



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS ARARANGUÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO NO CURSO DE MESTRADO
PROFISSIONAL DE ENSINO DE FÍSICA (MNPEF)

PAULO HENRIQUE FREITAS

TUBO DE DIRETIVIDADE SONORA (TDS): Confeção de um
modelo experimental para o estudo da Acústica.

ARARANGUÁ
2019

Paulo Henrique Freitas

TUBO DE DIRETIVIDADE SONORA (TDS): Confecção de um modelo experimental para o estudo da Acústica.

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Orientador: Prof. Dr. Olga Yevseyeva

Coorientador: Prof. Dr. Priscila Cardoso
Calegari

Araranguá
2019

Ficha de identificação da obra

Freitas, Paulo Henrique

TUBO DE DIRETIVIDADE SONORA (TDS) : Confeção de um modelo experimental para o estudo da Acústica / Paulo Henrique Freitas ; orientador, Olga Yevseyeva, coorientador, Priscila Cardoso Calegari, 2019.

74 p.

Dissertação (mestrado profissional) - Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Araranguá, Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, Araranguá, 2019.

Inclui referências.

1. Ensino de Física. 2. Ensino de Física. 3. Experimentos de Acústica. 4. Aplicativos no Ensino de Física. 5. Experimentos com materiais de baixo custo. I. Yevseyeva, Olga. II. Calegari, Priscila Cardoso. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física. IV. Título.

Paulo Henrique Freitas

Tubo de Diretividade Sonora (TDS): Confeção de um modelo experimental para o estudo da Acústica.

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Alvaro Junio Pereira Franco, Dr.
Universidade UFSC

Profª. Marcia Martins Szortyka, Dra.
Universidade UFSC

Prof. Evy Augusto Salcedo Torres, Dr.
Universidade UFSC

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Profª. Marcia Martins Szortyka, Dra.
Coordenadora do Programa

Profª. Olga Yevseyeva, Dra.
Orientadora

Araranguá, 11 de abril de 2019.

Este trabalho é dedicado aos meus pais (in memoriam), a minha esposa Aline e ao meu filho Caíque.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha esposa por caminhar ao meu lado a todo instante, me encorajando durante todos os momentos a seguir com o objetivo de concluir este trabalho. Ao meu pequeno filho Caíque agradeço pelo aprendizado que me fez entender que o tempo que queremos é algo que não depende do tempo que temos, devemos apenas gerenciá-lo para tornar nossas tarefas possíveis.

Agradeço aos professores que fizeram parte deste processo, em especial ao Professor Evy Salcedo pela gentileza e colaboração em muitos momentos que precisei de auxílio.

Ao Prof. Humberto Oliveira a quem agradeço as inúmeras sugestões sobre estudos de acústica e sua prestatividade imediata sempre que precisei de auxílio.

À professora Marcia Szortyka pelo empréstimo de um livro de referência teórica.

À professora e coorientadora, Priscila Calegari, expressei minha gratidão pela participação efetiva neste trabalho, durante as muitas horas de orientação e compreensão com os momentos em que não foi possível dar continuidade nas atividades.

Agradeço à professora e orientadora Olga Yevseyeva pelas orientações e dado o auxílio necessário para iniciarmos este trabalho e concluí-lo.

Agradeço ao Professor Álvaro Junio por aceitar o convite para integrar a banca examinadora.

Agradeço à CAPES pelo financiamento do programa.

RESUMO

O Professor/Educador tem a nobre missão de tentar transformar cada esforço seu em benefícios para os estudantes. As propostas pedagógicas nas literaturas de ensino dão suporte e mostram que há inúmeras maneiras do ensino de Física contemplar métodos amplos de aprendizagem. Além dos conceitos próprios da Física, também auxiliam o Educador em práticas que contribuem para o desenvolvimento humano dos estudantes, sobretudo a autonomia e a criticidade. O estudo da acústica tem sido abordado nas escolas de maneira rasa, limitando-se a conceitos iniciais de ondulatória e sob uma visão muito teórica, deficiente de experiências práticas. Pouco se tem feito para associar o estudo da acústica à vida cotidiana dos estudantes, inclusive sobre assuntos que envolvem a qualidade da saúde das pessoas. Os materiais de baixo custo e os descartáveis da vida cotidiana são opções de recurso didático que mostram que os fenômenos físicos são parte da vida e associados à experiência das pessoas. A familiaridade com esses materiais facilita a manipulação e como consequência estimula a criatividade dos estudantes na montagem de experimentos. O avanço tecnológico contribui para as mudanças na sociedade e também impõem desafios de adequação aos ambientes de ensino. Sob esse ponto de vista, atualmente há uma forte associação entre comunicação, informação, entretenimento com os *smartphones*. Estes dispositivos portáteis podem ser inseridos nas opções metodológicas no ensino de Física, haja vista seu potencial como ferramenta didática através dos aplicativos que interagem com os ambientes. Este trabalho propõe uma montagem experimental denominada Tubo de Diretividade Sonora (TDS), integrando o uso dos *smartphones* com materiais do tipo garrafa pet e canos de pvc na realização de experimentos de Acústica.

Palavras-chave: Ensino de Física, Acústica, Aplicativos de áudio.

ABSTRACT

The Teacher / Educator has the noble mission of trying to turn every effort of yours into benefits for the students. The pedagogical proposals in teaching literatures support and show that there are innumerable ways of teaching physics to contemplate broad methods of learning. In addition to the concepts of physics, they also help the educator in practices that contribute to students' human development, especially autonomy and criticality. The study of acoustics has been approached in the schools in a shallow way, being limited to initial concepts of ondulatory and under a very theoretical view, deficient of practical experiences. Little has been done to associate the study of acoustics to the daily life of students, including on subjects that involve the quality of people's health. The low-cost and disposable materials of daily life are didactic resource options that show that physical phenomena are part of life and associated with people's experience. Familiarity with these materials facilitates manipulation and as a consequence stimulates the students' creativity in assembling experiments. The technological advance contributes to the changes in the society and also imposes challenges of adaptation to the educational environments. From this point of view, there is currently an association between communication, information and entertainment with smartphones. These portable devices should therefore be included in the methodological options in Physics teaching, given their potential as a didactic tool through the applications that make the device interact with the environment. This work proposes the assembly of an experimental apparatus called Tube of Sound Direction (TDS), integrating the use of smartphones with pet bottle type materials and pvc pipes to perform acoustic experiments.

Keywords: Physics education, Acoustics, Audio Applications.

Sumário

Capítulo 1 Introdução.....	1
Capítulo 2 Fundamentação teórica.....	4
2.1 Acústica.....	6
2.1.1 Propagação de Ondas.....	6
2.1.1.1 Ondas estacionárias.....	19
Capítulo 3 Metodologia.....	24
3.1 Tubo de Diretividade Sonora (TDS).....	25
3.1.1 Aplicativos.....	26
Capítulo 4 Relato dos encontros.....	30
4.1 Primeira aplicação.....	30
4.2 Segunda aplicação.....	41
4.3 Resultados dos Encontros.....	43
Capítulo 5 Considerações Finais.....	45
Apêndice A Produto Educacional.....	46
Apêndice B Questionário de Avaliação.....	50
Referências Bibliográficas.....	52

Capítulo 1

1.1 Introdução

Sabemos que somos responsáveis pela qualidade do nosso trabalho e que nossa realização profissional depende essencialmente de atividades que, por vezes diárias, envolvem muita dedicação e tempo. Sabemos também da importância de termos qualidade de vida, no sentido físico e mental, e que nossos desejos e sonhos de felicidade permeiam as dificuldades que encontramos tanto na vida profissional quanto na pessoal. É comum nos depararmos com dizeres de artistas, atletas ou pessoas renomadas, que quando fazemos coisas que gostamos, as chances de darem certo são muito grandes. Os obstáculos que para muitos podem ser desmotivador, para outros são oportunidades de superação. Talvez essa sabedoria seja mais comum do que pensamos, é possível que haja muitas pessoas, comuns, contentes e felizes com o que fazem e fazendo muito bem feito.

O professor/Educador tem a nobre missão de tentar transformar cada esforço seu em benefícios para outras pessoas, haja vista tamanha influência da sua prática educacional na vida pessoal e profissional delas. Entretanto, para que os estudantes se sintam motivados, antes de qualquer coisa, o professor/Educador também precisa de motivação.

As práticas educacionais associadas à vida do professor e a dos alunos são ótimas tentativas para fomentar a interatividade durante as aulas. Quando gostamos ou por algum motivo temos interesse naquilo que estamos estudando, damos significados objetivos a estas práticas, facilitando o ensino e a aprendizagem.

Há propostas pedagógicas, inclusive nos Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN+) [1], que elencam e sugerem temas a serem desenvolvidos contemplando a autonomia do professor. Veja que não se trata de suprimir assuntos sem conexão com o professor ou que o professor não gosta, mas de tentar adequá-los às nossas realidades, mesmo que sutilmente.

Na fase de problematização, durante os diálogos e questionamentos, os alunos participam mais quando se sentem encaixados no assunto e, como é de se esperar, sempre têm alguma história pra contar sobre suas experiências individuais. Isso se deve à escola ser um ambiente culturalmente diverso.

Durante meus estudos na licenciatura de Física, tinha facilidade em compreender e produzir quando os assuntos tinham relações com a minha vida. Sempre gostei muito de música e desde a adolescência toco violão e contrabaixo. Tive também antes de ser professor uma pequena empresa de sonorização de bandas e eventos, onde nos últimos anos já fazia uso de aplicativos de *smartphones* para operar mesas de som, fazer análises de frequências e níveis de pressão sonora. Desde criança tenho interesse por leituras, filmes, documentários e atualmente por canais do Youtube, sobre oceanos, navios, barcos, céu, nuvens e aviões, coisas que sempre renderam bons diálogos com os alunos durante as aulas de Física. Conseguimos contextualizar melhor os assuntos em sala de aula quando os conhecemos bem e ainda melhor quando são resultados de nossas vivências, pois a nossa vida pode ser um “livro didático” em potencial.

O uso da música, dos sons, imagens e tecnologias digitais como linguagem e expressão cultural está também naturalmente presente no ambiente escolar através do uso dos *smartphones*. Percebe-se que os alunos não querem ter seus *smartphones* desligados durante as aulas, visto que isso se torna uma tendência que demanda consciência quanto ao seu uso, mas que admitamos ser parte da evolução tecnológica e da própria conduta social das pessoas num processo irreversível. Conforme Andrade [2] os alunos têm maior interatividade e agilidade na busca pelo saber científico quando estão inseridos nas práticas educacionais os recursos tecnológicos, que se as escolas e os profissionais da educação não se adequarem ao desenvolvimento e aplicação das Tecnologias de Informação e Comunicação, as chamadas TICs, o mundo escolar ficará cada vez mais distante do mundo dos alunos. Por outro lado, diz também que essas aplicações devem estar em constante avaliação para que se verifiquem melhorias na construção do conhecimento, o que de fato justificaria seu uso. Percebe-se aqui o cuidado que devemos ter com essas práticas para que não sirvam apenas de entretenimento para os alunos.

A acústica é uma área da física que estuda a produção, propagação, as propriedades e o comportamento das ondas sonoras em ambientes distintos, está diretamente ligada às nossas condições sociais e fisiológicas e muitas vezes requer abstração no seu entendimento. Os simuladores são recursos interessantes que facilitam a sua compreensão e além desses há também diversos aplicativos para *smartphones* que não só simulam, mas também interagem com o ambiente. Outras alternativas são os vídeos encontrados na internet com demonstrações de experimentos e simulações sobre acústica. Para aqueles que sabem tocar algum instrumento musical há a opção de fazer

atividades com o próprio instrumento em sala de aula. Existem muitas maneiras de trabalhar a Acústica, mas por se tratar de fenômenos que os percebemos com o sentido da audição, torna-se muito mais interessante se os alunos dispuserem de meios para reproduzi-los fisicamente.

As atividades propostas neste trabalho utilizam *smartphones*, canos de pvc e garrafas pet, todos materiais de fácil acesso e manipulação, que são usados na confecção de um instrumento experimental denominado Tubo de Diretividade Sonora (TDS) com o qual reproduzem e observam fenômenos de nível de pressão sonora, frequência, comprimento de onda e superposição de ondas.

