

Nota: 10/10

Relatório 5 - "Barulhinho bom"

Felipe Magina (15451791); Luan Leal (15470820);
Matheus Justino (14598021); Matheus Queiroz (15479562);
Micael Baruch (15578823)

26 de maio de 2025

1 Introdução

O estudo de osciladores harmônicos em muito contribui para a física ondulatória, responsável pela descrição da propagação de perturbações, ou energia, sem haver transporte de matéria. O conhecimento de propriedades ondulatórias é aplicado em diversas áreas, como óptica, eletromagnetismo, quântica e acústica. Para o estudo de sons, que é o enfoque deste relatório, é essencial o conhecimento de que tratam-se de ondas mecânicas longitudinais associadas a variações de pressão, causando regiões de compressão e rarefação no meio [2]. Além disso, vale ressaltar que suas propriedades são perceptíveis à audição humana, como a amplitude sentida na intensidade sonora, a frequência que é notada na afinação (frequências mais altas sendo mais agudas) e interferência de múltiplas ondas percebida pelo timbre. Por fim, constata-se a importância do estudo do som por tratar-se de um fenômeno cotidiano e uma peça essencial da experiência humana do mundo ao seu redor, bem como valores utilitários em áreas como medicina (como no uso de ultrassom), transmissão de informação, detecção de objetos (como por sonares) e inspeção de maquinário industrial.

Tendo isso em vista, este trabalho discute a realização de quatro experimentos sobre propriedades sonoras. O primeiro envolveu o uso de diapasões para gerar ondas de frequências determinadas sobre um tubo com água de altura variável. Esperava-se notar a liberação de som pelos tubos quando a água estivesse próxima a alturas marcadas no tubo, relacionadas às frequências dos diapasões. O objetivo é poder explicar como esse efeito está relacionado a harmônicos em tubos fechados e interferência de ondas estacionárias, além de estimar-se a velocidade do som no ar a partir dos conhecimentos de ondulatória e comparação de diferentes alturas da coluna da água que geram sons de mesma frequência. Por fim, o estudo de harmônicos em tubos fechados é relevante inclusive para o entendimento de instrumentos de sopro, como flautas e clarinetes, que dependem desse fenômeno.

Quanto ao segundo experimento, esse foi da geração de figuras de Chladni em duas placas metálicas cobertas de areia, com o uso de um arco de violino. Ernst Chladni (1756-1827) foi um físico e músico alemão, famoso pela descoberta da formação de padrões em placas vibrantes sobre as quais colocou areia, havendo variação dos desenhos dependendo da frequência de vibração, formato da placa e se fixava/pressionava alguma parte dela [4]. Tal experimentação permite tanto uma perspectiva visual do som, como uma apreciação do funcionamento de uma superfície vibrante bidimensional.

Já a terceira experimentação envolveu uma recriação do experimento descrito por P. L. Rijke em 1859 [3], na qual uma rede metálica dentro de um tubo é aquecida e posteriormente retira-se a fonte de calor, resultando na geração de som. Também foi observado o que ocorre ao inclinar-se o tubo e como o som variava ao utilizar-se tubos de dimensões diferentes, sendo esperada uma alteração na frequência em função do tamanho [5]. Por fim, vale ressaltar a questão particular deste experimento, de envolver geração de som a partir de energia térmica.

Por fim, o quarto experimento envolveu o uso de uma corda esticada sobre uma haste móvel, similar ao monocórdio de Pitágoras [1], tendo uma extremidade presa e outra ligada a pesos variáveis. Com isso, é possível a análise dos sons gerados com variação de comprimento e tensão da corda, uma vez que a frequência é proporcional à raiz quadrada da tensão da corda e inversamente proporcional ao comprimento da corda e à raiz quadrada da sua densidade linear, como descrito pelas leis de Mersenne [2] e sintetizado na seguinte expressão:

$$v_1 = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

Sendo v_1 a frequência fundamental, l o comprimento da corda, T a tensão da corda e μ , a sua densidade linear de massa. Essas propriedades representam a base do entendimento dos instrumentos de corda e das notas musicais.

