



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
Instituto de Física
Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física
Mestrado Profissional em Ensino de Física

Sequência de atividades sobre acústica utilizando análise espectral do som

Victor Agostinho Pontes

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, Instituto de Física, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Orientadores:

Dr. Germano Maioli Penello

Dr. Rodrigo Miranda Pereira

Rio de Janeiro

Maio de 2022

Sequência de atividades sobre acústica utilizando análise espectral do som

Victor Agostinho Pontes

Orientadores:

Dr. Germano Maioli Penello

Dr. Rodrigo Miranda Pereira

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, Instituto de Física, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Aprovada por:

Dr. Germano Maioli Penello - UFRJ (Presidente)

Dr. Rodrigo Miranda Pereira - UFF

Dra. Mercedes Arana - UFRJ

Dr. Carlos Eduardo Magalhães de Aguiar - UFRJ

Dr. Carlos Eduardo Rodrigues de Souza - UFF

Rio de Janeiro
Maio de 2022

FICHA CATALOGRÁFICA

P814s Pontes, Victor Agostinho

Sequência de atividades sobre acústica utilizando análise espectral do som / Victor Agostinho Pontes. – Rio de Janeiro: UFRJ/IF, 2022.

xii, 12 f. : il. ; 30 cm.

Orientadores: Dr. Germano Maioli Penello; Dr. Rodrigo Miranda Pereira.

Dissertação (mestrado) – UFRJ / Instituto de Física / Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, 2022.

Referências Bibliográficas: f. 74-77.

1. Ensino de Física. 2. Velocidade do Som. 3. Espectro Sonoro. 4. Tubos Ressonantes. I. Penello, Germano Maioli. II. Pereira, Rodrigo Miranda. III. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Física, Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física. IV. Sequência de atividades sobre acústica utilizando análise espectral do som.

Dedico esta dissertação à minha família, que sempre esteve ao meu lado, apoiando e incentivando. Dedico também aos profissionais da educação que, mesmo com tantas adversidades, batalhamos todos os dias para oferecer um ensino significativo da cultura e educação aos cidadãos do nosso país.

Agradecimentos

Agradeço a todos os meus familiares que contribuíram na minha formação pessoal e profissional. Em especial aos meus pais, Ronaldo e Ana por sempre oportunizarem meus estudos, minha tia Leila e meu irmão Ramon por incentivarem ao máximo o caminho pelo conhecimento e minha esposa Mariana por sempre contribuir com seus sábios conselhos e me apoiar em todas as decisões.

Agradeço aos meus amigos Jonathas Borges (41), Matheus Gomes e Lucas Labre por participarem desde o início dessa jornada, sempre com muita alegria, balbúrdia e incentivo para cada um alcançar seus sonhos.

Agradeço aos professores Vitor Acioly, Antonio Manfredi (in memoriam), André Penna Firme e João Paulo Sinnecker que fizeram parte da minha formação e que sigo como exemplo.

Agradeço aos meus orientadores Germano e Rodrigo pela orientação, paciência, empenho e incentivo ao longo do mestrado, onde aprendi muito com vocês.

Agradeço ao colégio Américo de Oliveira pela oportunidade de realizar a aplicação do material desenvolvido na presente dissertação de mestrado.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, de acordo com a portaria 206 de 4 de setembro de 2018.

RESUMO

Sequência de atividades sobre acústica utilizando análise espectral do som

Victor Agostinho Pontes

Orientadores:

Dr. Germano Maioli Penello

Dr. Rodrigo Miranda Pereira

Resumo da Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, Instituto de Física, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Neste trabalho, apresentamos um experimento de decomposição das frequências do som em um tubo ressonante, bem como sua abordagem no ensino de acústica para o ensino básico. O objetivo central é explorar as ressonâncias acústicas para obter um valor experimental para a velocidade do som no ar utilizando-se apenas folhas de papel, trena, fita adesiva, microfone, fone de ouvido e um computador, o que será suficiente para atingir excelentes precisão e acurácia. A montagem e a operação foram detalhadas e simplificadas, ampliando o acesso ao experimento com equipamentos e recursos disponíveis aos professores da educação básica, sem prejudicar a precisão das medidas. A exploração pedagógica foi dividida em uma sequência de 4 atividades, onde são investigados os conceitos físicos de produção e qualidade do som e o modelo de ondas sonoras em um tubo aberto, culminando na medida indireta da velocidade do som no ar. A maior parte das atividades foram centralizadas no programa DFTubo criado exclusivamente para o experimento. O programa controla os alto-falantes e microfones, e analisa os dados do experimento podendo rodar em *Windows* e *Linux*. Aproveitamos ainda oportunidades para introduzir uma série de discussões transversais, como a qualidade dos equipamentos empregados, diferenças entre medida direta e indireta, interpretação e análise de gráficos.

Palavras chave: Ensino de Física, Velocidade do Som, Espectro Sonoro, Tubos Ressonantes.

Rio de Janeiro
Maio de 2022

ABSTRACT

Sequence of activities on acoustics using spectral sound analysis

Victor Agostinho Pontes

Supervisors:

Dr. Germano Maioli Penello

Dr. Rodrigo Miranda Pereira

Abstract of master's thesis submitted to Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, Instituto de Física, Universidade Federal do Rio de Janeiro, in partial fulfillment of the requirements for the degree Mestre em Ensino de Física.

In this work, we propose an experiment for the decomposition of sound frequencies in a resonant tube, as well as how to approach it when teaching acoustics on a basic education level. The central aim is to explore acoustic resonances to obtain an experimental value for the speed of sound using only sheets of paper, tape measure, Scotch tape, microphone, headphones, and a computer, which will be enough to achieve excellent precision and accuracy. Detailed assembling and handling are provided and simplified as much as possible, which makes the experiment more widely accessible with resources usually available to basic education teachers while preserving the precision. The pedagogical approach is divided in a sequence of 4 activities where the physical features of sound are discussed and the model of sound waves in an open tube is introduced, culminating in an indirect measurement of the speed of sound in air. Most of the activities were centered on the software DFTubo created exclusively for the experiment. The software controls the loudspeakers and microphones, and analyzes the experiment data and can run on *Windows* and *Linux*. We also take the opportunity to introduce additional discussions such as the quality of the equipment employed, differences between direct and indirect measurement and graph analysis and interpretation.

Keywords: Physics Teaching, Speed of Sound, Sound Spectrum, Resonant Tubes.

Rio de Janeiro
Maio de 2022

Sumário

Lista de Figuras	x
Lista de Tabelas	xiii
1 Introdução	1
1.1 Estrutura da Dissertação	2
2 Conceitos Físicos e Matemáticos	4
2.1 Ondas	4
2.2 Acústica	13
2.3 Transformada de Fourier	17
2.4 Tratamento de dados	20
2.4.1 Método dos Mínimos Quadrados	20
2.4.2 Incerteza	22
3 Experimento de Decomposição de Frequências em um Tubo	24
3.1 Funcionamento do DFTubo	25
3.2 Ensaio Experimentais	31
3.2.1 Qualidade dos Equipamentos	31
3.2.2 Influência do Tubo	33
3.2.3 Tubos de Materiais Diferentes	36
3.2.4 Estimativa da Incerteza	38
3.2.5 Curvaturas no Tubo	40
3.2.6 Modelo de Tubos Fechados	42
3.2.7 Tubo Aberto Comparado com Tubo Fechado	44
3.2.8 Disposição dos Dispositivos	46
3.2.9 Influência da Temperatura	46
4 Aplicação em Sala de Aula	52
4.1 Aparato Experimental	52
4.2 Sequência de Atividades	55

4.2.1	Atividade 1	56
4.2.2	Atividade 2	58
4.2.3	Atividade 3	59
4.2.4	Atividade 4	61
4.2.5	Atividades Extras	62
4.3	Discussão da aplicação das atividades	64
5	Considerações Finais	68
5.1	Trabalhos futuros	70
	Referências bibliográficas	74
	Material Instrucional	78

Lista de Figuras

2.1	Representação de uma onda longitudinal e uma transversal.	5
2.2	Representação das interferências construtivas e destrutivas entre ondas.	7
2.3	Representação da função y_{R2} em diferentes instantes de tempo.	9
2.4	Representação da reflexão de uma onda na corda com extremidades em diferentes situações.	10
2.5	Representação dos três primeiros harmônicos em uma corda fixa nas duas extremidades.	11
2.6	Representação dos três primeiros harmônicos com antinodo e nodo nas extremidades.	13
2.7	Exemplos de ondas sonoras provocadas por diferentes instrumentos e com a mesma nota, figura reproduzida de HOLLIS [12].	16
2.8	Análise de uma onda particular sendo formada pela soma de funções seno.	18
2.9	Resultado da transformada de Fourier de uma onda particular, como mostrada na Fig. 2.8(c), sendo formada pela soma de funções seno.	19
3.1	Representação gráfica da disposição dos equipamentos.	26
3.2	Janela do programa DFTubo.exe.	26
3.3	Imagem apresentada dentro do programa quando selecionado o botão “Montagem experimental”.	28
3.4	Exemplo de ondas ressonantes em um tubo aberto.	29
3.5	Exemplo de um gráfico gerado pelo programa e um máximo de pico de intensidade destacado com o cursor do <i>mouse</i>	29
3.6	Inserindo os dados das frequências na coluna B.	30
3.7	Simulação da disposição dos equipamentos no ensaio experimental da qualidade dos alto-falantes e microfone.	32

3.8	Resultado da análise de qualidade dos equipamentos, onde o item (a) combina o AF1 com M1, item (b) combina AF1 com M2, item (c) combina AF2 com M1 e o item (d) combina o AF2 com M2.	34
3.9	Resultado da análise do som ambiente (a), do áudio sem tubo (b) e com o tubo (c).	35
3.10	Resultado da análise espectral do som com tubo de papel (a), de alumínio (b) e de PVC (c).	37
3.11	Procedimento para estimar a incerteza da frequência.	39
3.12	Representação gráfica da disposição dos equipamentos no ensaio experimental da mangueira.	40
3.13	Resultado da análise do som usando uma mangueira entre o alto-falante e o microfone, onde a mangueira está esticada em (a), a mangueira com 1 volta em (b), com 3 voltas em (c) e com 5 voltas em (d).	41
3.14	Representação gráfica da disposição dos equipamentos no ensaio experimental do tubo fechado.	42
3.15	Resultado da análise do tubo fechado, onde o item (a) foi tampado com o dedo, item (b) com a tampa de garrafa PET, (c) com fita adesiva e (d) ficou totalmente aberto.	43
3.16	Resultado da análise do experimento usando um tubo aberto e fechado mantendo os dispositivos na mesma extremidade. . .	45
3.17	Resultado da análise do som usando um tubo aberto com os dispositivos em extremidades opostas e na mesma extremidade.	47
3.18	Disposição real dos equipamentos no ensaio experimental da temperatura.	49
3.19	Resultado da análise da velocidade do som em função da temperatura.	51
4.1	Disposição real dos equipamentos.	53
4.2	Ilustração de alguns passos da produção do tubo de papel A4.	54
4.3	Disposição real dos equipamentos nas duas primeiras atividades.	56
4.4	Resultado da análise com as pré-configurações.	57
4.5	Resultado da análise com emissão contínua.	58
4.6	Definindo a melhor faixa de frequência.	60
4.7	Resultado da análise com o tubo.	60
4.8	Analisando um áudio externo.	63
4.9	Resultado 1 obtido por um dos estudantes.	65
4.10	Resultado 2 obtido por um dos estudantes.	67
5.1	Aplicação do experimento para medidor de vazão.	70

5.2	Simulação do protótipo para auxiliar o teste de posição e ângulo do microfone.	72
-----	--	----

Lista de Tabelas

3.1	Análise das disposições dos picos selecionados do tubo com equipamentos na mesma extremidade e em extremidades opostas.	48
3.2	Análise das medidas da velocidade do som para cada temperatura.	50

Capítulo 1

Introdução

Estamos cercados de ruídos, barulhos e sons. Percebemos inúmeros aparelhos eletrônicos que emitem som, como televisões, rádios, computadores, *smartphones*, e até os que não têm a emissão de som como objetivo principal, como o “tic-tac” dos relógios. O som sempre esteve e está presente no nosso cotidiano. Às vezes, trata-se somente de um ruído de fundo, como o barulho do ventilador que frequentemente passa despercebido por já estarmos habituados, mas ele sempre está presente.

O som pode ser explorado de diversas maneiras e sob vários aspectos no ensino de física. Em particular, quando abordado em tubos sonoros, percebemos uma falta de exploração e discussão aprofundada do tema na maior parte dos livros e apostilas dos sistemas de ensino básico.

Por conta disso, esta dissertação tem como objetivo apresentar uma sequência de atividades que utiliza um experimento de decomposição de frequências do som em um tubo para o ensino de acústica. Serão discutidos os conceitos físicos, matemáticos e de tratamento de dados além de explorar limites e aplicações do experimento trabalhado.

É importante destacar que existe uma ampla discussão na literatura sobre os conceitos básicos que serão apresentados, inclusive existem experimentos bem interessantes que abordam o tema de acústica e são excelentes na discussão dos fenômenos envolvidos. O que diferencia esta dissertação é o programa

desenvolvido para a sequência de atividades que será proposta aos estudantes e a disponibilidade de um roteiro de aplicação, guiando o professor e os estudantes para realização das atividades.

Os artigos de Cavalcante [1], Saab [2] e Pizetta [3] são ótimos exemplos de trabalhos que descrevem os fenômenos sonoros em tubos. Todos os citados descrevem o experimento do tubo de Kundt, que facilita a “visualização” dos harmônicos formados no tubo. A dissertação de Souza [4] também explora outros experimentos além do tubo de Kundt, evidenciando uma sequência de ensino-aprendizagem sobre ondas sonoras. Como dito antes, nosso intuito é dar ao professor uma orientação de como abordar o experimento no ensino básico utilizando uma sequência de atividades como Souza, diferente dos artigos citados que centralizam a discussão no conceito físico do fenômeno.

Inclinados a favorecer uma alta reprodutibilidade do experimento, utilizamos materiais de fácil acesso com margem para adaptações. No contexto de pandemia vivido em 2020, a intenção era viabilizar a realização do experimento pelos alunos em casa com o próprio material. O professor pode optar em realizar a sequência de atividades durante a aula com os alunos ou apenas dar instruções de como o aluno pode realizar o experimento de casa, a depender da situação, contexto e da preferência do professor.

1.1 Estrutura da Dissertação

Este primeiro capítulo de introdução tem o propósito de anunciar o tema alvo e os objetivos da presente dissertação, além de relacionar com alguns trabalhos existentes na literatura e apontar o diferencial da dissertação.

No capítulo 2, descrevemos e vinculamos os conceitos básicos, fundamentais para o entendimento do tema alvo. No nosso caso, optamos por explorar o experimento de decomposição de frequências do som em um tubo. Logo, os conceitos físicos e matemáticos trabalhados serão relacionados ao estudo de ondas, interferências, ondas estacionárias, acústica, qualidades do som, transformada de Fourier e tratamento de dados utilizando o método dos mínimos quadrados e ao conceito de incerteza de uma medida.

No capítulo 3, discriminamos o experimento que será trabalhado. Nesse

capítulo também apresentamos e discutimos alguns ensaios experimentais que tiveram o objetivo de verificar dependências com algumas grandezas físicas, a precisão e aplicações do experimento.

No capítulo 4, selecionamos as possíveis aplicações do experimento a serem trabalhadas no ensino básico e separamos em atividades que servirão como um guia ao professor, tanto para aprender sobre o experimento como para aplicá-lo em sala de aula.

No capítulo 5, realizamos um balanço do trabalho, expondo os objetivos propostos e alcançados, discutindo os possíveis motivos para aqueles que não foram alcançados e investigamos soluções. Exploramos também as dificuldades enfrentadas pelos estudantes durante a realização do experimento e as resoluções atingidas.

Capítulo 2

Conceitos Físicos e Matemáticos

Neste capítulo, abordaremos os conceitos físicos e matemáticos que são necessários para entender o experimento de decomposição de frequências em um tubo, que será descrito no capítulo 3. O tema geral da física, como o nome do experimento sugere, é o estudo de ondas. Na seção 2.1 aprofundaremos os conceitos como a definição de onda, equação da onda, interferências, ondas estacionárias e na seção 2.2 particularizamos a discussão para o caso de ondas sonoras, que é conhecido como *acústica*.

Na seção 2.3 descrevemos os conceitos matemáticos de série e transformada de Fourier e na seção 2.4 nos preocupamos com o tratamento de dados, descrevendo o método dos mínimos quadrados e o conceito de incerteza da medida. Estes conceitos representam substancialmente o funcionamento do experimento e dos recursos computacionais que foram desenvolvidos especificamente para este fim.

2.1 Ondas

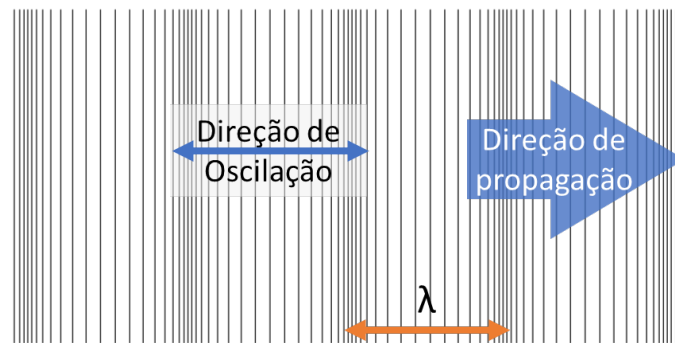
Para entendermos os fenômenos sonoros, que é o escopo do experimento, precisamos primeiro da definição de onda. De acordo com Nussenzveig [5]:

“...uma onda é qualquer sinal que se transmite de um ponto a

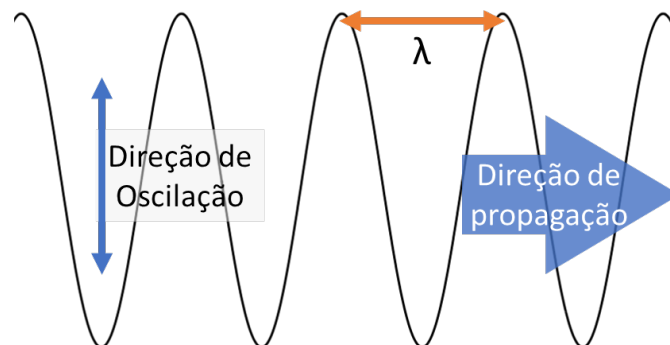
outro de um meio, com velocidade definida. Em geral, fala-se de onda quando a transmissão do sinal entre dois pontos distantes ocorre sem que haja transporte direto de matéria de um desses pontos ao outro.”

Este referido sinal pode ser interpretado como uma perturbação cuja propagação chamamos de onda. Como claramente anunciado, essa perturbação ocorre sem que haja um transporte direto de matéria, mas havendo transmissão de energia.

Uma onda pode ser classificada quanto à sua natureza. Se ela precisa de um meio material para se propagar é denominada onda mecânica. Por outro lado, a onda eletromagnética é caracterizada por se propagar em qualquer meio, material ou não, pelo fato de se propagar perturbando o campo magnético e elétrico, de acordo com Hewitt [6].



(a) Onda longitudinal.



(b) Onda transversal.

Figura 2.1: Representação de uma onda longitudinal e uma transversal.

Outra classificação importante é quanto à direção de oscilação. Ondas que têm a mesma direção de oscilação e propagação, são denominadas de ondas longitudinais, Fig. 2.1(a). No entanto, as ondas que têm direção de propagação diferente da direção de oscilação, são denominadas transversais, Fig. 2.1(b).

O comprimento de onda λ é a distância mínima entre repetições da forma de onda. Para uma onda mecânica longitudinal, o comprimento de onda pode ser representado pela distância entre duas regiões de baixa ou alta pressão sucessivos, como mostrado na Fig. 2.1(a). Para onda transversal, o comprimento de onda pode ser representada como a distância de dois vales ou picos sucessivos, como mostrado na Fig. 2.1(b).

Como apresentado em Sears [7], uma onda longitudinal pode ser representada em um gráfico de forma similar à onda transversal, desde que a análise de um pico seja compreendido como um ponto de alta pressão e um vale como uma região de baixa pressão. Utilizaremos esta representação por facilitar a visualização da onda, como veremos a seguir.

Em determinadas situações, algumas ondas mais complexas podem ser longitudinais e transversais simultaneamente. O artigo de Silveira [8] descreve em detalhes a propagação de ondas marítimas e dos tsunamis, que são ondas mistas, transversais e longitudinais simultaneamente.

A propagação de uma onda unidimensional é representada por uma função $y(x,t)$ que depende da posição x e do tempo t . Esta função deve obedecer à chamada equação de ondas

$$\frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = 0, \quad (2.1)$$

onde v é a velocidade de propagação da onda.

Como pode-se verificar por substituição direta na eq. 2.1, qualquer função das variáveis x e t na forma $f(x + vt)$ ou $f(x - vt)$ será solução da equação de ondas, onde o sinal negativo indica que a onda se desloca na direção positiva do eixo x e quando positivo a onda desloca-se no sentido negativo do eixo.

Um tipo de onda muito importante, que aparece naturalmente em aplica-

ções e na descrição de fenômenos naturais como o som, é a onda harmônica. Trata-se do caso particular em que a função de onda é descrita por uma função harmônica e pode ser escrita na forma

$$f(x,t) = A \operatorname{sen}(kx - \omega t + \delta), \quad (2.2)$$

satisfazendo como solução a equação 2.1, onde A é uma constante que define a amplitude de oscilação, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ é o número de onda, λ , como já mencionado, é o comprimento de onda, ω é a frequência angular e δ é a fase inicial da onda.

As ondas podem sofrer interferências. A Fig. 2.2(a) representa duas ondas de mesma intensidade e propagando-se em sentidos contrários. No encontro ocorre uma soma de amplitudes caracterizando uma interferência construtiva. A Fig. 2.2(b) representa uma interferência destrutiva, onde no encontro das ondas ocorre uma situação de anulação momentânea. Após a interferência, as ondas continuam a se propagar normalmente.

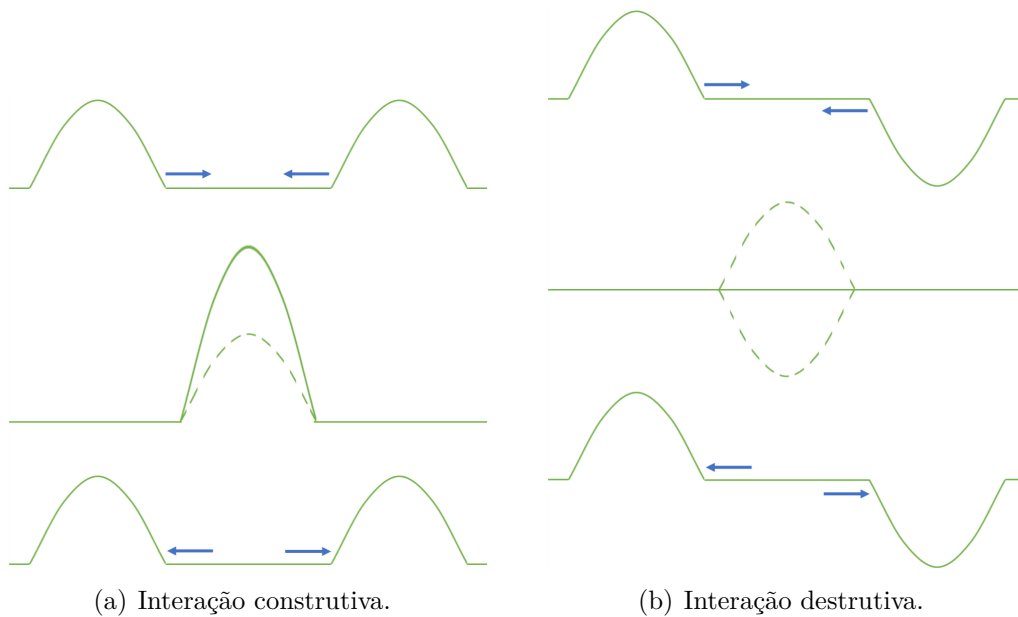


Figura 2.2: Representação das interferências construtivas e destrutivas entre ondas.

As interferências podem ser explicadas pelo princípio da superposição,

onde a soma de duas soluções da eq. 2.1 também é solução. Quando duas ondas interferem-se o resultado é simplesmente a soma delas por se tratar de uma equação linear.

Desta forma, de acordo com Halliday [9], ao analisarmos a interferência entre duas ondas harmônicas y_1 e y_2 com mesma frequência e mesmo comprimento de onda que se propagam no mesmo sentido

$$\begin{cases} y_1(x,t) = A \operatorname{sen}(kx - \omega t) \\ y_2(x,t) = A \operatorname{sen}(kx - \omega t + \delta), \end{cases} \quad (2.3)$$

pelo princípio da superposição

$$y_{R1}(x,t) = y_1 + y_2 = \left[2A \cos\left(\frac{\delta}{2}\right) \right] \operatorname{sen}\left(kx - \omega t + \frac{\delta}{2}\right), \quad (2.4)$$

obtemos uma onda resultante, y_{R1} , que se propaga com uma modulação.

Na situação de duas ondas que se propagam em sentidos opostos, podemos manter y_1 e admitir o termo ωt positivo em y_2 . Para facilitar a discussão, colocaremos a fase inicial $\delta = 0$ e obtemos a seguinte onda resultante, y_{R2} ,

$$y_{R2}(x,t) = [2A \operatorname{sen}(kx)] \cos(\omega t). \quad (2.5)$$

O termo $[2A \operatorname{sen}(kx)]$ funciona como uma amplitude que modula as oscilações ao longo do tempo t para cada posição x . Podemos destacar que $\operatorname{sen}(kx)$ apresenta-se nulo nas posições $x_{\text{nodos}} = \frac{n\pi}{k}$ para $n \in \mathbb{N}$, que correspondem aos nodos, regiões que não oscilarão.

Em contrapartida, existem posições que atingem o valor máximo/mínimo de $2A$ quando $x_{\text{antinodos}} = \frac{(n + \frac{1}{2})\pi}{k}$ para $n \in \mathbb{N}$, que correspondem aos antinodos, regiões que formam picos ou vales. A ilustração da Fig. 2.3 representa esta função em diferentes instantes do tempo, gerando o que chamamos de onda estacionária.

