smartphones* ou *tablets*, pode-se utilizar algum aplicativo como fonte geradora de som, como por exemplo o "*Frequency Sound Generator*", disponível gratuitamente para Android. Isso envolve mais os alunos e deixa a atividade mais dinâmica e motivante para eles. No nosso caso, utilizamos um notebook (do professor) como fonte sonora.

Como receptor, atuando como o decibelímetro, foi utilizado o "Decibelímetro", aplicativo gratuito disponível para o Android (veja a Fig. 6). Ele possui várias funcionalidades que podem ser exploradas pelo professor, como a plotagem de um gráfico $\alpha \times t$, as medidas mínima e máxima obtidas e também o nível de intensidade médio da coleta.[13] Ao clicar no ícone com a letra M dentro de um círculo, é exibida uma lista de níveis sonoros de exemplos do nosso cotidiano, o que contextualiza ainda mais a atividade. Um comentário final sobre esse aplicativo é sobre a língua inglesa. Entendemos que ela não seja um obstáculo para seu uso; muito pelo contrário: estimula a interdisciplinaridade, algo tão debatido e almejado na literatura.

A sequência proposta permite estimar a ordem de grandeza de vibração das moléculas do ar durante a propagação do som e, consequentemente, o grau de precisão que nosso ouvido é capaz de detectar

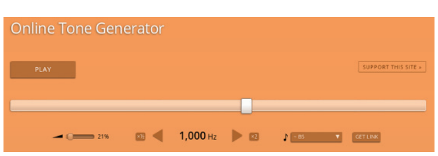

Figura 5: Interface do gerador de tons puros.

O exemplo ilustrado nas Figs. 4 e 5 traz um nível de intensidade de 61 dB para a frequência de 1000 Hz. Com a Eq. (9), encontramos que o valor da intensidade sonora correspondente é $I_{61dB} = 1{,}26 \times 10^{-6}$ Wm^{-2}. Por sua vez, a Eq. (10) nos fornece a amplitude da onda de pressão correspondente: $\mathcal{P}_{0;61dB} = 3{,}2 \times 10^{-2}$ Nm^{-2}. Finalmente, com a Eq. (11) concluímos que a amplitude de deslocamento da onda é da ordem de 10^{-8} m – mais precisamente, $\mathcal{X}_{0;61dB,1000Hz} = 1{,}25 \times 10^{-8}$ m. Esse valor é cerca de cem mil vezes menor do que um milímetro. Nos cálculos, sob condições normais de temperatura e pressão, utilizamos $\rho_0 = 1{,}225$ kg/m e $v = 332$ m/s.

Uma análise interessante é obtida a partir do ponto mínimo da curva de 0 fon (ver Fig. 2), cuja frequência corresponde, aproximadamente, a 3500 Hz, frequência fundamental do canal auditivo.[14] Ela diz respeito ao nível mais fraco de som que somos capazes de perceber, com nível de intensidade próximo de -8 dB; como já discutimos, esse valor negativo não representa problemas físicos. Para esses valores, as equações desta seção nos fornecem $I_{-8dB} = 1{,}58 \times 10^{-13}$ Wm^{-2}, $\mathcal{P}_{0;8dB} = 1{,}14 \times 10^{-5}$ Nm^{-2} e $\mathcal{X}_{0;8dB,3500Hz} = 1{,}27 \times 10^{-12}$ m. Esse é o limite inferior de vibração que nosso ouvido pode detectar. Ou seja, nosso ouvido é uma estrutura complexa e extremamente sensível, capaz de detectar sons cujas ordens de grandeza das danças das moléculas de ar, ou das amplitudes de deslocamento, são da ordem das escalas atômicas e moleculares!

Após essa etapa, sugerimos que seja proposta uma atividade para os alunos, com o objetivo de fixar e aprofundar os estudos feitos até o momento. Ela pode ter a forma de exercício em sala, individual ou em grupo, ou trabalho para casa; e, inclusive, pode ser avaliativa. A ideia é construir, para cada frequência, uma tabela que relacione níveis de intensidade diferentes com a respectiva intensidade, amplitude da onda de pressão e amplitude da onda de deslocamento. Em seguida, deve-se analisar os resultados à luz das curvas de igual audibilidade. A Tabela 1 traz os valores para um som dito grave, com $f = 50$ Hz, que pode ser ouvido apenas para níveis de intensidade maiores do que 50 dB, aproximadamente, e para um som dito agudo, com $f = 5000$ Hz, que é perceptível a partir de níveis de intensidade pouco menores do que 10 dB.