2 Metodologia

2.1 Diapasão em um tubo fechado

O estudo dos harmônicos em tubos fechados foi conduzido utilizando um arranjo experimental composto por um tubo cilíndrico fechado em uma de suas extremidades, um reservatório de água com altura ajustável e um conjunto de diapasões calibrados com frequências de 256 Hz, 384 Hz e 512 Hz. O tubo foi parcialmente preenchido com água, permitindo a variação da coluna de ar em seu interior através do ajuste da altura do reservatório de água como representado na Figura 1.

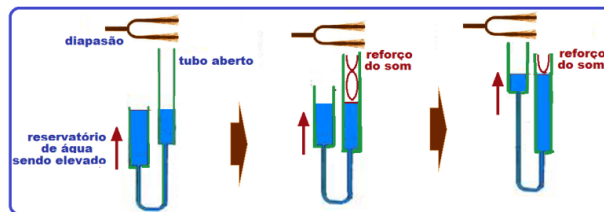


Figura 1. Representação esquemática da montagem experimental para o estudo da ressonância em um tubo fechado. O tubo, com uma extremidade inferior fechada e parcialmente preenchido com água, permite ajustar a altura da coluna de ar por meio do nível da água, facilitando a identificação de harmônicos ao ser excitado por diapasões de diferentes frequências. Fonte: imagem fornecida pelo monitor Pedro.

O procedimento experimental consistiu em excitar os diapasões e posicioná-los na abertura superior do tubo, perpendicularmente ao eixo longitudinal do mesmo. A altura da coluna de água foi ajustada sistematicamente até que a ressonância fosse observada.

2.2 Ressonância e vibração em diapasão

O arranjo experimental incluiu um diapasão de frequência fixa de 256 Hz e um segundo diapasão com frequência ajustável, equipado com um sistema de ímãs para calibração (Figura 2). A detecção da vibração no diapasão ajustável foi realizada utilizando uma pequena esfera de massa desprezível suspensa por um fio, que estava em contato com uma das hastes do diapasão.

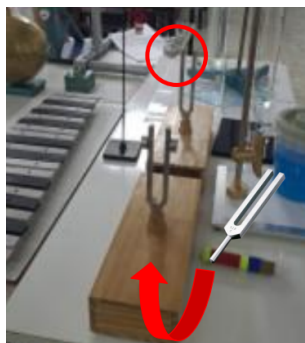


Figura 2. Fotografia do experimento de ressonância entre dois diapasões realizada no laboratório. O primeiro diapasão, circulado em vermelho, possui frequência fixa de 256 Hz, enquanto o segundo tem frequência ajustável por meio de ímãs. A vibração induzida é detectada por uma esfera suspensa em contato com uma das hastes do primeiro diapasão. Fonte: fotografia tirada pelo monitor Pedro

O procedimento iniciou-se com os dois diapasões já ajustados para a mesma frequência de 256 Hz. Em seguida, o diapasão de frequência ajustável foi percutido, e observou-se a esfera suspensa em contato com uma das hastes do primeiro diapasão.

2.3 Figuras de Chladni

O estudo das figuras de Chladni foi realizado empregando duas placas metálicas planas, uma triangular e a outra quadrada, e um arco de violino (Figura 3). O procedimento experimental consistiu em aspergir uma fina camada de areia sobre a superfície da placa. Em seguida, a placa foi fixada em pontos estratégicos e excitada pela fricção do arco em suas bordas, gerando vibrações. ~~Para coletar a areia que se desprendia da placa durante o experimento, um recipiente de plástico foi acoplado abaixo dos suportes das placas.~~

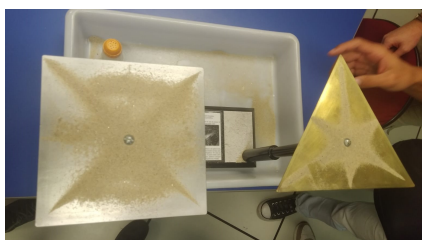


Figura 3. Fotografia tirada durante a realização do experimento de figuras de Chladni no laboratório. As placas metálicas de diferentes formas (quadrada e triangular) foram excitadas com um arco de violino, que não está visível na imagem, formando padrões visíveis na superfície das placas. Fonte: autoria própria

Durante a experimentação, variaram-se os pontos de apoio da placa e os locais de aplicação da fricção do arco, permitindo a observação de diferentes padrões nodais formados pela areia. A análise qualitativa das figuras foi realizada para investigar a relação entre a geometria da placa, os pontos de excitação e as configurações dos padrões nodais.