As ondas sofrem inúmeras reflexões seja na corda ou no tubo quando atingem os limites ou interfaces do meio, ou dos meios, em que se propaga. No caso de uma corda fixa ou um tubo fechado, a onda sofre uma inversão

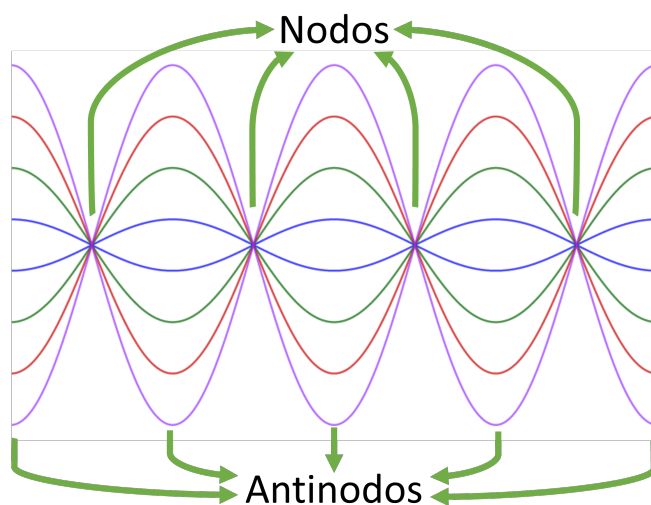


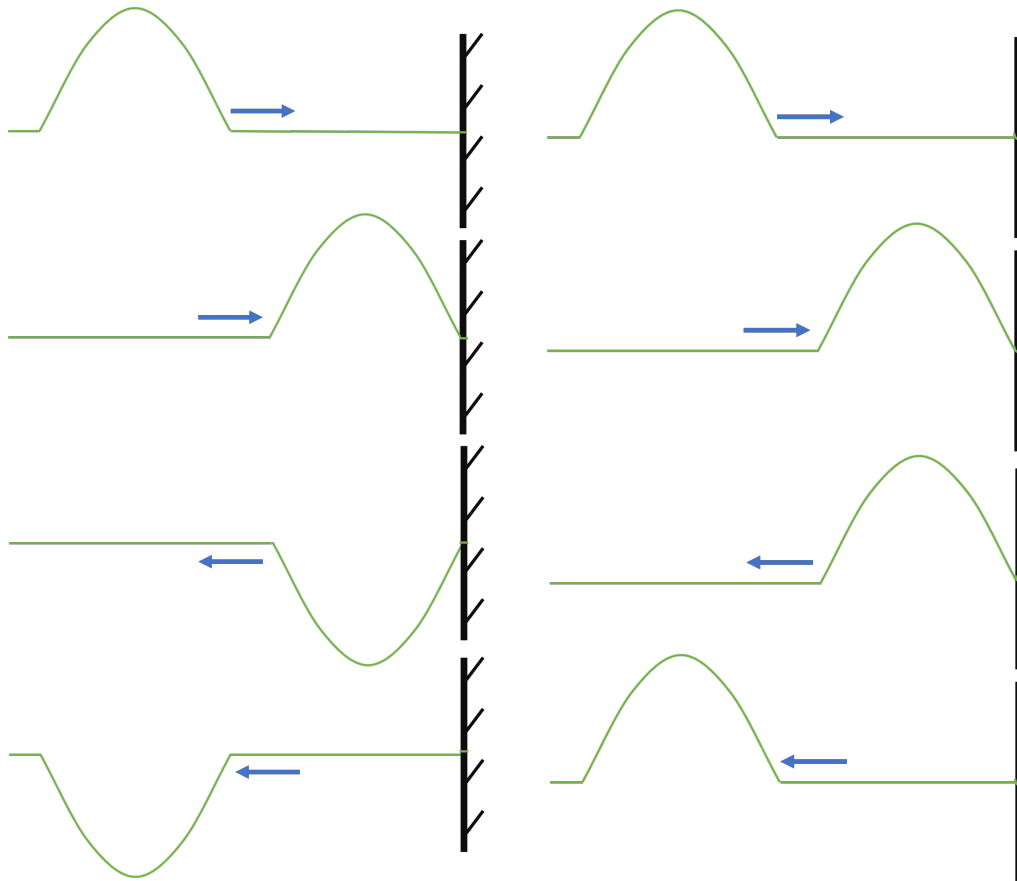
Figura 2.3: Representação da função y_{R2} em diferentes instantes de tempo.

após a reflexão pelo fato da extremidade oferecer uma resistência. Quando a extremidade não oferece resistência, seja no caso da corda não estar fixa ou o tubo estar aberto, a onda não sofrerá uma inversão com a reflexão. Podemos perceber estas duas situações na Fig. 2.4, onde o item (a) representa a reflexão de uma onda na corda com a extremidade fixa e o item (b) representa a reflexão com a extremidade solta.

Uma onda estacionária pode ser formada de diversas formas. Um exemplo pode ser dado utilizando uma corda, as diferentes configurações nas extremidades, soltas ou fixas, podem gerar ondas estacionárias. Essas configurações são chamadas de condições de contorno e elas influenciam por completo o formato da onda estacionária permitida, formando um nodo ou antinodo nas extremidades.

Podemos gerar uma onda estacionária também com um tubo, usando ondas sonoras. Assim como na corda, também podemos forçar uma condição de contorno no tubo tampando a(s) extremidade(s) ou não. No exemplo da Fig. 2.3 o tubo precisaria estar totalmente aberto ou uma corda com as duas extremidades livres para poder gerar aquela configuração.

Em um tubo ou corda com comprimento ℓ e admitido uma condição de contorno que provoque nodos ou antinodos nas extremidades, temos frequên-



(a) Reflexão de uma onda na corda com uma extremidade fixa.

(b) Reflexão de uma onda na corda com uma extremidade solta.

Figura 2.4: Representação da reflexão de uma onda na corda com extremidades em diferentes situações.

cias específicas e discretas que admitem solução para a questão. Este conjunto de frequências específicas é o que chamamos de harmônicos da onda e depende do comprimento do tubo ou corda que está sendo utilizado.

No caso de uma corda fixa, podemos visualizar os três primeiros harmônicos que podem ser formados na Fig. 2.5. A ilustração da Fig. 2.5(a) representa o primeiro, a Fig. 2.5(b) representa o segundo e a Fig. 2.5(c) representa o terceiro harmônico. Não há um número limite de harmônicos que a corda ou tubo podem admitir, só precisamos gerar uma onda com a frequência suficiente para alcançar o harmônico “n” desejado.

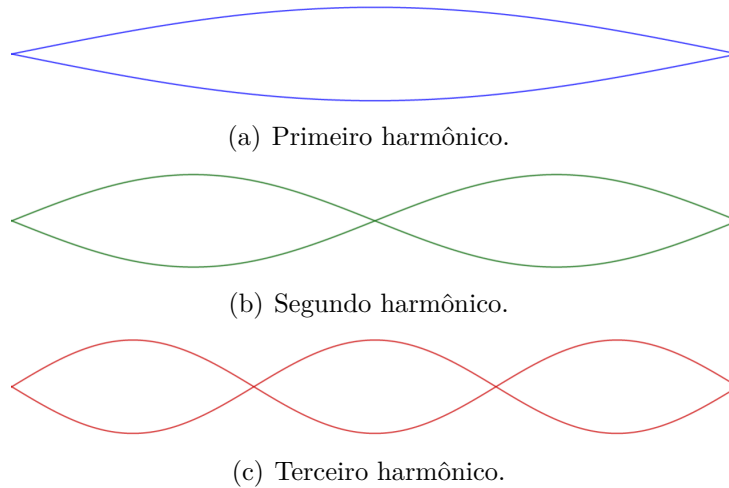


Figura 2.5: Representação dos três primeiros harmônicos em uma corda fixa nas duas extremidades.

Sabendo o comprimento ℓ de um tubo ou corda e a condição de contorno, podemos obter a respectiva frequência de cada harmônico algebricamente ou geometricamente. De forma algébrica, podemos utilizar a equação 2.5 e analisar o termo

$$\mathbb{A}(x) = 2 A \text{sen}(k x), \quad (2.6)$$

onde, anteriormente chamamos \mathbb{A} de amplitude que modula as oscilações ao longo do tempo de cada posição.

Adotando as condições de contorno, onde $\mathbb{A}(0) = \mathbb{A}(\ell) = 0$, obtemos com a primeira condição

$$\mathbb{A}(0) = 0, \quad (2.7)$$

e a segunda condição leva ao resultado

$$\mathbb{A}(\ell) = 2A \operatorname{sen}(k\ell) = 0. \quad (2.8)$$

Portanto, as condições são satisfeitas se k admitir valores discretos obedecendo

$$k_n = \frac{n\pi}{\ell}, \quad (2.9)$$

onde $n \in \mathbb{N}$. Relacionando $\omega_n = \frac{n\pi v}{\ell}$ e $\omega = 2\pi\nu$, podemos obter as frequências respectivas aos harmônicos n

$$\nu_n = \frac{nv}{2\ell}. \quad (2.10)$$

Este resultado mostra que precisamos de frequências discretas e específicas para alcançar os harmônicos referentes ao comprimento ℓ utilizado na corda ou no tubo. Mencionaremos bastante a equação 2.10 ao longo dos próximos capítulos, é de extrema importância para as atividades posteriores.

A forma geométrica é mais intuitiva. Ao observar a Fig.2.5 percebemos que o primeiro harmônico só admite metade de um comprimento de onda, o segundo harmônico é o próprio comprimento de onda, o terceiro harmônico precisa de $\frac{3}{2}$ do comprimento de onda e seguindo o raciocínio, por indução, podemos obter a equação

$$\lambda_n = \frac{2\ell}{n}, \quad (2.11)$$

de acordo com o esperado.

Além deste modelo explicar o caso da onda estacionária na corda fixa nas duas extremidades ou um tubo totalmente fechado, formando nodos nas extremidades, este modelo também descreve a corda com as duas extremidades livres ou até mesmo um tubo totalmente aberto.

O modelo também descreve o caso das extremidades diferentes, como um tubo parcialmente aberto ou uma corda fixa apenas em uma ponta. Mas o padrão da onda gerada nestes casos seria um nodo e um antinodo em cada extremidade, como mostrado na Fig. 2.6.

Com o mesmo argumento geométrico utilizado anteriormente, podemos

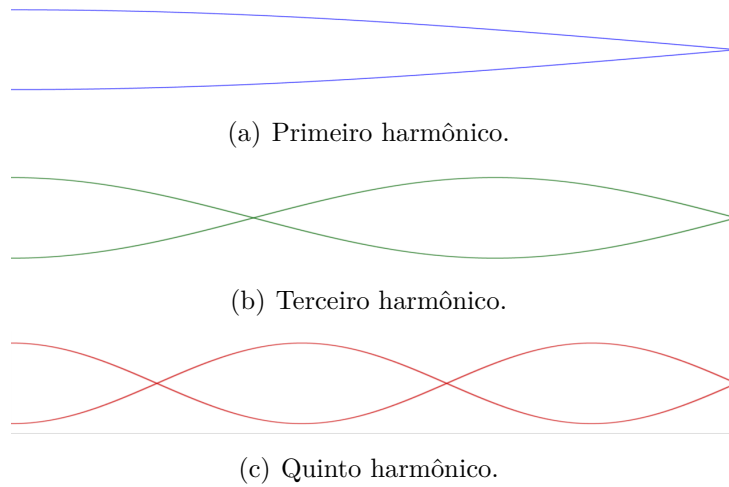


Figura 2.6: Representação dos três primeiros harmônicos com antinodo e nodo nas extremidades.

admitir que a equação

$$\nu_n = \frac{nv}{4\ell}, \quad n = 2k + 1, \quad k \in \mathbb{N} \quad (2.12)$$

descreve o caso das extremidades diferentes e a partir dela podemos extrair as frequências específicas para cada harmônico n para o tubo ou corda utilizada. Destacamos que nessa configuração só obtemos harmônicos ímpares, o item (a) representa o primeiro, item (b) representa o terceiro e (c) representa o quinto harmônico.

Até este ponto, discutimos casos gerais de ondas aplicados na corda e em tubos. Uma vez que estamos interessados em um experimento de ondas sonoras em um tubo, na próxima seção particularizaremos a discussão para fenômenos acústicos, introduzindo conceitos que serão úteis à nossa análise.

2.2 Acústica

O tema acústica tem o objetivo de descrever os fenômenos físicos relacionados ao som. Como bem detalhado em Randall [10], o som é uma onda mecânica e longitudinal, apresentada na seção 2.1. Isto significa que o som

precisa de um meio material para se propagar e tem a mesma direção de propagação e oscilação, como mostrado na Fig. 2.1(a).

O som é a propagação de uma perturbação em um meio material, seja sólido ou fluido, e apresenta uma velocidade que depende das propriedades mecânicas do meio. Para entendermos a dinâmica dessa propagação, vamos supor um tubo retilíneo para propagação unidimensional, com diâmetro Φ e preenchido por um gás. Este gás está submetido a uma pressão de equilíbrio uniforme p_0 e tem uma densidade de equilíbrio ρ_0 definida.

De acordo com Feynman [11], podemos perceber que a propagação da onda sonora está associada a três fatores: o deslocamento de matéria¹, a variação de densidade e a variação de pressão. Um exemplo ocorre quando comprimimos um gás por uma das extremidades do tubo (deslocamento de matéria), e provocando uma variação na densidade. Essa variação de densidade resulta em uma variação de pressão, de modo que o gás é localmente expelido e portanto deslocado. Isso reinicia o ciclo e assim a onda se propaga.

Como podemos notar em Sears [7], a velocidade de propagação da onda sonora depende do meio em que ela está se propagando. A dependência do meio é consequência dos fatores citados, os deslocamentos de matéria e as variações de densidade e pressão produzem uma perturbação no meio, gerando compressões e expansões no gás. Para um gás ideal, é possível mostrar que [5]

$$v_{som} = \sqrt{\frac{\gamma p_0}{\rho_0}}, \quad (2.13)$$

onde $\gamma = \frac{C_p}{C_V}$ é o coeficiente de expansão adiabática e C_p e C_V são respectivamente os calores específicos a pressão e volume constantes, p_0 é a pressão inicial e ρ_0 é a densidade inicial.

Utilizando a conhecida equação de Clapeyron

$$pV = nRT, \quad (2.14)$$

e admitindo o ar como um gás ideal, podemos realizar algumas substituições

¹A palavra “deslocamento” está empregada como oscilação de matéria em torno de um ponto, sem que haja o transporte livre de matéria.

na equação 2.13 para chegar em

$$v_{som} = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}, \quad (2.15)$$

onde $R = 0,082 \text{ atm L/mol K}$ é a constante universal dos gases ideais, T é a temperatura e M é a massa molar do gás ao nível do mar. O que demonstra a dependência da velocidade do som com a temperatura e reforça a dependência do meio. No caso do ar, assim como Nussenzveig [5], admitindo $\gamma \approx 1,4$, a velocidade do som é, aproximadamente, 343 m/s nas condições normais de temperatura e pressão, que está compatível com o observado.

A onda sonora também tem propriedades como a intensidade ou volume, altura ou tom e timbre. A intensidade sonora para uma onda harmônica é definida como a energia média que atravessa uma seção do tubo, por unidade de tempo e área. Matematicamente, podemos descrever como

$$I = \frac{1}{2} \frac{\mathcal{P}^2}{\rho_0 v}, \quad (2.16)$$

onde $\mathcal{P} = \rho_0 v^2 k U$ é a amplitude das oscilações de pressão e U é o deslocamento, de onde vê-se que a intensidade da onda sonora depende do quadrado da amplitude.

A altura ou tom da onda sonora está relacionada com a frequência. A sensação de som agudo é produzida por alta frequência e a de grave por baixa frequência. Como estamos interessados nas ondas harmônicas e periódicas, a equação

$$v = \lambda \nu, \quad (2.17)$$

deixa evidente a relação inversamente proporcional da frequência ν e o comprimento de onda λ . Logo, uma onda grave tem um grande comprimento de onda e uma onda aguda tem um pequeno comprimento de onda, para o mesmo meio.

O timbre é conhecido também pela “coloração” do som. Além da relação da intensidade com a amplitude e do tom com a frequência, podemos dizer que o timbre está relacionado com a forma da onda sonora. Essa forma da

onda sonora permite diferenciarmos dois sons emitidos por instrumentos distintos, como piano e violino mesmo mantendo a intensidade e a nota musical, como a Fig. 2.7(a).



(a) Onda sonora provocada por um violino.



(b) Onda sonora provocada por um piano.

Figura 2.7: Exemplos de ondas sonoras provocadas por diferentes instrumentos e com a mesma nota, figura reproduzida de HOLLIS [12].

Isto acontece pelo fato dos instrumentos produzirem um som com forma característica para cada onda sonora gerada. O próprio corpo é capaz de produzir som e cada pessoa consegue gerar uma onda sonora particular e distinguível com as cordas vocais, comumente chamada de “voz”.

Independente da forma da onda, podemos descrevê-la como uma soma de funções periódicas e extrair as frequências que compõem aquele som. Este conceito é um dos mais importantes sobre o funcionamento do experimento que iremos explorar e o processo para extração das frequências chama-se transformada de Fourier, processo este que aprofundaremos e descreveremos na próxima seção.

Portanto, chegamos à conclusão de que o som é uma onda mecânica, longitudinal, cuja velocidade de propagação depende do meio e da temperatura, conforme a equação 2.15, e que, além disso, é caracterizada por propriedades, como intensidade, tom e timbre.

2.3 Transformada de Fourier

Para entendermos a transformada de Fourier, precisamos primeiro entender o conceito de série de Fourier. Basicamente, qualquer função periódica $f(t)$, por mais estranha que ela possa parecer, pode ser descrita como uma soma de funções senoidais. Isso pode ser muito conveniente para representar uma ampla gama de funções a partir de senos e cossenos que têm propriedades que facilitam a utilização.

De acordo com as séries de Fourier podemos escrever matematicamente qualquer função $f(t)$ como [13]

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\omega_0 t) + b_n \text{sen}(n\omega_0 t)], \quad (2.18)$$

onde $\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$, a_0 , a_n e b_n são parâmetros dados por

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} f(t) dt, \quad (2.19)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} f(t) \cos(n\omega_0 t) dt, \quad (2.20)$$

$$b_n = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} f(t) \text{sen}(n\omega_0 t) dt. \quad (2.21)$$

É comum a limitação do índice somado n , valendo-se como um valor finito na prática. Entretanto, quanto maior o número de termos, melhor será o ajuste à função original sendo ilimitado o valor que n pode assumir.

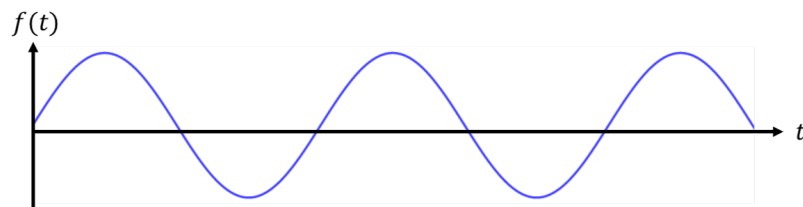
Fixada essa possibilidade de ajustarmos à função o quanto desejarmos, que não é trivial, podemos discutir o conceito de transformada de Fourier. É possível encontrar uma ampla discussão do assunto em Butkov [13]. Contudo, concentraremos este recurso aplicado em ondas sonoras, que é o foco do experimento e do aplicativo computacional que foram desenvolvidos e serão utilizados. Portanto, o objetivo agora é analisar qualquer função e extrair as frequências angulares que compõem aquela função. Lembrando que a função que estamos nos referindo pode ser uma função $f(t)$ qualquer, inclusive uma

função que descreve uma onda sonora.

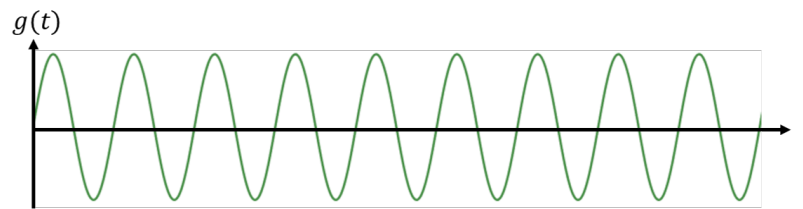
Para realizar este procedimento, utilizaremos

$$F(\omega) = \mathcal{F}\{f(t)\} \equiv \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt, \quad (2.22)$$

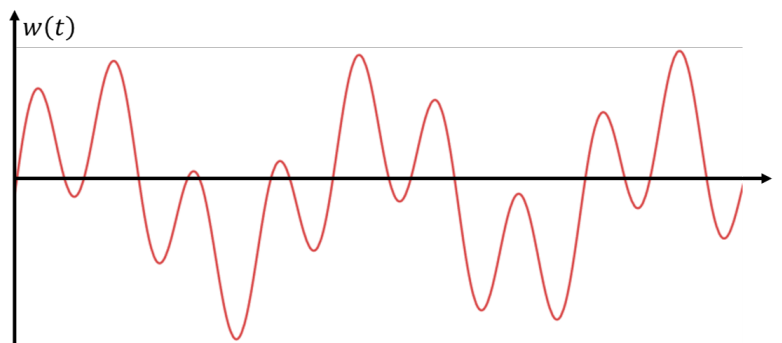
onde $e^{-i\omega t} = \cos(\omega t) - i \sin(\omega t)$. De acordo com a equação 2.22, obtemos uma função que depende da frequência angular ω . Logo, somos capazes de extrair as frequências que compõem a função $f(t)$ sabendo que $\nu_n = \frac{\omega_n}{2\pi}$.



(a) Primeira função $f(t) = \text{sen}(500\pi t)$.



(b) Segunda função $g(t) = \text{sen}(18000\pi t)$.



(c) Soma das funções $w(t) = f(t) + g(t)$.

Figura 2.8: Análise de uma onda particular sendo formada pela soma de funções seno.

Este recurso matemático será de extrema importância para o experimento de decomposição de frequências em um tubo, por ser crucial à análise das

frequências que compõem o som após a passagem por um tubo ressonante e a relação com timbre, que é um dos assuntos alvos da seção 2.2.

Para verificar essa relação, experimentalmente emitimos uma onda sonora, com formato bem particular, como na Fig. 2.8(c), que é formada pela soma das funções do item (a) e (b) da mesma figura. Neste caso, vamos usar como exemplo a frequência angular do item (a) como $\omega_A = 5000\pi$ rad/s e do item (b) como $\omega_B = 18000\pi$ rad/s, onde a frequência do som emitido é, respectivamente $\nu_A = 2500$ Hz e $\nu_B = 9000$ Hz². Portanto, quando realizamos uma transformada de Fourier na função que descreve a onda sonora do item (c), obtemos um gráfico de intensidade por frequência onde se apresentarão picos em 2500 Hz e 9000 Hz por fazerem parte das frequências que compõem o som emitido, como na Fig. 2.9.

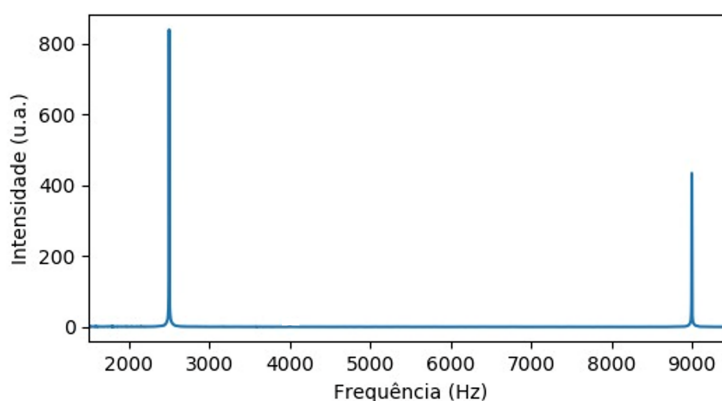


Figura 2.9: Resultado da transformada de Fourier de uma onda particular, como mostrada na Fig. 2.8(c), sendo formada pela soma de funções seno.

O resultado mostra nitidamente as frequências que compõem o som emitido e também podemos perceber a intensidade de cada frequência. Mesmo definindo, no nosso caso, o mesmo volume de emissão das frequências, observamos que ν_B tem quase a metade da intensidade da frequência de ν_A por uma questão de qualidade experimental. O exemplo apresentado é um resultado experimental, onde podemos emitir um som com uma frequência

²O aparato experimental e o programa utilizado será discutido no capítulo 3.

definida, captar o som com um microfone e realizar uma análise da transformada de Fourier para obter as componentes.

Como dito no início do capítulo, o experimento envolve muitos conceitos físicos e matemáticos que serão explorados ao máximo no capítulo 3, inclusive discutimos esta questão levantada das intensidades diferentes, que relacionam-se com a qualidade dos dispositivos utilizados, discutida na subseção 3.2.1. Aplicações pedagógicas com experimentos relacionando a transformada de Fourier e timbre, podem ser encontradas no artigo de Monteiro [14].

2.4 Tratamento de dados

Além dos conceitos físicos e matemáticos descritos até aqui é importante discutir o tratamento dos dados que serão obtidos durante a realização do experimento. Nesta seção vamos explorar o conceito de ajuste linear a partir do método dos mínimos quadrados e estimar as incertezas das grandezas envolvidas, essenciais para o experimento.

2.4.1 Método dos Mínimos Quadrados

O método dos mínimos quadrados (MMQ), é um processo em que pode ser calculada a reta que melhor se ajusta a um conjunto de dados

$$y(x) = a x + b, \tag{2.23}$$

onde a é o coeficiente angular, que está relacionado com o ângulo que a reta faz com a horizontal, e b é o coeficiente linear, que determina onde a reta corta o eixo vertical, ou seja, o valor de $y(0)$. Os dados obtidos com a realização do experimento serão representados em um eixo bidimensional no nosso experimento.

Assim como Oguri [15] descreve, este método funciona utilizando como critério que a soma dos desvios ao quadrado, obtidos pela diferença entre o valor experimental e do modelo, deve ser o menor possível.

Suponha que estamos medindo uma grandeza y dependente de outra grandeza x , e temos um conjunto de N medidas $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_N, y_N)$. Se desejamos buscar a reta que melhor descreve a relação entre y e x , como na equação 2.23, o MMQ nos permite calcular o coeficiente angular da reta utilizando a equação

$$a = \frac{1}{\beta} \left(N \sum_{i=1}^N x_i y_i - \sum_{i=1}^N x_i \sum_{i=1}^N y_i \right), \quad (2.24)$$

e para calcular o coeficiente linear da reta, obedecemos a equação

$$b = \frac{1}{\beta} \left(\sum_{i=1}^N x_i^2 \sum_{i=1}^N y_i - \sum_{i=1}^N x_i \sum_{i=1}^N x_i y_i \right), \quad (2.25)$$

onde

$$\beta = N \sum_{i=1}^N x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N x_i \right)^2, \quad (2.26)$$

N é o número total de pontos e x_i e y_i é o par ordenado.

Por consequência de ser uma medida, o cálculo tanto do coeficiente angular quanto do coeficiente linear possuem uma incerteza associada. A incerteza do coeficiente angular Δa obedece a equação

$$\Delta a = \left[\frac{N}{\beta} (\Delta y)^2 \right]^{1/2}, \quad (2.27)$$

assim como também podemos calcular a incerteza do coeficiente linear Δb , que obedece a equação

$$\Delta b = \left[\frac{(\Delta y)^2}{\beta} \sum_{i=1}^N x_i^2 \right]^{1/2}, \quad (2.28)$$

onde Δy é a incerteza da medida da grandeza y .

O MMQ será utilizado no nosso experimento relacionando os dados experimentais obtidos, que são as frequências referentes aos harmônicos formados no tubo $\nu(n)$, com o modelo matemático de tubos abertos, descrito anteriormente pela equação 2.10. Dessa forma, ν se comportará como y , a variável

dependente e os harmônicos n como a variável independente, conseguindo comparar o coeficiente angular a com todos os múltiplos de n da citada equação e extraindo alguns resultados interessantes.

2.4.2 Incerteza

A relação da medida com a incerteza mencionada no final da seção anterior é um conceito primordial para qualquer medida. A incerteza precisa estar presente para mensurar um grau de confiança. Uma medida pode ser direta ou indireta. Ela é considerada direta quando o instrumento compara a grandeza a medir com outra da mesma espécie e indireta é quando a partir de outra grandeza extraímos a medida.

Um exemplo de medida direta é a aferição do comprimento de um objeto com uma régua e indireta quando a aferição de um comprimento é com a utilização de um ultrassom, onde precisa-se relacionar a velocidade de propagação do ultrassom com o tempo gasto de reflexão da onda para obter a medida de comprimento.

A determinação da incerteza de uma medida direta, em situações muito específicas³, pode ser adotada pela metade da menor divisão do instrumento utilizado para aferição. Para mensurar a incerteza de uma medida indireta da grandeza dependente $x(x_1, x_2, x_3, \dots, k)$, precisamos propagar as incertezas das grandezas independentes x_1, x_2, x_3, \dots, k , como pode ser encontrado na literatura em Vuolo [16]

$$\Delta x = \sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial x_1}\right)^2 \Delta x_1^2 + \left(\frac{\partial x}{\partial x_2}\right)^2 \Delta x_2^2 + \dots + \left(\frac{\partial x}{\partial k}\right)^2 \Delta k^2}, \quad (2.29)$$

onde Δx_1 e Δx_2 são as incertezas das grandezas x_1 e x_2 , respectivamente, e assim por diante, até a grandeza independente k .

Como exemplo do próprio experimento que utilizaremos, como já mencionado, vamos analisar os harmônicos formados em um tubo relacionando com as respectivas frequências $\nu(n)$ e a partir da equação 2.10 podemos relacionar

³Onde temos bem definida a leitura da medida com o instrumento [16].

a velocidade de propagação do som no ar $v = 2\ell a$ com o comprimento do tubo ℓ utilizado e o coeficiente angular a obtido pelo MMQ.