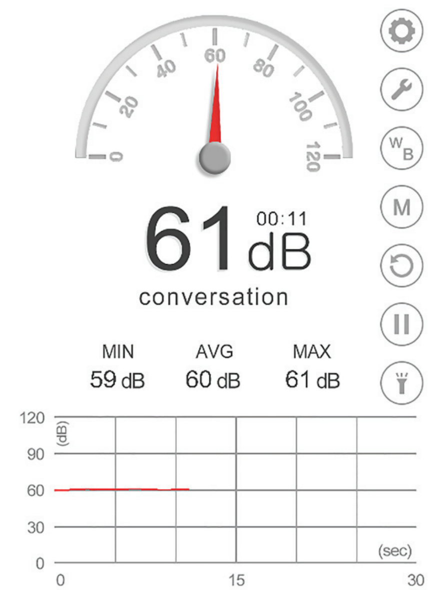

Figura 6: Interface do decibelímetro.

Complementarmente à construção dessas tabelas, pode-se pedir para os alunos se concentrarem (em silêncio) para verificar a partir de que nível de intensidade (indicado pelo decibelímetro) eles passam a escutar cada frequência reproduzida pelos alto-falantes. Deve-se, então, comparar a percepção dos alunos com o limiar de audibilidade para a respectiva frequência, sobre a curva de 0 fon. Caso seja possível, dependendo da qualidade dos alto-falantes utilizados, pode-se dar uma ênfase nos extremos do espectro sonoro, ou seja, nos sons mais graves e mais agudos, que são mais difíceis de serem percebidos do que os sons médio agudos.

Por fim, frisemos que o valor em vermelho da Tabela 1 indica, em concordância

Tabela 1: Para cada frequência são estimadas as amplitudes das ondas de deslocamento referentes a diferentes níveis de intensidade. Às frequências graves, associam-se vibrações de ordens de grandeza maiores; às agudas, menores. E quanto maior o nível de intensidade e a própria intensidade, as amplitudes das vibrações das moléculas de ar também são maiores.

α (dB)	I (W/m^2)	$\mathcal{P}_0$ (N/m^2)	$\mathcal{X}_0$(m), $f = 50$ Hz	$\mathcal{X}_0$(m), $f = 5000$ Hz
0	1×10^{-13}	$2{,}85 \times 10^{-5}$	$2{,}23 \times 10^{-10}$	$2{,}23 \times 10^{-12}$
50	1×10^{-7}	$9{,}02 \times 10^{-3}$	$7{,}06 \times 10^{-8}$	$7{,}06 \times 10^{-10}$
100	1×10^{-2}	$2{,}85 \times 10^{0}$	$2{,}54 \times 10^{-6}$	$2{,}23 \times 10^{-7}$

com a Fig. 2, que um som com frequência de f = 50 Hz não é audível a 0 dB. Comparando a amplitude de deslocamento correspondente com a de 5000 Hz, ou para frequências agudas em geral, observamos que a percepção dos sons não diz respeito à ordem de grandeza da amplitude da onda de deslocamento; afinal, é exigida uma precisão maior para a detecção de sons mais agudos, mas isso diz respeito à natureza do ouvido humano. Dito de outra maneira, para frequências cada vez mais baixas, isto é, sons mais graves, as amplitudes das ondas de deslocamento são cada vez maiores. Poderíamos nos perguntar, então, por que os sons graves, aparentemente "exigindo uma menor precisão" do nosso ouvido, são mais difíceis de serem distinguidos uns dos outros? Essa é uma questão que deixamos para discutir em outra oportunidade.

Ensaios didáticos

A atividade proposta e as ideias abordadas neste artigo foram trabalhadas em duas turmas de segunda série do Ensino Médio integrado ao técnico de um instituto federal. Em cada turma, a atividade foi realizada no ano de 2016 em dois encontros (dois dias de duas semanas consecutivas), sendo cada encontro de duas aulas de cinquenta minutos cada, totalizando duzentos minutos com cada turma. Antes da atividade, os alunos das turmas já tiveram contato com ideias introdutórias acerca das ondas sonoras. Na ocasião, a atividade envolveu todos os tópicos discutidos neste artigo concernentes à sequência proposta. Basicamente, o primeiro encontro foi dedicado aos estudos das equações da biofísica e às curvas de igual audibilidade. As atividades práticas e discussões concentraram-se no segundo encontro.