Pretende-se nesse processo promover o senso de colaboração entre os estudantes, criar condições para que expressem a criatividade e que se sintam participantes ativos do próprio aprendizado. O aprendizado almejado deve contemplar além dos conceitos fundamentais na compreensão dos fenômenos da Acústica, a formação crítica a respeito do uso e aplicabilidade desse conhecimento em nossas vidas.

Capítulo 2

Fundamentação Teórica

O ensino de Física no ensino médio vem passando por novas propostas que visam a participação mais ativa dos estudantes e a inclusão de novas linguagens, incluindo as TIC, que já fazem parte da vida dos estudantes. Brandão [3] fala das possibilidades que essas tecnologias têm de interação e auxílio nas estratégias de aprendizagem e que por isso a escola deve orientar os estudantes quanto ao seu uso consciente.

A teoria sócio-histórico-cultural de Vygotsky [4] diz que o desenvolvimento e aprendizagem do indivíduo é resultado de interações com a sociedade, sua cultura e experiência de vida. A aprendizagem e o desenvolvimento estão ligados entre si já a partir dos primeiros dias de vida de uma criança. Para Vygotsky cada situação de aprendizagem envolve um arcabouço histórico da vida do estudante. Portanto o planejamento dos conteúdos e metodologias devem levar em conta esses aspectos sócio-histórico-culturais.

Segundo os PCN [1] o ensino não deve apresentar ao aluno a Física de forma meramente informativa, pois é preciso que o conhecimento transforme sua forma de pensar e agir. Além disso, o documento trata das ações pedagógicas no ensino de Física, as quais devem ser relacionadas às experiências do estudante, definindo os motivos para o ensino:

“Os critérios que orientam a ação pedagógica deixam, portanto, de tomar como referência primeira “o que ensinar de Física”, passando a centrar-se sobre o “para que ensinar Física”, explicitando a preocupação em atribuir ao conhecimento um significado no momento mesmo de seu aprendizado. Quando “o que ensinar” é definido pela lógica da Física, corre-se o risco de apresentar algo abstrato e distante da realidade, quase sempre supondo implicitamente que se esteja preparando o jovem para uma etapa posterior” (pág.4, 2002 [1]).

Bastos e Mattos [5] refletem sobre o estudo da Acústica e sua importância no ensino médio relacionando-o à saúde:

“Vários conhecimentos da física são deixados de lado no currículo efetivo nas escolas públicas. Um desses conteúdos é o de acústica que, quando tratado, são apresentadas apenas curiosidades sobre a velocidade do som, eco ou efeito Doppler. Quando se trata da intensidade sonora, se limita a apresentar o espectro sonoro sem correlacioná-lo com uma saúde da audição.” (pág.1, 2015) [11]

Silva e Miltão [6] propõem o estudo da Acústica através da música no ensino médio como elemento motivador e metodológico:

A relação entre Física e Música é bastante rica no sentido de poder explorar diversos conceitos importantes da Física como frequência, amplitude, oscilação, ondas e acústica, através da utilização de temas e exemplos advindos da Música, durante o processo de ensino

Além das associações que as ações pedagógicas devem fazer com a vida cotidiana, as práticas de experimentação são de grande importância no processo metodológico. Nascimento [7] diz que a experimentação deve acompanhar todo o processo de ensino e aprendizagem:

“é indispensável que a experimentação esteja sempre presente ao longo de todo o processo de desenvolvimento das competências em Física, privilegiando-se o fazer, manusear, operar, agir, em diferentes formas e níveis, permitindo assim a construção do conhecimento pelo próprio aluno de maneira que ele se veja um agente transformador do processo de ensino e aprendizagem” (pág.2, 2018 [4]).

A montagem e execução de experimentos às vezes requer a participação de mais de um estudante, e dependendo da complexidade podem necessitar de vários outros. Percebe-se que nestes casos a experimentação propicia práticas de colaboração podendo ainda oportunizar o aprendizado em grupo. O conhecimento e os problemas compartilhados podem favorecer os questionamentos e resoluções de questões. Alonso [8] diz que a aprendizagem colaborativa é uma relação de concepções e interações que permite o trabalho em conjunto sobre um mesmo objetivo.

Para o estudo da acústica pode haver materiais sofisticados inclusive comprados de empresas que fabricam materiais didáticos, no entanto por razões de investimento esses recursos não são comuns na maioria das escolas. Porém isso pode ser contornado pela criatividade dos professores e alunos que dispuserem de boa vontade e de materiais de baixo custo, incluindo

aqueles que iriam para o lixo se não fossem aproveitados nos experimentos de Física. Grillo e Perez [9] defendem o uso de materiais desse tipo não só pelo baixo custo, mas também para evidenciar que a Física está presente no nosso dia a dia.

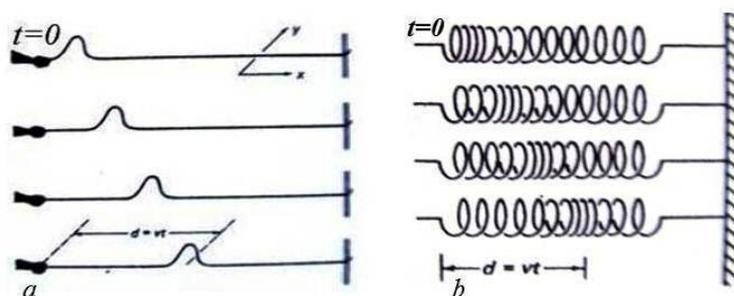
2.1 Acústica

A Acústica é uma área da Física que estuda padrões de vibração dos corpos e meios que produzem, conduzem, absorvem, amortecem e refletem as ondas sonoras. Os sons podem ser musicais ou não, dentre outros conceitos podem ser ruídos, barulhos ou estrondos. O som possui um comportamento ondulatório e fisicamente depende da matéria para ser reproduzido e transportado, portanto é uma onda mecânica.

2.1.1 Propagação de Ondas

Conforme Mckelvey e Grotch [10] em um sistema de propagação unidimensional, como em uma corda, cada ponto é representado por uma única coordenada x quando este meio está em equilíbrio. Quando ocorre a passagem da onda ou pulso, há um deslocamento destes pontos na direção y , o qual descreve o módulo da perturbação. Este deslocamento em y é dependente do tempo e da distância x , conforme Figura 1a.

Figura 1. Onda transversal em uma corda e onda longitudinal em uma mola



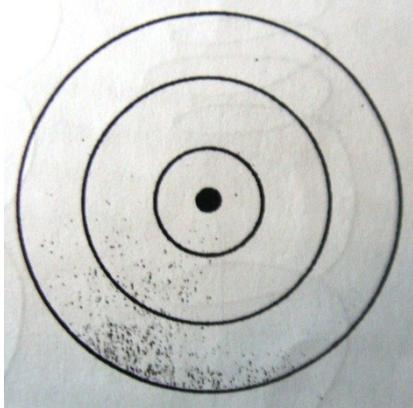
. Fonte: John P Mckelvey e Howard Grotch

A mesma situação ocorre com ondas longitudinais. A diferença é que o deslocamento dos pontos ocorre na direção de propagação da onda.

Há outros exemplos de ondas que se propagam em duas e três dimensões. Ondas em superfícies se propagam em duas dimensões,

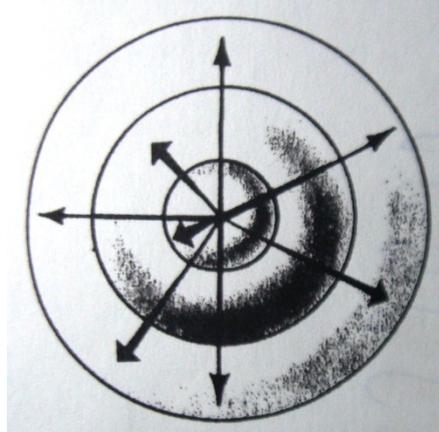
produzem frentes de ondas circulares, como em um lago após uma pedra ter sido jogada, já uma explosão causada no ar por fogos de artifícios geram frentes de ondas esféricas que se propagam em três dimensões.

Figura 2: frente de onda circular



Fonte: John P Mckelvey e Howard Grotch

Figura 3. Frente de onda esférica



Fonte: John P Mckelvey e Howard Grotch

Se considerarmos o exemplo da onda em uma corda, então a perturbação no instante inicial $t=0$ pode ser descrita pela função:

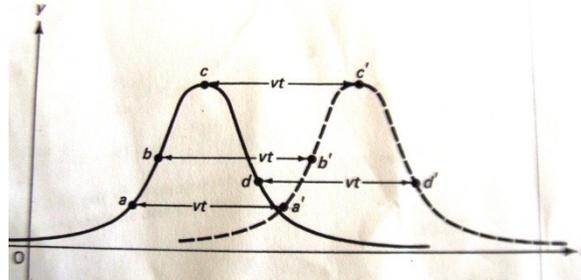
$$y(x, 0) = F(x) \quad (2.1)$$

Acontece que o perfil da onda terá se deslocado à direita nos instantes posteriores para algum ponto distante d da posição inicial. Se todo e qualquer ponto da perturbação se desloca satisfazendo a função horária do espaço $d=vt$, então a condição para que a dependência temporal componha o argumento da função deve ser

$$y(x, t) = F(x - vt) \quad (2.2)$$

onde a constante v é denominada velocidade da onda ou velocidade de fase, enquanto que o produto vt descreve a nova posição de todo e qualquer ponto do perfil da onda na direção da propagação, conforme Figura 4:

Figura 4. Velocidade constante para cada ponto que se propaga



Fonte: John P Mckelvey e Howard Grotch

Quando o sentido da propagação da onda for da direita para a esquerda, a função que descreve o movimento é dada por:

$$y(x, t) = F(x + vt) \quad (2.3)$$

Se duas ondas se propagam e se encontram em uma região do espaço, pelo **princípio da superposição**, a onda resultante será uma soma algébrica das amplitudes. As funções de onda de cada uma delas são somadas na seguinte função:

$$y(x, t) = F(x - vt) + G(x + vt) \quad (2.4)$$

As funções (2.2), (2.3) e (2.4) são soluções da equação diferencial parcial denominada *equação da onda* [12], dada por:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0 \quad (2.5)$$

sujeita a condições iniciais e de contorno.

Em (2.2), tomando $y(x, t) = x - vt$, com a variável u representando o deslocamento das partículas e usando a regra da cadeia [12], obtêm-se, duas equações diferenciais parciais, uma em relação à variável x e outra em relação à variável t :

$$\begin{aligned}
\frac{\partial y}{\partial x} &= \frac{\partial}{\partial x} F(u) = \frac{\partial F(u)}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial F(u)}{\partial u} \frac{\partial}{\partial x} (x - vt) = \frac{\partial F(u)}{\partial u} \\
\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{dF(u)}{du} \right) = \left[\frac{d}{du} \left(\frac{dF(u)}{du} \right) \right] \frac{du}{dx} \\
&= \frac{\partial^2 F(u)}{\partial u^2} \frac{\partial}{\partial x} (x - vt) = \frac{\partial^2 F(u)}{\partial u^2}
\end{aligned} \tag{2.6}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial y}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial t} F(u) = \frac{dF(u)}{du} \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{dF(u)}{du} \frac{\partial}{\partial t} (x - vt) = -v \frac{dF(u)}{du} \\
\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} &= \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial y}{\partial t} \right) = \frac{\partial}{\partial t} \left(-v \frac{dF(u)}{du} \right) = -v \left[\frac{d}{du} \left(\frac{dF(u)}{du} \right) \right] \frac{du}{dt} \\
&= -v \frac{\partial^2 F(u)}{\partial u^2} \frac{\partial}{\partial t} (x - vt) = v^2 \frac{\partial^2 F(u)}{\partial u^2}
\end{aligned} \tag{2.7}$$

Dividindo (2.7) por v^2 e comparando-a com (2.6), nota-se que $y(x, t)$ satisfaz a equação de derivadas parciais (2.5).