Portanto, de acordo com a equação 2.29, a incerteza que calculamos para a velocidade do som a partir da referida função será

$$\Delta v = 2 \sqrt{(\ell^2 \Delta a^2 + a^2 \Delta \ell^2)}, \quad (2.30)$$

onde $\Delta \ell$ é a incerteza do comprimento do tubo, Δa é a incerteza do coeficiente angular e Δv é a incerteza da velocidade do som.

No próximo capítulo, serão detalhados e explorados com maior profundidade o exemplo citado acima e o próprio funcionamento do experimento de aplicação. O alvo desta seção era explicitar que uma medida tem uma incerteza relacionada. Essa concepção é fundamental para avaliarmos se os dados obtidos são de boa qualidade e se estão coerentes com o esperado.

Capítulo 3

Experimento de Decomposição de Frequências em um Tubo

O experimento de decomposição de frequências em um tubo, como o nome sugere, é utilizado para análise espectral do som e para essa análise manipularemos um tubo. Tendo como base os conceitos físicos, matemáticos e de tratamento de dados descritos no capítulo 2, é possível analisarmos as frequências que compõem o som utilizando a transformada de Fourier e ainda podemos verificar o comportamento do som no interior de um tubo por meio dos modelos de ondas estacionárias. Todos estes conceitos serão fundamentais para alcançarmos a medida indireta da velocidade do som.

Como mencionado no capítulo 1, reforçamos que o experimento e a natureza dos fenômenos envolvidos já são devidamente conhecidos na literatura, como é o exemplo do artigo de Hirth [17] e o artigo de Molina-Coronell [18], que também conseguem determinar a velocidade do som com ferramentas do dia a dia com grande precisão. Hirth usa um *tablet* para o experimento, aumentando a reprodutibilidade por não precisar de um computador. Molina-Coronell consegue realizar o experimento com o alto falante e o microfone do próprio celular, aumentando ainda mais a capacidade de aplicação em escolas.

O presente capítulo tem como objetivo discutir e analisar a natureza dos fenômenos acústicos e selecionar os conceitos que podem ser explicados de

modo acessível aos estudantes do ensino médio. Utilizaremos uma sequência de atividades para aplicação, como veremos no capítulo 4. As seguintes seções deste capítulo dão ênfase aos materiais necessários, ao funcionamento do experimento e é discutida a natureza do fenômeno realizando alguns ensaios experimentais.

3.1 Funcionamento do DFTubo

Para entendermos o experimento, iniciaremos com a explicação de como é realizada a montagem experimental. Serão necessários apenas quatro itens para o correto funcionamento do experimento, listados a seguir:

1. Alto-falante;
2. Microfone;
3. Computador (muitos computadores têm microfone e alto-falante embutidos e podem ser utilizados, se um deles for móvel);
4. Tubo (com aproximadamente 2 cm de diâmetro e 75 cm de comprimento).

O alto-falante é colocado próximo a uma das extremidades do tubo e um microfone próximo à outra. Dessa forma, as ondas sonoras emitidas pelo alto-falante para o interior do tubo serão captadas pelo microfone, ambos conectados ao computador, como ilustra a Fig. 3.1.

O computador deve estar com o programa DFTubo (acrônimo de decomposição de frequências em um tubo) devidamente instalado. O programa foi desenvolvido especificamente para a sequência de atividades descrita no capítulo 4 e o *download* pode ser realizado no endereço <https://www.if.ufrj.br/~gpenello/Softwares/DFTubo/DFTubo.exe>.

O DFTubo tem o objetivo de tratar os dados obtidos e também de gerar os resultados a serem analisados. Para isso, ele controla o alto-falante para emitir um som de maneira bem específica e controlada. Como mencionado,



Figura 3.1: Representação gráfica da disposição dos equipamentos.

ele será o responsável por tratar os dados que serão captados pelo microfone e fornecerá um resultado em forma de gráfico.

Ao executar o arquivo DFTubo.exe, aguardamos o carregamento do programa (é possível que demore alguns segundos até que ele se apresente). Uma janela se abrirá com um espaço para um gráfico de intensidade da onda sonora como função da frequência ($I \times \nu$) no lado esquerdo e algumas configurações no lado direito, como mostrado na Fig. 3.2.

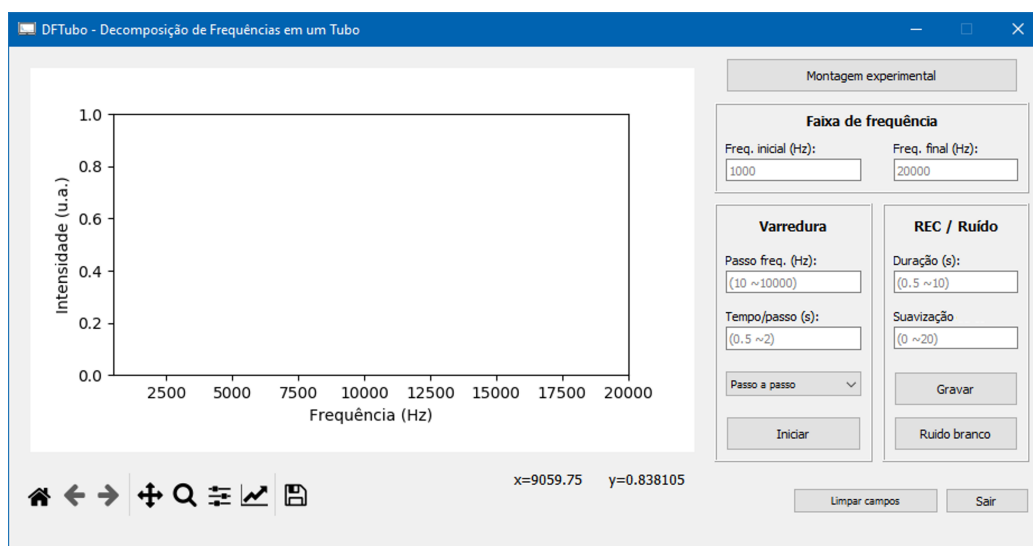


Figura 3.2: Janela do programa DFTubo.exe.

Abaixo da área do gráfico, na parte inferior esquerda, apresentam-se oito botões. O botão com um símbolo de casa é útil para o gráfico retornar à situação original de sua criação. No botão com a seta para esquerda, podemos desfazer algum ajuste no gráfico, e clicando no botão com a seta para direita, refazer o ajuste.

O botão com símbolo de duas setas formando uma cruz é utilizado para transladar o gráfico e o botão com símbolo de lupa é utilizado para ampliar o gráfico na área selecionada com o clique esquerdo do *mouse* e para reduzir com o clique direito. No botão com símbolo de três linhas horizontais com um ponto em cada, podemos ajustar as bordas do gráfico. No botão com símbolo de um gráfico com com uma seta crescente, é possível redefinir o título dos eixos e até a linha do gráfico, como estilo e cor em que ela será apresentada.

O último botão da sequência, com símbolo de disquete, é utilizado para salvar o gráfico gerado em formato de imagem. Ao passar a seta do *mouse* sobre a área do gráfico, também é possível visualizar os valores do eixo x e y na parte inferior central do programa.

No lado direito, podemos visualizar um grande botão na parte superior intitulado “Montagem experimental”. Ao clicá-lo será exibida uma imagem, exatamente como a Fig. 3.3 onde mostra a disposição do experimento como forma de auxiliar o usuário na montagem experimental. Os três quadros abaixo do botão são intitulados como “Faixa de frequência”, “Varredura” e “REC / Ruído”, onde é possível modificar as configurações pré-selecionadas assim que o programa é aberto.

No quadro “Faixa de frequência”, podemos manipular a frequência inicial de varredura até a frequência final que o alto falante emitirá o som nas caixas de entrada. No quadro “Varredura”, podemos manipular a lista suspensa e emitir frequências discretas (opção ‘Passo a passo’) ou contínuas (opção ‘Continuamente’). Nas caixas de entrada de texto numérico do quadro, podemos determinar o incremento em Hertz da frequência inicial até a final e também podemos configurar a duração de cada tom emitido.

No quadro “REC / Ruído”, podemos utilizar o recurso ‘Gravar’, em que o microfone captará o áudio ambiente pelo tempo escolhido na caixa ‘Duração’,

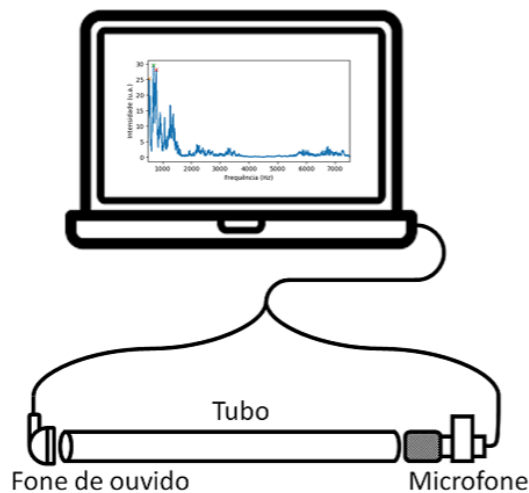


Figura 3.3: Imagem apresentada dentro do programa quando selecionado o botão “Montagem experimental”.

bem como o recurso ‘Ruído branco’, em que um ruído branco é emitido pelo alto falante para ser captado pelo microfone. O ruído branco é um som com inúmeras frequências sendo emitidas ao mesmo tempo, dando uma sensação de chiado aos nossos ouvidos.

Abaixo dos quadros mencionados, apresentam-se dois botões intitulados “Limpar campos” para apagar os valores alterados nas caixas de entrada e retornar às configurações pré-selecionadas, e “Sair” para fechar a janela do programa.

Guarnecido das informações gerais de montagem do experimento e das funcionalidades do programa DFTubo, podemos entender propriamente o mecanismo do experimento. Ao emitirmos uma ampla faixa de frequências para o interior do tubo, acontecem interferências construtivas e destrutivas com reflexões das ondas sonoras no interior do tubo, provocando ondas ressonantes de acordo com o tamanho do tubo utilizado.

As interferências construtivas e destrutivas que acontecem dentro do tubo formam os harmônicos, como ilustrado na Fig. 3.4. Os harmônicos são frequências específicas e proporcionais ao comprimento do tubo utilizado, assim como o modelo de tubo aberto descrito na equação 2.10.

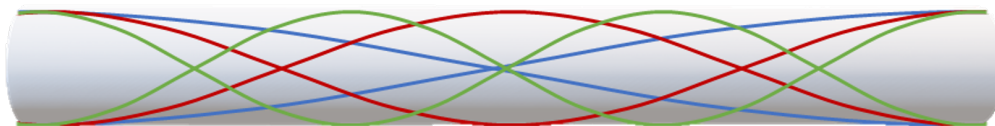


Figura 3.4: Exemplo de ondas ressonantes em um tubo aberto.

Como o DFTubo emite seguidas frequências de acordo com a faixa de frequência definida nas configurações, em algum momento é possível atingir uma frequência específica de um harmônico para o tubo utilizado no experimento. Ao atingir essa frequência, acontece uma interferência construtiva dando uma sensação que o sinal foi amplificado. Neste momento o programa irá gerar um gráfico da intensidade de todas as frequências que estão dentro da faixa pré-selecionada. Um pico de intensidade se formará em determinadas frequências que fazem parte dos harmônicos do respectivo tubo, como Fig. 3.5.

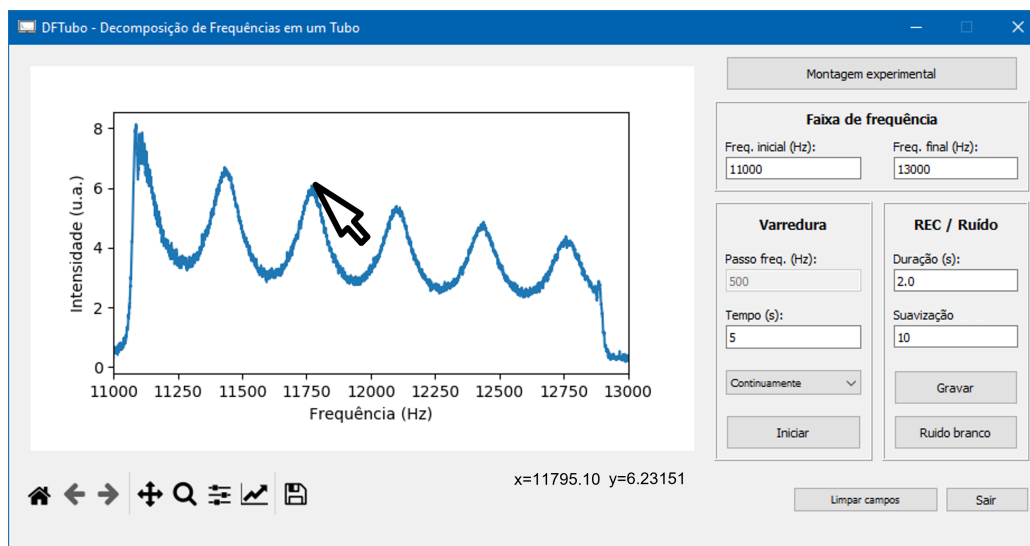


Figura 3.5: Exemplo de um gráfico gerado pelo programa e um máximo de pico de intensidade destacado com o cursor do *mouse*.

Como antecipado, passando o cursor do *mouse* sobre cada pico de intensidade máxima, podemos obter a informação da frequência associada a

cada ponto do gráfico, como destaca a Fig. 3.5. O intuito é relacionar o resultado obtido do experimento com o modelo de tubos abertos. A partir das respectivas frequências para cada harmônico, podemos utilizar o modelo de tubos abertos para descobrir informações como comprimento do tubo ou velocidade do som.

Munido das frequências de ressonância, podemos realizar um ajuste linear dos dados de frequência como função da ordem do harmônico, para comparação com a equação 2.10. Para isso, sugerimos o emprego de um aplicativo desenvolvido na plataforma *Geogebra online* especificamente para sequência de atividades proposta aos estudantes, o aplicativo já pré-configurado pode ser acessado no endereço <http://geogebra.org/classic/gdw3zfwg>. Uma vez aberto o site, os dados das frequências são inseridos na coluna B e automaticamente é gerada a equação da reta que melhor se encaixa aos pontos representados no gráfico, como ilustra a Fig. 3.6.

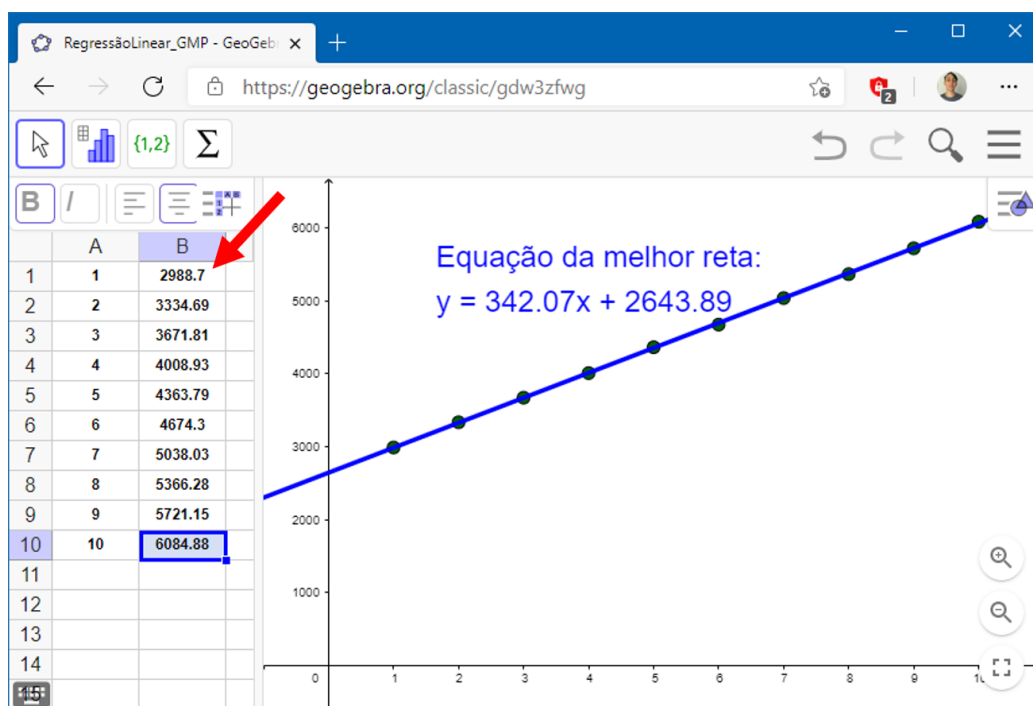


Figura 3.6: Inserindo os dados das frequências na coluna B.

A partir da equação linear obtida no *Geogebra online*, de acordo com a seção 2.4, podemos relacionar com o modelo de tubo aberto, como visto no

capítulo 2, e extrair informações importantes para serem trabalhadas com os alunos, como medir indiretamente o comprimento do tubo ou até mesmo a velocidade do som, como veremos no capítulo 4.

A plataforma *Geogebra online* é uma ótima ferramenta para realizar simulações matemáticas e físicas. No nosso caso, utilizamos o aplicativo apenas como uma ferramenta de ajuste linear, mas existem diversas possibilidades. Sugerimos o artigo de Walsh [19] para exemplos interessantes como simulações de lançamento oblíquo e horizontal ou o traçado de linhas equipotenciais de uma distribuição de cargas.

3.2 Ensaios Experimentais

Para explorarmos o quão eficiente e versátil é o experimento, realizamos alguns testes. Primeiro, foi verificado a qualidade dos equipamentos, testamos o experimento sem e com o tubo para visualizar a influência dele nos resultados, comparamos tubos fabricados com diferentes materiais, certificamos a precisão do experimento e analisamos as curvaturas no tubo, utilizando uma mangueira.

Interessados no modelo dos tubos fechados e no modelo dos tubos abertos, contrastamos os resultados para as duas situações. Investigamos também a influência da disposição dos dispositivos e finalizamos os testes examinando a dependência da velocidade do som com a temperatura. Todos estes testes serão detalhados nas próximas subseções.

3.2.1 Qualidade dos Equipamentos

Para medir a qualidade dos equipamentos utilizados, primeiro precisamos definir a função de cada equipamento para comparar a qualidade entre eles. O microfone tem como função captar as perturbações do ar, a onda sonora, e transformar em sinal elétrico para o computador processar a informação. A função do alto-falante é justamente o oposto, converter um sinal elétrico gerado pelo computador em perturbações do ar, o som. Mais detalhes sobre o funcionamento e utilização de sensores podem ser obtidas em Patsko [20].

Um microfone de qualidade é um equipamento que garante a possibilidade de gerar sinais elétricos provenientes de ondas sonoras de intensidade e frequência diversas, sem preferências ou distinções. O alto-falante não é muito diferente, só destacamos que é esse equipamento que emitirá a onda sonora a partir de sinais elétricos recebidos.



Figura 3.7: Simulação da disposição dos equipamentos no ensaio experimental da qualidade dos alto-falantes e microfone.

Definida a boa qualidade dos equipamentos, podemos verificar os ensaios experimentais de qualidade dos dispositivos. Destacamos a dificuldade de realizar esta comparação com a própria audição. O artigo de Johann [21] elucida a dificuldade da distinção dos sons com os sentidos humanos. Para não ficar dependente dos nossos sentidos, utilizaremos o microfone e o alto falante. Porém, antes de utilizá-los, é necessário determinar a qualidade dos equipamentos disponíveis para o experimento.

Portanto comparamos a qualidade utilizando os resultados dos gráficos de intensidade sonora em função da frequência. Primeiramente, procuramos dispositivos de emissão e captação de áudio disponíveis em casa e realizamos a disposição experimental ilustrada na Fig. 3.7.

Os dispositivos disponíveis para comparação foram dois fones de ouvido e dois microfones, todos com fabricantes distintos e nomeados respectivamente como AF1, AF2, M1 e M2. Destacamos que o dispositivo M2 é um microfone embutido de um computador, como mencionado, e que é possível utilizar o dispositivo embutido desde que um deles seja móvel. Ao iniciar varreduras de 1 à 20 kHz de forma contínua, obtemos o resultado para cada equipamento como ilustrado na Fig. 3.8.

Podemos perceber que a qualidade do microfone 2 é superior à qualidade do microfone 1, por apresentar uma quantidade de ruído menor e pelo ganho de intensidade sonora mesmo apresentando uma saturação em 350 u.a.¹ de intensidade, como observado na Fig. 3.8(b). Quanto ao alto-falante, percebemos que o alto-falante 1 apresenta duas regiões bem destacadas onde seria um bom local para selecionar a faixa de frequência de trabalho e o alto-falante 2 apresenta apenas um único pico, que é largo e pode ser observado com maior definição na Fig. 3.8(d).

Neste momento, é importante frisar que a utilização do “M2” com o “AF1” seria a melhor combinação, como ilustrado na Fig. 3.8(b), por apresentar uma faixa mais extensa mantendo uma boa intensidade sonora. Em nenhuma combinação obtemos boas emissão e captação a partir de 12,5 kHz, apenas um ruído para o microfone 1 e uma ausência de sinal no microfone 2 tanto para o alto-falante 1 quanto para o 2.

3.2.2 Influência do Tubo

Nesta seção, realizamos um teste para visualizar o que acontece quando acrescentamos um tubo entre o microfone e o alto-falante. Primeiramente, realizamos o experimento com o microfone captando o som ambiente, Fig. 3.9(a), depois o som contínuo produzido pelo alto-falante mas a uma distância equivalente à distância do tubo, Fig. 3.9(b). Por último, acrescentamos o tubo no espaço entre o microfone e o alto-falante, Fig. 3.9(c).

É interessante observar que não houve uma mudança significativa entre o resultado obtido da captação do som ambiente, Fig. 3.9(a), para o resul-

¹Unidade arbitrária.

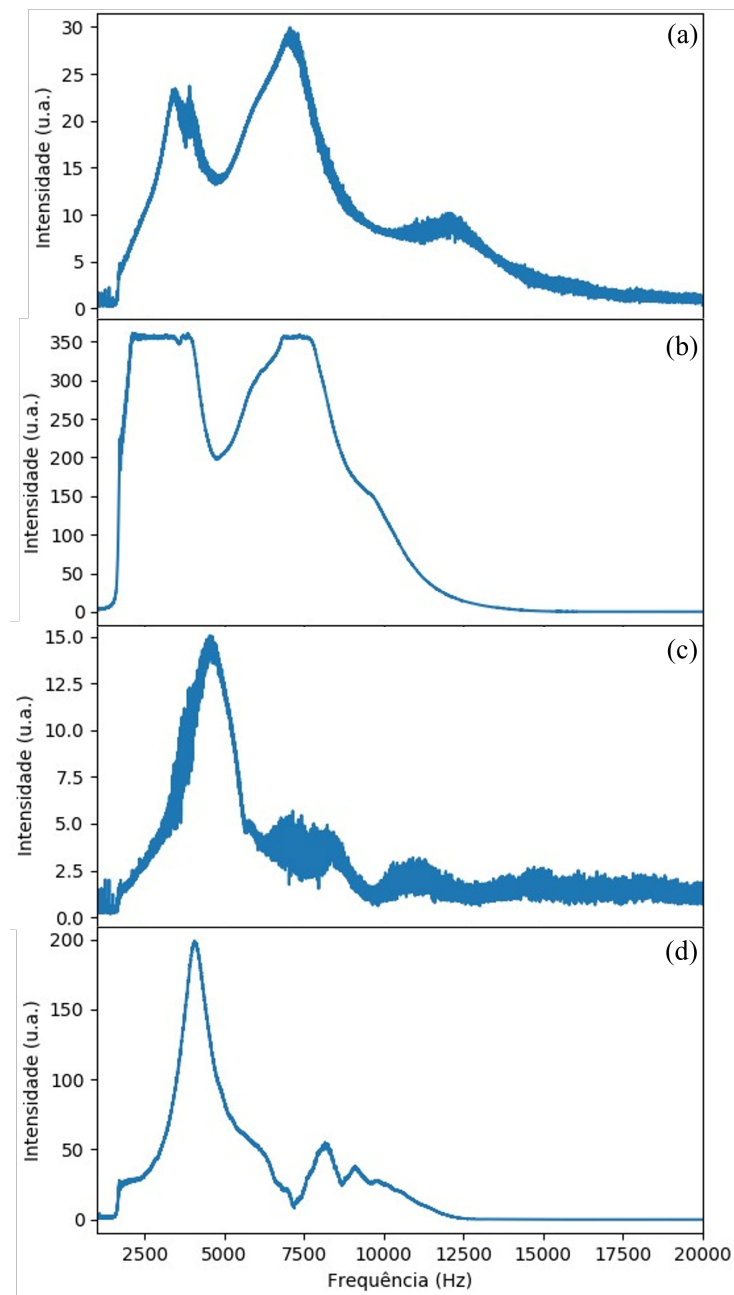
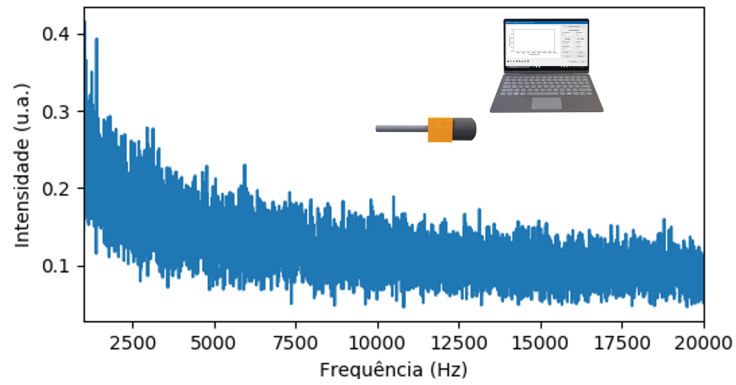
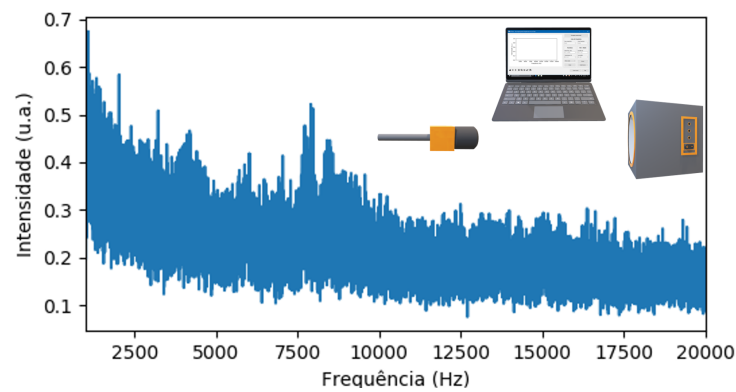


Figura 3.8: Resultado da análise de qualidade dos equipamentos, onde o item (a) combina o AF1 com M1, item (b) combina AF1 com M2, item (c) combina AF2 com M1 e o item (d) combina o AF2 com M2.

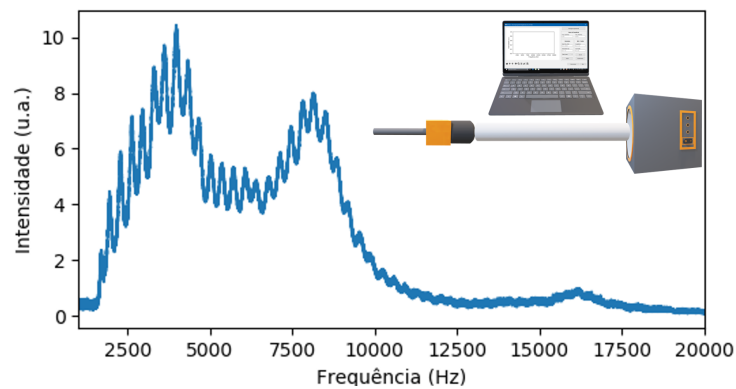
tado obtido para a captação do áudio gerado pelo alto-falante, Fig. 3.9(b), lembrando que em ambas situações os microfones estavam afastados do alto-



(a) Experimento com áudio ambiente.



(b) Experimento com áudio sem tubo.



(c) Experimento com áudio e tubo.

Figura 3.9: Resultado da análise do som ambiente (a), do áudio sem tubo (b) e com o tubo (c).

falante pela mesma distância do comprimento do tubo.

Podemos perceber experimentalmente que a presença do tubo, Fig. 3.9(c), resultou em um aumento de intensidade sonora e um surgimento de picos de intensidades referentes aos harmônicos, como anunciado anteriormente. Especificamente para este resultado apresentado, utilizamos um tubo feito com papel A4².

