

# COMO OBSERVAR ONDAS SONORAS

Anderson Ribeiro de Souza (andersoncp2@gmail.com)

Colégio Pedro II - Niterói e Instituto de Física, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

## RESUMO

Apresentamos neste artigo uma abordagem experimental relativamente simples e eficaz para o estudo das ondas sonoras no Ensino Médio. Usamos alguns softwares gratuitos para geração e gravação dos sons. Examinamos batimentos sonoros e ressonâncias em tubos cilíndricos fechados e abertos nas extremidades.

O arranjo experimental nos permite gerar ondas harmônicas cujas frequências correspondem às frequências de ressonância previstas teoricamente nesses tubos. Deste modo, podemos verificar as variações de intensidade na onda que resulta das reflexões na cavidade.

Gravamos o som no interior dos tubos cilíndricos através da passagem aproximadamente regular de um pequeno microfone pelo seu eixo longitudinal. Obtemos então, em tempo real, um gráfico da intensidade sonora em função do tempo, análogo ao gráfico que representaria às variações da pressão do ar em função da posição do microfone.

Sugerimos que uma interpretação mais didática das ondas sonoras estacionárias (e também menos sujeita a interpretações controversas pelos estudantes) seria obtida através da análise dos gráficos da variação da pressão atmosférica versus a distância em relação a uma das extremidades do tubo. Ao invés disto, usualmente os livros didáticos de Ensino Médio as abordam apenas a partir de diagramas e gráficos mais abstratos, representando a amplitude de deslocamento das moléculas do ar.

Embora as duas análises sejam complementares e corretas, a quadratura (defasagem de  $90^\circ$ ) entre a onda de pressão e a onda de deslocamento tem uma origem matemática muito sofisticada para estudantes de ensino médio. Ondas de pressão são mais intuitivas e podem ser observadas diretamente na tela do computador através de programas apropriados.

**PALAVRAS -CHAVE:** Ondas longitudinais, ressonância, tubo sonoros.

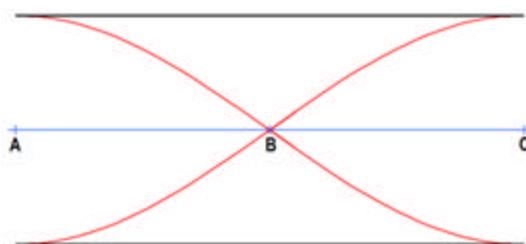
## 1. INTRODUÇÃO

No ensino médio, o curso de acústica normalmente é precedido pelo de mecânica ondulatória. Neste último, estudamos a propagação de ondas transversais em meios homogêneos, tais como em cordas ou na superfície da água, mais simples de serem visualizadas.

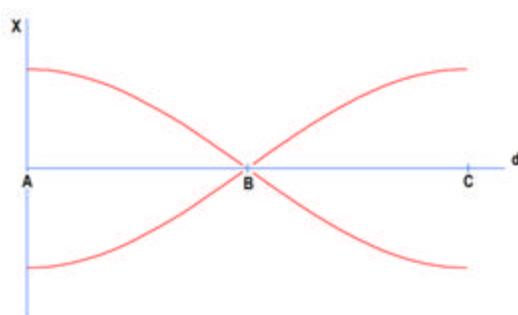
O fato das ondas sonoras serem longitudinais torna seu estudo um pouco mais delicado. De modo geral, ondas desta espécie podem ser ilustradas através de molas helicoidais longas ou pelo emprego de simulações computacionais, muitas delas disponíveis na Internet. Apesar disto, a compreensão de quais grandezas físicas variam, e do modo como variam, não é muito simples.

Ao tratarmos ressonâncias em tubos cilíndricos, os livros didáticos costumam interpretar as ondas sonoras apenas como variações nas amplitudes de deslocamento das moléculas do ar na

direção longitudinal Assim, um diagrama como o da figura 1 é análogo ao gráfico da amplitude de deslocamento em função da distância a partir de uma de suas extremidades (figura 2).