2.4 Tubo de Rijke

O aparato experimental consistiu em um tubo cilíndrico aberto em ambas as extremidades e uma tela de malha metálica posicionada próxima a uma das extremidades do tubo. A fonte de calor de uma vela foi utilizada para aquecer a tela (Figura 4).

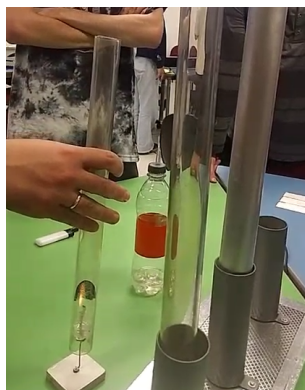


Figura 4. Registro fotográfico do experimento do tubo de Rijke feito em ambiente de laboratório. A malha metálica é aquecida por uma chama, gerando posteriormente uma emissão sonora característica quando o tubo é posicionado verticalmente. Fonte: autoria própria.

O procedimento envolveu o aquecimento inicial da tela metálica utilizando a chama da vela. Após um período de aquecimento, o tubo foi removido da chama e posicionado verticalmente. A emissão de um som característico foi observada. A influência da orientação do tubo (horizontal ou vertical) na emissão sonora foi qualitativamente investigada.

2.5 Vibração de uma corda

O estudo das vibrações em uma corda foi realizado utilizando um aparato que permitia variar a tensão e o comprimento efetivo da corda. O sistema incluía uma corda tensionada entre dois pontos fixos, sendo um deles móvel para ajustar o comprimento, e um mecanismo de pesos para aplicar e mensurar a tensão como mostrado na Figura 5.



Figura 5. Fotografia da montagem utilizada no laboratório para investigar os modos de vibração de uma corda tensionada. A tensão é aplicada com o uso de massas e o comprimento pode ser ajustado. Fonte: autoria própria.

O experimento focou na observação dos sons gerados na corda e na relação entre a frequência de vibração, a tensão, o comprimento e a densidade linear da corda. A variação da tensão da corda e do seu comprimento efetivo foi realizada sistematicamente, e a resposta vibracional foi observada.

3 Resultados e discussões

3.1 Figuras de Chladni

Ao friccionar o arco de violino contra a placa no ângulo e velocidade corretos, foi possível observar que a areia sobre a placa agitou-se e passou a acumular-se em algumas linhas, formando figuras. Este fenômeno ocorreu em ambas as placas. Cada placa formou padrões diferentes entre si. Além disso, ao excitar a placa

em pontos diferentes com o arco, figuras diferentes foram formadas. Também, pressionar o dedo contra a placa em algum ponto ocasionou mudanças na figura. Em particular, o ponto pressionado sempre passa a ser parte de uma das linhas de areia formadas. Dependendo da combinação entre pontos pressionados e posição do arco para excitar a placa, figuras com menos resolução poderiam ser observadas, não formando um padrão claro.

Este fenômeno é explicado pela formação de modos de vibração, no qual as ondas excitadas na placa pelo arrastar do arco de violino têm máxima interferência construtiva. Neste cenário, formam-se ondas estacionárias com pontos da placa tendo deslocamento vertical máximo (pontos de antinós) e pontos na placa com nenhum deslocamento vertical (pontos de nós). Ao vibrar, a placa arremessa a areia, portanto a areia se acumula nos pontos de nós da placa naquele modo de vibração.

Placas não seguem o padrão de tubos ou cordas de ter modos normais como múltiplos de uma frequência fundamental. Devido à isto, os modos normais não podem ser obtidos através de uma única equação de onda estacionária e a determinação destes modos nem sempre têm solução analítica. Em particular, ao variar os pontos da placa nos quais pressionamos o dedo, variamos as condições de contorno de vibração da placa, forçando a existência de um ponto de nó no ponto em que pressionamos o dedo. Similarmente, ao variar a posição em que o arco é friccionado forçamos a formação de um antinó naquele ponto. A variação dessas condições de contorno altera os modos normais da placa sob estas condições. Portanto, levando em consideração estas condições, é possível variar uma enorme diversidade de figuras em uma mesma placa.