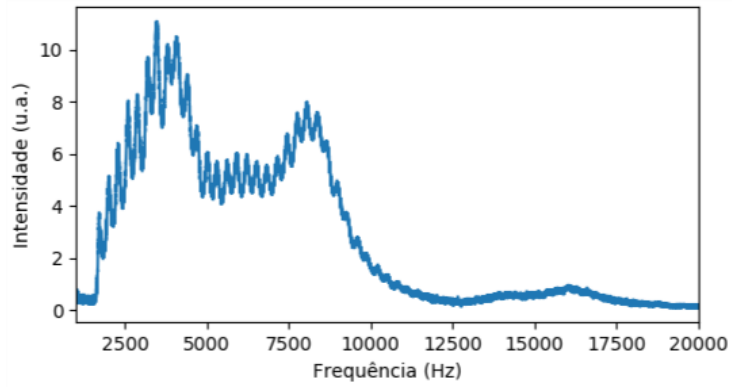
3.2.3 Tubos de Materiais Diferentes

Agora, podemos verificar a dependência do material que é produzido o tubo no resultado da formação de picos. Primeiramente escolhemos um tubo de papel sulfite, um de alumínio e outro de PVC (acrônimo de policloreto de vinila, um polímero sintético), todos com comprimento $\ell = (0,766 \pm 0,003)$ m e diâmetro $\Phi = (0,020 \pm 0,003)$ m.

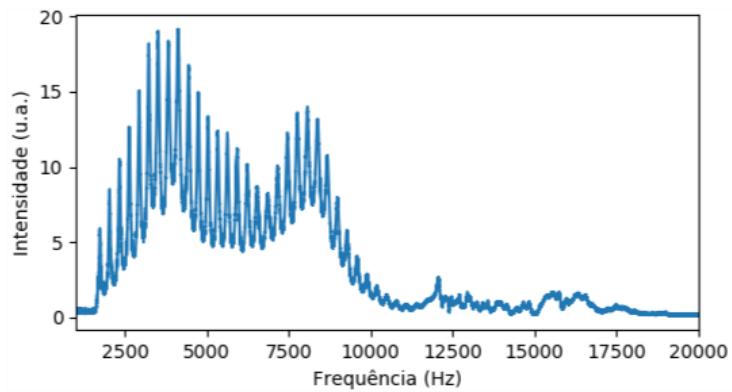
Notadamente, existe uma grande diferença nos resultados entre os materiais utilizados. O experimento com tubo de papel, Fig. 3.10(a), e de PVC, Fig. 3.10(c), apresentou picos de baixa intensidade e que não se destacaram tão significativamente. Sem dúvidas, com o tubo de alumínio, Fig. 3.10(b), observamos um melhor resultado tanto de intensidade quanto de picos destacados, facilitando a localização dos harmônicos e diminuindo a incerteza de cada ponto.

A diferença entre os resultados obtidos usando os diferentes materiais dos tubos é devido ao fato de cada material ter uma eficácia diferente. O papel, sendo mais flexível, favorece a perda de energia através de vibrações pela parede, atenuando sua intensidade com a propagação ao longo do tempo, diferente do alumínio e o PVC que são mais rígidos em comparação ao papel. O material pode favorecer ou prejudicar a presença do fenômeno de ressonância no interior do tubo e isso explica os diferentes resultados obtidos.

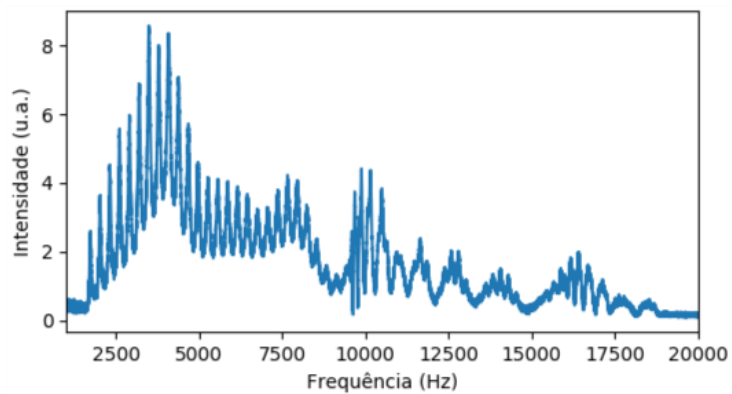
²O manuseio e a produção de um tubo de comprimento variável com folhas A4 serão explicados na seção 4.1.



(a) Tubo feito de papel.



(b) Tubo feito de alumínio.



(c) Tubo feito de PVC.

Figura 3.10: Resultado da análise espectral do som com tubo de papel (a), de alumínio (b) e de PVC (c).

3.2.4 Estimativa da Incerteza

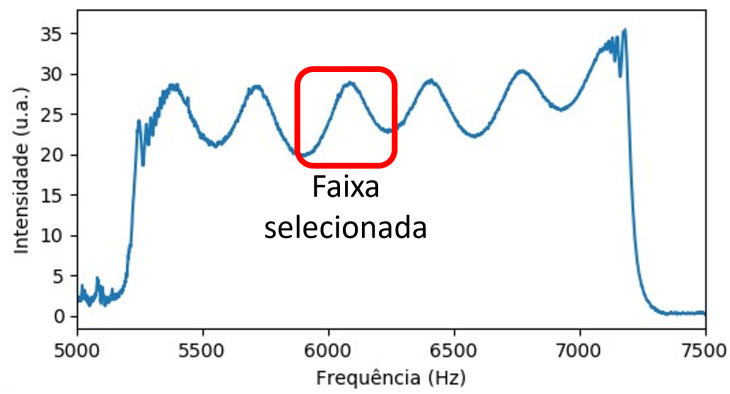
Nesta subseção vamos discutir a estimativa da incerteza especificamente no experimento proposto. Como o objetivo é medir indiretamente a velocidade do som, como anunciado no início deste capítulo, precisamos mensurar o valor da incerteza de todas as grandezas que dependem da velocidade do som para estimar a incerteza da velocidade do som, assim como vimos na subseção 2.4.2.

Para isso, realizamos o experimento com um tubo de papel e analisamos um pico que julgamos estar “largo”, ou seja, com um valor máximo não tão bem definido. Com o auxílio do programa, ampliamos o pico selecionado e escolhemos uma margem à esquerda e à direita do que estabelecemos como um ponto de pico. Esta margem foi medida e a incerteza da frequência foi definida como $\Delta\nu = 20$ Hz, o processo pode ser observado na Fig. 3.11.

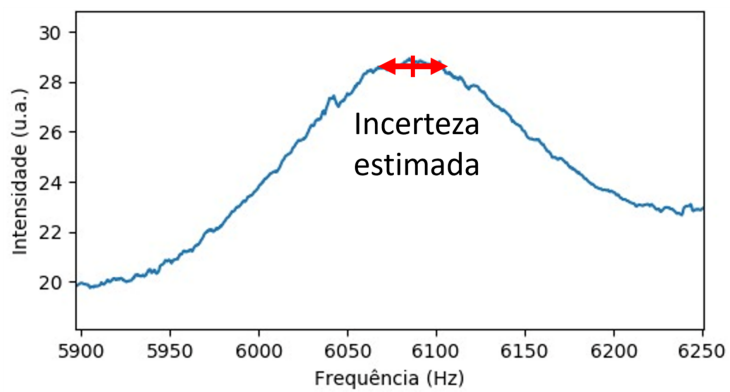
O motivo de utilizarmos o tubo de papel para analisar um pico não muito definido, foi para estimarmos a incerteza de forma conservadora. Dessa forma, podemos admitir que um estudante mesmo sem um bom equipamento disponível, conseguiria alcançar resultados próximos a estes medidos na dissertação.

Obtida a incerteza da frequência, realizamos o experimento novamente com um tubo de comprimento $\ell = (0,500 \pm 0,003)$ m, diâmetro $\Phi = (0,020 \pm 0,003)$ m. Com novos dados de frequências obtidos, calculamos pelo método dos mínimos quadrados, já definido na subseção 2.4.1, o coeficiente angular da regressão linear bem como sua incerteza, pelas equações 2.24 e 2.27, obtendo $a = (350,7 \pm 3,1)$ Hz.

Munido dos valores do comprimento do tubo e do coeficiente angular e as respectivas incertezas, podemos propagar a incerteza com a equação 2.30. Substituindo os valores, chegamos ao valor da velocidade do som $v = (350,7 \pm 3,7)$ m/s. Este resultado pode ser considerado bem satisfatório, tendo em vista que fomos cautelosos na estimativa da incerteza e ainda assim obtivemos uma incerteza relativa da ordem de 1% e uma discrepância da ordem de 0,1%, em relação a Bohn [22].



(a) Visão geral.



(b) Faixa selecionada.

Figura 3.11: Procedimento para estimar a incerteza da frequência.

3.2.5 Curvaturas no Tubo

Movidos pela curiosidade, manipulamos uma mangueira de borracha com comprimento $\ell = (1,460 \pm 0,003)$ m e diâmetro $\Phi = (0,011 \pm 0,003)$ m. A mangueira, que atuará como um tubo, permite verificar se há dependência das frequências dos harmônicos com o raio de curvatura. Para isso, realizamos em sequência a análise espectral alterando apenas o raio de curvatura da mangueira. A Fig. 3.12 ilustra uma simulação da disposição dos equipamentos.

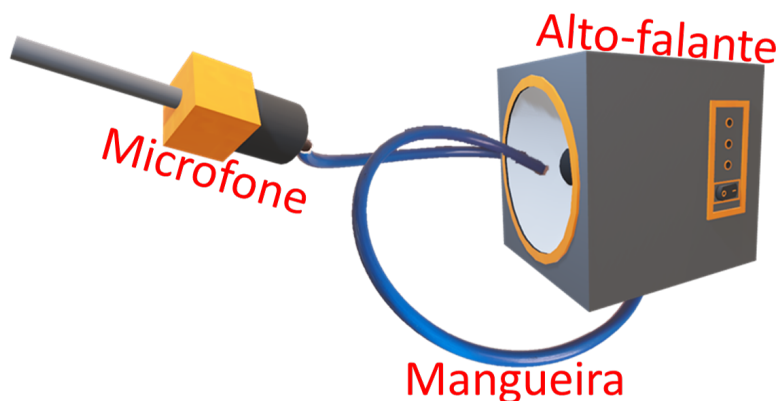


Figura 3.12: Representação gráfica da disposição dos equipamentos no ensaio experimental da mangueira.

Primeiramente, realizamos o teste com ela perfeitamente esticada, depois com uma volta, três voltas e chegamos em um limite de 5 voltas. Não foi possível aumentar o número de voltas porque a mangueira colapsava, bloqueando a passagem do som. Esse limite foi específico para a nossa mangueira e dependerá, principalmente, do comprimento da mangueira e da flexibilidade de cada uma que será utilizada.

Os resultados obtidos para cada condição da mangueira foram similares. Na Fig. 3.13(a) podemos observar o resultado do experimento feito com a mangueira esticada, Fig. 3.13(b) já com uma volta, Fig. 3.13(c) com três voltas e Fig. 3.13(d) com cinco voltas. Percebemos que o incremento de voltas teve como consequência a perda de intensidade em alguns picos a partir de 1750 Hz mas em todas as situações o resultado apresentou o mesmo padrão.

Este resultado está de acordo com o esperado, e foi interessante realizar

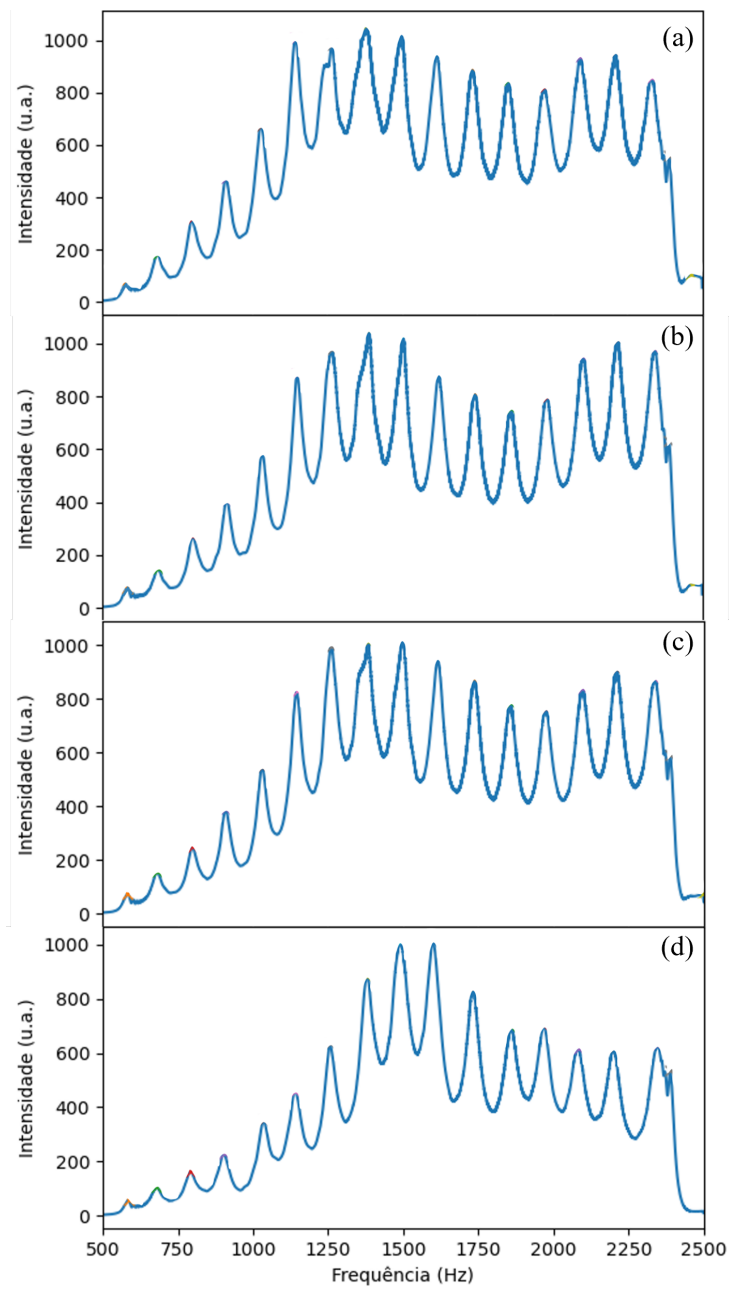


Figura 3.13: Resultado da análise do som usando uma mangueira entre o alto-falante e o microfone, onde a mangueira está esticada em (a), a mangueira com 1 volta em (b), com 3 voltas em (c) e com 5 voltas em (d).

este ensaio por certificar as variáveis envolvidas, além da possibilidade de explorar alguns instrumentos musicais que utilizam o recurso da curvatura no

tubo, como o saxofone, trompete, trombone, entre outros que valem a pena relacionar com acústica no ensino básico. O artigo de Santos [23], a dissertação de Silva [24] e de Salazar [25] são exemplos de como os instrumentos musicais podem ser relacionados com o ensino de acústica.

3.2.6 Modelo de Tubos Fechados

Até o momento, analisamos o experimento posicionando o microfone em uma extremidade e o alto-falante na extremidade oposta com o tubo totalmente aberto. Para verificar o modelo de tubos fechados, realizamos o experimento posicionando o alto-falante e o microfone na mesma extremidade e tampamos apenas uma das extremidades do tubo com comprimento $\ell = (0,400 \pm 0,003)$ m e diâmetro $\Phi = (0,020 \pm 0,003)$ m, como a Fig. 3.14 representa.

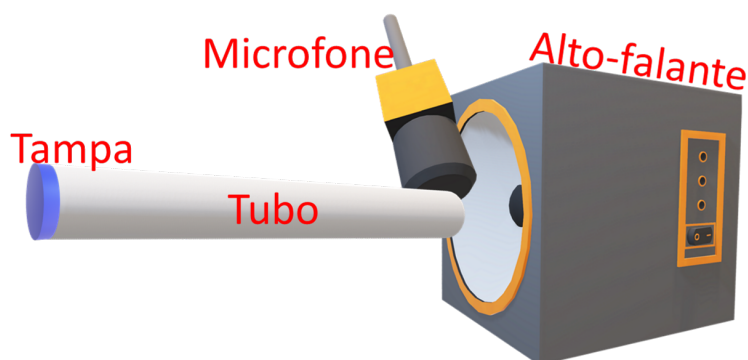


Figura 3.14: Representação gráfica da disposição dos equipamentos no ensaio experimental do tubo fechado.

Para estudar a influência do material que foi utilizado para vedar a extremidade oposta do tubo, colocamos uma tampa de garrafa, fita adesiva e outras formas, que serão detalhadas a seguir. O intuito era verificar o modelo de tubos fechados como a equação 2.12 descreve e avaliar a eficácia dos materiais no bloqueio da vibração na extremidade oposta.

Na Fig. 3.15(a) se representa o resultado da utilização do dedo para o bloqueio obtendo uma velocidade do som $v_{dedo} = (349,4 \pm 3,6)$ m/s. A Fig. 3.15(b) demonstra o resultado usando uma tampa de uma garrafa PET

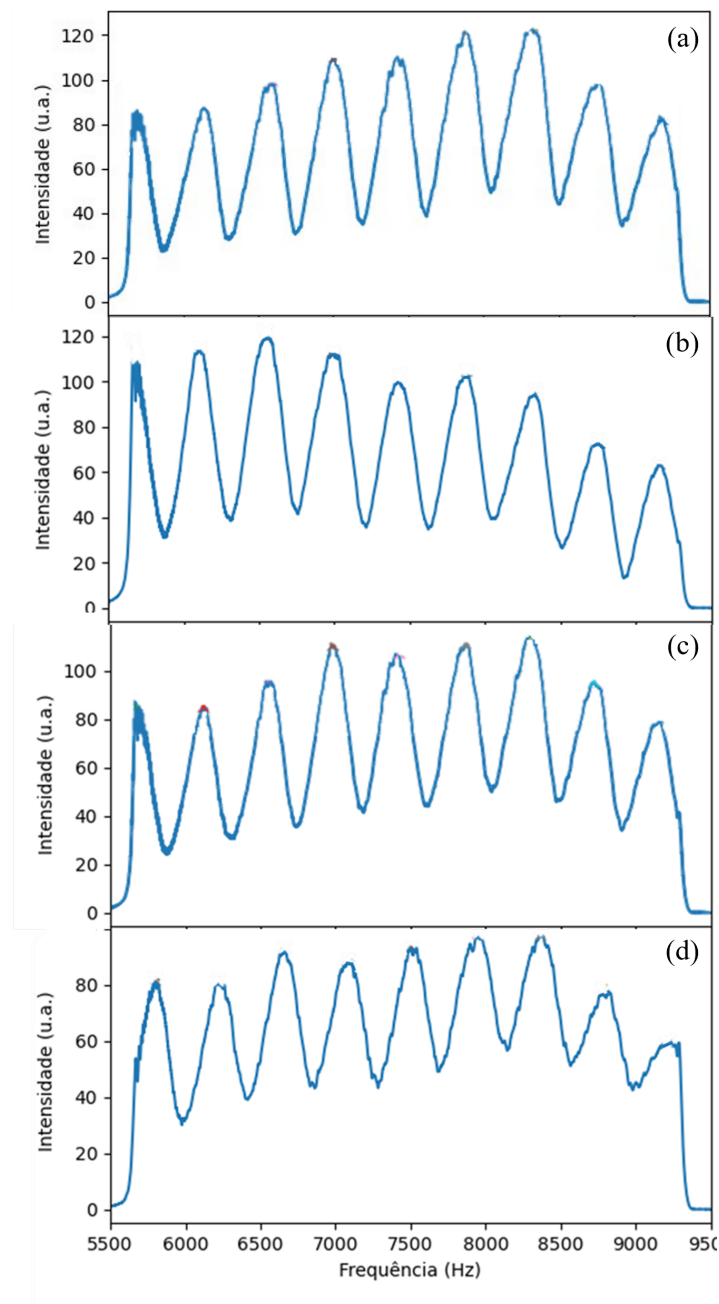


Figura 3.15: Resultado da análise do tubo fechado, onde o item (a) foi tampado com o dedo, item (b) com a tampa de garrafa PET, (c) com fita adesiva e (d) ficou totalmente aberto.

(acrônimo de politereftalato de etileno, um polímero termoplástico) alcan-

quando uma velocidade do som $v_{PET} = (349,8 \pm 3,3)$ m/s. A Fig. 3.15(c) retrata o resultado do bloqueio da vibração com fita adesiva gerando uma velocidade do som $v_{fita} = (348,0 \pm 3,6)$ m/s. Por último, a Fig. 3.15(d) expressa o resultado quando deixamos a extremidade totalmente livre resultando uma velocidade do som $v_{aberto} = (341,2 \pm 3,6)$ m/s.

Podemos perceber que todas as formas que utilizamos de bloqueio da extremidade foram eficazes para apresentar os picos referentes aos harmônicos. É intrigante como o tubo sem bloqueio, Fig. 3.15(d), apresentou os picos, mesmo com uma queda de intensidade sonora e um leve deslocamento dos picos, pelo fato dele se comportar agora como um tubo aberto novamente.

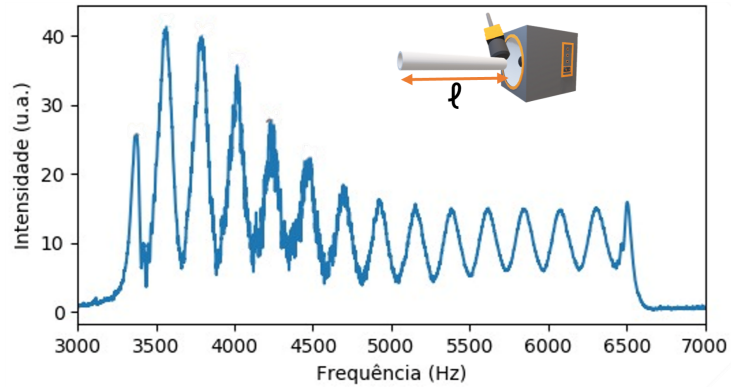
3.2.7 Tubo Aberto Comparado com Tubo Fechado

Procurando investigar com mais detalhes o desvio observado, realizamos um ensaio para comparar o resultado experimental do tubo fechado com o tubo aberto.

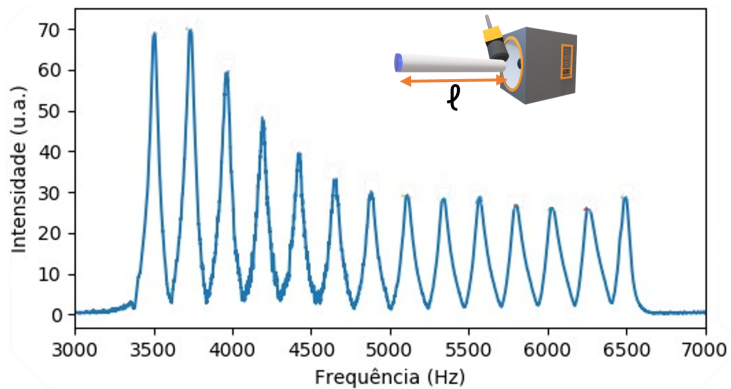
Neste ensaio utilizamos um tubo de comprimento $\ell = (0,760 \pm 0,003)$ m e diâmetro $\Phi = (0,020 \pm 0,003)$ m, realizamos o experimento com os dispositivos na mesma extremidade e na oposta deixamos totalmente livre. Logo em seguida refizemos o experimento, mas tampando essa extremidade que tinha ficado livre com o próprio dedo, vedando-a totalmente. Os resultados obtidos podem ser analisados na Figs. 3.16, respectivamente no item (a) e (b).

Realizando o experimento em um curto período de tempo, admitimos uma condição parecida do ambiente entre as duas medidas do experimento e podemos afirmar que tratam-se de resultados distintos. Os resultados anteriores demonstraram um desvio nos picos, pelo fato de ao deixarmos livre uma extremidade o tubo comporta-se como um tubo totalmente aberto, independente da posição dos dispositivos.

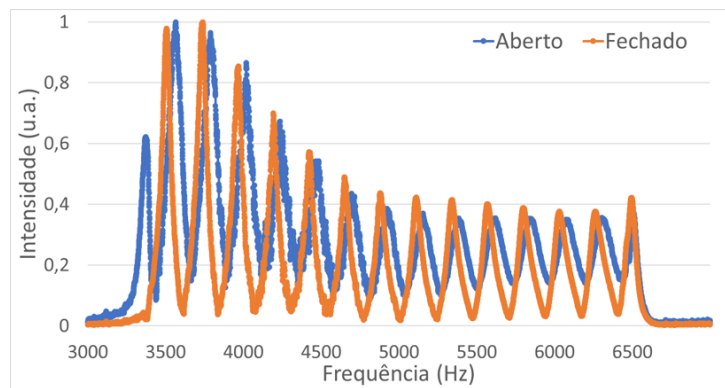
A Fig 3.16(c) é um gráfico normalizado com os dados obtidos para o tubo aberto e fechado sobrepostos, respectivamente em azul e laranja. O gráfico demonstra que os picos não estão localizados no mesmo ponto e além disso, a diferença entre eles é, na média, 48,8 Hz, mais que o dobro da incerteza da frequência estimada.



(a) Tubo totalmente aberto.



(b) Tubo com uma extremidade fechada.



(c) Gráficos do tubo aberto e parcialmente aberto sobrepostos.

Figura 3.16: Resultado da análise do experimento usando um tubo aberto e fechado mantendo os dispositivos na mesma extremidade.

A velocidade do som no ar encontrada para o experimento com o tubo aberto foi de $v_{Aberto} = (346,4 \pm 2,4)$ m/s e para o experimento com o tubo fechado foi de $v_{Fechado} = (349,3 \pm 2,4)$ m/s. Portanto, podemos confirmar os resultados consistentes obtidos e mesmo mantendo a incerteza conservadora da frequência, verificamos uma queda da incerteza da velocidade do som pelo fato de aumentarmos a quantidade de picos selecionados.

3.2.8 Disposição dos Dispositivos

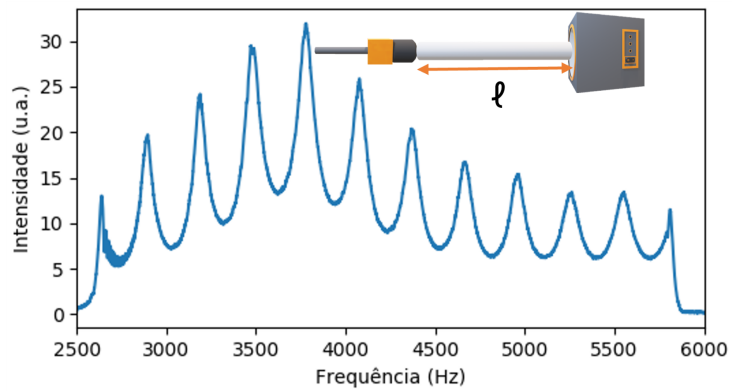
Para explorarmos sobre a disposição dos dispositivos, realizamos o experimento com os dispositivos em extremidades opostas do tubo, Fig. 3.17(a) e logo em seguida refizemos com os equipamentos na mesma extremidade, Fig. 3.17(b), para o caso de um tubo aberto em ambos os lados. Como no ensaio anterior, realizamos os experimentos um logo em seguida do outro para tentar garantir condições ambientes semelhantes.

É nítido que os picos ficaram mais evidentes quando dispusemos os equipamentos na mesma extremidade, Fig. 3.17(b), mas, sem dúvida, chegamos ao mesmo resultado. As diferenças entre os picos são, no máximo, de 7,62 Hz conforme a tabela 3.1. Como nossa incerteza da frequência foi estimada em 20 Hz, concluímos que as duas situações são compatíveis.