Para ondas de superfície o deslocamento das partículas, em um ponto localizado em (x, y) , é representado pela variável z na equação da onda da seguinte forma:

$$\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} = 0 \tag{2.8}$$

Para ondas tridimensionais, Figura 2a, o deslocamento das partículas em um ponto localizado em (x, y, z) é representado pela variável u na equação da onda da seguinte forma:

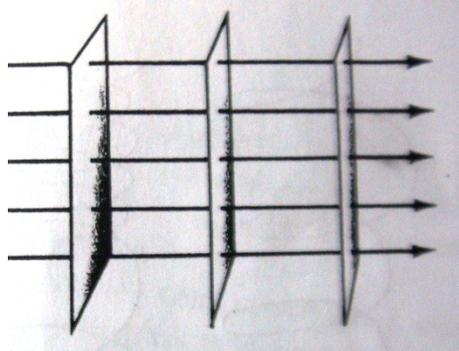
$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0 \tag{2.9}$$

As ondas tridimensionais geram frentes de ondas esféricas, como as ondas sonoras em um espaço aberto. A amplitude das ondas tridimensionais diminui conforme a distância r da fonte aumenta, do mesmo modo que frentes de ondas circulares, pois a energia das ondas é transferida para uma quantidade cada vez maior de partículas.

Outra análise importante a ser feita com respeito à distância da origem, é que quanto maior a distância da fonte geradora as frentes de ondas esféricas

e circulares tendem a ficar planas e assim podem ser analisadas pela equação de onda unidimensional.

Figura 5: Frente de onda plana



Fonte: John P Mckelvey e Howard Grotch

A velocidade de propagação da onda é definida pelas características mecânicas do meio. Para um sistema de propagação unidimensional, do tipo fio ou corda, a velocidade da onda v aumenta se a tensão T aumentar, porém diminui quando a densidade de massa linear μ aumenta.

$$v = \sqrt{\frac{T_0}{\mu}} \quad (2.10)$$

Substituindo na equação da onda, temos:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} - \frac{1}{(T_0/\mu)} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0 \quad (2.11)$$

Outros meios como os fluidos, possuem módulo de elasticidade volumétrico B , medido em Pascal no Sistema Internacional de Medidas (SI) e definido por:

$$B = \frac{\Delta P}{(\Delta V / V_0)}, \quad (2.12)$$

onde a variação do volume ΔV resultado da pressão ΔP e a razão $\Delta V / V_0$ é a fração da variação do volume inicial V_0 . Nesses meios a velocidade de propagação é dada por

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}} . \quad (2.13)$$

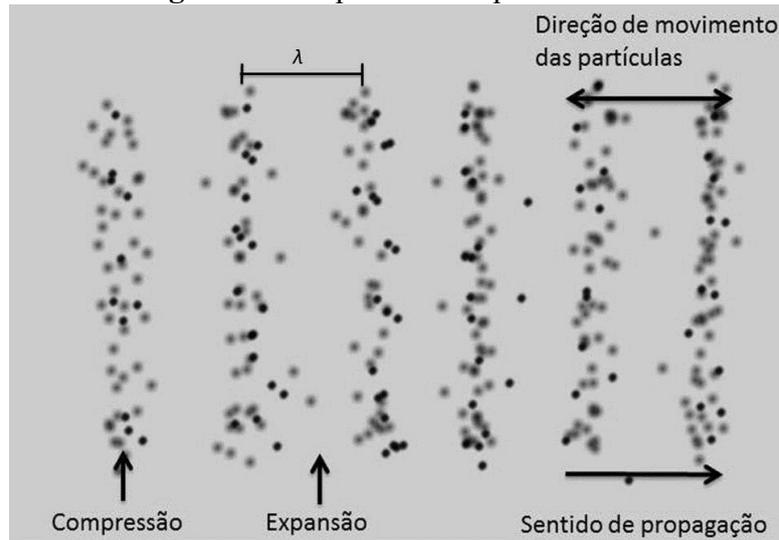
Em condições normais, o módulo volumétrico B e a densidade ρ de um gás dependem da temperatura e da pressão, e com isso a velocidade da onda pode variar.

As ondas sonoras são definidas por ondas longitudinais que se propagam no meio sólido, líquido ou gasoso. Quando um ponto material ou corpo extenso está vibrando, o meio circundante é posto a vibrar. Isso ocorre porque as moléculas em contato são forçadas a saírem de sua posição de equilíbrio, irem ao encontro das adjacentes, transferirem sua energia e retornarem ao equilíbrio.

Concebido como a parcela audível do espectro de vibrações acústicas, o som é percebido pelos seres humanos quando ocorrem vibrações entre 20 a 20 mil vezes por segundo, ou seja, frequências de 20 hertz a 20000 hertz. Esse movimento alternado pode ser reproduzido por um alto falante, por exemplo, que gera ondas de movimento “empurrando e puxando” as moléculas do ar, causando variação na pressão atmosférica. A membrana timpânica, ou tímpano, reage a essas variações de pressão reproduzindo o movimento do alto falante.

A propagação sonora, ilustrada na Figura 6, produz variações de pressão no ar denominadas região de compressão, onde a pressão é maior que a pressão atmosférica do local, e outra região denominada expansão onde há pressão menor, abaixo da pressão atmosférica. A distância entre duas regiões iguais é denominada comprimento de onda representado pela letra grega λ (Lâmbda).

Figura 6. Compressão e expansão do ar



Fonte: Próprio autor

Uma onda sonora de amplitude e frequência constante originada em um alto falante, configurando um sistema de movimento harmônico simples (MHS), é descrita por uma função do tipo senoidal, dada por:

$$y(x, t) = A \cos(kx \pm \omega t). \quad (2.14)$$

A função $y(x, t)$ fornece o deslocamento longitudinal instantâneo de uma partícula no meio para uma posição x no instante t , enquanto que o sentido de propagação da onda sobre o eixo x é orientado pelos sinais $+$ ou $-$.

O argumento $(kx \pm \omega t)$ denomina-se fase e é uma grandeza angular medida em radianos. Seu valor determina o que ocorre em qualquer parte do ciclo senoidal a qualquer tempo, portanto cada ponto onde houver uma partícula em movimento harmônico simples, esta possuirá uma fase. Para amplitude máxima $y = A$ quando $\cos(kx \pm \omega t) = 1$ a fase pode ser $0, 2\pi, 4\pi$ e assim por diante. Para amplitude mínima $y = -A$ quando $\cos(kx \pm \omega t) = -1$, a fase pode ser $\pi, 3\pi, 5\pi$, e assim por diante. Pode-se inferir que quando há diferença entre os argumentos das funções que descrevem a superposição, haverá uma diferença de fase.

O termo k é denominado número de onda. É medido em radianos por metro, refere-se ao número de comprimentos de onda por unidade de distância

e, portanto, é inversamente proporcional ao comprimento de onda. Pode ser definido por:

$$k = \frac{\pi}{\lambda} \quad (2.15)$$

O termo ω é denominado frequência angular ou velocidade angular. É medida em radianos por segundo e refere-se à variação angular do deslocamento de um ponto no ciclo senoidal, dado por:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f, \quad (2.16)$$

sendo T o período e f a frequência.

A velocidade constante v de propagação da onda, dependente das propriedades mecânicas do meio, ao percorrer uma distância x equivalente a λ durante um período T , pode ser expressa por $v = \lambda/T$. Considerando que $f = 1/T$, a expressão para a velocidade v da onda pode ser dada por:

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

onde a frequência f é uma propriedade do movimento periódico devido às partículas do meio executarem movimento harmônico simples. Esta equação é denominada equação fundamental da ondulatória.

A expressão para a velocidade do deslocamento das partículas que estão em MHS é obtida derivando a função de onda (2.10) em relação a t . Para diferenciar essa velocidade de deslocamento da velocidade de propagação da onda usa-se v_y :

$$v_y(x, t) = \left(\frac{\partial y(x, t)}{\partial t} \right) = \omega A \cos(kx - \omega t) \quad (2.18)$$

Para obter a expressão que descreve a aceleração a_y de uma partícula que se desloca em MHS, toma-se a segunda derivada parcial da função (2.11) em relação a t :

$$a_y(x, t) = \left(\frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial t^2} \right) = -\omega^2 A \sin(kx - \omega t) = -\omega^2 y(x, t) \quad (2.19)$$

A energia transportada pelas ondas é inerente ao movimento harmônico simples (MHS) das partículas que compõem o meio. Esse movimento é originado por uma força que realiza trabalho sobre o sistema. Em um alto falante, por exemplo, a energia eletromagnética produz uma força sobre o transdutor e este transfere sua energia de movimento às partículas do ar.

A potência P de uma onda é dada pela energia ΔU contida nas partículas que se deslocam no tempo equivalente a um período T . No caso de ondas sonoras emitindo ondas esféricas, considera-se a energia média que flui através de uma unidade de área ΔA perpendicular à direção de propagação, denominada Intensidade, dada por:

$$I = \frac{\Delta U}{(\Delta T)(\Delta A)} = \frac{P}{\Delta A} = \frac{P}{4\pi r^2} \quad (2.20)$$

Percebe-se que a intensidade de uma onda depende da energia dada pela fonte, tanto quanto da forma geométrica da área em razão do sistema de propagação. Como visto em (2.20) a uma determinada distância da fonte sonora, a intensidade varia conforme a lei do inverso do quadrado para distâncias. A unidade de medida que expressa a intensidade sonora, nesse caso, é W/m^2 .

Podemos definir o Nível de Intensidade Sonora (NIS) para nossos ouvidos a partir da comparação entre duas intensidades. A intensidade inicial I_0 tomada como referência é valor mínimo definido para a audição humana estabelecido em $10^{-12} W/m^2$ correspondente à frequência de 1000hz. A intensidade sonora I pode ser determinada por um aparelho chamado sonômetro, também conhecido por decibelímetro, ou calculado a partir de uma situação ideal para um determinado ponto do espaço.

O Nível de Intensidade Sonora (NIS), cuja unidade de medida é o decibel, abreviado por dB, é dado por:

$$NIS = (10dB) \log \left[\frac{I}{I_0} \right] \quad (2.21)$$

Assim quando a intensidade I de uma onda sonora for igual à intensidade mínima audível I_0 , o NIS será igual a 0dB. Se o nível de intensidade sonora for de aproximadamente 120 dB, então equivalerá à intensidade de 1 w/m^2 , nesse ponto encontra-se o limiar da dor.

Ondas sonoras podem ser descritas em termos da variação de pressão em determinadas regiões do espaço tendo como referência a pressão atmosférica. O ouvido humano funciona sensivelmente a essas variações, o tímpano movimenta-se conforme a diferença de pressão entre o lado do canal auditivo, por onde a onda sonora entra, e o lado interno onde a pressão se ajusta através do tubo de Eustáquio. Cápsulas de microfones dinâmicos e outros transdutores acústicos similares funcionam com esse mesmo princípio.

Na prática se torna inviável medir pressão sonora em termos da própria definição de pressão, pois o ouvido humano é sensível a uma faixa muito extensa de nível de pressão sonora, entre $2 \times 10^{-5} \text{ N/m}^2$ a 20 N/m^2 , inclusive se comporta de forma não linear e por isso usa-se então a escala decibel que corresponde a uma escala logarítmica.

Convencionalmente adotou-se o nível 0 dB como limiar mínimo da percepção do ouvido humano estimulado na frequência de 1kHz. A pressão sonora nesse limiar inferior, é um dado experimental correspondente a 2×10^{-5} Pa (Pascal) . Para o limiar de percepção superior, ou limiar da dor, os dados foram fixados em $20 \text{ N/m}^2 = 120 \text{ dB}$.

Para determinar o Nível de Pressão Sonora (NPS) é dada a seguinte expressão:

$$NPS = (20dB) \log \left[\frac{P}{P_0} \right], \quad (2.22)$$

onde P é a pressão local e P_0 é a mínima pressão audível, usada como referência, que corresponde a 2×10^{-5} Pa.

A relação entre variação da pressão do ar causada pela passagem de uma onda sonora e sua respectiva intensidade é dada por:

$$I = \frac{P^2}{\rho v}, \quad (2.23)$$

onde P^2 corresponde ao quadrado da pressão, ρ é a densidade do ar e v a velocidade do som.