Aspectos relacionados à física do som mencionados neste artigo, como o alinhamento do sistema sonoro, bem como a própria questão do conforto acústico, do uso social da ciência e da tecnologia, ou mesmo a biofísica do ouvido humano, podem ser aprofundados durante a atividade ou até mesmo constituírem temas de outros projetos

O ponto negativo observado foi o uso das funções exponenciais e logarítmicas. Todavia, acreditamos que os percalços valem todo o esforço. Afinal, ninguém disse que seria fácil promover uma educação crítica e que fosse além dos livros didáticos tradicionais. Como pontos positivos, destacamos o envolvimento dos alunos durante a parte prática, principalmente durante a reprodução dos sons e a medição dos níveis de intensidade com o aplicativo dos *smartphones* como decibelímetro, e também durante o exercício de se perceber qual é o som mais fraco possível que somos capazes de perceber para cada frequência. Eles se mostraram interessados em comparar os resultados obtidos com a curva de 0 fon e entusiasmados em saber que nossos ouvidos têm grande poder de precisão na detecção de vibrações da ordem de escalas atômicas.

Considerações finais

Neste artigo, trouxemos conceitos, ideias e equações que não se fazem presentes nas aulas de física que são pautadas nos livros didáticos tradicionais do Ensino Médio. Discutimos as ondas sonoras, dando maior ênfase às relações da física acústica, as quais nos permitiram estimar as ordens de grandeza envolvidas na propagação e percepção do som, especificamente das amplitudes das ondas de deslocamento. Nossos cálculos evidenciaram que a oscilação das moléculas de ar é da ordem das escalas atômicas e moleculares.

Precisamos também ressaltar que o nosso comentário sobre a tradição dos livros de física do Ensino Médio em introduzir o assunto de ondas com ondas em cordas não é uma crítica necessariamente negativa. Todavia, passa a ser quando não há nenhum esforço para se ir além disso, tanto em relação aos autores dos livros quanto aos próprios professores. O que não se pode, segundo nossa visão, é ser negligente sobre questões que podem ser estimulantes para os estudantes. Se as editoras não se preocupam com isso, sejam quais forem suas razões, nós, professores e pesquisadores, devemos fazê-lo. E a ideia deste artigo é justamente auxiliar os professores a dar esse passo, tanto no que se refere ao planejamento de suas aulas como à sua aplicação e avaliação. Obviamente, não temos a pretensão de oferecer uma receita infalível para o sucesso do ensino das ondas sonoras. Os professores podem e devem fazer escolhas, omissões e saltos, dependendo de fatores culturais, planejamento escolar, tempos das aulas, receptividade dos alunos, etc.

Outrossim, ressaltemos que alguns aspectos relacionados à física do som mencionados neste artigo, como o alinhamento do sistema sonoro, bem como a própria questão do conforto acústico, do uso social da ciência e da tecnologia, ou mesmo a biofísica do ouvido humano, podem ser aprofundados durante a atividade ou até mesmo constituírem temas de outros projetos. Em outra ocasião, ambas as turmas realizaram projetos interdisciplinares sobre a poluição sonora; essa atividade foi orientada pelas Ilhas Interdisciplinares de Racionalidade, propostas por Gerard Fourez. Deixemos essa ocasião para outro momento.