Indo além, seria possível variar também a placa. Evidentemente, que como a excitação da placa pela fricção com o arco depende da força elástica da placa, isto é, da rigidez do material, esta alteração também fomentaria a formação de outras figuras em comparação à placa inicial em condições de contorno iguais. Por fim, a geometria da placa faz com que as forças atuando sobre cada ponto da placa ao deformar um ponto (pela fricção do arco de violino) também seja diferente visto que a força elástica dependerá da deformação da vizinhança do ponto. E, é em decorrência disto, que foi possível observar a formação de figuras distintas na placa retangular e na placa triangular.

3.2 Tubo de Rijke

Ao esquentar a grade de metal e erguer o tubo foi possível ouvir nitidamente um duradouro som em alto volume. Enquanto o som era reproduzido, virar o tubo para posição horizontal resultou na extinção do som. A origem do som emitido tem relação com o sentido de convecção do ar.

Ao aquecer a grade de metal, o ar envolta da grade se expande, ao mesmo tempo, o ar quente se move para cima devido à esta expansão. Ao expandir-se, o ar próximo à grade de metal empurra o ar mais acima, comprimindo-o. Enquanto a vela está aquecendo o tubo, o fluxo de ar que entra é quente, fazendo com que todo ar dentro do tubo se expanda. Porém, ao retirar o tubo de cima da vela, a expansão de ar quente causa uma diminuição na pressão dentro do tubo, por sua vez, esta diferença de pressão entre o interior e exterior do tubo faz com que novas moléculas de ar frio entrem por baixo do tubo. Então, estas novas moléculas entram em contato com a grande quente e se expandem, aquecidas, as moléculas sobem, empurrando e comprimindo o ar um pouco mais frio logo a cima, a menor pressão dentro do tubo faz com que mais moléculas frias entrem e o ciclo se repete periodicamente. Este ciclo de compressão e expansão de ar é o que origina o som. Assim, torna-se evidente que ao virar o tubo na horizontal, a convecção perde a orientação dentro do tubo e o ar quente tende a ir para os dois lados do tubo. Consequentemente, o fluxo de ar perde a propriedade periódica descrita anteriormente e o som é encerrado. Similarmente, ao virar o tubo de ponta cabeça, o fluxo de ar se torna desorganizado, pois a fonte de ar frio está muito distante da grade quente, portanto, o reforço do som não ocorre.

Como o tubo tem as extremidades abertas, sabemos que na extremidade superior, a onda de pressão

possui um nó, pois naquele ponto a pressão deve se manter constante e igual à pressão atmosférica. O mesmo ocorre na outra extremidade do tubo. Dessa forma, conclui-se que o som emitido pelo tubo de Rijke é o som emitido por um tubo com duas extremidades abertas. Portanto, as frequências naturais emitidas pelo tubo de Rijke são $\lambda_n = 2L/n$ em que L é o comprimento do tubo, pois no comprimento do tubo cabe exatamente meia onda.

3.3 Diapasão e coluna d'água

O experimento do diapasão com coluna de água é uma demonstração clássica da física ondulatória, utilizada para estudar os princípios da ressonância em tubos fechados. No dito experimento, ao colocar diferentes diapasões com frequências diferentes e conhecidas na boca do tubo, fez com que as ondas sonoras se propagassem pela coluna de ar dentro do tubo sendo refletido pelas paredes até a extremidade superior da água, que reflete a onda.

Para cada diapasão diferente testou-se que, ao variar o nível da água no tubo por completo, ou seja, variá-lo do menor ponto até o maior ponto, observou-se que, em pelo menos um ponto, houve um grande aumento na intensidade sonora, e esse ponto foi demarcado com a descrição da frequência do diapasão que foi usado. Para o melhor tratamento e análise de dados, será aprofundada a discussão quanto aos dados obtidos com o experimento com o diapasão de 512 Hz, que poderá ser abrangida para os testes com os outros diapasões.

O experimento com o diapasão de 512 Hz apresentou dados singulares, sendo o único que apresentou dois pontos onde houve um grande aumento na intensidade sonora. Esses dois pontos foram marcados e tiveram suas colunas de ar medidas, como mostrado na Figura 6.