O Nível de Intensidade Sonora (*NIS*) para nossos ouvidos é obtido a partir da comparação entre duas intensidades. A intensidade inicial tomada como referência (I_0) e a Intensidade (I) determinada por um aparelho chamado sonômetro (decibelímetro) ou calculado a partir de uma situação ideal para um determinado ponto do espaço. O *NIS*, cuja unidade de medida também é o decibel, é abreviado por dB:

$$NIS = (10dB) \log \left[\frac{I}{I_0} \right], \quad (2.24)$$

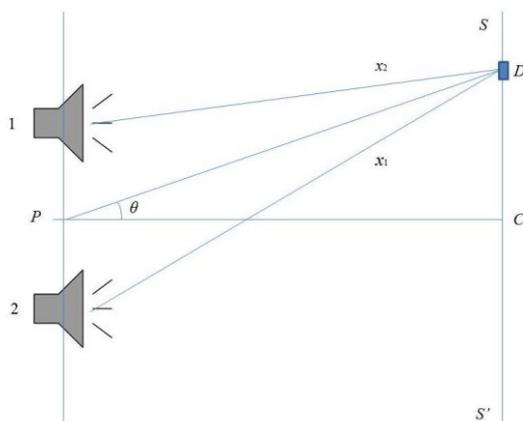
onde I_0 é valor mínimo audível para os humanos, que é da ordem de 10^{-12} W/m^2 e I é a intensidade sonora no local.

Assim quando a intensidade (I) de uma onda sonora for igual à intensidade mínima audível (I_0), o *NIS* será igual a 0dB. Se o nível de intensidade sonora for de aproximadamente 120 dB, então equivalerá à intensidade de 1 W/m^2 , nesse ponto encontra-se o limiar da dor.

Para determinar a amplitude de ondas sonoras resultantes da superposição de ondas em uma determinada região do espaço, monta-se um experimento onde dois alto falantes emitem ondas de mesma amplitude e frequência, denotadas por ondas senoidais do tipo:

$$\begin{aligned} y_1 &= y_0 \text{sen}(kx_1 - \omega t) \\ y_2 &= y_0 \text{sen}(kx_2 - \omega t). \end{aligned} \quad (2.25)$$

Figura 7. Pontos de interferência entre dois alto falantes



Fonte: Próprio autor.

O sinal (–) no argumento da função indica que as ondas se propagam da esquerda para a direita. As variáveis x_1 e x_2 são as respectivas distâncias entre os alto-falantes 1 e 2 até o detector D. A amplitude máxima ou mínima possível de cada onda no local é representada por y_0 .

A distância entre o conjunto de alto-falantes e o detector deve ser maior que a distância entre os alto-falantes, aproximadamente 10 vezes. O detector se move ao longo do segmento de reta SS' onde se pode considerar que $x_1 \approx x_2$.

Se a distância entre o conjunto e o detector for muito pequena e o detector estiver muito próximo do alto falante 1, detectará uma amplitude muito maior em relação ao alto falante 2. Se estiver muito distante, os pontos máximos e mínimos resultantes da superposição estarão cada vez mais próximos uns dos outros tendendo a uma frente de onda única.

A superposição de ondas ao longo do segmento de reta SS' é dada por:

$$y = y_1 + y_2 = y_0 [\text{sen}(kx_1 - \omega t) + \text{sen}(kx_2 - \omega t)] \quad (2.26)$$

Usando a identidade trigonométrica para funções senos

$$\text{sen } a + \text{sen } b = 2 \text{sen } \frac{1}{2} (a + b) \cos \frac{1}{2} (a - b) \quad (2.27)$$

obtém-se a função:

$$y = 2 y_0 \text{sen } \left[\frac{1}{2} k (x_1 + x_2) - \omega t \right] \cos \frac{1}{2} k (x_1 - x_2) \quad (2.28)$$

Por ser menor a distância entre os alto-falantes em relação à distância de cada um ao detector, considera-se a distância $X = \frac{1}{2} (x_1 + x_2)$ entre o ponto médio P e o detector. Substituindo em (2.28) os termos

$$2 y_0 \cos \frac{1}{2} k (x_1 - x_2) = Y_0, \quad (2.29)$$

obtém-se a expressão:

$$y = Y_0 \text{ sen } (kX - \omega t) \quad (2.30)$$

Percebe-se que a função (2.29) se parece com a função de apenas uma onda, exceto pelo fato que Y_0 é a amplitude que agora depende da posição do detector em relação aos alto falantes. Se as distâncias x_1 e x_2 forem iguais, o que corresponde ao detector estar alinhado ao ponto médio e entre os alto-falantes, a amplitude Y_0 terá valor máximo de $2y_0$. Quando a diferença da distância entre x_1 e x_2 em módulo aumenta, a intensidade decresce até que o valor seja zero quando $\frac{1}{2} k (x_1 - x_2) = \pi/2$. Neste ponto, onde a intensidade é nula, a diferença no comprimento da trajetória é equivalente à metade do comprimento de onda, ou seja, há uma diferença de fase de π radianos, ou 180° entre as duas ondas. A amplitude máxima é denominada interferência construtiva e a amplitude mínima interferência destrutiva.

A interferência construtiva ocorre sempre que a diferença da trajetória for igual a números inteiros de comprimento de onda $n\lambda$, ou que a diferença de fase seja um múltiplo inteiro de 2π radianos $\frac{1}{2} k (x_1 - x_2) = 0, \pi, 2\pi, 3\pi \dots n\pi$.

A Interferência destrutiva ocorrerá sempre que a diferença de trajetória for igual a números ímpares de meios comprimentos de onda $(n+1/2)\lambda$, ou quando a diferença de fase for um múltiplo ímpar de π radianos $\frac{1}{2} k (x_1 - x_2) = \pi/2, 3\pi/2, 5\pi/2 \dots (2n+1)\pi/2$.

2.1.1.1 Ondas estacionárias

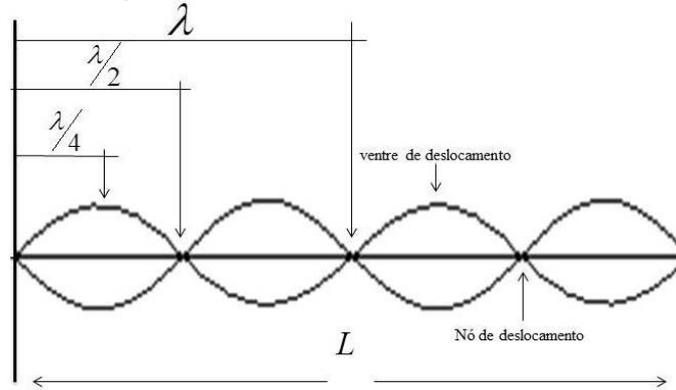
Cordas em instrumentos musicais, instrumentos de percussão ou qualquer objeto, quando submetidos a uma energia de vibração externa, podem reproduzir padrões denominados modos normais de vibração. O formato e as propriedades mecânicas destes corpos determinam quais frequências irão compor estes modos. Quando um sistema é forçado a oscilar e a frequência do agente externo coincidir com uma das frequências que compõem um modo de vibração do objeto, ocorrerá o fenômeno da ressonância. Por isso que a característica sonora dos instrumentos, denominada timbre, é determinada não só pelas características físicas das cordas e membranas, mas também pelos modos de vibração do corpo do instrumento.

Em uma análise do espectro de vibração de um objeto é possível saber a amplitude e a frequência de cada modo de vibração em ressonância. Esse procedimento também é chamado de análise de Fourier, onde cada frequência é uma componente de uma série de Fourier [11].

Quando ondas sonoras se propagam pelo interior de um tubo de extremidades fechadas, essas ondas são refletidas da mesma forma que uma onda transversal em uma corda de violão é refletida em suas extremidades. As contínuas reflexões alteram o sentido de propagação das ondas ocasionando a superposição. Essas ondas são chamadas de **ondas estacionárias** e podem ser descritas tanto em termos do deslocamento, para ondas transversais, quanto pela variação de pressão como no caso de ondas sonoras no interior de um tubo. Outro modo mais específico para descrevê-las é usar as expressões **nó de deslocamento** para designar um ponto onde o deslocamento de uma partícula é nulo e **ventre de deslocamento** onde o deslocamento é máximo. A distância entre dois nós adjacentes corresponde a $\lambda/2$ e, portanto a distância entre um nó e o ventre adjacente é igual a $\lambda/4$.

Se as partículas oscilam entre dois ventres adjacentes então vibram em fases opostas.

Figura 8. Ondas estacionárias transversais.



Fonte: Próprio autor.

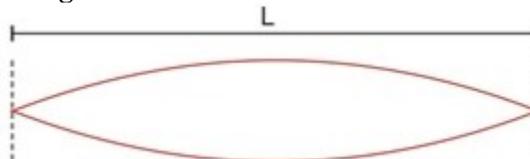
As ondas estacionárias podem ser expressas na forma (2.29) por se tratar de um tipo de superposição de ondas. Considerando a identidade trigonométrica para funções senos (2.26), obtém-se a expressão:

$$y = 2 y_0 \text{ sen } (kx) \cos (\omega t) \quad (2.31)$$

Considerando as extremidades fixas de uma corda vibrante de comprimento $x=L$, a amplitude nas extremidades é nula em qualquer valor de t , de forma que o termo em seno na função (2.31) seja anulado. Se $\text{sen}(kx)=0$, então o argumento $kx = n\pi$, onde n inteiro é equivalente ao número de ventres de deslocamento e a ordem do modo de vibração.

O primeiro modo de vibração, denominado frequência fundamental ou 1° harmônico, possui apenas um ventre de deslocamento e é equivalente ao próprio comprimento L da corda e corresponde a metade do comprimento de onda $\lambda/2$.

Figura 9. Onda estacionária fundamental



Fonte: Próprio autor

O comprimento de onda λ de uma onda estacionária em uma corda é dado pela seguinte relação:

$$\lambda = \frac{2L}{n}, \quad (2.32)$$

onde L é o comprimento da corda e n a ordem do modo de vibração.

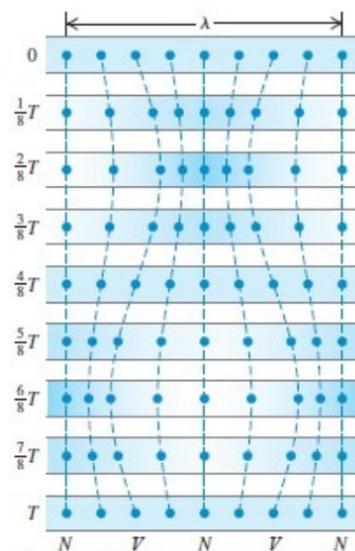
Considerando a equação (2.17) a frequência de uma onda estacionária em uma corda de extremidades fixas é dada por:

$$f = \frac{nv}{2L}. \quad (2.33)$$

onde f é a frequência do modo de vibração e v a velocidade da onda.

Em ondas estacionárias longitudinais, como as produzidas no interior de tubos abertos nas duas extremidades, ou fechados em uma extremidade, usa-se o termo **nó de pressão** para descrever o ponto onde a pressão e a densidade do ar não variam, e o termo **ventre de pressão** para descrever o ponto no qual a pressão e a densidade têm valores máximos. O deslocamento das partículas azuis na Figura 10 representam pontos equivalentes aos formados nas ondas estacionárias transversais. Um nó de deslocamento (N) corresponde a um ventre de pressão, onde a pressão varia ao máximo, e um ventre de deslocamento (V) corresponde a um nó de pressão, onde a pressão é constante.

Figura 10. Onda estacionária em um tubo aberto



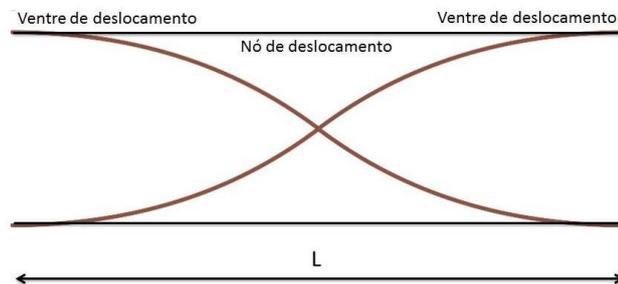
. Fonte: Young & Freedman [11].

A reflexão de uma onda na extremidade fechada de um tubo forma um nó de deslocamento e um ventre de pressão, as partículas não se movem, porém a pressão é máxima nessa região. Para uma extremidade aberta as partículas se deslocam com amplitude máxima e sempre haverá um ventre de deslocamento e um nó de pressão por ela estar aberta à atmosfera.