**Figura 1. Tubo cilíndrico aberto nos extremos A e C. A distância entre as linhas vermelha e azul indica qualitativamente a amplitude de deslocamento das moléculas de ar no modo fundamental ao longo do tubo.**



**Figura 2. Gráfico das amplitudes de deslocamento ao longo do tubo aberto.**

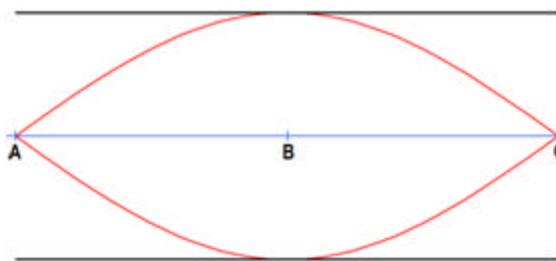
Por outro lado, esta abordagem traz outras dificuldades. Os estudantes não distinguem com facilidade um gráfico abstrato como o da figura 2, onde oscilações longitudinais são representadas num eixo vertical, das oscilações transversais que de fato acontecem ao longo de uma corda vibrante, por exemplo.

Confusões de teor semelhante aparecem em diversos contextos. Na cinemática, por exemplo, o gráfico da altura em relação ao tempo de uma massa atirada obliquamente no espaço muitas vezes é confundido com a própria parábola descrita pelo projétil. Ou seja, os estudantes não conseguem fazer uma distinção entre o fenômeno e os conceitos físicos que permitem sua análise.

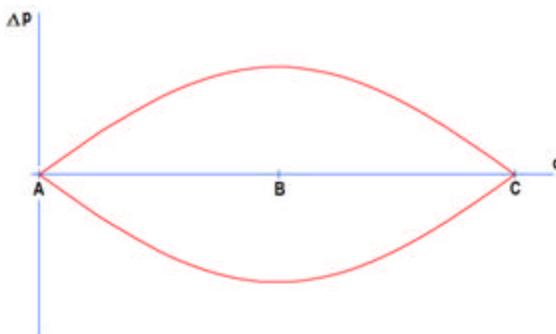
No caso da onda sonora, ainda mais difícil costuma ser a interpretação da diferença de fase de  $90^\circ$  (quadratura) entre a função que descreve a variação da posição das moléculas do ar e aquela que descreve sua variação de pressão. Muitos livros didáticos, e mesmo alguns universitários, sequer mencionam esta diferença.

Para o primeiro harmônico em tubo abertos (figura 1), próximo de seus extremos, a pressão é aproximadamente constante (pontos A e C) porque estas ondas interferem de modo destrutivo e cancelam-se mutuamente. No meio do tubo (ponto B) as ondas se reforçam e o som é amplificado.

Podemos então reinterpretar o fenômeno físico caracterizando-o pela variação da pressão do ar em relação à pressão atmosférica normal Neste caso teremos a figura 3, abaixo.



**Figura 3.** Novamente o modo fundamental no tubo aberto, contudo, reinterpretado em termos da variação de pressão do ar (linha vermelha) em relação à pressão atmosférica normal (linha azul).



**Figura 4.** Gráfico da amplitude de pressão ao longo do tubo aberto.

Neste artigo discutimos as ondas sonoras em termos de variações da pressão atmosférica. Destacamos a simplicidade desta abordagem utilizando computadores e programas para geração e análise de sons. Analisamos batimentos e ondas estacionárias em tubos cilíndricos fechados e abertos.

A adoção desta interpretação procura favorecer a compreensão do fenômeno de modo mais experimental e intuitivo. Na tela do computador podemos visualizar cada um dos sons, além de ouvi-los propriamente.

## **2. OBSERVANDO E OUVINDO SONS**

Utilizamos os softwares SweepGen 2.2 [1] e Audacity Portable 1.2.6 [2] para geração e análise das ondas sonoras nos experimentos que se seguem. Ambos são gratuitos e podem ser baixados nos sites citados na bibliografia

### **a. Harmônicos em tubos cilíndricos abertos**

A partir de um pequeno tubo cilíndrico de papelão (figura 5), podemos traçar uma comparação entre os modos normais de vibração previstos teoricamente e aqueles captados por um microfone e analisados com o Audacity.



**Figura 5. Tubo cilíndrico de papelão percorrido por microfone em seu interior.**

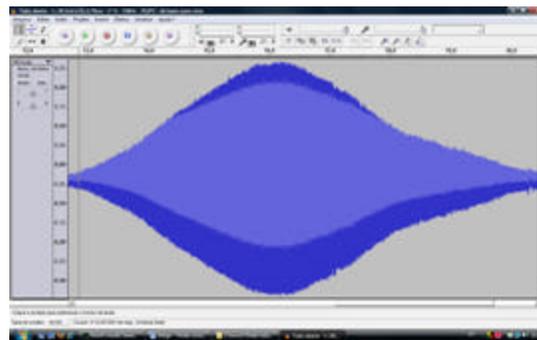
Arrancamos o tubo de um rolo de papel alumínio, tipicamente usado em cozinhas. Seu comprimento é  $L=30,1\text{cm}$  e seu diâmetro interno de  $D=3,78\text{cm}$ . Quando aberto nos dois extremos, as frequências de ressonância que se estabelecem em seu interior, são:

$$f_n = n \cdot \frac{v}{2L_{\text{ef}}}, \text{ onde } n = 1, 2, 3\dots$$

Consideramos aqui o comprimento efetivo do tubo, isto é,  $L_{\text{ef}} = L + 0,6D$ , [3] e [4]. Também levamos em consideração a variação da velocidade com a temperatura no ar:  $v \sim 331,48 + 0,59\theta$ , no intervalo de 0 até  $40^\circ\text{C}$ . Logo, para  $\theta = 25,9^\circ\text{C}$ , temperatura no momento do experimento, a frequência do modo fundamental era de, aproximadamente,  $536\text{Hz}$ .

Inicialmente prendemos o tubo num suporte vertical e definimos essa frequência para o SweepGen. Posicionamos então uma das caixas de som perto da entrada do tubo e introduzimos lentamente um microfone em seu eixo; simultaneamente gravamos o som com o Audacity.

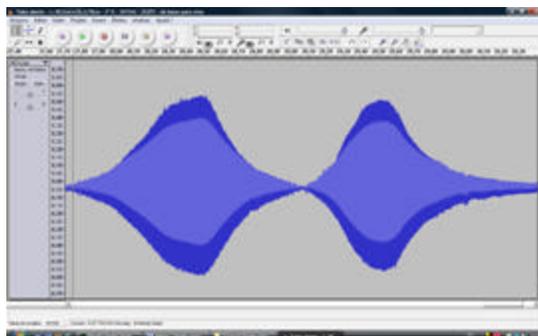
A figura 6 nos mostra o padrão de intensidade sonora obtido a medida que o microfone era deslocado de um extremo aberto a outro. O microfone registra as flutuações da pressão atmosférica ao longo do tubo e o Audacity as transforma em flutuações de intensidade sonora, indicadas no gráfico. Na tela do computador o estudante pode observar exatamente isto: variações de intensidade que, por sua vez, são bem menos abstratas que amplitudes de deslocamento das moléculas do ar.



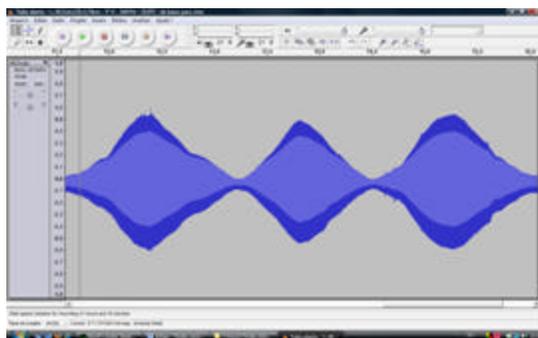
**Figura 6. Padrão estacionário do 1º harmônico no tubo de papelão aberto nos extremos**

(536Hz).

Repetimos o procedimento para o 2º e o 3º harmônicos do tubo aberto: cerca de 1071Hz e 1607Hz, respectivamente.



**Figura 7. Padrão estacionário do 2º harmônico no interior do tubo de papelão aberto nos extremos (1071Hz).**



**Figura 8. Padrão estacionário do 3º harmônico no interior do tubo de papelão aberto nos extremos (1607Hz).**

As figuras não são exatamente simétricas porque deslocamos o microfone manualmente, logo sua velocidade sofre irregularidades que se refletem no padrão obtido. Os nós fixos nas proximidades dos extremos do tubo correspondem às condições de contorno, isto é, à pressão atmosférica normal.

### **b. Harmônicos em tubos cilíndricos fechados**

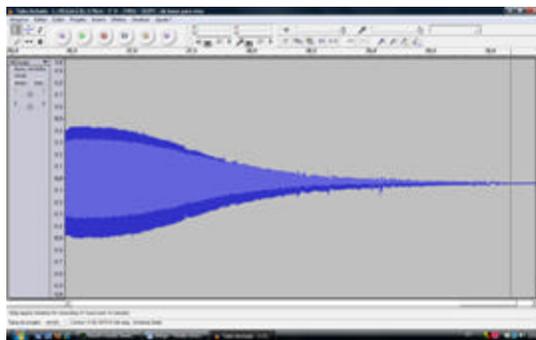
Repetimos o experimento após fecharmos o cilindro de papelão na extremidade inferior. Inicialmente, o microfone foi colocado nesta parede e deslocado verticalmente para cima.