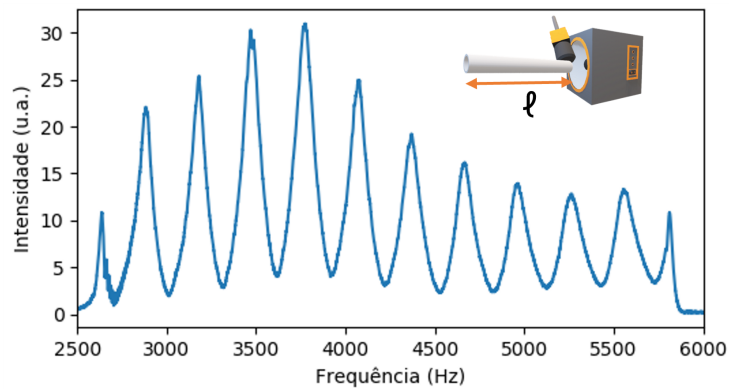
A velocidade do som encontrada para o experimento com os dispositivos na mesma extremidade foi de $v_{ME} = (344,5 \pm 3,1)$ m/s e para o experimento com os dispositivos em extremidades opostas foi de $v_{EO} = (343,5 \pm 3,1)$ m/s. Portanto, podemos confirmar novamente os resultados como consistentes.

3.2.9 Influência da Temperatura

Pensando nas condições do ambiente para determinar o valor da velocidade do som, sabe-se que a temperatura, a umidade e a pressão são variáveis importantes que podem alterar esse valor, de acordo com a equação 2.15 e como discutido, por exemplo, no artigo de Bohn [22]. Sem um criterioso cuidado e nem a garantia de condições ambientes semelhantes, erros podem ser introduzidos na comparação entre os dois ensaios experimentais. Por este



(a) Dispositivos em extremidades opostas.



(b) Dispositivos na mesma extremidade.

Figura 3.17: Resultado da análise do som usando um tubo aberto com os dispositivos em extremidades opostas e na mesma extremidade.

Tabela 3.1: Análise das disposições dos picos selecionados do tubo com equipamentos na mesma extremidade e em extremidades opostas.

Mesma extremidade (Hz)	Extremidades opostas (Hz)	Diferença entre os picos (Hz)
2879,83	2887,45	7,62
3176,85	3184,46	7,61
3473,86	3473,86	0
3770,88	3778,49	7,61
4067,89	4075,5	7,61
4364,9	4364,9	0
4661,92	4664,92	3
4958,93	4958,93	0
5255,94	5255,94	0
5552,96	5552,96	0

motivo, esta subseção tratará da influência da temperatura na medida da velocidade do som.

O ensaio experimental da influência da temperatura na medida indireta da velocidade do som só pode ser verificada graças à boa precisão das medidas e nos ótimos resultados obtidos até o momento. Porém, para podermos verificar essa influência, precisamos controlar a temperatura do ambiente. No artigo de Lutz Kasper [26], mostrou-se que era possível perceber uma mudança significativa da velocidade do som em virtude de uma diferença de temperatura mesmo com equipamentos utilizados em uma sala de aula.

No caso do referido artigo foi realizada a medida dentro de sala de aula a 24 °C e no ambiente externo a 0 °C para comparar a influência da temperatura na medida da velocidade do som. No nosso caso, escolhemos usar uma mangueira submersa em água usando um aparato experimental feito de isopor, com o microfone e o alto-falante posicionados um em cada extremidade do tubo, como ilustra a Fig. 3.18 contendo o dispositivo preparado e montado.

Para obter constantemente a medida da temperatura, utilizamos um sensor de temperatura a prova d'água DS18B20 no Arduino, cujo código-fonte pode ser obtido no endereço eletrônico www.if.ufrj.br/~gpenello/Soft

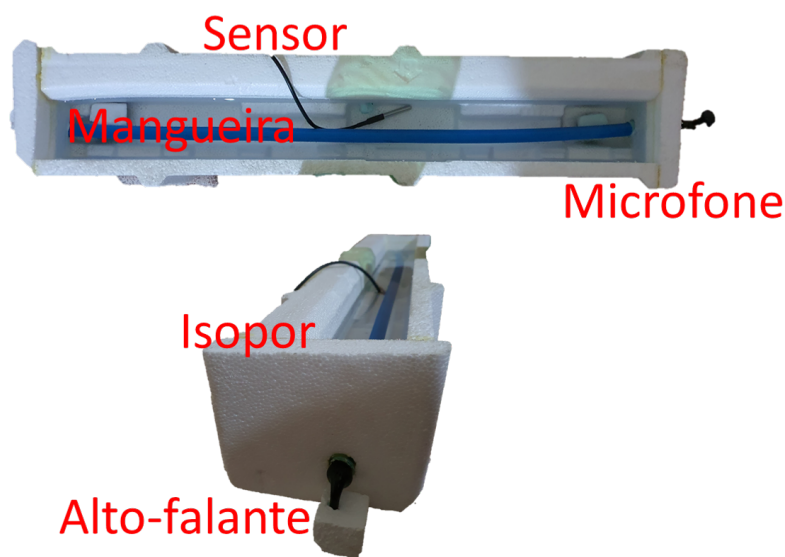


Figura 3.18: Disposição real dos equipamentos no ensaio experimental da temperatura.

wares/DFTubo/Temperatura_DFTubo.ino. O sensor tem uma incerteza informada pelo fabricante de $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, porém, durante a utilização, verificamos algumas oscilações na leitura, de modo que estimamos a incerteza conservadoramente em $\Delta T = 1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Após o aparato ser preenchido com água a uma temperatura de aproximadamente $5\text{ }^{\circ}\text{C}$, realizamos 15 medidas da velocidade do som. A cada medida, aumentávamos em aproximadamente $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ a temperatura da água acrescentando lentamente água morna e homogeneizando até atingir uma temperatura de, aproximadamente, $30\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Realizadas as 15 medidas, obtemos o resultado da tabela 3.2. Em uma tentativa de diminuir ainda mais a incerteza da velocidade do som, utilizamos uma mangueira de maior comprimento $\ell = (0,637 \pm 0,003)\text{ m}$ do que estávamos utilizando e adquirimos uma maior quantidade de harmônicos. Para cada medida da velocidade do som foram analisados 15 picos de ressonância.

Como descrito na seção 2.2, a dependência da velocidade do som é diretamente proporcional à raiz da temperatura, como a equação 2.15 destaca. Portanto, geramos um gráfico em escala logarítmica para linearizar a equação, onde o coeficiente angular teórico de $a_{teo} = 0,5$ por conta da raiz presente

Tabela 3.2: Análise das medidas da velocidade do som para cada temperatura.

Medida	v_{som} (m/s)	Δv_{som} (m/s)	T (K)	ΔT (K)
1	333,9	2,93	278,2	1,0
2	335,6	2,89	280,3	1,0
3	336,8	2,90	282,4	1,0
4	336,3	2,90	284,0	1,0
5	338,3	2,90	285,2	1,0
6	339,3	2,91	286,8	1,0
7	340,0	2,91	288,2	1,0
8	341,5	2,91	290,9	1,0
9	342,4	2,91	292,9	1,0
10	343,4	2,92	294,3	1,0
11	345,4	2,92	296,2	1,0
12	347,0	2,92	298,1	1,0
13	347,4	2,93	299,3	1,0
14	348,6	2,93	301,4	1,0
15	349,7	2,93	303,6	1,0

em T , e todo múltiplo de T desta equação está relacionado com o coeficiente angular b . A Fig. 3.19, ilustra o gráfico já com a incerteza propagada tanto no eixo x para $\log(T)$, como no eixo y para $\log(v_{som})$.

A Fig. 3.19 representa o resultado experimental obtido, onde o coeficiente angular experimental foi de $a_{exp} = 0,54 \pm 0,08$ e o coeficiente de determinação, que é uma medida do ajuste de um modelo estatístico linear, foi de $R^2 = 0,9908$, confirmando um ótimo resultado experimental e em bom acordo com a teoria e as incertezas estimadas.

Este resultado do coeficiente angular leva a uma discrepância relativa de 7,8%. Reforçamos que o experimento foi realizado, em sua maior parte, com recursos disponíveis em casa, como fone de ouvido, microfone, isopor, mangueira, água, apenas o sensor de temperatura e o Arduino são dispositivos que não são encontrados facilmente para ser utilizado em escolas. No artigo de Velasco [27], também podemos encontrar resultados semelhantes aos obtidos e até com uma precisão maior, mas sendo necessário um aparato mais sofisticado, perdendo reprodutibilidade.

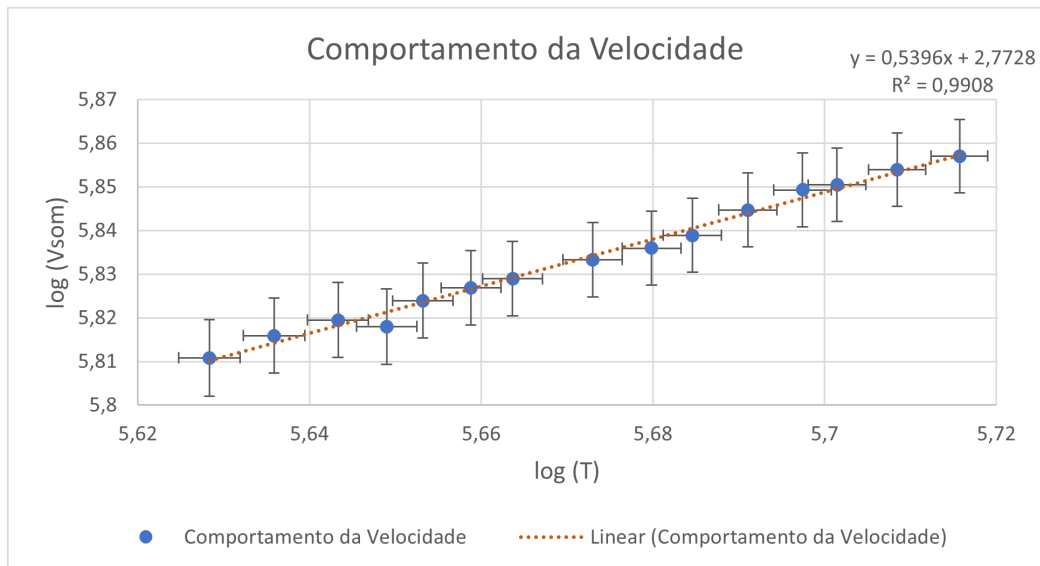


Figura 3.19: Resultado da análise da velocidade do som em função da temperatura.

Capítulo 4

Aplicação em Sala de Aula

Com medidas confiáveis, de acordo com o que observamos nos ensaios experimentais, elaboramos o experimento para ser acessível e atraente a estudantes do ensino básico. Neste capítulo, descreveremos a condução das atividades para uma boa aplicação do experimento e também os resultados alcançados quando essa proposta foi aplicada. No apêndice 5.1 disponibilizamos a sequência de atividades de forma resumida contendo o material construído para auxiliar os alunos na realização e os professores na aplicação das atividades.

4.1 Aparato Experimental

Para montar o experimento de forma adequada ao ensino básico, fizemos algumas adaptações prezando pela reprodutibilidade e acessibilidade dos estudantes ao experimento. O alto-falante continua colocado próximo a uma das extremidades do tubo e um microfone próximo à outra. Dessa forma, garantimos que as ondas sonoras emitidas pelo alto-falante para o interior do tubo serão captadas pelo microfone, ambos conectados ao computador. A Fig. 4.1 ilustra os dispositivos utilizados na prática.

Abaixo listamos os materiais necessários que foram adaptados, alcançando resultados satisfatórios:

1. Régua;



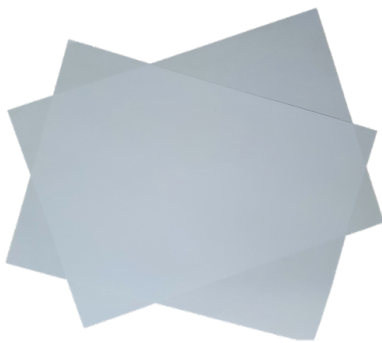
Figura 4.1: Disposição real dos equipamentos.

2. Fita adesiva;
3. Folhas de Papel A4;
4. Microfone;
5. Alto-falante (Fone de ouvido);
6. Computador (Com o programa DFTubo devidamente instalado).

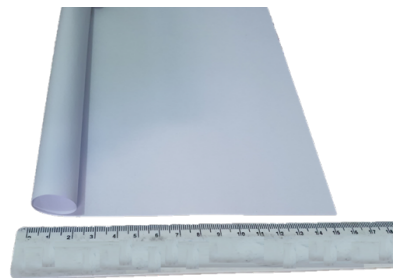
Com o intuito de favorecer a reprodutibilidade, sugerimos que o tubo ressonante seja construído a partir de folhas A4 enroladas, uma vez que trata-se de um material de fácil acesso aos estudantes. Isso facilita por exemplo a variação do comprimento do tubo, permitindo alterar mais um parâmetro do experimento. Indicamos abaixo um passo a passo da montagem de um tubo de papel com comprimento variável, e alertamos que o uso de folhas com gramaturas maiores impacta positivamente os resultados, pois minimiza as vibrações do próprio tubo, evitando perdas de intensidade pelas paredes do tubo. Para fazer o tubo de papel, segue abaixo uma lista com o passo a passo da montagem.

1. Separe duas folhas de papel A4, como mostrado na Fig. 4.2(a);
2. Pegue a primeira folha e enrole-a, com um diâmetro relativamente pequeno (aproximadamente 2 cm) de forma que a maior dimensão da folha tenha o comprimento do tubo, como mostrado na Fig. 4.2(b);

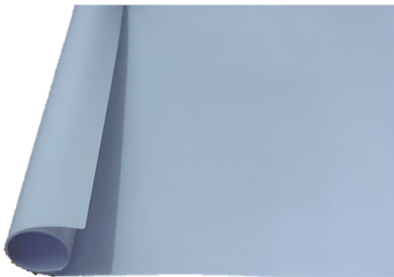
3. Corte três pedaços de fita adesiva, de aproximadamente 5 cm de comprimento, e cole-as nas bordas da folha e na parte central, evitando assim que o tubo se desenrole;
4. Pegue a segunda folha de papel A4. Use o primeiro tubo como modelo, enrolando/envolvendo a segunda folha sobre o tubo de papel previamente feito. Desta forma garantimos que os tubos terão diâmetros parecidos, minimizando folgas, como mostrado na Fig. 4.2(c);



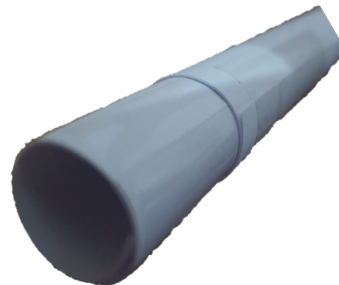
(a) Separando duas folhas A4.



(b) Enrolando a primeira folha.



(c) Enrolando a segunda folha usando a primeira como modelo.



(d) Empurrando o tubo interior do exterior, formando um único tubo de comprimento variável.

Figura 4.2: Ilustração de alguns passos da produção do tubo de papel A4.

5. Corte novamente três pedaços de fita adesiva, de aproximadamente 5 cm de comprimento e cole duas próximas às bordas e uma na parte central, como feito no passo 3;
6. Empurre com o dedo o tubo interior, deslocando o tubo interno em

relação ao externo. Pronto, agora temos um tubo de papel com comprimento variável, como mostrado na Fig. 4.2(d).

O experimento, prezando pela acessibilidade, possibilita o uso do fone de ouvido como alto-falante. Observamos que embora os modelos de fone de ouvido com microfone embutido possam ser utilizados ao mesmo tempo na emissão e captação, isso introduz uma limitação ao comprimento do tubo imposta pelo tamanho do fio do equipamento, o que pode comprometer a obtenção de resultados. Uma alternativa é o uso de dispositivos distintos para captação e emissão para evitar a limitação do comprimento.

Como já mencionado, o computador deve estar com o programa DFTubo devidamente instalado. Ele será necessário para o tratamento dos dados obtidos e também para gerar os resultados a serem analisados. Na próxima seção descreveremos cada etapa da sequência de atividades e qual o objetivo de cada uma que será realizada em sala de aula.

4.2 Sequência de Atividades

Para introduzir a sequência de atividades, destacamos que é desejável que os alunos tenham sido previamente expostos aos conceitos de volume, tom e timbre. Portanto sugerimos uma aula sobre esses temas e preparamos uma abordagem para essa introdução que pode ser encontrada no apêndice 5.1. O professor que aplicar a atividade pode adaptá-la para cada situação.

Nesta seção, apresentaremos a metodologia utilizada na sequência de atividade e os conceitos físicos que serão abordados em cada etapa. O objetivo fundamental é fazer uma progressiva compreensão das características do som para, ao final, medirmos indiretamente a velocidade do som no ar.

Nas duas primeiras atividades (subseções 4.2.1 e 4.2.2), apresentamos as funcionalidades do programa bem como um teste de qualidade dos equipamentos que o aluno tem ao seu alcance. No processo, discutimos o conceito de volume e a relação da frequência com o tom. O foco é determinar a faixa de frequências ideal para os equipamentos disponíveis, a fim de obtermos a melhor medida possível. A montagem nas duas primeiras atividades é ilustrada



Figura 4.3: Disposição real dos equipamentos nas duas primeiras atividades.

na Fig. 4.3

Na atividade 3 (subseção 4.2.3) temos o objetivo de verificar a influência do tubo de papel entre o alto-falante e o microfone. Verificaremos que ele atuará como um filtro, selecionando frequências em função de seu comprimento.

Na atividade 4 (subseção 4.2.4) propomos uma medida do valor da velocidade do som de forma indireta, a partir dos dados obtidos anteriormente. De acordo com as frequências coletadas pelo microfone após a passagem da onda sonora pelo tubo, é possível determinar a velocidade do som fazendo um ajuste linear.

Nas atividades extras (subseção 4.2.5), propomos que os estudantes analisem outros dispositivos que tenham disponíveis, como fones e microfones diferentes, além de explorar a opção “Gravar” do programa, utilizando instrumentos musicais ou mesmo a voz para visualizar as frequências presentes e as diferenças entre sons.

4.2.1 Atividade 1

Nesta primeira etapa, o objetivo é entender o funcionamento do programa. Precisamos demonstrar aos estudantes que o programa controla os dispositivos sonoros do computador, permitindo a emissão de um som por meio do

alto-falante bem como a captação pelo microfone. O som emitido é analisado e cada frequência absorvida é registrada com suas respectivas intensidades.

Após os estudantes realizarem o *download*, devem abrir o programa DF-Tubo.exe e aguardar o carregamento. Uma janela se abrirá com um espaço para um gráfico de intensidade como função da frequência ($I \times \nu$) na parte esquerda e algumas configurações na parte direita, como mostrado na Fig. 3.2. Nesta primeira atividade utilizaremos as opções pré-selecionadas por padrão, sem necessidade de alterar as configurações.

Para começar, os estudantes montam a experiência desta atividade conforme descrito na Fig. 4.3 e apertam o botão “Iniciar” localizado no quadro intitulado “Varredura” na janela do programa. Percebemos que sons são sucessivamente emitidos com frequências bem definidas, variando entre 1 kHz e 20 kHz, e em seguida um gráfico de barras, similar ao da Fig. 4.4 é produzido.

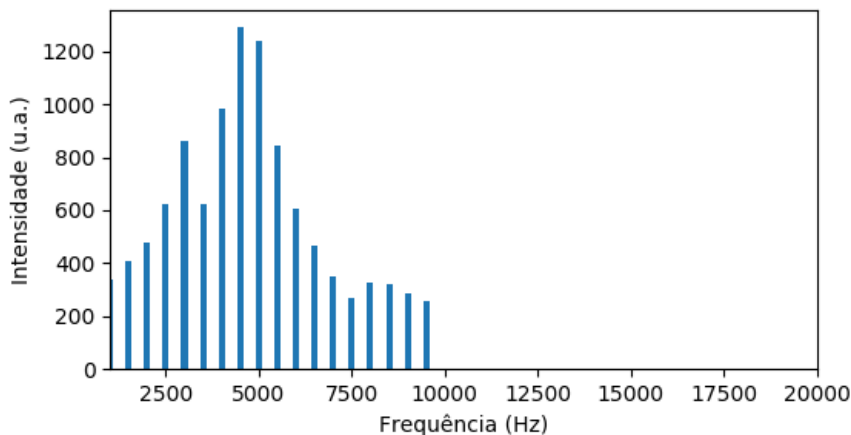


Figura 4.4: Resultado da análise com as pré-configurações.

Como podemos observar no gráfico, mesmo sem alterarmos a regulagem de volume do alto-falante obtemos intensidades diferentes para diferentes frequências. Isto pode acontecer tanto por conta do alto-falante não conseguir emitir quanto por o microfone não captar estas frequências com a mesma eficiência. Para descobrir qual dispositivo está limitando a medida, podemos trocar um deles e analisar as diferenças nos resultados, um teste sugerido na

subseção 4.2.5 (Atividades Extras).

4.2.2 Atividade 2

Nesta atividade, precisamos alterar as pré-configurações. Na primeira coluna do lado direito, no quadro intitulado “Varredura”, altere a função de “Passo a passo” para “Continuamente”. Realize novamente o processo anterior com a mesma disposição dos equipamentos da Fig. 4.3 e analise o gráfico, que deve se assemelhar ao da Fig. 4.5. Como cada equipamento tem suas particularidades, a curva obtida será diferente para cada equipamento utilizado, não sendo exatamente igual ao ilustrado na Fig. 4.5.

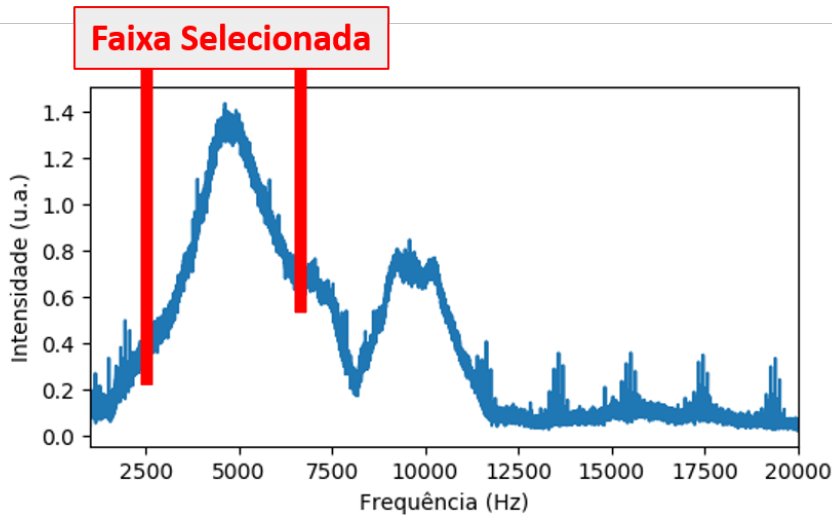


Figura 4.5: Resultado da análise com emissão contínua.

Podemos perceber que temos incontáveis valores de frequência relacionados com as respectivas intensidades, dando uma sensação de continuidade. Diferentemente dos valores discretos obtidos na primeira atividade, repare que agora temos informações de frequências que não tínhamos na atividade anterior.

O objetivo desta atividade é observar e selecionar a faixa de frequência emitida e captada de modo mais eficiente pelos dispositivos disponíveis aos estudantes. Ao passar o cursor do *mouse* sobre o gráfico, aparecerão na parte

inferior do gráfico os valores de x e y para facilitar a seleção dos pontos. Procure uma faixa que tenha um pico de intensidade o mais largo possível, com no mínimo 2 kHz de largura, mesmo que haja pequenas alterações nas intensidades, e anote o valor mínimo e máximo da faixa de frequência escolhida.

Durante a atividade, abordaremos o conceito de intensidade ou volume e também de altura ou tom. A discussão destes conceitos é fundamental para o tema da qualidade dos equipamentos que estamos utilizando na experiência e para a progressão das atividades posteriores.

Paralelamente à discussão da qualidade do equipamento, o professor pode aproveitar os interessantes questionamentos em aula e indagar sobre o ouvido humano, nosso “equipamento natural”. Também é possível que o professor explore a questão de poluição sonora e níveis de ruído, para este fim, o artigo de Bedaque [28] é uma ótima sugestão para aprofundar o conceito de nível sonoro.

4.2.3 Atividade 3

Para realizar a atividade 3, precisamos alterar o arranjo experimental. Faça a montagem seguindo a Fig. 4.1 e altere a faixa de frequência pré-definida, colocando as frequências mínima e máxima da faixa identificada e selecionada na atividade 2, como indicado na Fig. 4.6.

Agora podemos verificar a influência do tubo no espectro sonoro medido quando ele é posicionado entre o microfone e o alto-falante. Após a medida, obtemos um gráfico similar ao da Fig. 4.7, com picos de intensidades em frequências específicas.

Estes picos encontrados são formados pela interferência das ondas sonoras, resultando em ondas estacionárias no interior do tubo. Nesta atividade, propomos ao estudante relacionar o modelo de estudo de ondas sonoras em um tubo aberto (equação 2.10) com o que se observa do resultado da análise do experimento com o tubo.

Devemos estimular que os estudantes cheguem à conclusão de que cada frequência de pico obtida é a frequência do respectivo harmônico n para aquele tubo utilizado. Além disso, destacamos que o primeiro pico obtido



Figura 4.6: Definindo a melhor faixa de frequência.

não necessariamente corresponderá ao 1^o harmônico, uma vez que os primeiros harmônicos podem estar abaixo da frequência mínima selecionada na atividade 2 ou talvez em uma faixa não bem captada pelo microfone.

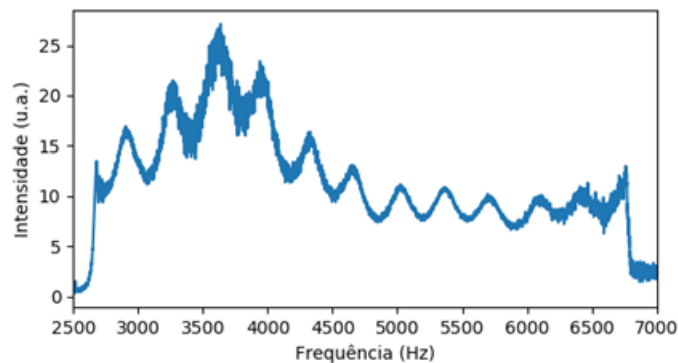


Figura 4.7: Resultado da análise com o tubo.

A ideia principal é comparar a atuação do tubo com um filtro. De modo geral, um filtro tem a função de separar ou bloquear. No nosso caso, o

tubo não bloqueia mas amplifica a intensidade de determinadas frequências, aquelas respectivas aos harmônicos, gerando uma sensação de seleção de frequências.

4.2.4 Atividade 4

Na atividade 4 vamos obter o valor da velocidade do som a partir dos dados de frequência coletados na atividade anterior. Este tipo de medida é chamada de medida indireta, pois a grandeza que estamos calculando advém de operações matemáticas realizadas a partir de outras grandezas.

Com o gráfico gerado, os estudantes precisam posicionar o cursor sobre cada pico e anotar o valor da frequência. De acordo com a atividade 3, cada frequência corresponde a um harmônico n . O objetivo é analisarmos a frequência ν_n da equação 2.10 como uma função linear dependente de n , obtendo uma equação de 1º grau, onde o coeficiente linear b é nulo e o coeficiente angular a é dado em função da velocidade do som v e do tamanho do tubo ℓ por

$$a = \frac{v}{2\ell}. \quad (4.1)$$

Estimando o coeficiente angular da reta $\nu_n \times n$ e medindo o comprimento do tubo com uma fita métrica ou uma trena, podemos estimar o valor da velocidade do som como

$$v = 2\ell a. \quad (4.2)$$

Para estimar o coeficiente angular da melhor reta que se ajusta a nossos dados experimentais, utilizaremos o aplicativo *Geogebra Online*¹, como anunciado antes, já pré-configurado especificamente para esta atividade. Uma vez aberto o site, os valores das frequências associadas aos picos são inseridos na coluna B, como ilustrou a Fig. 3.6, e é gerada uma equação linear. Como mencionado na subseção 2.4.1, esta equação é a que melhor se ajusta à disposição dos pontos selecionados. A partir da equação gerada, o coeficiente angular é relacionado à velocidade do som, conforme descrito na equação 4.2.

¹Acesse pelo *link* <http://geogebra.org/classic/gdw3zfwg> o aplicativo pré-configurado para esta atividade.