Em um tubo com as duas extremidades abertas, denominado tubo aberto, a frequência fundamental f_1 corresponde a uma onda estacionária com um ventre de deslocamento em cada extremidade e um nó de deslocamento no meio do tubo. Como a distância entre dois ventres adjacentes é igual a meio comprimento de onda, o comprimento L do tubo aberto, neste caso, é equivalente a $\lambda/2$. Relacionando esta equivalência à equação (2.17) obtém-se a expressão para a frequência fundamental em um tubo aberto:

$$f_1 = \frac{v}{2L} \quad (2.34)$$

Figura 11. Tubo com extremidades abertas.



Fonte: Próprio autor

A extremidade aberta de um tubo é sempre um ventre de deslocamento e todos os modos normais de comprimento L possuem um múltiplo inteiro n para meios comprimentos de onda $\lambda_n/2$, e os comprimentos de ondas λ_n são dados por:

$$L = n \frac{\lambda_n}{2} \quad \text{ou} \quad \lambda_n = \frac{2L}{n} \quad (n=1,2,3\dots) \quad (2.35)$$

As frequências que correspondem aos modos normais novamente são obtidas pela relação com a equação (2.17):

$$f_n = \frac{nv}{2L} \quad (n=1,2,3\dots) \quad (2.36)$$

Para um tubo com uma extremidade fechada formará nessa região um nó de deslocamento, contrário à extremidade aberta.

A distância entre um nó e um ventre adjacente é sempre $1/4\lambda$, pois como visto, a distância entre dois ventres adjacentes é sempre igual a meio comprimento de onda. Logo, o comprimento L do tubo no modo fundamental deve corresponder a $\lambda/4$.

Os comprimentos de ondas possíveis são dados por:

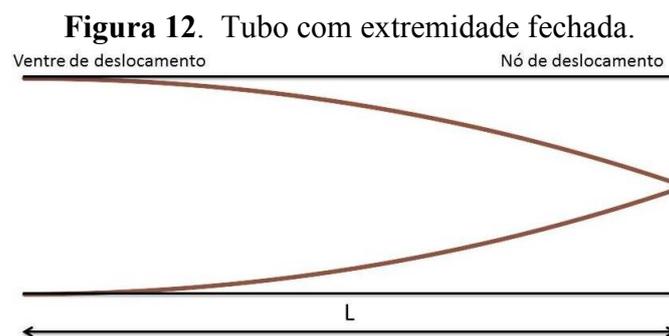
$$L = n \frac{\lambda_n}{4} \quad \text{ou} \quad \lambda_n = \frac{4L}{n} \quad (n=1,3,5\dots) . \quad (2.37)$$

A frequência do modo fundamental, fazendo a substituição em (2.17) é dada por:

$$f_1 = \frac{v}{4L} , \quad (2.38)$$

enquanto as frequências dos outros modos normais são dadas por:

$$f_n = \frac{nv}{4L} \quad (n=1,3,5\dots) \quad (2.39)$$



Fonte: Próprio autor

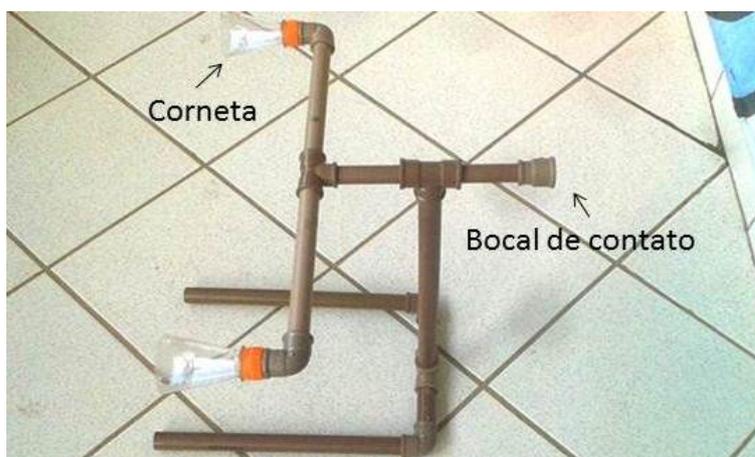
Capítulo 3

Metodologia

Durante as pesquisas em buscas de referenciais que contribuíssem para o desenvolvimento desse trabalho, foram encontrados vídeos na internet de pessoas que fazem Montagens semelhantes ao TDS para ouvirem músicas. Esta foi a maior inspiração que imediatamente se transformou numa problematização de como poderia ser aplicado no ensino da Acústica. O material didático de apoio aos mestrandos do Programa Mestrado Nacional Profissional de Ensino de Física (MNPEF) [9] propõe 13 experimentos de acústica com enfoque nos materiais de baixo custo. Esse foi também um motivo pelo qual o Tubo de Diretividade Sonora (TDS) tornou-se possível.

O presente trabalho envolve o uso de uma montagem experimental denominada Tubo de Diretividade Sonora (TDS) composta de canos e conexões PVC e garrafas PET, usado para guiar a onda sonora produzida em um *smartphone*, através do contato físico entre ambos, para que seja concentrada em uma região do espaço e analisada através de aplicativos de um segundo *smartphone*. A Figura 13 apresenta um TDS montado e usado como exemplo para que os alunos montem outros exemplares em sala de aula.

Figura 13. TDS com bocal de contato e duas cornetas.



Fonte: Próprio autor

3.1 Tubo de Diretividade Sonora (TDS)

O Tubo de Diretividade Sonora (TDS) é estruturalmente semelhante a um tubo sonoro de extremidades abertas. A principal diferença é que o som não é produzido no TDS, como ocorre nos instrumentos musicais de sopro. O TDS é um instrumento que propaga a onda paralelamente ao eixo longitudinal do tubo. Ele é composto de canos e conexões de PVC e garrafas PET.

O *smartphone* é acoplado em um bocal de contato e o som reproduzido sai pela extremidade oposta, onde fica encaixada uma corneta feita com o gargalo de uma garrafa pet, sua função é dar eficiência na transmissão dos sons, pois umas das maneiras mais rudimentares de comunicação verbal à distância é a utilização das mãos em formato de conchas em volta da boca para direcionar o som. As cornetas têm a característica de tornar mais inteligível as frequências médias e agudas, justamente na região da fala humana. Podem ter formatos denominados cônico, parabólico, exponencial ou hiperbólico, cada modelo atribui resultados harmônicos diferentes na faixa de frequências médias e agudas [Horn 2019]. Além dessas especificações, as cornetas também controlam o ângulo de irradiação da onda sonora concentrando maior energia em determinadas direções.

Figura 14: Corneta feita com garrafa pet.



Fonte: Próprio autor.

A confecção do TDS com materiais de fácil acesso incluindo materiais descartáveis vai ao encontro dos parâmetros curriculares nacionais, quando

estes consideram que o uso de materiais alternativos nos experimentos e estudos de fenômenos físicos viabiliza o processo de ensino/aprendizagem adequando o ambiente escolar à própria realidade social e econômica local.

As habilidades necessárias para que se desenvolva o espírito investigativo nos alunos não estão associadas a laboratórios modernos, com equipamentos sofisticados. Muitas vezes, experimentos simples, que podem ser realizados em casa, no pátio da escola ou na sala de aula, com materiais do dia a dia, levam a descobertas importantes. (pág. 55, 2002 [1]).

Por essa motivação foram usadas garrafas pet e canos de pvc na confecção do Tubo de Diretividade Sonora (TDS). O formato de cada TDS ficou a critério da criatividade dos alunos.

3.1.1 Aplicativos

Os recursos didáticos e metodológicos incluem também tecnologias digitais de fácil acesso, principalmente pelo uso de aplicativos gratuitos com potencial satisfatório no estudo de fenômenos físicos, especificamente para a acústica. Alguns aplicativos gratuitos podem ser baixados diretamente de um dispositivo com sistema operacional *Android* ou em um computador pelo site *Google Play* [Google play 2019]. Essas opções são economicamente viáveis para o desenvolvimento de estudos em sala de aula, principalmente em escolas públicas, pois há poucos anos essas práticas eram possíveis com equipamentos eletrônicos sofisticados e encontrados principalmente em laboratórios de escolas de ensino técnico ou de ensino superior.

O *smartphone* pode ser usado como um gerador de frequência através do aplicativo denominado *Gerador de Frequência*. Esse aplicativo foi escolhido para ser usado nos experimentos propostos por este trabalho por possuir um controle deslizante que varia a frequência sonora entre 1 Hz a 20kHz; opções de escolha de frequências predefinidas; um botão que muda o formato da onda entre senoidal, quadrada, triangular e dente de serra e um botão de *play/stop*.

A escolha por esse aplicativo foi motivada pela sua simplicidade, pois todas as funções aparecem na tela principal e não é necessária uma configuração inicial.

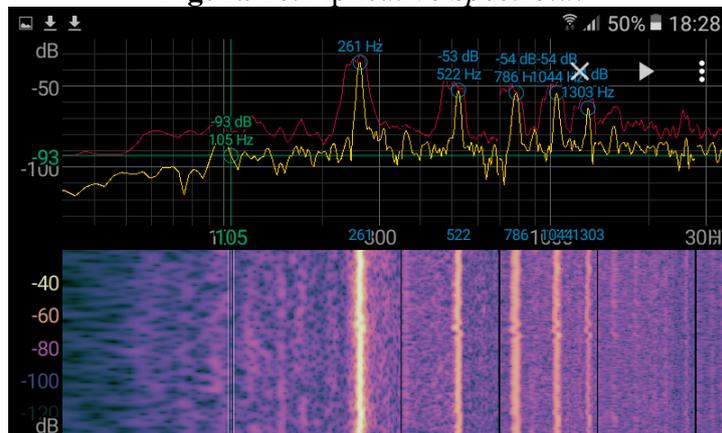
Figura 15. Aplicativo Gerador de Frequência.



Fonte: Próprio autor

Neste trabalho o aplicativo usado para analisar as componentes harmônicas no som reproduzido através do Tudo de Diretividade Sonora (TDS) é denominado *Spectroid*.

Figura 16. Aplicativo *Spectroid*.

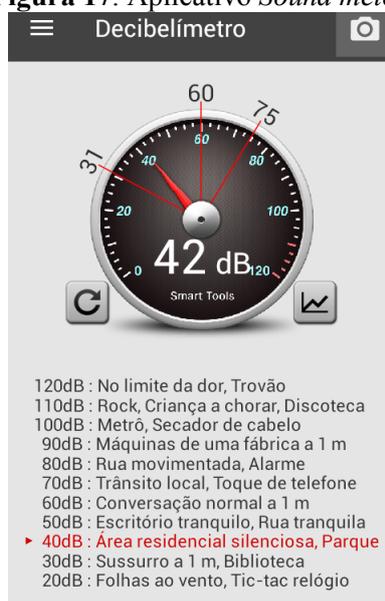


Fonte: Próprio autor.

O aplicativo *Spectroid* possui uma escala em decibel, porém escalas de níveis de intensidade sonora não possuem valores negativos, portanto a amplitude registrada no aplicativo deve ser desconsiderada, pois é prático para o experimento verificar apenas a variação da amplitude das frequências. A escala de intensidade à esquerda da tela é denominada *dBFS* que significa

decibel Full Scale (escala completa de decibéis), esta escala é própria para processamento digital de áudio, define que a amplitude mais intensa possível para analisar ou gravar antes do ponto de saturação seja 0dB. As amplitudes abaixo desse limite são valores numéricos negativos, portanto sem corresponderem numericamente ao nível de intensidade sonora real da escala de decibéis. Outro aplicativo usado apenas para medição de nível de intensidade sonora é o *Sound Meter*. Este aplicativo é conhecido por Decibelímetro e faz medições da intensidade sonora em ambientes.

Figura 17. Aplicativo *Sound meter*.



Fonte: Próprio autor

A opção *Referência/Gráfico* alterna entre a lista de comparação de ambientes e o gráfico da intensidade em função do tempo. Para novas medições o aplicativo dispõe da opção *Reiniciar* e de outras descritas na Figura 18.

Figura 18: Função *Referência/Gráfico*.