Nos tubos fechados as novas frequências serão dadas pela relação:

$$f_n = n \cdot \frac{v}{4L_{ef}} \quad , \text{ onde } n = 1, 3, 5...$$

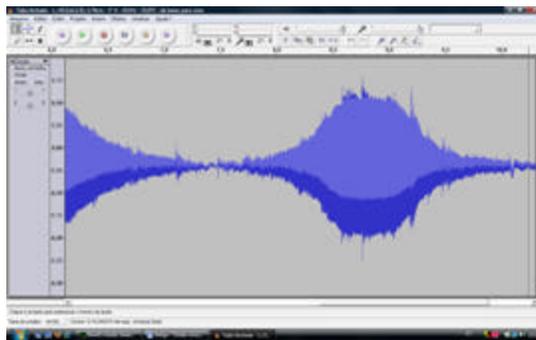
As figuras 9, 10 e 11 nos mostram, respectivamente, o 1º, 3º e 5º harmônicos deste tubo.

Chamamos a atenção para o novo comprimento efetivo do tubo:  $L_{ef} = L + 0,3.D$ , [3] e [4].

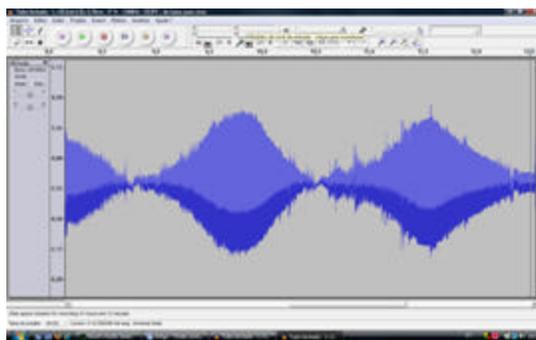


**Figura 9. Padrão estacionário do 1º harmônico no interior do tubo de papelão fechado em um dos extremos (278Hz).**

Observe que sobre a parede fechada (começo do gráfico, à esquerda) a variação de pressão é máxima. Inversamente, no extremo aberto, sempre temos um nó de pressão (pressão atmosférica).



**Figura 10. Padrão estacionário do 3º harmônico no interior do tubo de papelão fechado em um dos extremos (833Hz).**



**Figura 11. Padrão estacionário do 5º harmônico no interior do tubo de papelão fechado em um dos extremos (1388Hz).**

### c. Batimentos de ondas sonoras

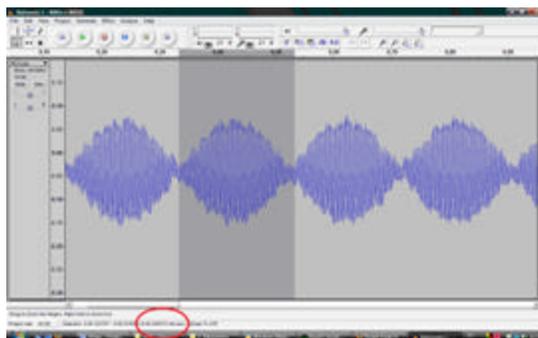
O programa SweepGen também nos permite gerar sons senoidais estéreo e controlar a intensidade dos canais direito e esquerdo de modo independente. Através deste recurso podemos

criar batimentos de ondas sonoras.

Fixamos as frequências de 400 e 405Hz em cada uma das caixas de som conectadas ao computador. Em seguida, colocamos o microfone em repouso e equidistante delas. Depois gravamos a sobreposição dos sons com o auxílio do Audacity.

A sobreposição destas ondas resulta num som de amplitude modulada, chamado de batimento. Sua frequência é dada pela diferença das ondas originais, neste caso, 5Hz. Esta variação é perfeitamente audível.

Podemos usar a ferramenta de seleção do Audacity para encontrar seu período, indicado no eixo horizontal: 0,200s.



**Figura 12.** A região selecionada apresentou período de 0,200s (indicado dentro da elipse vermelha), que corresponde claramente ao batimento de 5Hz.

### 3. CONCLUSÕES

Através de um computador, um microfone e dois softwares de uso gratuito, tentamos mostrar a viabilidade de algumas atividades experimentais para um curso de acústica nas escolas de nível médio.