Ao final desta atividade, esperamos que os estudantes consigam relacionar as frequências obtidas na atividade anterior com o seu respectivo harmônico. Ou seja, ler e analisar o gráfico para que seja capaz de manipular a equação 4.2 e obter a velocidade do som a partir do coeficiente angular.

Estimado o valor da velocidade do som, é natural que alguns estudantes verifiquem o resultado obtido em mecanismos de busca na *internet* e percebam que a medida, provavelmente, não foi idêntica à pesquisada. Temos aqui uma abertura para discutir a incerteza da medida com os alunos e também sobre como outros fatores podem influenciar a velocidade do som.

A incerteza está presente já na obtenção das frequências associadas aos picos, extraídas a partir do cursor do *mouse* sobre o gráfico. Provavelmente o *pixel* que apontaremos não será exatamente o topo de um pico pois a resolução é a própria largura do pico. Existe também a incerteza no processo de ajuste linear dos pontos na reta e até mesmo na medida direta do comprimento do tubo com a régua, como detalhado antes na subseção 2.4.2. Ademais, como mencionamos, vários fatores influenciam a velocidade do som no ar, como a umidade, temperatura² e a pressão.

4.2.5 Atividades Extras

Aqui sugerimos algumas atividades adicionais que complementam o material e ampliam as aplicações do experimento.

- Outros microfones e alto-falantes podem ser testados para comparar as frequências alcançadas por cada um. Desta forma, é possível verificar a qualidade de emissão e captação dos dispositivos, possibilitando uma verificação mais precisa da relação custo/benefício dos diversos equipamentos sonoros existentes no mercado.
- Com diferentes instrumentos musicais, diferentes notas podem ser emitidas e analisadas utilizando o recuso de gravar do DFTubo, por meio do botão “Gravar” localizado no quadro “REC/Ruído”, como indica a

²Influência discutida na subseção 3.2.9.



Figura 4.8: Analisando um áudio externo.

Fig. 4.8. Cantando ou assobiando, é produzida diferentes notas musicais e podemos comparar os resultados.

- Uma vez medida a velocidade do som, se alterarmos o comprimento do tubo e refazermos o procedimento experimental da atividade 3, é possível manipular a equação 4.1 para encontrar indiretamente o comprimento do tubo. Este resultado permite comparar a medida indireta com uma medida direta, realizada com uma fita métrica ou uma régua por exemplo. Isso possibilita a discussão de como essa técnica pode ser empregada para medir o tamanho de tubulações ou cavidades em situações em que a medida direta é dificultada (e.g., um tubo no interior de uma parede ou uma caverna).

Para esta e todas as atividades anteriores, como mencionado anteriormente, foram criados materiais para auxiliar na montagem e no roteiro de atividades, tanto para o aluno como também para o professor. Este material segue no apêndice 5.1.

4.3 Discussão da aplicação das atividades

A sequência de atividades foi aplicada em Novembro de 2020 em duas turmas de 3^a série de uma escola particular do Rio de Janeiro, totalizando 48 alunos. No momento da aplicação, as escolas estavam operando totalmente *online* devido à pandemia de COVID-19, forçando a aplicação do experimento de forma remota.

Inicialmente realizamos uma aula sobre acústica e ao final propusemos a realização do experimento, sugerindo que fosse feito pelos próprios estudantes em suas residências, com material próprio. O direcionamento foi para introduzir a ideia de uma atividade prática, para eles entenderem o que era para ser feito, conhecerem os materiais necessários para montagem e o roteiro utilizado.

Entendendo a situação e o contexto na época de aplicação da atividade, os alunos estavam muito empolgados e animados em saber que poderiam realizar um experimento aparentemente muito complexo, como a medição da velocidade do som, em suas próprias casas com o próprio material. No nosso caso, foi combinado que a realização da atividade não seria obrigatória, por conta da cobrança de ser o último ano do ensino médio e da questão emocional de estarmos passando por uma pandemia.

Durante a aplicação, os estudantes apresentaram algumas dificuldades e como não era uma tarefa obrigatória, nem todos realizaram ou completaram a sequência de atividades. Entre os que realizaram, aproximadamente 10 estudantes, grande parte pediu auxílio para finalizar.

O principal problema apresentado foi na detecção dos picos de intensidade. Muitos alunos estavam realizando o experimento com um tubo demasiadamente pequeno. O comprimento do tubo influencia no espaçamento entre um pico e outro. Quanto menor o comprimento, menor a quantidade de picos de intensidades que vamos observar, vide equação 2.10.

Ainda sobre o tubo, alguns estudantes não conseguiram visualizar com perfeição o pico por usar um diâmetro muito grande, gerando um alargamento do pico. Esse alargamento dificultou a percepção da localização do ponto de máxima intensidade, muitas vezes dois picos acabavam sobrepostos, como

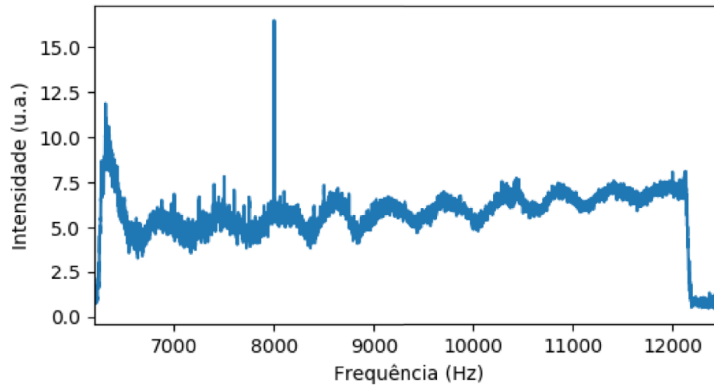


Figura 4.9: Resultado 1 obtido por um dos estudantes.

mostra a Fig. 4.9.

A análise matemática e a interpretação da equação dos tubos abertos durante o uso do *Geogebra* também foram dificuldades observadas. A causa para esta dificuldade foi utilizar uma aula independente, sem realizar conexões com a realização do experimento. Para contornar este problema, no capítulo 2 do apêndice 5.1 elaboramos algumas sugestões de como abordar acústica com vínculos para utilização do experimento.

O programa DFTubo também apresentou um problema de compatibilidade em dois computadores, posteriormente identificado como um bloqueio da inicialização do programa por parte do antivírus. O problema foi solucionado desativando-se o antivírus por alguns minutos enquanto realizava a atividade. Esse problema foi relativamente simples de resolver, no entanto, alguns alunos podem ficar receosos em desabilitar o programa de proteção do computador ou até mesmo não saber como desabilitar.

Também foi narrado por um estudante que o *Windows 7* não estava conseguindo inicializar o programa, mas não investigou o motivo, apenas tentou no *Windows 10* e funcionou normalmente³.

Alguns estudantes estavam realizando a montagem experimental de forma

³Tendo interesse em utilizar o DFTubo em outros sistemas operacionais, além *Windows.*, pode realizar o *download* do código-fonte em www.if.ufrj.br/~gpenell/Softwares/DFTubo/DFTubo.py ou entrar em contato com os autores da dissertação.

errada, muitos por falta de leitura do material auxiliar, especificamente a parte sobre a montagem das atividades. O material auxiliar que está no capítulo 5 do apêndice 5.1 tem apenas 3 páginas e está suficientemente resumido e direto. Portanto, não consideramos que o material esteja extenso, mas que falta ao aluno uma experiência em experimentação. Uma possível alternativa, paliativa, é a demonstração da disposição dos dispositivos na aula de introdução do experimento, antes da realização, mas somente com prática em experimentos é que pode-se corrigir este problema.

Um fato curioso foi o relato de um estudante que ao utilizar caixas de som estéreo, precisou abafar a segunda caixa de som que estava interferindo no experimento. Para isso ele embrulhou a caixa de som com casacos para tentar bloquear o som emitido. É interessante observar a simplicidade e praticidade que os estudantes têm na procura de solução dos problemas que não previmos, o que demonstra a disponibilidade, o interesse e a vontade de realizar a tarefa.

Um estudante que concluiu a atividade alcançou o resultado da velocidade do som $v_{exp} = 343,71 \text{ m/s}^4$, e os picos que encontrou podem ser observados na Fig. 4.10. O estudante descreveu que utilizou um tubo de papel com diâmetro $\Phi = 2 \text{ cm}$ e comprimento $\ell = 45 \text{ cm}$. Admitindo a temperatura ambiente como $T_{amb} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ e usando como referência o valor de Bohn [22] para velocidade do som $v_{ref} = 346,29 \text{ m/s}$, ele obteve uma discrepância de aproximadamente 0,7%.

Podemos verificar que os picos de intensidade ficaram bem definidos, facilitando a identificação de cada harmônico, mas com uma forma inusitada. Em nenhum momento dos ensaios experimentais foram apresentados picos com esse formato, com a base do pico mais larga e um afinamento brusco quando próximo de alcançar o ponto máximo de intensidade.

Passada uma semana da aula de introdução da atividade para os alunos realizarem o experimento, propusemos uma aula de discussão e apresentação dos resultados. Os alunos relataram que compreenderam melhor o fenô-

⁴Na aplicação da sequência de atividades com os estudantes, não discutimos o cálculo da incerteza, apenas abordamos qualitativamente. Portanto, essa medida ficou sem incerteza por ter sido realizada por um estudante.

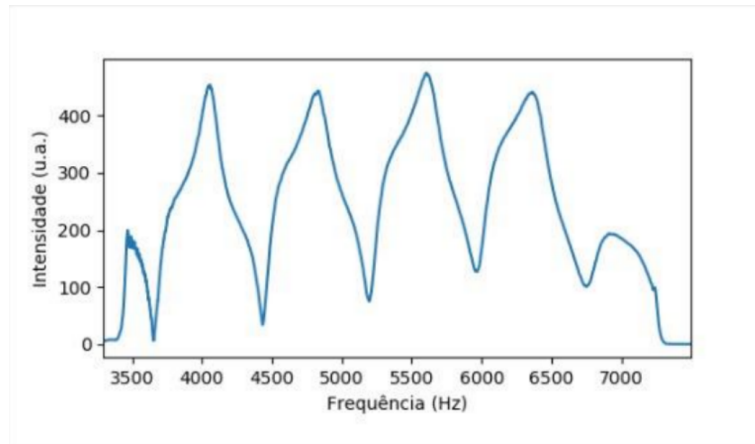


Figura 4.10: Resultado 2 obtido por um dos estudantes.

meno, o funcionamento do experimento e que sentiram-se mais motivados para estudar ao realizar atividades práticas. Por ter sido uma atividade não obrigatória, não houve uma avaliação sobre a atividade nem a obrigação de entrega de relatórios, logo as constatações foram feitas a partir dos diálogos com os alunos antes, durante (com alguns deles) e após a realização do experimento.

Capítulo 5

Considerações Finais

Como discutido ao longo da dissertação, o experimento e a natureza dos fenômenos envolvidos são devidamente conhecidos na literatura, mas sem dúvida a sequência de atividades criada é original e bem adequada para se discutir diversos aspectos da física de ondas sonoras, como por exemplo a física do volume, altura, timbre, interferência de ondas e ressonância no tubo. Elaboramos um material instrucional de forma que o aluno participe do processo de prática em que ele pode inclusive utilizar dispositivos pessoais para realizar a atividade e experimentar suas curiosidades.

O experimento também permite trabalhar com tratamento de dados, como incerteza e o método dos mínimos quadrados. No ensino médio não realizamos uma abordagem minuciosa desses aspectos, mas indiretamente os estudantes acabam incorporando alguns conceitos, ainda que sem nomeá-los como no ensino superior. Um exemplo disto é o processo de linearização da reta que o aluno realiza utilizando o *Geogebra*, cujo objetivo é extrair o coeficiente angular da reta e relacioná-lo com a velocidade do som.

A matemática está presente na essência do experimento, permeando os princípios de funcionamento do programa DFTubo, os modelos de tubo aberto e fechado e a manipulação da equação de primeiro grau relacionando-as, ficando a critério do professor o quanto explorar em cada assunto. É possível explorá-la em diversos níveis de profundidade, incluindo aplicações nos ensino superior, como poderia ser feito por exemplo em discussões sobre

a transformada de Fourier ou sobre tratamento de sinais.

O principal objetivo do trabalho de dissertação foi desenvolver uma sequência de atividades para a aplicação do experimento no ensino básico e desvendar a gama de possibilidades que o experimento pode oferecer. Desta maneira, julgamos que o trabalho atendeu as intenções substanciais e o caráter versátil do experimento permitiu que os estudantes pudessem manipular os dispositivos, fazer parte do experimento e possibilitou a utilização do aparato pessoal, realizando a montagem experimental em casa, para conclusão das atividades, o que consistia em uma das pretensões iniciais do trabalho.

Como descrito no Capítulo 3, em relação às medidas realizadas, podemos concordar que alcançaram mais do que o esperado, mesmo utilizando recursos acessíveis aos estudantes. Ademais, é possível aperfeiçoar substancialmente o experimento empregando-se uma mangueira ou um tubo de PVC, itens que, embora nem todos possuam em casa, não são difíceis de se encontrar.

Como mencionado na seção 4.3, o experimento foi realizado de forma remota por necessidade e não por escolha. Sem levar em conta o lado emocional dos estudantes para realização de uma atividade que não era obrigatória, percebemos que uma abordagem presencial para instruir melhor os alunos contribuiria para que a sequência de atividades atingisse seu objetivo de forma mais satisfatória. Esta mudança já sanaria, por exemplo, um dos problemas levantados, que foi a montagem errada da disposição dos dispositivos por falta de leitura do material auxiliar.

Podemos afirmar que o trabalho de dissertação tem um enorme potencial que evidenciou-se durante a aplicação, onde descrevemos os conceitos básicos do experimento, realizamos testes, desenvolvemos uma sequência de atividades para aplicação do experimento no ensino básico e aplicamos a sequência. O desenvolvimento ao longo do trabalho permitiu abertura para muitas ideias que não foram contempladas no momento, mas seguem para trabalhos futuros utilizando este material. Essas ideias serão descritas na subseção seguinte.

5.1 Trabalhos futuros

Como mencionado, o trabalho da presente dissertação permitiu a abertura para explorar uma série de conceitos físicos e matemáticos a partir da sequência de atividades criada para o experimento. Mas, além disso, pensamos em algumas aplicações que contêm a mesma base conceitual que utilizamos até aqui e que podem ser exploradas futuramente.

Como exemplo, podemos usar o programa DFTubo como um medidor de vazão. A ideia seria em vez de medir a velocidade do som, como estávamos realizando, medir o comprimento do tubo adotando um valor de referência para a velocidade do som. Para esse experimento, precisamos de um recipiente onde vamos preencher com um líquido e deixar um furo no fundo do recipiente, suficiente para permitir o líquido escoar e aumentar a coluna de ar ao longo do tempo. Realizando duas medidas em um intervalo de tempo conhecido e sabendo a área da base do recipiente utilizado, podemos calcular a vazão média. A Fig. 5.1 ilustra a ideia de aplicação.

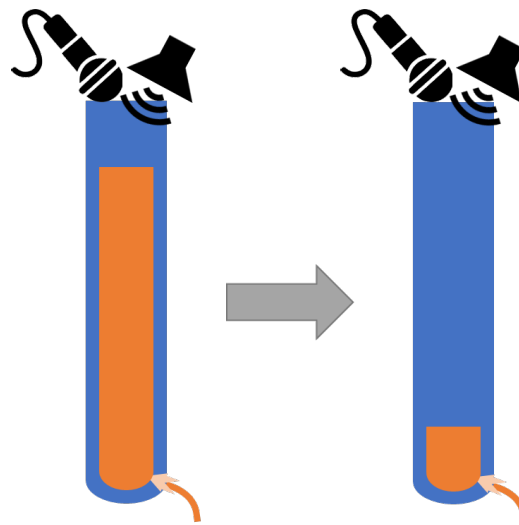


Figura 5.1: Aplicação do experimento para medidor de vazão.

Também achamos interessante a ideia de estruturar uma sequência de atividades específica para explorar a influência da temperatura na velocidade do som. Nosso trabalho relacionou e discutiu essa influência na subseção 3.2.9, mas não estruturou uma sequência de atividades a serem desenvolvidas com

alunos em sala de aula. Neste ponto, além do ensino básico é natural extrapolar e imaginar uma sequência com mais profundidade sendo aplicada no ensino superior em um laboratório de física básica.

Nos ensaios experimentais realizamos muitos testes, como descrito no capítulo 3, mas ainda percebemos a necessidade de mais alguns. Entre eles, podemos destacar a variação do diâmetro do tubo, com o intuito de verificar a chamada “correção de borda”. Elaboramos uma ideia para atacar o assunto, montando tubos de papel com diversos diâmetros para realizar o experimento. Porém, tivemos dificuldade de montar o tubo com diâmetro bem definido, uma vez que o papel amassa com facilidade. Esse problema é discutido, por exemplo, no artigo de Levine [29] com um bom grau de aprofundamento físico e matemático.

Uma possível solução seria a construção de discos com raios bem definidos com auxílio da impressão 3D e posteriormente montar o tubo de papel com o disco dentro, de modo a obter uma precisão e um controle maiores do diâmetro. Não foi possível acessar o laboratório para realizar a construção dos discos de suporte por causa do isolamento social que foi iniciado durante o andamento da dissertação. Detalhes do comportamento da correção de borda pode ser verificado no artigo de Anderson [30].

Ainda com a ideia de usar a impressão 3D para auxiliar e contribuir com testes no experimento, consideramos alterar o posicionamento e a angulação do microfone em relação ao tubo para verificar a influência que podem exercer sobre os resultados.

Elaboramos um modelo 3D de como seria o protótipo a ser impresso. Esse modelo pode ser visualizado tridimensionalmente no endereço eletrônico <https://app.sketchup.com/app?3dwid=3d1b16af-be87-4717-b930-e38d6dc00d4d>¹ e na Fig. 5.2 se representa uma visão tridimensional da peça.

A ideia de fazer essa peça está em apoiar o tubo no suporte mais largo em forma de calha (hachurado em azul) e colocar o microfone na calha menor (hachurada em vermelho), podendo até prendê-lo por parafusos com o suporte posicionado na parte superior. Fixados o microfone na parte vermelha, com o auxílio da peça amarela e o tubo apoiado na parte azul, podemos

¹É necessário um cadastro no *Trimble*.

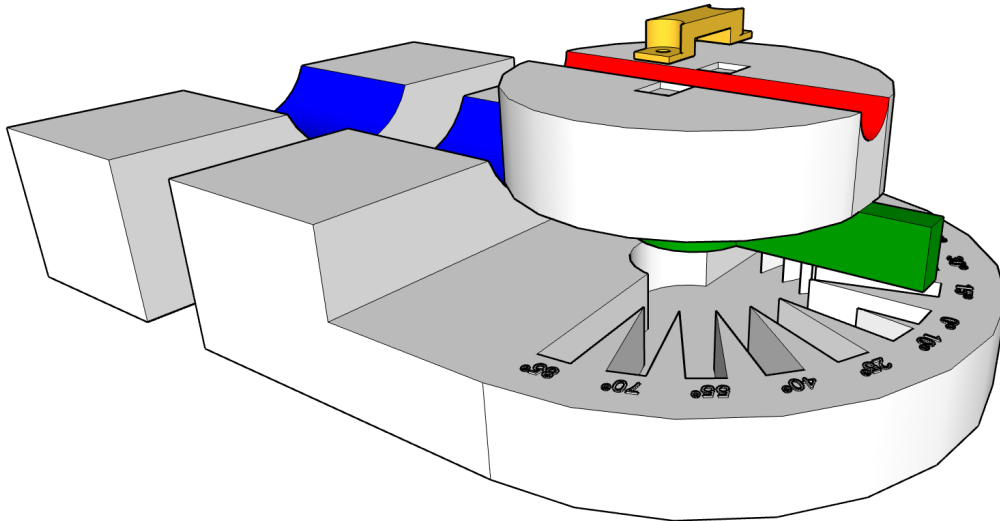


Figura 5.2: Simulação do protótipo para auxiliar o teste de posição e ângulo do microfone.

encaixar a peça verde no suporte inferior que dispõe um passo de 5° e uma variação de 0° a 90° em relação à direção do tubo.

Uma outra possibilidade de explorar esse experimento é alterar o meio de propagação da onda sonora. Embora não tenhamos nos dedicado a produzir um aparato capaz de vedar o interior do tubo eficientemente, encontramos na literatura algumas iniciativas bem sucedidas, como artigo de Martin [31], em que o experimento é realizado em ar, CO_2 e Hélio, para verificar a mudança da velocidade do som em cada situação. Na realidade das escolas brasileiras, injetar outros gases além do próprio ar seria muito difícil. Portanto, uma solução seria usar gelo seco para injetar o CO_2 no interior do tubo e verificar uma diferença na velocidade do som.

Uma necessidade que se apresentou durante o desenvolvimento do trabalho foi a construção de uma avaliação da sequência de atividades desenvolvida para o ensino básico. É importante elaborar e discutir uma avaliação para tentar medir, mesmo que qualitativamente, se os alunos conseguiram alcançar os objetivos propostos em cada atividade. Uma avaliação desenvolvida na referência [32] foi sugerida no capítulo 5 do apêndice 5.1. Todavia, seria in-

interessante construir uma verificação de aprendizagem criada especificamente para a atividade proposta. Isso permitira acima de tudo uma avaliação da atividade em si.

Bibliografia

- [1] CAVALCANTE, M. A.; RODRIGUES, C. E. M.; PONTES, L. A. *Novas tecnologias no estudo de ondas sonoras*. Caderno Brasileiro de Ensino de Física, V. 30, n. 3, p. 579 – 613, 2013.
- [2] SAAB, S.; CÁSSARO, F. A. M.; BRINATTI, A. M. *Laboratório caseiro: tubo de ensaio adaptado como tubo de kundt para medir a velocidade do som no ar*. Caderno Brasileiro de Ensino de Física, V. 22, n. 1, p. 112 – 120, 2005.
- [3] PIZETTA, D. C.; WANDERLEY, A. B.; MASTELARO, V. R.; PAIVA, F. F. *Uma avaliação experimental do tubo de ondas sonoras estacionárias*. Revista Brasileira de Ensino de Física, SciELO Brasil, V. 39, n. 3, p. e3301.1 – e3301.13, 2017.
- [4] SOUZA, A. R. *Experimentos em ondas mecânicas*. Dissertação (Mestrado Profissional em Ensino de Física) - Programa de pós graduação de Ensino de Física, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Ilha do Fundão, 2011.
- [5] NUSSENZVEIG, H. M. *Curso de Física Básica: fluidos, oscilações e ondas, calor*. Editora Blucher, V. 2, 2018.
- [6] HEWITT, P. G. *Fundamentos de física conceitual*. Bookman, V. 1, 2000.
- [7] SEARS, F.; ZEMANSKY, M.; YOUNG, H.; FREEDMAN, R. *Física II: Termodinâmica e Ondas*. Addison Wesley, V. 2, 2003.
- [8] SILVEIRA, F. L. da; VARRIALE, M. C. *Propagação das ondas marítimas e dos tsunamis*. Caderno Brasileiro de Ensino de Física, V. 22, n. 2, p. 190 – 208, 2005.
- [9] HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. *Fundamentals of physics*. John Wiley & Sons, V. 1, 2013.

-
- [10] KNIGHT, R. D. *Física: Uma Abordagem Estratégica*. Bookman, V. 2, 2009.
- [11] FEYNMAN, R. P.; LEIGHTON, R. B.; SANDS, M. *Lições de física de Feynman*. Bookman, V. 1, 2008.
- [12] HOLLIS, B. *Physics of Sound*. Disponível em: <https://method-behind-the-music.com/mechanics/physics/>. Acesso em: 27 abril 2022, 2017.
- [13] BUTKOV, E. *Física matemática*. Livros Técnicos e Científicos, V. 1, 1988.
- [14] JÚNIOR, F. N. M. *Somando Funções Trigonométricas: uma reconstrução didática do conceito de timbre a partir de duas experiências pedagógicas*. Boletim de Educação Matemática, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, V. 23, n. 36, p. 597 – 624, 2010.
- [15] OGURI, V.; SANTORO, A.; MAHON, J. R.; OLIVEIRA, J. U. C. L.; MUNDIM, L. M.; SILVA, W. L. P. *Estimativas e erros em experimentos de física*. EdUERJ, V. 1, 2005.
- [16] VUOLO, J. H. *Fundamentos da teoria de erros*. Editora Blucher, V. 1, 1996.
- [17] HIRTH, M.; KUHN, J.; MULLER, A. *Measurement of sound velocity made easy using harmonic resonant frequencies with everyday mobile technology*. The Physics Teacher, American Association of Physics Teachers, V. 53, n. 2, p. 120 – 121, 2015.
- [18] MOLINA-CORONELL, J.; MANCERA, W. C.; MAZO, C. S. *Analizando ondas estacionarias en tubos abiertos y cerrados con el uso de smartphone*. Revista mexicana de física, Sociedad Mexicana de Física, V. 63, n. 1, p. 76 – 82, 2017.
- [19] WALSH, T. *Creating interactive physics simulations using the power of GeoGebra*. The physics teacher, American Association of Physics Teachers, V. 55, n. 5, p. 316 – 317, 2017.
- [20] PATSKO, L. F. *Tutorial: Aplicações, Funcionamento e utilização de sensores*. Maxwell Bohr: Instrumentação eletrônica, p. 1 – 84, 2006.
- [21] JOHANN, M.; FOLLE, L.; GOMES, W.; CORDONI, R. *Estabelecendo uma Metodologia de Avaliação Subjetiva de Qualidade de Áudio*. ScientiaTec, V. 2, n. 2, p. 85 – 96, 2015.

-
- [22] BOHN, D. A. *Environmental effects on the speed of sound*. Journal of the Audio Engineering Society, Audio Engineering Society, V. 36, n. 4, p. 223 – 231, 1988.
- [23] SANTOS, E.; MOLINA, C.; TUFAILE, A. *Violão e guitarra como ferramentas para o ensino de física*. Revista Brasileira de Ensino de Física, SciELO Brasil, V. 35, n. 2, p. 2507.1 – 2507.7, 2013.
- [24] SILVA, D. K. *A física e os instrumentos musicais construindo significados em uma aula de acústica*. Dissertação (Mestrado Profissional em Ensino de Física) - Programa de pós graduação em Ensino de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.
- [25] SALAZAR, A. D. *Análise de instrumentos musicais através do expoente hurst de banda harmônica - estudo comparativo da quena e de outros instrumentos de sopro*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Programa de pós graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2015.
- [26] KASPER, L.; VOGT, P.; STROHMEYER, C. *Stationary waves in tubes and the speed of sound*. The physics teacher, American Association of Physics Teachers, V. 53, n. 1, p. 52 – 53, 2015.
- [27] VELASCO, S.; ROMÁN, F. L.; GONZÁLEZ, A.; WHITE, J. A. *A computer-assisted experiment for the measurement of the temperature dependence of the speed of sound in air*. American Journal of Physics, American Association of Physics Teachers, V. 72, n. 2, p. 276 – 279, 2004.
- [28] BRETONES, P. S. *Nível sonoro medido com aplicativos em aulas de física*. Física na Escola, V. 17, n. 1, p. 39 – 45, 2019.
- [29] LEVINE, H.; SCHWINNGER, J. *On the radiation of sound from an unflanged circular pipe*. Physical review, APS, V. 73, n. 4, p. 383 – 406, 1948.
- [30] ANDERSON, H.; OSTENSEN, F. *Effect of frequency on the end correction of pipes*. Physical review, APS, V. 31, n. 2, p. 267, 1928.
- [31] MARTIN, B. *Measuring the speed of sound — Variation on a familiar theme*. The Physics Teacher, American Association of Physics Teachers, V. 39, n. 7, p. 424 – 426, 2001.

- [32] SILVA, S. T. *Propagação do som: Conceitos e Experimentos*. Dissertação (Mestrado Profissional em Ensino de Física) — Programa de pós graduação em Ensino de Física, Instituto de Física, Universidade do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, p. 62 – 73, 2011.

Material Instrucional

Neste apêndice, encontra-se o material instrucional que será utilizado pelo professor para guiar no planejamento das atividades com a turma. Destacamos que o seção 5.1 (Montagem e Roteiro de Atividades) pode ser destacado e compartilhado com os alunos de forma impressa ou digitalmente, com o intuito de auxiliar os alunos na realização do experimento.