Fonte: Próprio autor

O Decibelímetro deve ser calibrado para apresentar dados confiáveis, porém mesmo este aplicativo tendo a opção “calibrar” torna-se difícil calibrá-lo, pois não há equipamentos de referência para fazer isso em sala de aula. No entanto, é possível usar esta opção para fazer ajustes arbitrários de sensibilidade e utilizá-lo como mostrador de variação do nível de intensidade sonora. O ajuste numérico da amostragem para uma determinada intensidade sonora que esteja sendo captada é feita através dos botões mais (+) e menos (-) através da opção *Calibrar* nas opções de configuração.

Figura 19: Opção de calibragem.



Fonte: Próprio autor

Capítulo 4

Relato dos encontros

As atividades práticas desenvolvidas durante este trabalho foram realizadas em duas turmas do Centro de Educação de Jovens e Adultos (CEJA) das cidades de Passo de Torres-SC e Araranguá-SC e em uma turma de terceiro ano do ensino médio regular da cidade de Meleiro-SC. Foram realizados três encontros com tempo estimado de 2 horas e 30 minutos para os alunos do CEJA e um encontro de aproximadamente 45 minutos para realização de experimentos com os alunos do terceiro ano do ensino regular, levando em consideração que estes já haviam estudado ondulatória no segundo ano.

4.1 Primeira aplicação

A primeira aplicação do TDS em sala de aula foi realizada em turmas do CEJA, cujos estudantes ainda não tinham conhecimento formal sobre os conceitos de Acústica. Nestas turmas foram realizados três encontros, que são descritos a seguir.

Encontro: Música e Som.

Este primeiro encontro tem o intuito de familiarizar os estudantes com os conceitos básicos da acústica e oportunizar momentos de reflexão e discussão sobre a cultura musical brasileira. Dessa forma, espera-se que os estudantes aprendam e ampliem conceitos e propriedades dos fenômenos acústicos, tais como, comprimento de onda, frequência, velocidade de propagação, período e as relações matemáticas que se originam da equação fundamental da ondulatória.

Recursos utilizados

- Projetor multimídia;
- Internet a ser usada para apresentar um clipe musical. Caso não haja internet na escola, o professor deve providenciar outro meio para a apresentação do clipe da música.
- Notebook: para a apresentação de slides e de uma música;
- Quadro branco/negro e pincel/giz.

Atividades realizadas

- Apresentação de um vídeo musical, seguido de uma discussão;
- Apresentação dos conceitos básicos de fenômenos acústicos;
- Apresentação de relações e equações que modelam fenômenos acústicos;
- Exercícios propostos, visando a observação de fenômenos acústicos de forma quantitativa.

Inicialmente foi apresentado o clipe oficial de uma música [Trem Bala 2019] com o objetivo de sensibilizar os estudantes quanto ao estudo da música e dos sons. Após a apresentação do vídeo, foi feito um debate conduzido por questionamentos, com o propósito de estimular a interação entre os alunos. A discussão teve como base o conhecimento prático e habitual de cada um. Como sugestão, as perguntas desenvolvidas para este trabalho podem ser impressas para que os alunos as respondam por escrito. As questões propostas foram:

1. Atualmente, quais os gêneros musicais mais apreciados no Brasil?
2. O que leva uma pessoa a ter um gosto musical em vez de outro?
3. O que todos os gêneros musicais têm em comum?
4. Como é feita a música?
5. O que os instrumentos musicais têm em comum?
6. Quais sons são produzimos para nos comunicar?
7. Existem sons que não ouvimos e que eram comuns no passado?
8. Há sons que produzimos e que há algumas décadas não eram produzidos?
9. O que é o silêncio? O que é som?
10. Como ouvimos o som? Como o som chega aos nossos ouvidos?

Das perguntas feitas nesse momento surgiram hipóteses sobre a cultura musical brasileira popular, que tem a característica de mudar a cada 10 ou 15 anos, como é o caso do estilo “Sertanejo Universitário” que iniciou por volta de 2005 e que continua até a presente data em 2018. Outros gêneros e estilos musicais em seus apogeu nas décadas passadas são Rock Nacional (anos

1980), o Pagode nos anos 1990 entre outros subgêneros regionais que tomaram proporção nacional durante esses períodos, como a “Vaneira” do sul do Brasil, o Arrocha, Calypso, Forró do nordeste brasileiro.

Para alguns alunos questões sociais parecem ser motivadores para essas mudanças em torno dos estilos e gêneros musicais. As letras das músicas e os ritmos dos sucessos retratam tendências de comportamento da população. Outro fator são as influências das mídias e propagandas na associação da música com as bebidas, carros, erotização como sinônimo de alegria e felicidade.

Outros assuntos interessantes desenvolvidos nessa conversa foram sobre a diferenciação de som, barulho e ruído que só depende da maneira como os compreendemos. Quando perguntados sobre quais sons existiam no passado e que hoje não mais, foi comentado sobre os sons dos animais extintos e o som vocálico da linguagem dos antigos povos e civilizações, além do chiado das televisões analógicas quando fora de sintonia. Entre os sons que atualmente existem e que há pouco não, estão os sintetizados por computador e os das novas máquinas. Questões mais técnicas a respeito do som não tiveram tantos argumentos e percebe-se pouco conhecimento empírico. Por exemplo, quando perguntados se há som no espaço, poucas respostas surgiram e ainda incompletas do tipo “no espaço só teria som se tivesse ar”, atrelando o fenômeno ao ar que respiramos.

Princípios de fenômenos acústicos

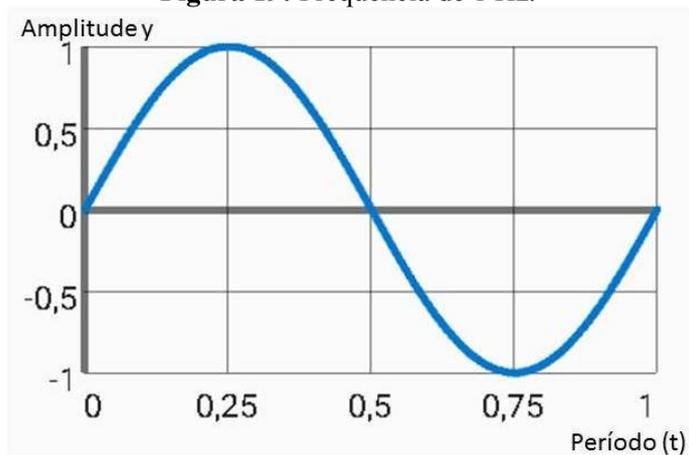
A discussão feita sobre música e som no primeiro momento procurou motivar os estudantes no estudo dos conceitos básicos de acústica. Dessa forma, o passo seguinte foi inserir questionamentos mais específicos, do tipo:

Como o som se propaga e do que é feito?

Para que os estudantes tenham uma visão mais detalhada das propriedades das ondas sonoras e do movimento alternado de uma onda mecânica e de como as partículas de um determinado meio reagem a uma perturbação, optou-se pelo uso de slides para ilustrar esses fenômenos ondulatórios.

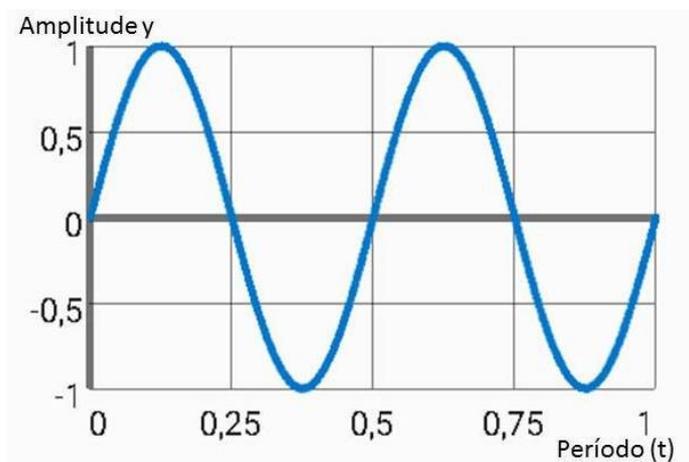
Após as definições iniciais sobre a natureza do som, a discussão foi direcionada pelo questionamento: **O que faz o som do apito de um árbitro de futebol ser diferente do apito de um trem?** Para responder a este, foram apresentados conceitos fundamentais do som e mostradas imagens que representam as frequências sonoras e relação inversa e à quantidade de ciclos por unidade de tempo.

Figura 19: Frequência de 1 Hz.



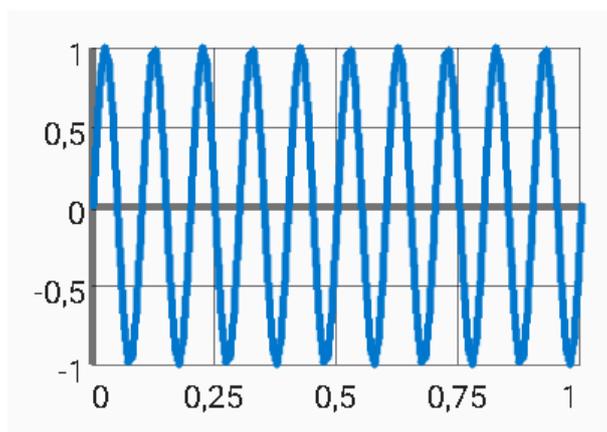
Fonte: Próprio autor

Figura 20: Frequência de 2 Hz.



Fonte: Próprio autor

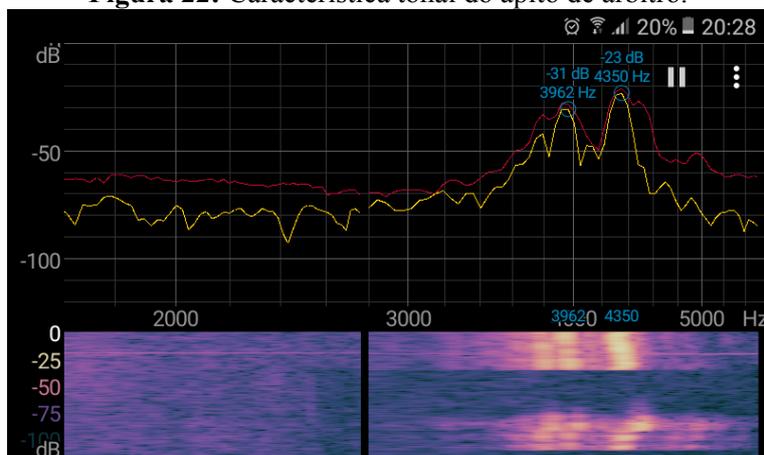
Figura 21: Frequência de 10 Hz



Fonte: Próprio autor

Para desenvolver a compreensão sobre a característica tonal de um som usou-se uma imagem do aplicativo *spectroid* analisando o som de um apito de árbitro de futebol. Estes apitos geram um som com frequência de aproximadamente 4000 Hz, conferido através do aplicativo *spectroid*.

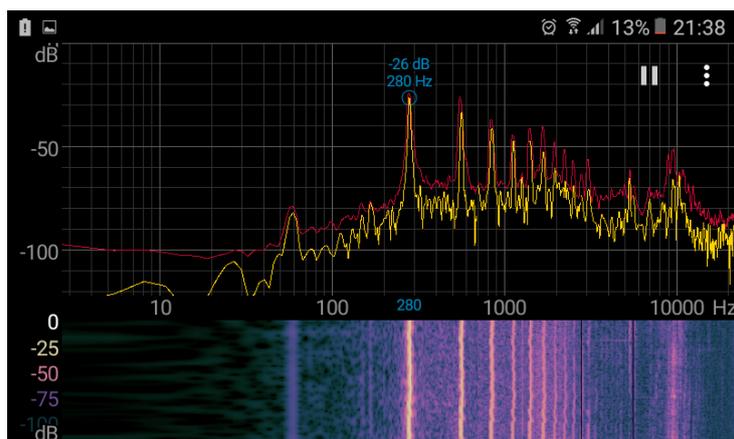
Figura 22: Característica tonal do apito de árbitro.



Fonte: Próprio autor

A Figura 23 mostra a característica tonal de um apito de trem [Trem 2019] analisado com o aplicativo *spectroid* através do som reproduzido em um vídeo no *Youtube*.

Figura 23: Característica tonal do apito de trem.