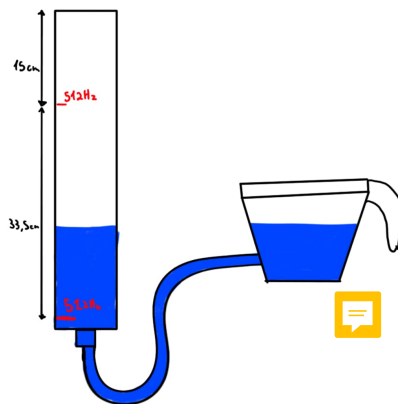


Figura 6. Tubo de água com uma extremidade fechada e sistema de modificação do nível, marcados e medidos os pontos em que houveram um aumento significativo na intensidade sonora com a vibração de um diapasão de 512 Hz. Fonte: Autoria própria.

Esse aumento significativo na intensidade do som, ocorre pois quando a onda se propagou pela coluna de ar dentro do tubo, e refletiu-se pela extremidade fechada (superfície da água), criou-se uma *onda refletida* com defasagem de 180° para a onda original, e essa interferência entre as ondas incidentes e refletidas deu origem a uma onda estacionária. Essas ondas estacionárias, são os modos normais de vibração da coluna de ar contida no tubo, que possuem seus pontos de ressonância identificáveis por um aumento significativo na intensidade sonora. E em um tubo com uma extremidade fechada, esses pontos de ressonância ocorrem quando o comprimento da coluna de ar (l) corresponde a $\frac{\lambda_n}{4}$, para valores ímpares de n , com n natural, como demonstrado pela Figura 7.

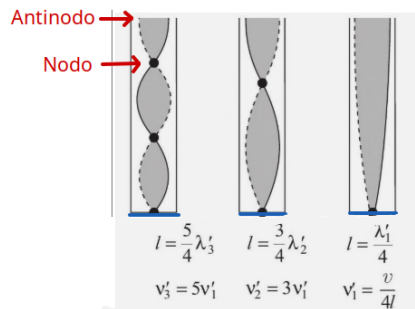


Figura 7. Demonstração da interferência entre ondas incidentes e refletidas em um tubo fechado, com a formação de nodos e antinodos, posicionados na extremidade fechada e na extremidade aberta, respectivamente, quando as ondas encontram um ponto de ressonância. Abaixo da imagem, formulas de demonstração do tamanho da coluna de ar em que o ponto de ressonância é identificado. Fonte: Modificação de imagem do livro Moyses vol 2.

Segundo os dados retirados do experimento, sabe-se que os pontos de ressonância das ondas estacionárias ocorreram com uma coluna de ar de tamanhos 15 cm e 48,5 cm, possibilitando o calculo do comprimento da onda referente ao primeiro harmônico, que ocorre ao menor l .

$$\begin{aligned}
 l &= \frac{\lambda}{4} \\
 \lambda &= 4l \\
 &= 4(15 \text{ cm}) \\
 &= 60 \text{ cm} \\
 &= 0,6 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Dessa forma, como possui-se o comprimento de onda do som λ , e a frequência da onda f , é possível calcular-se a velocidade do som no ar:

$$\begin{aligned}
 v &= \lambda \cdot f \\
 v &= 0,6 \text{ m} \cdot 512 \text{ Hz} \\
 v &= 307,2 \text{ m/s}
 \end{aligned}$$

Os resultados experimentais indicaram uma velocidade do som de 307,2 m/s, apresentando uma diferença de aproximadamente 10,4% em relação ao valor teórico de 343 m/s. Esta discrepância pode ser atribuída principalmente a: (1) variações nas condições ambientais (temperatura e umidade), já que a velocidade do som varia com a temperatura do ar; (2) imprecisões na determinação do ponto exato de ressonância; e (3) possíveis erros sistemáticos nas medições. Apesar da diferença, o experimento demonstrou ser um método válido para estimativa da velocidade do som em condições controladas.

3.4 Experimento de Uma Corda

Este experimento ilustra o princípio de funcionamento dos instrumentos de corda, nos quais o som é produzido pela vibração das cordas. Ao serem colocadas em oscilação, as cordas perturbam o meio ao seu redor, gerando ondas sonoras — variações de pressão que se propagam pelo ar. O perfil dessa oscilação determina as características da onda sonora gerada. Assim, ao alterar propriedades como a frequência ou o comprimento da onda, modifica-se o som produzido.