Estas ferramentas podem nos sugerir uma infinidade de novas possibilidades a serem exploradas por estudantes e professores. Mais um exemplo seria a análise espectral de sons de carros ou aviões em movimento. Através da variação da frequência devido ao efeito Doppler poderíamos estimar as velocidades com que se movem.

Acreditamos que a interpretação das ondas sonoras através de ondas de pressão talvez evite uma comparação inadequada com as ondas transversais. Ela também pode contornar a dificuldade no entendimento da quadratura entre as funções matemáticas que descrevem o deslocamento longitudinal das moléculas do ar e aquelas que descrevem as variações de pressão do ar. Essa analogia pode gerar uma confusão desnecessária para estudantes deste nível. A abordagem matemática completa pode ser trabalhada em um momento posterior, nos cursos universitários.

A discussão sobre nós e ventres de pressão e deslocamento nos sugeriu a formulação de um problema curioso, cuja interpretação é o elemento central deste artigo: suponha que um turista esteja perdido no interior de uma caverna. O que acontecerá ao tentar estabelecer comunicação gritando com uma pessoa do lado de fora?

Ambos enfrentarão sérias dificuldades. A intensidade do som será amplificada ou reduzida drasticamente para cada um dos harmônicos.

Num modelo simplificado deste problema, considere o turista localizado no ponto médio de uma longa caverna cilíndrica aberta de ambos os lados, similar ao tubo aberto das figuras 1 e 3. Imagine também a fonte sonora situada do lado de fora da caverna, a esquerda do ponto A, emitindo uma frequência constante e igual a de seu modo fundamental. Neste caso, o turista ouviria um som muito intenso já que sua posição corresponderia a um ventre de pressão, conforme averiguamos experimentalmente na figura 6.

Curiosamente, nenhum som seria ouvido quando o turista andasse até um dos extremos da caverna (pontos A ou C).

A comunicação real entre duas pessoas apresenta uma construção dinâmica de infinitos harmônicos sobrepostos. Em particular, enquanto o turista estiver posicionado no ponto médio da caverna cilíndrica, todos os harmônicos pares serão suprimidos nas múltiplas interferências destrutivas. Os harmônicos ímpares sofrerão interferência construtiva e serão amplificados. O resultado será um som confuso, talvez ininteligível.

As zonas de interferência construtiva e destrutiva variam no tempo e no espaço. Logo, ainda que o turista avançasse pela caverna, o problema continuaria afetando com maior ou menor grau os diferentes harmônicos.

Qualquer comunicação dentro da caverna é prejudicada pelas reflexões sucessivas. Para piorar, num ambiente de paredes rochosas o tempo de reverberação tende a ser maior que o normal, e o ruído tende a crescer.

Quando pessoas se perdem em cavernas longas, com múltiplas câmeras, a comunicação torna-se difícil. É possível que duas pessoas que não se vêem estejam a uma distância curta entre si, mas sem se comunicar com clareza. Inversamente, podem estar distantes uma da outra mas falando com alguma nitidez.

#### 4. REFERÊNCIAS

[1] Versões mais recentes do programa já estão disponíveis na Internet. SweepGen 3.1, por exemplo, pode ser baixado em diversos sites:

[http://freewareapp.com/sweepgen\\_download/](http://freewareapp.com/sweepgen_download/)

[http://download.chip.eu/en/Audio-SweepGen-3.1.0\\_32321.html](http://download.chip.eu/en/Audio-SweepGen-3.1.0_32321.html)

[http://download.chip.eu/en/Audio-SweepGen-3.1.0\\_32321.html](http://download.chip.eu/en/Audio-SweepGen-3.1.0_32321.html) (acessados em 15/06/2008).

[2] Audacity Portable 1.2.6 pode ser obtido pelo site: <http://audacity.sourceforge.net/> (acessado em 15/06/2008).

[3] Michael C. LoPresto. *Measuring end correction for a quarter-wave tube*. Physics Teacher, 43, 380 (2005).

[4] Juan G. Roederer. *The Physics and Psychophysics of Music: An Introduction*. Springer; 4th edition (October 3, 2008).

[5] H. Moysés Nussenzveig. *Curso de Física Básica*. Fluidos, Oscilações e Ondas, Calor. São Paulo: Edgard Blücher, 1981.

#### **AGRADECIMENTOS**

Agradecemos o apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ). Agradecemos também aos professores Carlos Eduardo Aguiar e Marco Adriano Dias pelas discussões e incentivo.