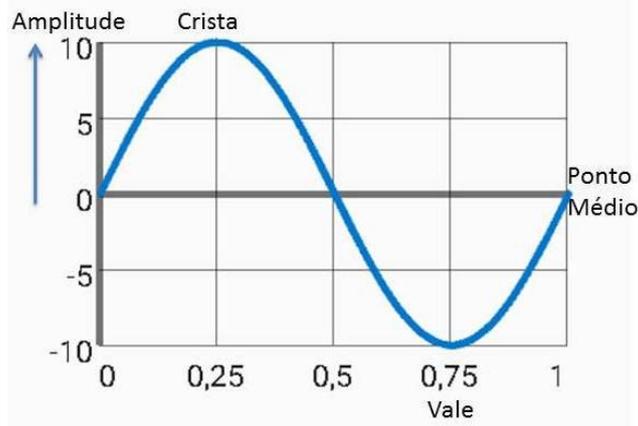
Fonte: Próprio autor.

Buscando uma definição conceitual a respeito da amplitude, foi proposto aos alunos o seguinte questionamento: **“Se alguém fala alto com você, significa que a voz dessa pessoa é aguda ou intensa?”**.

Popularmente os termos “alto” e “baixo” referem-se ao nível de intensidade sonora, significando que o som produzido pela fala está acima ou abaixo do nível considerado normal para uma conversação, enquanto que na Física os termos “alto” e “baixo” correspondem à altura da frequência de um som. Na música usam-se os termos “forte” e “fraco” para determinar a intensidade da execução das notas musicais. As Figuras 24 e 25 ilustram ondas que se diferem apenas pela amplitude. Por questões didáticas, os valores numéricos da amplitude não definem nenhuma unidade de medida.

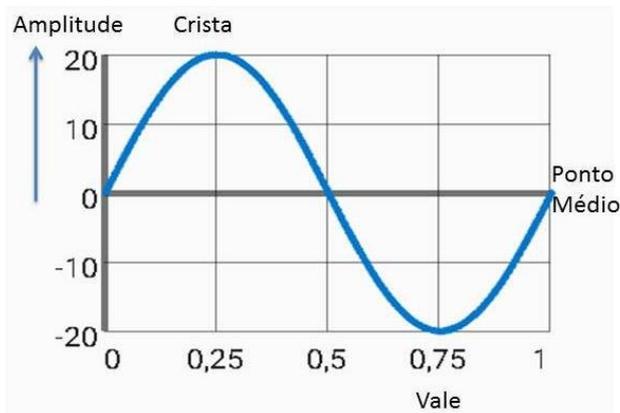
O valor da amplitude é definido a partir do ponto médio localizado sobre o eixo horizontal do gráfico, onde a amplitude é nula. Desse ponto aos extremos, denominados crista e vale, nota-se um valor positivo máximo e um valor negativo mínimo, indicando que esse é um fenômeno cíclico.

Figura 24: Onda de 1Hz com amplitude 10.



Fonte: Próprio autor

Figura 25: Onda de 1Hz com amplitude 20.



Fonte: Próprio autor

Outro questionamento propôs saber o **quão intenso é um som para nossos ouvidos**. Esse questionamento foi discutido mostrando a equação 2.24 e suas definições.

Comprimento de onda e velocidade de propagação

As relações matemáticas atribuídas aos fenômenos acústicos discutidos nesse primeiro encontro são apresentadas partindo da observação das figuras dos *slides*. Prosseguindo com esse método, outro questionamento feito aos alunos durante a sequência de *slides* foi: **“Por que às vezes ouvimos o som provocado por um raio um tempo depois de vermos sua luz?”**. Esse questionamento foi discutido através da equação fundamental da ondulatória (2.17).

Após os conceitos iniciais de Acústica e as formalizações necessárias, os alunos reuniram-se em grupos de 3 a 4 pessoas que em média formou 3 grupos, resolveram 8 questões sobre acústica, sendo 5 conceituais de múltipla escolha e 3 de resolução matemática [Enem 2019].

Evidencia-se a dificuldade da maioria dos alunos em resolver as questões apresentadas e de argumentos lógicos conceituais. Frequentemente pediam explicação que envolve aritmética básica, além disso, é comum os alunos pensarem que Física é apenas matemática. Percebeu-se também que mesmo a abordagem conceitual de um fenômeno ter sido trabalhada com vários exemplos, vários alunos insistem em resolver as questões através de concepções alternativas.

Para o próximo encontro, ficou acordado com os grupos que trariam materiais para a confecção do TDS e que baixassem os aplicativos. A ideia do TDS foi apresentada através de vídeos da internet, onde montagens semelhantes são feitas para entretenimento com objetivo de intensificar o som do *smartphone* [Pet 2019]. Os Aplicativos foram mostrados com o *smartphone* do professor. O primeiro aplicativo mostrado foi o Gerador de Ondas, o segundo aplicativo foi o decibelímetro *Sound Meter* usado para medir o *NIS* e o terceiro foi o *Spectroid*, que mostra um gráfico de amplitude em função da frequência.

Encontro: Montagem do TDS.

O segundo encontro foi iniciado com a confecção dos TDS e depois o estudo dos aplicativos. Cada grupo teve autonomia para fazer conforme achou melhor, inclusive dando nome próprio ao seu trabalho.

Figura 26: TDS com 8 cornetas.



Fonte: Próprio autor.

Os grupos que terminavam o TDS já iam experimentando o acoplamento dos *smartphones* para reproduzirem músicas, enquanto que outros já testavam o aplicativo Gerador de Frequência, o Decibelímetro e o analisador de espectro *Spectroid*.

Figura 27. Alunos experimentando o TDS.



Fonte: Próprio autor

Um dos primeiros testes objetivando o estudo dos Aplicativos foi com o gerador de tom, que consiste em testar a capacidade auditiva em relação às frequências. É interessante a reação dos alunos ao perceberem que algumas pessoas ouvem tons mais agudos que outras. A partir de 10 kHz vai ficando evidente essa diferença de sensibilidade entre os alunos. É importante ressaltar que esse teste foi feito em turmas de Jovens e Adultos, que inclui alunos idosos.

Durante essa fase do desenvolvimento do TDS e os primeiros testes de estudos dos aplicativos, algumas observações devem ser levadas em conta para tornar mais eficiente o próximo encontro e evitar situações indesejadas. Por exemplo, as reflexões do som nas paredes e nos objetos alteram os resultados, pois a sala de aula não é um local acusticamente adequado para testes. O ideal é usar um ambiente aberto, livre de superfícies refletoras e que não tenha ruído que não seja apenas o som do *smartphone*, ou ainda uma sala pequena com superfícies irregulares que causem absorção ou reflexão difusa, como os tecidos, madeiramentos e texturas. É aconselhável produzir as ondas sonoras pelo tempo mínimo para evitar que o ambiente cause reflexões e interfira na medição. Outro problema que encontramos nessa fase foi o incômodo gerado às turmas das salas vizinhas, provocado pelo som gerado no *smartphone*. De certa forma torna-se irritante para muitas pessoas que estão tentando estudar próximas desse local, pois o som contínuo de uma frequência alta não é agradável para a maioria das pessoas. Então é preciso cuidado ao escolher o local de testes, tanto para ter uma boa acústica quanto para não atrapalhar nos estudos de outras pessoas.

Encontro: Experimentos com o TDS.

O terceiro encontro iniciou-se com a apresentação de um vídeo curto sobre superposição de ondas na água [Interf. 2019], a partir de duas fontes oscilatórias. A finalidade deste foi analisar o que ocorrera na aula anterior quando ainda em testes, cada TDS registrara maior ou menor amplitude na intensidade sonora, dependendo da posição em relação ao *smartphone* que captava o som. Após o vídeo, a mesa do professor foi usada como bancada para posicionar o TDS acoplado ao *smartphone* gerador da onda sonora, e a distância aproximada de 1 metro foi posicionado o segundo *smartphone* que captou o som através do aplicativo Decibelímetro. Esta distância foi escolhida arbitrariamente.

Figura 28. Medição da intensidade da onda



Fonte: Próprio autor

Durante as medições foi constatado que cada TDS apresentava níveis de intensidade sonora diferentes em frequências específicas, foi proposta uma varredura entre 400 Hz a 3kHz e descobrir quais frequências cada TDS obtinha maior amplitude.

O fato de cada TDS ter uma frequência específica para atingir maior amplitude pode levar o aluno a pensar que ocorre uma ressonância na estrutura sólida, porém o que ocorre são vibrações do ar no interior dos canos formando ondas estacionárias.

Cada grupo registrou então a frequência de maior amplitude medida pelo aplicativo Decibelímetro e esses dados foram montados em cartolinas e colados na parede da sala para exposição. Cada grupo apresentou as características de seu TDS da seguinte forma:

- Nome do trabalho
- Amplitude sonora em decibéis
- Frequência de maior amplitude em Hz
- Comprimento da onda calculada.

Figura 29. Cartazes colados na parede.



Fonte: Próprio autor

4.2 Segunda aplicação: Experimentos com Tubo de Diretividade Sonora de comprimento Variável (TDS-V)

A segunda aplicação do TDS ocorreu em uma turma de 3º ano do ensino regular da Escola Estadual Básica de Meleiro-SC. De acordo com a grade curricular e o planejamento da escola essa turma conhecia o conteúdo relacionado às ondas.

Visando então somente a aplicação de experimentos, esse encontro foi realizado um ano após os primeiros experimentos feitos com as turmas do CEJA. Neste período, podemos destacar mais a potencialidade do TDS no ensino. Esses alunos formaram 3 grupos de 4 pessoas para realizarem as atividades em um tempo de aproximadamente 45 minutos.

Os experimentos foram feitos com o **Tubo de Diretividade Sonora de Comprimento Variável (TDS-V)**, uma versão evoluída com o bocal de contato móvel que permite encontrar os modos normais das ondas estacionárias no interior do tubo. Optou-se por não fazer um roteiro impresso, as atividades foram desenvolvidas a partir de demonstrações experimentais.

Tal como nos experimentos com o TDS de comprimento fixo, usou-se os mesmos aplicativos e os procedimentos para gerar e captar o som. Durante o encontro foram retomados alguns conceitos importantes como velocidade do som, frequência e comprimento de onda.

Para que os alunos pudessem sinalizar o comprimento de uma onda, foi colada uma fita crepe no sentido longitudinal do tubo variável e com o lápis foram feitos os pontos de registro onde a amplitude do som era maior.

Figura 30. TDS-V com fita colada



Fonte: Próprio autor

Depois de feita as marcas na fita crepe, usa-se uma régua para medir a distância entre os pontos. O experimento adquire maior precisão se forem feitas mais de duas marcas e depois a média aritmética da soma das distâncias.

Figura 31. Medição entre os pontos de maior amplitude.



Fonte: Próprio autor

Cada grupo montou uma tabela em uma folha de caderno, conforme faziam as medidas. A tabela 1 mostra as medidas do comprimento de onda da

frequência específica e a velocidade do som calculada. Para determinar o comprimento de onda usou-se a definição de ondas estacionárias em tubos abertos, pois conforme a variação do comprimento do tubo, o aplicativo detecta dois máximos, que corresponde a uma distância de meio comprimento de onda. Por essa razão os alunos usaram a seguinte definição:

$$\lambda = 2L, \quad (4.1)$$

onde λ é o comprimento de onda e L é a distância média entre os pontos marcados.

Para determinar a velocidade do som, usou-se a equação fundamental da ondulatória (2.17).

Tabela 1. Relação entre variáveis.

Grupo	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
Medidas	4 pontos	2 pontos	5 pontos
Frequência	2000 Hz	3000 Hz	4000 Hz
Distância média entre pontos	0,087 m	0,060 m	0,425 m
Comprimento de onda calculado	0,174 m	0,120 m	0,085 m
Velocidade do som calculado	348 m/s	360 m/s	340 m/s

Fonte: Próprio autor

Percebeu-se que o experimento deve ser feito com cuidado no momento de fazer as medidas na fita crepe, pois para frequências altas os desvios nas medidas podem ocasionar erros consideráveis. Para mínimas quantidades de medidas, como no caso do grupo 2 (veja tabela 1), pode ocorrer de os resultados apresentarem maiores discrepâncias no momento de calcular a velocidade do som.