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
Instituto de Física
Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física
Mestrado Profissional em Ensino de Física

**Sequência de atividades sobre acústica utilizando
análise espectral do som**
(Material Instrucional)

Victor Agostinho Pontes
Germano Maioli Penello
Rodrigo Miranda Pereira

Material instrucional associado à dissertação de mestrado de Victor Agostinho Pontes, apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, Instituto de Física, da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Rio de Janeiro
Maio de 2022

Sumário

Lista de Figuras	iii
1 Introdução	1
2 Conceitos Físicos	3
3 Experimento de Decomposição de Frequências em um Tubo	7
3.1 Materiais	8
3.2 Montagem	9
4 Roteiro de Aplicação	13
4.1 Atividade 1	14
4.2 Atividade 2	16
4.3 Atividade 3	17
4.4 Atividade 4	19
4.5 Atividades Extras	21
5 Materiais Auxiliares	23
5.1 Montagem e Roteiro de Atividades	23
5.2 Proposta de Avaliação	27
6 Conclusão	28

Lista de Figuras

2.1	Lâmina vibrando produzindo som.	3
2.2	Onda monocromática.	5
2.3	Interferência entre ondas.	6
3.1	Representação da disposição dos equipamentos nas duas primeiras atividades.	9
3.2	Ilustração de alguns passos da produção do tubo de papel A4.	10
3.3	Disposição dos equipamentos na atividade 3.	11
4.1	Janela do programa DFTubo.exe.	14
4.2	Resultado da análise com as pré-configurações.	15
4.3	Resultado da análise do som com emissão contínua.	16
4.4	Definindo a melhor faixa de frequência.	17
4.5	Resultado da análise do som com o tubo entre o microfone e o alto-falante.	18
4.6	Inserindo os dados das frequências na coluna B.	20
4.7	Analisando um áudio externo.	22

Capítulo 1

Introdução

Estamos cercados de ruídos, barulhos e sons. Percebemos inúmeros aparelhos eletrônicos que emitem som, são televisões, rádios, computadores, *smartphones*, e até os que não têm a emissão de som como objetivo principal, como os relógios em seu “tic-tac”. O som sempre esteve e está presente no nosso cotidiano. Às vezes, trata-se somente de um ruído de fundo, como o barulho do ventilador que frequentemente passa despercebido por já estarmos habituados, mas ele sempre está presente.

Essa onipresença ocorre pois uma simples vibração de um objeto é transmitida às moléculas do ar, que sofrem alternadamente compressões e expansões em todas as direções, o que caracteriza o som. Estas vibrações chegam pelo ar até os nossos ouvidos, onde são recebidas pelo tímpano e o nosso cérebro as interpreta. A natureza física destas vibrações será abordada posteriormente com mais detalhes.

O som pode ser explorado de diversas maneiras e sob vários aspectos no ensino da física. Em particular, quando abordado em tubos sonoros, percebemos uma falta de exploração e discussão do tema na maior parte das apostilas dos sistemas de ensino do ensino médio.

Por conta disso, este produto instrucional tem como objetivo apresentar uma abordagem de um experimento de decomposição de frequências do som em um tubo no ensino de acústica. Nosso experimento foi originalmente desenvolvido com a finalidade de aplicação na modalidade de ensino presencial.

Porém, em virtude da pandemia de 2020 e a crescente demanda por recursos de ensino a distância por professores do ensino básico, readaptamos nossa proposta de modo a permitir a realização das atividades pelos alunos em suas casas individualmente.

Independente do modelo seguido no experimento, presencial ou a distância, abordamos os conceitos físicos de produção e qualidade do som e discutimos o modelo de ondas sonoras em um tubo aberto, propondo uma progressiva compreensão da fenomenologia envolvida, que culminará em uma medida indireta do valor da velocidade do som.

A seguir, vamos discutir sobre os conceitos físicos a serem abordados no experimento. Posteriormente, veremos os materiais necessários, a montagem e o roteiro de aplicação.

Capítulo 2

Conceitos Físicos

Uma ideia recorrente nos livros para iniciar a discussão da produção do som, é que ao fazermos vibrar um objeto material, ele produz o som, como a Fig. 2.1 sugere com uma lâmina. Entretanto, para que o efeito seja audível, é necessário uma lâmina capaz de vibrar muito rapidamente e a visualização deste efeito não é tão simples, podendo gerar alguns equívocos na concepção do som.

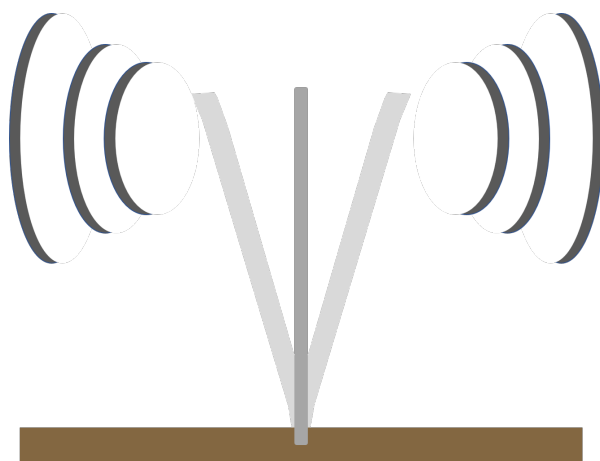


Figura 2.1: Lâmina vibrando produzindo som.

Uma alternativa para discutir a produção do som é com a utilização de um violão e a demonstração da vibração das cordas. Dessa forma, os alunos podem esticar e soltar a corda provocando a vibração, sendo natural para

eles perceberem que essas vibrações da corda serão transmitidas ao ar numa alternância de compressões e expansões produzindo o som, mas ainda assim, mal enxergamos as rápidas vibrações. Mesmo com o auxílio de câmeras usuais que operam com aproximadamente 30 quadros por segundo (ou FPS, sigla em inglês para *frames per second*), ainda não conseguimos observar nitidamente a forma das ondas na corda.

Além da produção do som, podemos também explorar suas qualidades utilizando um violão. A intensidade sonora produzida dependerá diretamente da intensidade com que pulsamos a corda e a soltamos. Quanto maior o pulso, maior a intensidade do som produzido. Com essa noção, podemos definir a 1ª qualidade, a intensidade ou volume.

Pulsando a corda com uma mão e pressionando-a com a outra em diferentes casas do braço do violão, percebemos uma mudança significativa no som produzido. A corda com um maior comprimento “disponível” para oscilar, produz um som mais grave, evidenciando as frequências mais baixas. Já a corda com um comprimento menor, produz um som mais agudo, evidenciando as frequências mais altas. Dessa forma, podemos definir a 2ª qualidade do som, o tom ou altura.

Há estudos sobre a sensibilidade da audição humana, podemos verificar a resposta do nosso corpo em função da absorção de ondas sonoras com diferentes frequências na mesma intensidade. Os resultados mostram que o corpo possui intensidades diferentes para cada frequência absorvida, ou seja, preferências em frequências do espectro audível, que está entre 20 Hz e 20 kHz.

As ondas sonoras são ondas mecânicas e longitudinais, isto é, ondas que precisam de um meio material para se propagar e cuja direção de vibração se dá na mesma direção de propagação da onda. Reiterando que as ondas sonoras são produzidas a partir da transmissão da vibração de um objeto para o meio material, provocando uma perturbação no meio com a mesma direção de propagação da onda. Podemos perceber esse efeito em uma onda que se propaga por uma mola aos 38 segundos do vídeo disponibilizado pela USP no link https://youtu.be/zYdho_gcCRE?t=38¹. Recomendamos o

¹Último acesso em 04 de maio de 2022.

restante do vídeo para outras demonstrações envolvendo ondas transversais.

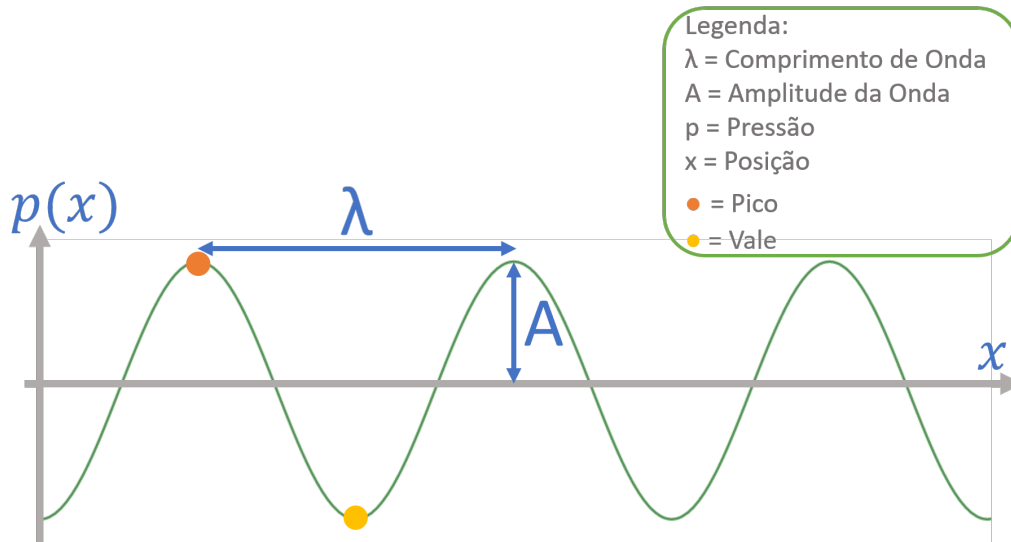


Figura 2.2: Onda monocromática.

Para facilitar a visualização da onda sonora, podemos representá-la em um gráfico associando cada pico a uma região de alta pressão e cada vale a uma região de baixa pressão, como ilustra a Fig. 2.2. No entanto, as ondas sonoras não necessariamente têm essa forma de onda monocromática, podendo aparecer nas formas mais variadas como resultado de interferências ondulatórias. Estas interferências podem ocorrer entre duas ou mais ondas, resultando em uma onda única.

Esse é um dos motivos de existirem vários instrumentos emitindo a mesma nota musical porém cada um com a sua própria característica. Ainda que a frequência dominante emitida seja a mesma, a forma da onda produzida é completamente diferente em cada instrumento. Ao escutarmos uma nota proveniente de um piano, uma flauta ou um violão, somos capazes de intuir o instrumento que a emitiu, por ter uma forma de onda bem característica. O mesmo acontece com a nossa voz, cada indivíduo possui sua respectiva forma de onda emitida, não é o jeito ou a linguagem da fala, é o timbre da voz. Dessa forma, acabamos de definir a 3ª qualidade do som, o timbre.

O timbre será a qualidade mais explorada nas atividades propostas. Não é intuitivo para o aluno associar que uma onda com forma aleatória, como

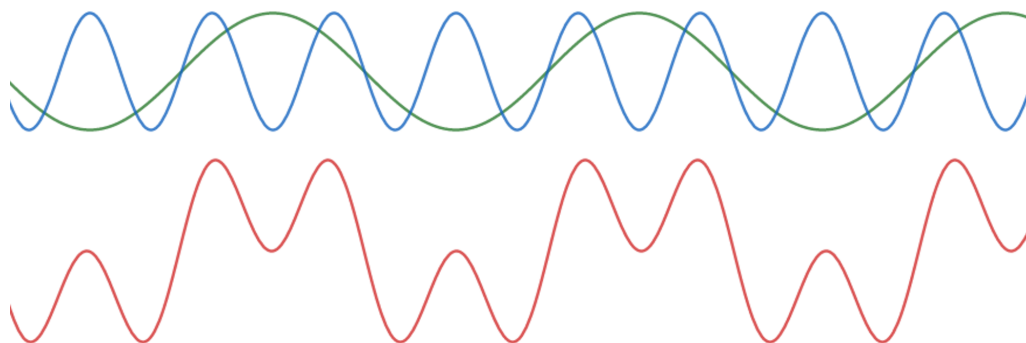


Figura 2.3: Interferência entre ondas.

exemplificado pela onda vermelha na Fig. 2.3, possa ser formada a partir das interferências de ondas monocromáticas como as de cor verde e azul.

No dia a dia, as ondas sonoras que chegam aos nossos ouvidos são compostas da superposição de outras ondas senoidais com distintas frequências. Dessa forma, pode-se obter qualquer forma de onda periódica. Os conceitos envolvidos na superposição destas ondas não são comumente abordados no ensino básico, portanto só precisamos da noção mais simples de interferência entre ondas gerando uma única. Agora, utilizando os conceitos discutidos até o momento, iremos apresentar como montar um experimento simples para observar algumas características do som. O experimento consiste na análise da interação dessas ondas sonoras utilizando um tubo.

Capítulo 3

Experimento de Decomposição de Frequências em um Tubo

O experimento de decomposição de frequências em um tubo, como o nome sugere, será utilizado para análise espectral do som. Para isso, um alto-falante é colocado próximo a uma das extremidades de um tubo feito com folhas de papel A4 e um microfone próximo à outra. Dessa forma, as ondas sonoras emitidas pelo alto-falante para o interior do tubo serão captadas pelo microfone, ambos conectados ao computador.

A construção do tubo a partir de folhas de papel A4 permite variar o seu comprimento, favorecendo a reprodutibilidade e permitindo a alteração de mais um parâmetro no experimento. Como veremos com mais detalhes adiante, o tubo atuará como um filtro de frequências, que será importante para discutirmos o conceito de timbre.

Com os dispositivos de emissão e captação de dados conectados ao computador, podemos instalar o programa DFTubo¹, acrônimo de decomposição de frequências em um tubo. O programa é responsável por manipular o alto-falante para emitir ondas sonoras em uma determinada faixa de frequência e analisa o sinal captado pelo microfone, tratando os dados e produzindo um gráfico de intensidade como função da frequência. Este gráfico será detalhado e mostraremos como será abordado posteriormente.

¹O download do programa pode ser realizado no link <https://www.if.ufrj.br/~gp-enello/Softwares/DFTubo/DFTubo.exe>.

Como mencionado, o experimento proporciona uma discussão dos conceitos físicos de produção e qualidades do som, bem como do modelo de ondas sonoras em um tubo aberto, para alcançarmos o objetivo final de medir indiretamente a velocidade do som. Durante a realização das atividades, inserimos discussões transversais como qualidade dos equipamentos empregados, incerteza das medidas, diferenças entre medida direta e indireta, além de conceitos mais fundamentais como interpretação e análise de gráficos.

As próximas seções determinarão os materiais necessários para realização do experimento e descreverá como montar adequadamente todos os itens para obtermos o melhor resultado possível dos dados.

3.1 Materiais

Para montar o experimento padronizado e alcançando uma boa qualidade, precisamos dos seguintes itens:

1. Régua;
2. Fita adesiva;
3. Folhas de Papel A4;
4. Microfone;
5. Alto-falante (Fone de ouvido);
6. Computador (Com o programa DFTubo devidamente instalado).

Para uma melhor aplicabilidade, sugerimos que folhas A4 sejam enroladas e usadas como um tubo no experimento, por tratar-se de um material de fácil acesso aos estudantes. Esse procedimento é discutido na seção 3.2. Alertamos que uma maior gramatura da folha terá um impacto positivo no resultado do experimento, pois o papel com uma espessura maior minimiza as vibrações do próprio tubo, evitando perdas.

Observamos que embora os modelos de fone de ouvido com microfone embutido possam ser utilizados ao mesmo tempo na emissão e captação, isso

introduz uma limitação ao comprimento do tubo imposta pelo tamanho do fio do equipamento, o que pode comprometer a obtenção de resultados.

3.2 Montagem

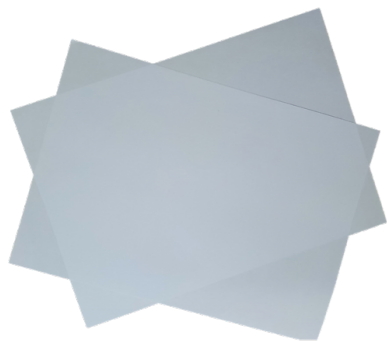
A disposição dos equipamentos citados acima sofrerá leves alterações para algumas atividades. Nas duas primeiras atividades, posicionaremos o alto-falante e o microfone um de frente para o outro sem nenhum objeto entre eles, assim como observamos na Fig. 3.1. O objetivo desta primeira etapa é entender o funcionamento do programa e algumas sutilezas do som, conforme será detalhado no roteiro de aplicação, capítulo 4.



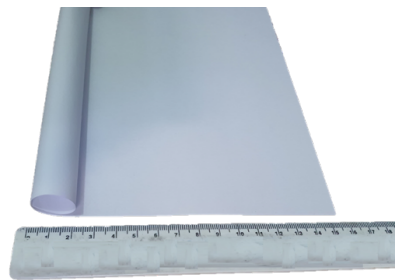
Figura 3.1: Representação da disposição dos equipamentos nas duas primeiras atividades.

Para a terceira atividade, entre o alto-falante e o microfone colocaremos um tubo de comprimento variável que será feito a partir das folhas de papel A4. A seguir temos um passo a passo de como fazer o tubo de papel para garantir um padrão de boa qualidade.

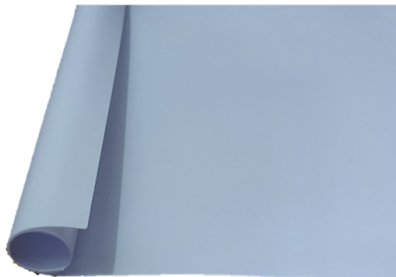
1. Separe duas folhas de papel A4, como mostrado na Fig. 3.2(a);
2. Pegue a primeira folha e enrole-a, com um diâmetro relativamente pequeno (aproximadamente 2 cm) de forma que a maior dimensão da folha tenha o comprimento do tubo, como mostrado na Fig. 3.2(b);



(a) Separando duas folhas A4.



(b) Enrolando a primeira folha.



(c) Enrolando a segunda folha usando a primeira como modelo.



(d) Empurrando o tubo interior do exterior, formando um único tubo de comprimento variável.

Figura 3.2: Ilustração de alguns passos da produção do tubo de papel A4.

3. Corte três pedaços de fita adesiva, de aproximadamente 5 cm, e cole-as nas bordas da folha e na parte central, evitando assim que o tubo se desenrole;
4. Pegue a segunda folha de papel A4. Use o primeiro tubo como modelo, enrolando/envolvendo a segunda folha sobre o tubo de papel previamente feito. Desta forma garantimos que os tubos terão diâmetros parecidos, minimizando folgas, como mostrado na Fig. 3.2(c);
5. Corte novamente três pedaços de fita adesiva, de aproximadamente 5 cm e cole duas próximas às bordas e uma na parte central, como feito no passo 3;
6. Empurre com o dedo o tubo interior, deslocando o tubo interno em relação ao externo. Pronto, agora temos um tubo de papel com comprimento variável, como mostrado na Fig. 3.2(d).

Preparado o tubo de papel e apoiado em uma superfície, posicionamos o alto-falante em uma extremidade, bem próximo da abertura do tubo. Na extremidade oposta, posicionamos o microfone, também bem próximo da abertura, mas ainda do lado de fora, como ilustra a Fig. 3.3.



Figura 3.3: Disposição dos equipamentos na atividade 3.

Com o alto-falante e o microfone conectados ao computador, realizamos as análises dos dados com o programa DFTubo. O programa foi desenvolvido em *Python* em parceria com os alunos João Pedro da Cruz Bravo Ferreira, do

curso de bacharelado em Física da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), e Lucas Weitzel Dutra Souto, do mestrado acadêmico em Física, também da UFRJ. Hoje, este programa foi mais desenvolvido e adaptado para o ambiente do ensino médio, podendo ser instalado em *Windows* com um arquivo executável.

A essência do programa é gerar o gráfico de intensidade em função da frequência, onde podemos perceber a intensidade de cada frequência emitida pelo alto-falante e que é captada pelo microfone. No próximo capítulo veremos como podemos trabalhar com este resultado em sala de aula.

Capítulo 4

Roteiro de Aplicação

No capítulo 2, discutimos as qualidades do som, isto é, as noções de volume, tom e timbre, que são conceitos fundamentais para explorarmos o experimento. Neste capítulo, apresentaremos a metodologia utilizada e os conceitos físicos que serão abordados em cada atividade. O objetivo destas atividades é fazer uma progressiva compreensão das características do som para, ao final, medirmos indiretamente a velocidade do som no ar.

Nas duas primeiras atividades (seção 4.1 e 4.2), temos o objetivo de apresentar as funcionalidades do programa, bem como testar a qualidade dos equipamentos que o aluno tem a seu alcance. No processo, discutimos o conceito de volume e a relação da frequência com o tom. O foco é determinar a faixa de frequência ideal para os equipamentos disponíveis, a fim de obtermos a melhor medida possível.

Na atividade 3 (seção 4.3), temos o objetivo de verificar a influência do tubo de papel entre o alto-falante e o microfone. Verificaremos que ele atuará como um filtro, selecionando frequências em função de seu comprimento.

A atividade 4 (seção 4.4) propõe uma medida do valor da velocidade do som de forma indireta, a partir dos dados obtidos anteriormente. De acordo com as frequências coletadas pelo microfone, após a passagem da onda sonora pelo tubo, é possível determinar a velocidade do som utilizando um ajuste linear.

Nas atividades extras (seção 4.5), propomos que os alunos analisem outros

dispositivos que tenham disponíveis, como fones e microfones diferentes, além de explorar a opção “Gravar” do programa, utilizando instrumentos musicais ou mesmo a voz para visualizar as frequências presentes e as diferenças entre sons. Ademais, propomos a possibilidade de realizar uma discussão sobre a distinção entre medida direta e indireta, que não está detalhada, apenas sugerida.

4.1 Atividade 1

Nesta etapa vamos entender o funcionamento e o objetivo do programa. O programa controla os dispositivos sonoros do computador, permitindo a emissão de um som por meio do alto-falante bem como a captação pelo microfone. O som emitido é analisado e cada frequência absorvida é registrada com suas respectivas intensidades.

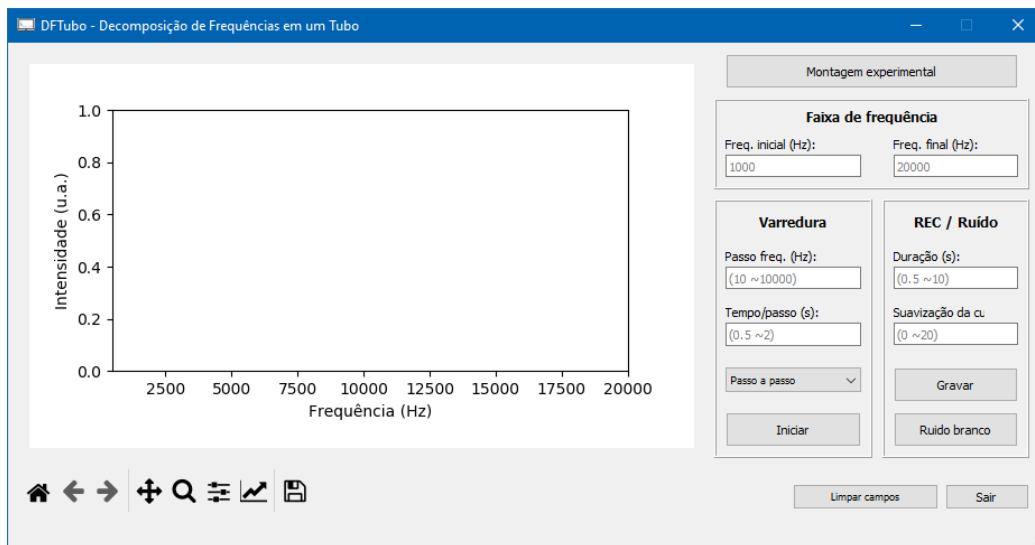


Figura 4.1: Janela do programa DFTubo.exe.

Após o *download* do DFTubo, execute o arquivo DFTubo.exe e aguarde o carregamento do programa. Uma janela se abrirá com um espaço para um gráfico de intensidade como função da frequência ($I \times \nu$) na parte esquerda e algumas configurações na parte direita, como mostrado na Fig. 4.1. Nesta

primeira atividade utilizaremos as opções pré-selecionadas por padrão, sem necessidade de alterar as configurações.

Para começar, monte a experiência desta atividade conforme descrito na Fig. 3.1 da seção 3.2 (Montagem) e aperte o botão “Iniciar” localizado no quadro intitulado “Varredura” na janela do programa. Percebemos que sons são sucessivamente emitidos com frequências bem definidas, variando entre 1 kHz e 20 kHz, e em seguida um gráfico de barras, similar ao da Fig. 4.2 é produzido.

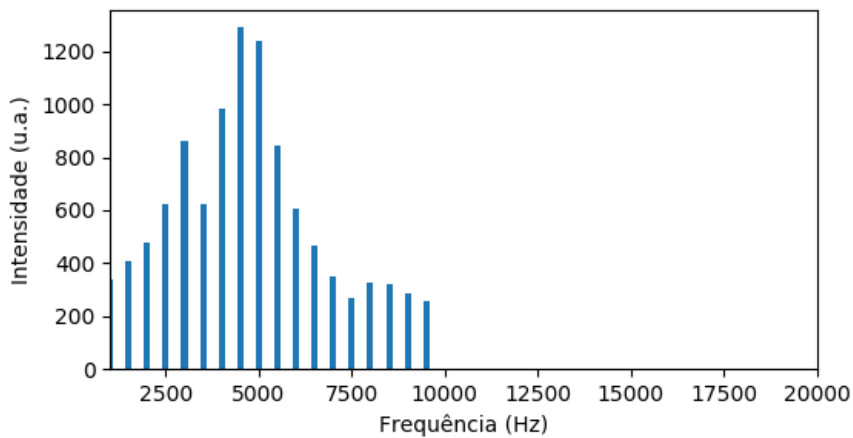


Figura 4.2: Resultado da análise com as pré-configurações.

Como podemos observar no gráfico, mesmo sem alterarmos a regulagem de volume do alto-falante obtemos intensidades diferentes para diferentes frequências. Isto pode acontecer tanto por conta do alto-falante não conseguir emitir quanto por o microfone não captar estas frequências com a mesma eficiência. Para descobrir qual dispositivo está limitando a medida, podemos trocar um deles e analisar as diferenças nos resultados, um teste sugerido na seção 4.5 (Atividades Extras).

4.2 Atividade 2

Nesta atividade, precisamos alterar as pré-configurações. Na primeira coluna do lado direito, no quadro intitulado “Varredura”, altere a função de “Passo a passo” para “Continuamente”. Realize novamente o processo anterior com a mesma disposição dos equipamentos da Fig. 3.1 e analise o gráfico, que deve se assemelhar ao da Fig. 4.3. Notoriamente, como cada equipamento tem suas particularidades, a curva obtida será diferente para cada equipamento utilizado, e não será exatamente igual ao da ilustrada.

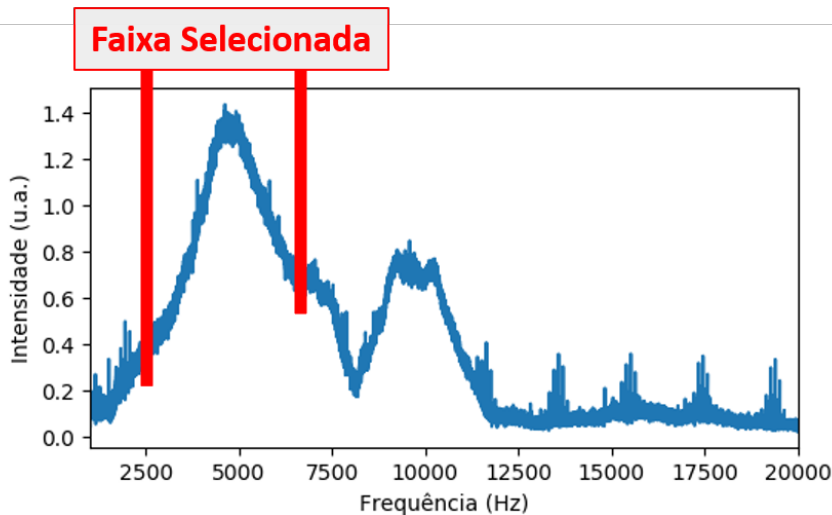


Figura 4.3: Resultado da análise do som com emissão contínua.