No experimento de uma corda, observou-se a variação do som emitido pela vibração da corda ao alterar a tensão da mesma. Observando mais especificamente, quando aumentada a tensão da corda, adicionando mais peso a sua extremidade livre, foi possível obter um som mais agudo, ou seja, uma frequência maior.

A explicação dessa alteração de som é sustentada pelas leis das Cordas Vibrantes, descritas por Mersenne. Mais especificamente pela sua segunda lei, que diz, que a frequência fundamental de uma corda é proporcional à raiz quadrada de sua tensão, ou seja, ao aumentar a tensão, aumenta-se sua frequência, e produz um som mais agudo.

Dessa forma, foi explicado o porquê instrumentos de corda são afinados aumentando a tensão de suas cordas, porém, as leis de Mersenne também explicam o porque nesses instrumentos existe a presença de múltiplos tipos de cordas. Segundo as leis de Mersenne, a produção de diferentes sons, a partir de uma corda, pode ser controlada através de três parâmetros principais: (1) a tensão aplicada, (2) o comprimento da corda e (3) suas propriedades físicas. Como o comprimento é limitado pela estrutura do instrumento e a tensão máxima pela resistência do material, a terceira lei de Mersenne oferece uma solução prática: a frequência fundamental é inversamente proporcional à raiz quadrada da densidade linear. Assim, variando a espessura e o material das cordas - e consequentemente sua densidade linear - é possível expandir significativamente a faixa tonal do instrumento. Este princípio é particularmente evidente em guitarras, onde cordas de diferentes calibres (mais finas para agudos, mais grossas para graves) permitem a execução de notas em diversas oitavas.

4 Conclusão

Este relatório explorou a aplicação de princípios físicos ondulatórios em quatro experimentos distintos, enriquecendo a compreensão de fenômenos sonoros. O experimento com o diapasão e a coluna d'água demonstrou a ressonância em tubos fechados, permitindo estimar a velocidade do som no ar em 307,2 m/s. A discrepância de aproximadamente 10,4% em relação ao valor teórico de 343 m/s foi atribuída a variações ambientais, imprecisões e possíveis erros sistemáticos.

As figuras de Chladni ofereceram uma visualização das ondas estacionárias em superfícies bidimensionais, onde a areia se acumulava nos pontos nodais. A variação dos padrões com a mudança dos pontos de apoio e excitação ressaltou a influência das condições de contorno e da geometria na formação dos modos de vibração.

O tubo de Rijke ilustrou a geração de som a partir de energia térmica, com o fenômeno dependendo da convecção do ar aquecido. A interrupção do som ao inclinar o tubo evidenciou a importância da orientação vertical para a manutenção do fluxo periódico de ar.

Por fim, o experimento da corda vibrante, similar ao monocórdio de Pitágoras, validou as leis de Mersenne ao demonstrar como a frequência e o tom do som são influenciados pela tensão, comprimento e densidade linear da corda. A capacidade de variar esses parâmetros é crucial para a afinação e a diversidade tonal em instrumentos de corda. Em suma, os experimentos reforçaram conceitos fundamentais da física ondulatória e suas aplicações práticas.

Referências

- [1] Oscar João Abdounur. *O experimento de Pitágoras com o monocórdio: uma abordagem histórico-didática*. Atena, 2020.
- [2] H. Moysés Nussenzveig. *Curso De Física Básica Fluidos, Oscilações E Ondas, Calor (Volume 2)*, chapter 5, 6. Editora Edgard Blücher Ltda, 5 edition, 2014.

- [3] P. L. Rijke. Lxxi. notice of a new method of causing a vibration of the air contained in a tube open at both ends. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 17(116):419–422, Jun 1859.
- [4] Robert Simão dos Santos, Paulo Sérgio de Camargo, and Zenaide de Fátima Dante Correia Rocha. Descobertas sobre a teoria do som: a história dos padrões de chladni e sua contribuição para o campo da acústica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 40, 2017.
- [5] Shekhar M Sarpotdar, Narayan Ananthkrishnan, and SD Sharma. The rijke tube—a thermo-acoustic device. *Resonance*, 8(1):59–71, 2003.