Referências

[1] D.D. Moura e P. Bernardes Neto, A Física na Escola **12**, 12 (2011).
[2] E. M. Santos, C. Molina e A.P.B. Tufaile, Rev. Bras. Ens. Fís. **35**, 2507 (2013).
[3] H.A. Errobidart e Cols., Rev. Bras. Ens. Fís. **36**, 1507 (2014).
[4] F. Catelli e G.A. Mussato, Rev. Bras. Ens. Fís. **36**, 2304 (2014).
[5] S.M. Coelho e G.R. Machado, Cad. Bras. Ens. Fís. **32**, 207 (2015).
[6] N.E. Souza Filho, B.A. Gonçalves e V.T. Oliveira, Rev. Bras. Ens. Fís. **37**, 2313 (2015).
[7] D.A. Magalhães e J. Pinho Alves Filho, Cad. Bras. Ens. Fís. **34**, 331 (2017).
[8] R.P. Feynman, R.B. Leighton e M. Sands, *Licões de Física de Feynman*, *vol. I* (Bookman, Porto Alegre, 2008).
[9] M. Nussenzveig, *Curso de Física Básica*, *vol. 2* (Edgar Blucher, São Paulo, 2002).
[10] M. Alonso e E.J. Finn, *Física: Um Curso Universitário*, *vol. 2* (Edgar Blucher, São Paulo, 1972).
[11] H. Fletcher and W.A. Munson, J.A.S.A. **5**, 82 (1933).
[12] D. Trancanelli, Rev. Bras. Ens. Fís. **38**, e2505 (2016).

Notas

[1] É preciso que façamos algumas simplificações. Uma delas é considerar que o movimento ocorra em uma única dimensão, de forma que para grandes distâncias entre a fonte sonora e o ouvinte, em comparação com as distâncias percorridas pelas moléculas de ar, as ondas podem ser consideradas como planas [8]. Veja outras considerações na mesma referência, por exemplo.

[2]Suas deduções fogem do escopo deste artigo. Para o leitor interessado, as Refs. [8-10] mostram como deduzir as equações de movimento do problema e encontrar suas soluções.

[3]Não mencionamos os fatores biofísicos. A Ref. [7], por exemplo, discute alguns deles.

[4]Se $\alpha = 10 \log_{10} (I/I_0)$, $\alpha' = 10 \log_{10} (2I/I_0) = 10 \log_{10} (I/I_0) + 10 \log_{10}(2) = \alpha + 3$.

[5]Alguns softwares e aplicativos de celulares, como o "*RTA Audio Analyzer*", para Android, auxiliam no alinhamento do som.

[6]Não entraremos em detalhes sobre esse assunto. Para o leitor interessado, sugerimos as Refs. [8-10].

[7]Em artigo recente, Trancanelli [12] apresenta uma revisão bastante acessível sobre a técnica da análise dimensional. Convidamos o leitor a visitar esse interessante artigo, que traz inúmeros exemplos de como estimar a dependência de uma grandeza em relação a outras relevantes da situação, sem fazer contas complicadas, ou seja, sem resolver a equação diferencial do problema.

[8]Reiteramos que a compreensão desse procedimento requer um detalhamento que foge do escopo deste artigo. Sugerimos que o professor não familiarizado com a técnica da análise dimensional visite, por exemplo, o já referido artigo de Trancanelli [12].

[9]Neste artigo, trabalharemos com três dimensões primitivas, comprimento, tempo e massa, as quais são designadas, respectivamente, por L, T e M.

[10]Uma outra maneira de se chegar à Eq. (7) é a seguinte: tem-se que a variação de pressão $\Delta\mathcal{P}$ depende do produto $\mathcal{X}_0\, k$. Todavia, observamos que esse produto é adimensional. Logo, ele deve ser multiplicado por uma quantidade que tenha unidades de pressão. Assim, podemos combinar a velocidade de propagação do som v e a densidade de equilíbrio do ar ρ_0, duas quantidades referentes a propriedades do meio e que são relevantes para a situação em questão. Combinadas, elas definem o módulo de elasticidade volumétrica do gás: $v^2\rho_0$ [10]. Ficamos, então, com a relação $\Delta\mathcal{P} \sim \mathcal{X}_0\, k\, v^2\rho_0$. A quantidade do lado direito é a própria amplitude da onda de pressão $\mathcal{P}_0 = 2\pi\, v\rho_0 f\, \mathcal{X}_0$ [10].

[11]Por exemplo, evitamos falar das séries de Fourier.

[12]Disponível no link: http://www.szynalski.com/tone-generator/. Outra sugestão é o simulador "Som", também gratuito e disponível no link: https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/legacy/sound. Este último oferece vários recursos que não são explorados nesta atividade, como interferência.

[13]A calibração do microfone é feita no próprio aplicativo e é fundamental para garantir a confiabilidade dos resultados.

[14]Esse cálculo pode ser visto, por exemplo, na Ref. [7].