Podemos perceber que temos incontáveis valores de frequência relacionados com as respectivas intensidades, dando uma sensação de continuidade. Diferentemente dos valores discretos obtidos na primeira atividade, repare que agora temos informações de frequências que não tínhamos na atividade anterior.

O objetivo desta atividade é observar e selecionar a faixa de frequência emitida e captada de modo mais eficiente pelos dispositivos disponíveis. Ao passar o cursor sobre o gráfico, aparecerão na parte inferior os valores de x e y para facilitar a seleção dos pontos. Procure uma faixa que tenha um pico de intensidade mais largo possível, com no mínimo 2 kHz de diferença,

mesmo que haja pequenas alterações nas intensidades e anote o valor mínimo e máximo da faixa de frequência escolhida.

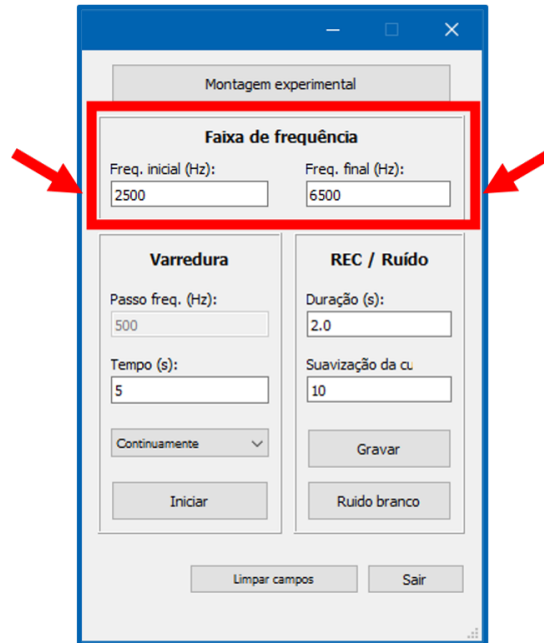


Figura 4.4: Definindo a melhor faixa de frequência.

Durante a atividade, abordaremos o conceito de intensidade ou volume e também de altura ou tom. A discussão destes conceitos é fundamental para o tema da qualidade dos equipamentos que estamos utilizando na experiência e para progressão das atividades posteriores.

Paralelamente à discussão da qualidade do equipamento, o professor pode aproveitar os interessantes questionamentos em aula e indagar sobre o nosso “equipamento natural”. O ouvido humano é capaz de perceber intensidades diferentes para cada frequência, exatamente como ilustra a Fig. 4.3?

4.3 Atividade 3

Para realizar a atividade 3, precisamos alterar o arranjo experimental. Faça a montagem seguindo a Fig. 3.3 da seção 3.2 (Montagem) e altere a faixa de frequência pré-definida, colocando as frequências mínima e máxima

da faixa que você identificou e selecionou na atividade 2, como indicado na Fig. 4.4.

Agora podemos verificar a influência do tubo no espectro sonoro medido quando ele é posicionado entre o microfone e o alto-falante. Após a medida, obtemos um gráfico similar ao da Fig. 4.5, com picos de intensidades em frequências específicas.

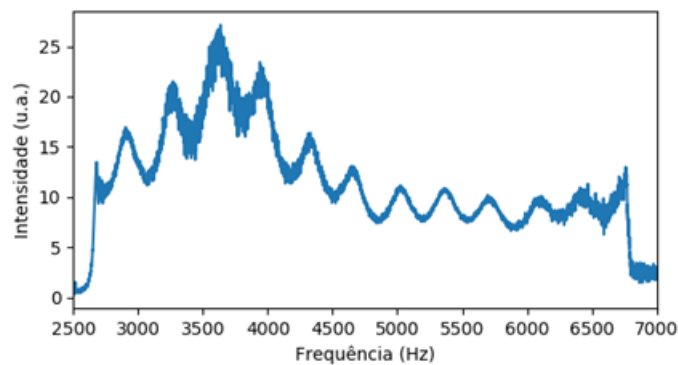


Figura 4.5: Resultado da análise do som com o tubo entre o microfone e o alto-falante.

Estes picos encontrados são formados pela interferência das ondas sonoras, resultando em ondas estacionárias no interior do tubo. Nesta atividade, propomos ao aluno relacionar o modelo de estudo de ondas sonoras em um tubo aberto com o que se observa do resultado da análise do experimento com o tubo. Nesse modelo, a frequência ν_n do n -ésimo harmônico é dada por

$$\nu_n = \frac{nv}{2\ell}, \quad (4.1)$$

onde v é a velocidade do som, e ℓ o comprimento do tubo.

Aqui podemos indagar novamente sobre a audição humana. Durante a atividade percebemos uma mudança de intensidade tão brusca em determinadas frequências como observado na Fig. 4.5?

Devemos estimular que os alunos cheguem à conclusão de que cada frequência de pico obtida é a frequência do respectivo harmônico n para aquele tubo utilizado. Além disso, destacamos que o primeiro pico obtido não neces-

sariamente corresponderá ao 1º harmônico, uma vez que os primeiros harmônicos podem estar abaixo da frequência mínima selecionada na atividade 2 ou talvez em uma faixa não bem captada pelo microfone.

A ideia principal é relacionar a atuação do tubo como um filtro em que somente as frequências que fazem parte dos harmônicos têm “permissão” para atravessá-lo, mesmo se emitirmos uma ampla gama de frequências no seu interior.

4.4 Atividade 4

Na atividade 4 vamos obter propriamente o valor da velocidade do som a partir dos dados de frequência coletados na atividade anterior. Este tipo de medida é chamada de medida indireta, pois a grandeza que estamos calculando advém de operações matemáticas realizadas entre outras grandezas, essas sim medidas diretamente.

Com o gráfico gerado, passe o cursor sobre cada máximo de pico e anote o valor da frequência. De acordo com a atividade 3, cada frequência corresponde a um harmônico n . Repare que se analisarmos a frequência ν_n da equação 4.1 como uma função linear dependente de n , obtemos uma equação de 1º grau ($y = ax + b$), onde o coeficiente linear b é nulo e o coeficiente angular a é dado em função da velocidade do som v e do tamanho do tubo ℓ por

$$a = \frac{v}{2\ell}. \quad (4.2)$$

Estimando o coeficiente angular da reta $\nu_n \times n$ e medindo o comprimento do tubo com uma fita métrica ou uma trena, podemos estimar o valor da velocidade do som como

$$v = 2\ell a. \quad (4.3)$$

Para estimar o coeficiente angular da melhor reta que se ajusta a nossos dados experimentais, utilizaremos o aplicativo *Geogebra Online*¹ já pré-configurado especificamente para esta atividade. Uma vez aberto o site, na

¹Acesse pelo *link* <http://geogebra.org/classic/gdw3zfwg> o aplicativo pré-configurado para esta atividade.

coluna B, insira os valores das frequências associadas aos picos, como ilustra a Fig. 4.6, e observe a equação linear gerada. Esta equação é a que melhor se ajusta à disposição dos pontos que você selecionou e é obtida por uma técnica matemática conhecida como regressão linear. Com ela você relacionará o coeficiente angular resultante à velocidade do som, conforme descrito na equação 4.3.

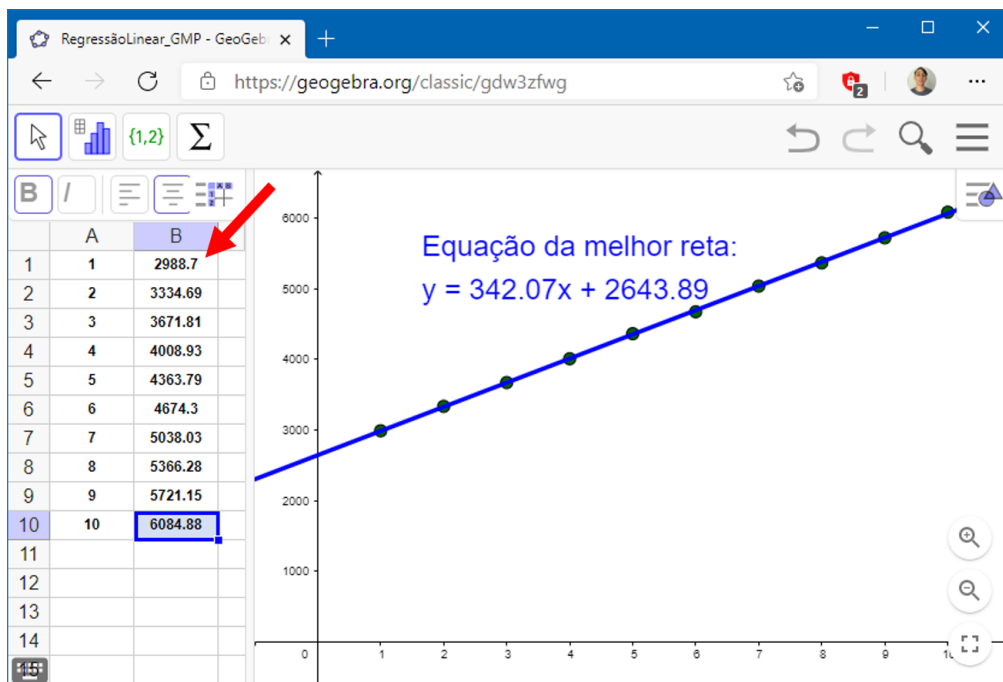


Figura 4.6: Inserindo os dados das frequências na coluna B.

Ao final desta atividade, esperamos que o aluno consiga relacionar as frequências obtidas na atividade anterior com o seu respectivo harmônico, ou seja, ler e analisar o gráfico para que seja capaz de manipular a equação 4.3 e obter a velocidade do som a partir do coeficiente angular.

Estimado o valor da velocidade do som, é natural que alguns alunos verifiquem o resultado obtido em mecanismos de busca na *internet* e percebam que a medida, provavelmente, não foi idêntica à pesquisada. Temos aqui uma abertura para discutir a incerteza da medida com os alunos e também sobre como outros fatores podem influenciar a velocidade do som.

A incerteza está presente já na obtenção das frequências associadas aos

picos, extraídas a partir do *mouse* sobre o gráfico, provavelmente o *pixel* que apontaremos não será exatamente o topo de um pico. Existe também a incerteza no processo de ajuste linear dos pontos na reta e até mesmo na medida direta do comprimento do tubo. Ademais, como mencionamos, vários fatores influenciam a velocidade do som no ar, como a umidade, temperatura² e a pressão.

4.5 Atividades Extras

Aqui sugerimos algumas atividades adicionais que complementam o material e ampliam as aplicações do experimento.

- Outros microfones e alto-falantes podem ser testados para comparar as frequências alcançadas por cada um. Desta forma, é possível verificar a qualidade de emissão e captação dos dispositivos, possibilitando uma verificação mais precisa da relação custo/benefício dos diversos equipamentos sonoros existentes no mercado.
- Com diferentes instrumentos musicais, diferentes notas podem ser emitidas e analisadas utilizando o recuso de gravar do DFTubo, por meio do botão “Gravar” localizado no quadro “REC/Ruído”, como indica a Fig. 4.7. Cantando ou assobiando, são produzidas diferentes notas musicais e podemos comparar os resultados.
- Uma vez medida a velocidade do som, se alterarmos o comprimento do tubo e refazermos o procedimento experimental da atividade 3, é possível manipular a equação 4.2 para encontrar indiretamente o comprimento do tubo. Este resultado permite comparar a medida indireta com uma medida direta, realizada com uma fita métrica ou uma régua por exemplo. Isso possibilita a discussão de como essa técnica pode ser empregada para medir o tamanho de tubulações ou cavidades em situações que a medida direta é dificultada (e.g., um tubo no interior de uma parede ou uma caverna).

²No corpo da dissertação que o presente material instrucional pertence, relacionamos e discutimos com mais detalhes a relação da velocidade do som com a temperatura.

Montagem experimental

Faixa de frequência

Freq. inicial (Hz): 1500 Freq. final (Hz): 5500

Varredura

Passo freq. (Hz): 500

Tempo (s): 5

Continuamente

REC / Ruído

Duração (s): 2.0

Suavização da cu.: 10

Gravar

Iniciar

Ruído branco

Sair

Figura 4.7: Analisando um áudio externo.

Para esta e todas as atividades anteriores, como mencionado anteriormente, foi criado um material para auxiliar na montagem e no roteiro de atividades tanto para o aluno como também para o professor na realização do experimento. Este material segue no próximo capítulo junto com uma sugestão de avaliação.

Capítulo 5

Materiais Auxiliares

Em montagem e roteiro de atividades (seção 5.1), disponibilizamos um material que auxiliará tanto o aluno como o professor para realizar as atividades. Está escrito de uma forma compacta que permite ser compartilhado com os alunos para leitura prévia.

Para finalizar, na seção 5.2, indicamos uma avaliação sobre os conteúdos que foram trabalhados durante o nosso experimento. A avaliação sugerida foi elaborada por Sergio Tobias da Silva, aluno da turma de 2008 do programa de mestrado profissional em ensino de física (MPEF) da UFRJ, intitulada “Propagação do som: conceitos e experimentos”¹.

5.1 Montagem e Roteiro de Atividades

A seguir, apresentamos o manual e o roteiro de atividades que podem ser disponibilizados para os alunos tanto de forma impressa como digitalmente. É um resumo para o professor e um guia para o aluno conseguir realizar o procedimento experimental sozinho, após às orientações dadas pelo professor.

¹Acesse pelo *link* https://www.if.ufrj.br/~pef/producao_academica/dissertacoes.html as dissertações produzidas pelo MPEF da UFRJ.



Manual das Atividades

Professor: _____ Turma: _____ Data: __/__/____

Disciplina: Física Nome: _____

O objetivo destas atividades é fazer uma progressiva compreensão dos aspectos do som para ao final medirmos a sua velocidade no ar. Os equipamentos e materiais utilizados serão:

- Papel A4;
- Microfone;
- Alto-falante;
- Computador.

As folhas de papel A4 serão utilizadas para criar um tubo, o microfone será utilizado como um captador de som, o alto-falante será utilizado como um emissor de som e o computador utilizando o programa DFTubo, permitirá analisar os dados. O download do programa pode ser realizado acessando

www.if.ufrj.br/~gpenello/Softwares/DFTubo/DFTubo.exe

A disposição dos equipamentos citados acima sofrerá leves alterações para algumas atividades que serão realizadas. O objetivo de cada atividade será detalhado no roteiro das atividades.

Abaixo temos um passo a passo da montagem e a disposição dos equipamentos que utilizaremos nas duas primeiras atividades, conforme mostra a Fig. 1.

- Conecte o seu microfone ao computador;
- Conecte o seu alto-falante ao computador;
- Posicione em um local plano e fixo o seu microfone;
- De frente para o microfone posicione o alto-falante com uma distância de poucos centímetros;
- Execute o programa DFTubo;
- Inicie a varredura como explicado no roteiro de atividades.



Figura 1 Disposição dos equipamentos nas atividades 1 e 2.

Para a atividade 3, entre o alto-falante e o microfone colocaremos um tubo de comprimento variável que será feito a partir da folha de papel A4.

A seguir temos um passo a passo de como fazer o tubo de papel e a nova disposição dos equipamentos na Fig. 2.



Figura 2 Disposição dos equipamentos na atividade 3.

- Separe duas folhas de papel A4, como a Fig. 3A;
- Pegue a primeira folha e enrole-a na direção de sua largura, com um diâmetro relativamente pequeno (aproximadamente 2 cm) de forma que a maior dimensão da folha tenha o comprimento do tubo, como a Fig. 3B;
- Corte três pedaços de fita adesiva, de aproximadamente 5 cm, e cole a ponta da folha em cada extremidade para não abrir as pontas e outra na parte central;

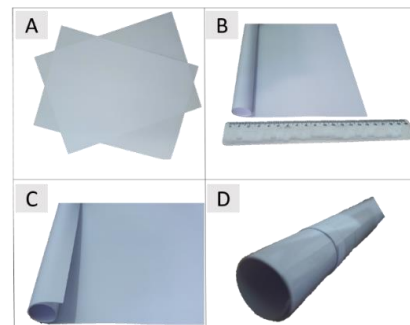


Figura 3 Montagem do tubo de papel A4.

- Pegue a segunda folha de papel A4;
- Enrole-a como a anterior, mas use o primeiro tubo de modelo, enrolando/envolvendo a segunda folha sobre a primeira. Desta forma garantimos que os tubos terão diâmetros parecidos e não ficará com folgas, como a Fig. 3C;
- Corte novamente três pedaços de fita adesiva, de aproximadamente 5 cm e cole a ponta da folha em cada extremidade e outra na parte central;
- Empurre com o dedo o tubo interior, deslocando o interno do externo;
- Pronto, agora temos um tubo de papel com comprimento variável, como a Fig. 3D.



Roteiro das Atividades

Professor: _____ Turma: _____ Data: __/__/____

Disciplina: Física Nome: _____

O objetivo destas atividades é fazer uma progressiva compreensão das características do som para ao final medirmos a sua velocidade no ar. Primeiramente, leia o “Manual das Atividades” para saber sobre a instalação do programa DFTubo e a montagem do experimento que será utilizado.

Atividade 1.

Nesta etapa vamos entender o funcionamento e o objetivo do programa. Execute o DFTubo, espere carregar e uma janela se abrirá com um espaço para um gráfico de intensidade por frequência na parte esquerda e algumas configurações na parte direita, como a Fig. 1.

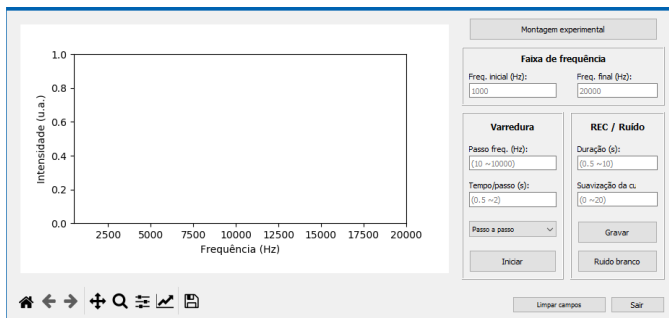


Figura 1 Layout do DFTubo.

O programa permite emitir um som por meio do alto-falante e este será captado pelo microfone. O som captado é analisado e todas as frequências que o compõem são separadas e registradas com suas respectivas intensidades.

Para começar, vamos montar a experiência desta atividade conforme descrito na Fig. 1 do manual de atividades e apertar o botão iniciar da seção “Varredura”. Percebemos que a cada instante o programa emite um som com uma frequência bem definida de 1 kHz até 20 kHz, após finalizar obtemos um gráfico, parecido com a Fig. 2.

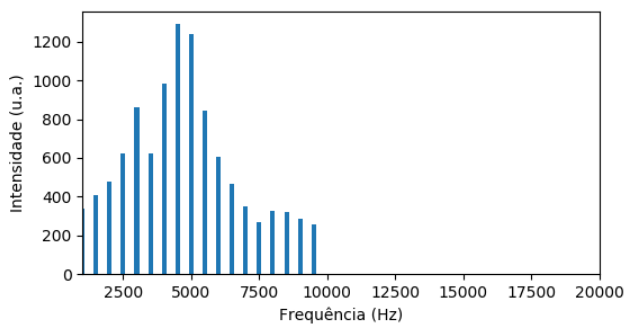


Figura 2 Resultado da análise com as pré-configurações.

Como podemos observar no gráfico, mesmo sem alterarmos a regulagem de volume do alto-

falante obtemos intensidades diferentes para diferentes frequências. Isto acontece por conta do alto-falante não conseguir emitir ou de o microfone não captar esta frequência com eficiência.

Atividade 2.

Agora, vamos alterar as pré-configurações. Na primeira coluna do lado direito, altere a função de “passo a passo” para “continuamente”. Realize novamente o processo anterior com a mesma disposição dos equipamentos e analise o gráfico, como a Fig. 3.

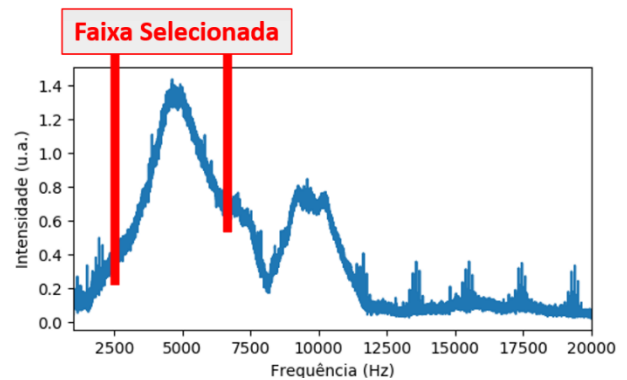


Figura 3 Resultado da análise com emissão contínua.

Podemos perceber que temos valores contínuos de intensidade para cada frequência. Diferente dos valores discretos obtidos na primeira atividade, repare que agora temos informações de frequências que não tínhamos.

O objetivo desta atividade é observar e selecionar a faixa de frequência emitida e captada de modo mais eficiente pelos dispositivos que temos. Ao passar o cursor sobre o gráfico, aparecerá na parte inferior os valores de x e y para facilitar a seleção dos pontos. Procure uma faixa que tenha no mínimo 2000 Hz de diferença, mesmo que haja perdas de intensidades.



Figura 4 Definindo a melhor faixa de frequência.

Atividade 3.

Neste momento precisamos alterar o arranjo experimental e a faixa de frequência pré-definida. Na parte direita da janela, como aponta a Fig. 4, coloque a frequência mínima e máxima que você identificou na atividade 2.

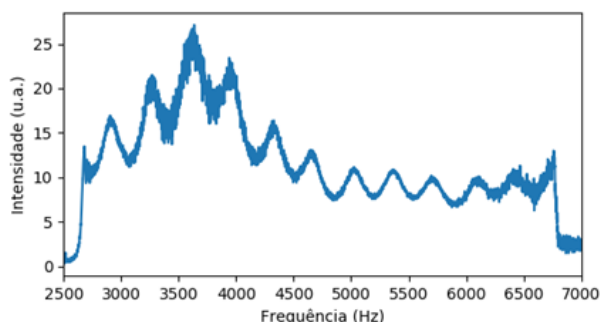


Figura 5 Resultado da análise com o tubo.

Agora podemos verificar a influência do tubo situado entre o microfone e o alto-falante. Após a medida obtemos um gráfico como o da Fig. 5, com picos de intensidades em frequências específicas.

Estes picos encontrados são formados pela interferência das ondas sonoras no interior do tubo. Tente relacionar o modelo de estudo de ondas sonoras em um tubo aberto (equação 1) com o que você está vendo no gráfico.

$$f_n = \frac{n \cdot v}{2 \cdot l} \quad (1)$$

Atividade 4.

Com o gráfico gerado, passe o cursor sobre cada pico e anote o valor da frequência. De acordo com a atividade 3, cada valor de n será referente a um harmônico, com sua respectiva frequência. Repare que se analisarmos a frequência (f_n) da equação 1 como uma função dependente do harmônico (n), obtemos uma equação de 1º grau ($y = ax + b$), onde o coeficiente linear (b) é nulo e o coeficiente angular (a) é a razão da velocidade do som pelo dobro do comprimento do tubo, como mostrado na equação 2.

$$a = \frac{v}{2 \cdot l} \quad (2)$$

Descobrimo o coeficiente angular da reta $f_n = \left(\frac{v}{2 \cdot l}\right)n$ e medindo o comprimento do tubo com uma fita métrica ou uma trena, podemos estimar o valor da velocidade do som, utilizando a equação 3.

$$v = 2 \cdot l \cdot a \quad (3)$$

Para descobrir o coeficiente angular da reta, utilizaremos o aplicativo Geogebra Online, acessando o link [geogebra.org/classic/gdw3zfwg](https://www.geogebra.org/classic/gdw3zfwg). Na coluna B coloque os valores das frequências selecionadas dos picos, como ilustra a Fig. 6 e observe a equação linear produzida. Esta equação é a que melhor se ajusta à disposição dos pontos

que você selecionou. Esta técnica matemática chama-se ajuste linear e com ela você relacionará o coeficiente angular obtido com a velocidade do som, conforme descrito na atividade.

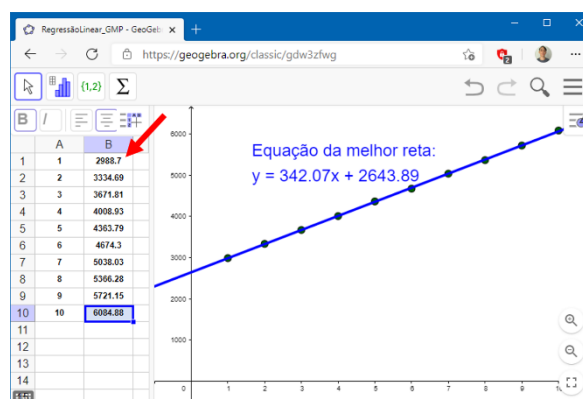


Figura 6 Inserindo os dados das frequências na coluna B.

Atividades Extras.

1. Teste outros microfones e alto-falantes para comparar as frequências alcançadas por cada um, desta forma você pode verificar a qualidade de emissão e captação dos seus dispositivos.
2. Se você tem acesso a instrumentos musicais, produza diferentes notas utilizando o recuso de gravar no AES, utilizando o botão “Gravar”, como indica a Fig. 7. Se não tiver instrumentos, pronuncie as vogais “a”, “e”, “i”, “o” e “u” e compare o gráfico gerado para cada vogal.

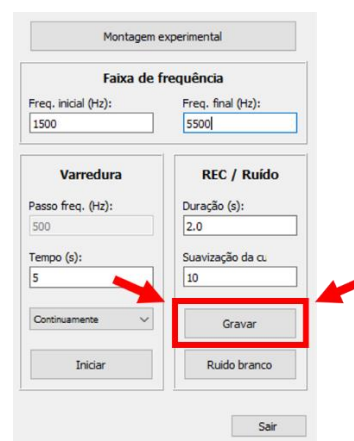


Figura 7 Analisando um áudio externo.

3. Uma vez medida a velocidade do som, altere o comprimento do tubo e depois compare o resultado obtido a partir da equação $l = \frac{v}{2 \cdot a}$ (chamada de medida indireta) com a medida a partir da fita métrica (chamada de medida direta).

5.2 Proposta de Avaliação

Para avaliação, sugerimos fortemente questões qualitativas para termos uma noção se os conceitos abordados durante a realização das atividades foram bem absorvidos e se os alunos interpretam corretamente os fenômenos físicos envolvidos. Para isto, sugerimos as atividades qualitativas descritas e discutidas na dissertação “Propagação do som: conceitos e experimentos” de Sérgio Tobias da Silva, como mencionado, realizada em 2008 no MPEF da UFRJ.

Deste trabalho, destacamos a análise das respostas dos alunos nas páginas 29, 30 e 31² de uma das questões elaboradas. Ela aborda a possibilidade de modificar o valor da velocidade do som, a partir da mudança do ambiente de aberto para um confinado, mantendo o mesmo meio. Neste caso específico, ele utiliza um tubo para o confinamento e o meio de propagação é o ar.

²A dissertação “Propagação do som: conceitos e experimentos” pode ser diretamente acessada no *link* https://www.if.ufrj.br/~pef/producao_academica/dissertacoes/2011_Sergio_Tobias/dissertacao_Sergio_Tobias.pdf.

Capítulo 6

Conclusão

O material instrucional produzido tem o propósito de guiar o professor na prática do experimento de decomposição espectral do som em um tubo ressonante, para isso elaboramos uma sequência de atividades que discrimina o máximo de pontos possíveis que o professor pode explorar com o experimento.

Tendo em vista os dispositivos e materiais necessários para a realização e a montagem do experimento, atingimos boas medidas. Pretendemos com isso favorecer a reprodutibilidade, deixando margem até para um certo grau de improvisação. Por isso, priorizamos a utilização de materiais de fácil acesso garantindo a ampla participação dos alunos no ensino básico.

Também foi preparado um material para o aluno, onde ele pode se guiar com uma explicação mais clara e direta dos objetivos de cada atividade. A proposta de avaliação, como dito anteriormente, é uma sugestão para trabalhar conceitos qualitativos, mas o ideal seria a elaboração de uma avaliação específica para a sequência de atividades elaborada.