4.3 Resultados dos Encontros

Propôs-se nesses encontros desenvolver um modo prático e criativo de estudar as propriedades das ondas sonoras, já que o estudo da Acústica nas escolas limita-se geralmente às aulas expositivas e técnicas e a pequenas exposições em feiras de ciências ou a experimentos breves como aquele do

“telefone com copinhos de iogurte e um barbante”, válidos e importantes, mas que fazem parte de uma metodologia que pode e deve ser melhorada. Os experimentos propostos proporcionaram momentos que inclusive resultaram em observações inesperadas beneficiando o desenvolvimento metodológico, como foi o caso da frequência de ressonância e da sobreposição de ondas, evidentes durante as experimentações.

Houve a preocupação desde o início de não tratar o som apenas como uma onda mecânica de comportamento similar às ondas eletromagnéticas, inclusive destoando do modo tradicional que é trabalhá-las simultaneamente com argumentos teóricos. Desse modo percebeu-se a interação dos alunos com o que estavam estudando, pelo debate inicial da primeira aula sobre sons e músicas e a customização e os cartazes dos TDS. Outro fator interessante que contribuiu significativamente com envolvimento dos alunos nos trabalhos foi a facilidade de compreensão que os aplicativos dão aos fenômenos sonoros.

Os materiais para a confecção do TDS são de fácil obtenção, pois as garrafas pet são geralmente obtidas em casa e os canos e conexões de PVC possuem pequeno valor no mercado. Algumas situações que requerem melhor gerenciamento de tempo são as próprias confecções dos TDS, inicialmente os alunos ficam indecisos em qual modelo construir e alguns demoram mais que outros, inclusive não ficando prontos no mesmo dia em que iniciam. Por isso a importância de iniciar os trabalhos com 1 ou 2 roteiros de montagem com medidas e formatos impressos em folhas ou exposto em slides. Esse trabalho não foi iniciado com esses recursos durante os encontros por se tratar também de uma metodologia experimental sujeita a melhorias. Ainda é importante respeitar a criatividade dos alunos e tomar cuidado para que desenvolvam trabalhos, na medida do possível, sem estarem muito “presos” a padrões estéticos ou técnicos.

Capítulo 5

Considerações Finais

A confecção do TDS não apresentou nenhuma dificuldade de obtenção dos materiais para a montagem. Os materiais de baixo custo, como os canos de PVC, e as garrafas pet, foram essenciais para que os trabalhos se iniciassem rapidamente.

Em relação ao uso dos aplicativos, são ferramentas práticas e intuitivas, nenhum aluno apresentou dificuldade em manuseá-los, inclusive alguns alunos baixaram outros aplicativos semelhantes para fazerem os testes.

Os encontros realizados nas turmas do CEJA possibilitaram um processo contínuo de atividades de acordo com o planejamento metodológico, pois os encontros duravam um período inteiro de duas horas e trinta minutos, isso facilitou a aplicação desse trabalho. No encontro ocorrido com a turma do 3º ano regular do ensino médio de Meleiro, apesar de ter apresentado os resultados esperados para os experimentos, mostrou-se muito objetivo na compreensão do funcionamento dos aplicativos, mas em relação a conceitos de acústica ficou deficiente, pois foi um encontro de 45 minutos que não possibilitou a sequência de atividades que as turmas do CEJA participaram.

Quanto ao processo de ensino e aprendizagem não há uma medida quantitativa a respeito, mas a participação integral dos alunos é um indicativo de que o processo metodológico envolveu os alunos em questões importantes do aprendizado, inclusive superando as expectativas de socialização e colaboração nas atividades. Percebeu-se claramente o entusiasmo e a criatividade no momento da confecção dos TDS. Em muitos momentos do trabalho a associação das atividades às práticas do cotidiano foi feita pelos próprios estudantes, que inclusive geraram discussão, como por exemplo, a qualidade e montagem de caixas e equipamentos de som automotivo e perturbação do silêncio pelo uso de escapamentos abertos em motocicletas.

Apêndice A

Material de Apoio ao Professor

APRESENTAÇÃO

Este produto educacional foi desenvolvido no curso de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF) da Universidade Federal de Santa Catarina – Campus Araranguá. Ele é destinado como material de apoio aos docentes interessados em desenvolverem aulas experimentais, utilizando materiais recicláveis e aplicativos de *smartphones*, no estudo de fenômenos ondulatórios.

A acústica é uma área da Física que estuda a produção, propagação, as propriedades e o comportamento das ondas sonoras em ambientes distintos. Portanto, esta área está diretamente ligada às nossas condições sociais e fisiológicas e também às condições de outros seres vivos, por isso sua importância na educação. O coração deste produto educacional é a montagem experimental denominada Tubo de Diretividade Sonora (TDS), com o qual se praticam experimentos sobre variação do nível de intensidade sonora, velocidade do som, superposição e comprimento de ondas. O TDS possibilita estudar assuntos básicos da acústica sem requerer espaço físico específico e conta com a facilidade de acesso, tanto aos materiais necessários para a construção quanto para a execução experimental.

Este material conta com a descrição da construção do TDS, listagem e breve descrição dos aplicativos de produção e de análise sonora. Algumas propostas de atividades experimentais para o estudo de fenômenos ondulatórios também estão contidas.

Sumário

Tubo de Diretividade Sonora (TDS).....	1
1.1 TDS: O que é?.....	1
1.2 Construção do TDS.....	2
1.3 Como utilizar o TDS.....	4
2.1 Primeiro encontro.....	4
2.1.1 Atividade: Música e som.....	5
2.1.2 Princípios de fenômenos acústicos.....	5
2.1.3 Exercícios propostos com questões do ENEN.....	6
3.1 Segundo encontro: TDS e aplicativos.....	9
3.2 Terceiro encontro.....	10
3.3 Tubo de Diretividade Sonora de comprimento Variável (TDSV).....	12

Tubo de Diretividade Sonora (TDS)

1.1. TDS: o que é?

O Tubo de Diretividade Sonora (TDS) é estruturalmente semelhante a um tubo sonoro de extremidades abertas. A principal diferença é que o TDS não produz som, como ocorre nos instrumentos musicais de sopro. O TDS é um meio confinado de propagação que guia a onda sonora paralelamente ao eixo longitudinal do tubo. Ele é composto de canos e conexões PVC e garrafas pet. A Figura 1 apresenta um TDS montado e usado como exemplo para os alunos, este possui um segmento central por onde o *smartphone* projeta o som e duas cornetas por onde a onda sonora deve sair.

Figura 1: Um Tubo de Diretividade Sonora.



Fonte: Próprio autor

O TDS é uma ferramenta que propõe praticidade, rapidez e facilidade para iniciar o estudo da acústica, pois requer montagem simples e os materiais para a confecção são baratos, podendo ser de produtos descartáveis. Como ferramenta mediadora no processo ensino/aprendizagem, possibilita o estímulo à criatividade, pois sua confecção não é a réplica de um modelo. Permite ainda a cooperação e interação social entre os alunos, pois a confecção e execução dos experimentos possibilitam a participação coletiva.

1.2. Construção do TDS:

As medidas e materiais usados apenas dão ideia de como pode ser feito. A construção de um modelo de TDS é descrito abaixo.

Materiais necessários:

- ✓ 2 garrafas PET pequenas;

- ✓ Régua;
- ✓ Serrinha de cano;
- ✓ Cano PVC com diâmetro de 20 mm e comprimento de 60 cm;
- ✓ 2 “joelhos” ou “curvas” de 20 mm;
- ✓ 1 “T” de 20 mm;
- ✓ 1 redução de 25mm para 20mm;
- ✓ Estilete;
- ✓ Cola tipo epóxi ou similar.

Passo a passo da construção:

Corte o cano PVC em três partes iguais de 20 cm, conforme a Figura 2.

Figura 2: Corte do cano de PVC.



Fonte: Próprio autor

Corte os gargalos das garrafinhas aproveitando somente o formato cônico, conforme Figura 3.

Figura 3: Confeção das "cornetas".



Fonte: Próprio autor

Com o estilete, faça um furo na tampa da garrafinha por onde o som irá passar, veja Figura 4.

Figura 4: Corte circular na tampa.



Fonte: Próprio autor

Cole a tampa no “Joelho”, conforme Figura 5.

Figura 5: Colagem da tampa no “joelho”.



Fonte: Próprio autor

A Figura 6 apresenta um modelo de TDS pronto para a utilização em sala de aula.

Figura 6: Um modelo de TDS com suporte do mesmo material.



Fonte: Próprio autor

1.3. Como utilizar o TDS:

Para utilizar o TDS são necessários dois *smartphones*: Aquele que produz o som é acoplado ao segmento central do TDS enquanto que o outro

aparelho capta o som à distância de aproximadamente 0,5 metros à sua frente, esta distância não segue padrões técnicos de medições, apenas é uma definição arbitrária sem prejuízos para a qualidade das experiências.

Um exemplo de experimento com o TDS consiste em reproduzir uma música em um *smartphone* acoplado, enquanto outro usa o aplicativo decibelímetro mostrando a variação do nível de intensidade sonora conforme a variação na dinâmica da execução da música.

A Figura 7 apresenta a posição que o *smartphone* deve ficar em relação ao TDS.

Figura 7: Distância aproximada entre o *smartphone* e o TDS.



Fonte: Próprio autor

2.1 Primeiro encontro

Este primeiro encontro visa familiarizar os estudantes com os conceitos básicos de fenômenos físicos ondulatórios tais como, comprimento de onda, frequência, velocidade de propagação, período e as relações matemáticas que se originam da equação fundamental da ondulatória e oportunizar momentos de reflexão e discussão sobre a cultura musical brasileira.

Recursos utilizados:

- Projetor multimídia;
- Internet. Caso não haja internet na escola, o professor deve providenciar o clipe da música.
- Notebook: para a apresentação de slides e de uma música;
- Quadro branco/negro e pincel/giz.

Atividades

- Apresentação de um vídeo musical, seguido de uma discussão;
- Apresentação dos conceitos básicos de fenômenos acústicos por intermédio de questionamentos e Figuras incluindo as equações;
- Exercícios visando a observação de fenômenos acústicos de forma quantitativa.

2.1.1 Atividade: Música e som.

Inicialmente apresenta-se o clipe oficial de uma música com o objetivo de sensibilizar os estudantes quanto ao estudo da música e dos sons. Após a apresentação do vídeo, faz-se um debate conduzido por questionamentos, com o propósito de estimular a interação entre os alunos. As questões propostas são:

1. Atualmente, quais os gêneros musicais mais apreciados no Brasil?
2. O que leva uma pessoa a ter um gosto musical em vez de outro?
3. O que todos os gêneros musicais têm em comum?
4. Como é feita a música?
5. O que os instrumentos musicais têm em comum?
6. Quais sons são produzidos para nos comunicar?
7. Existem sons que não ouvimos e que eram comuns no passado?
8. Há sons que produzimos e que há algumas décadas não eram produzidos?
9. O que é o silêncio? O que é som?
10. Como ouvimos o som? Como o som chega aos nossos ouvidos?

2.1.2 Fenômenos acústicos

Através do uso de slides com figuras, discutem-se as características físicas e os conceitos associados aos fenômenos ondulatórios. São propostos os seguintes questionamentos:

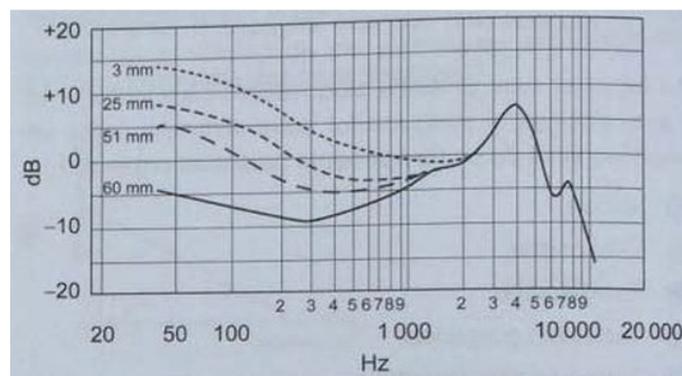
1. Como o som se propaga e do que é feito?

2. O que faz o som do apito de um árbitro de futebol ser diferente do apito de um trem?
3. Se alguém fala alto com você, significa que a voz dessa pessoa é aguda ou intensa?
4. Quão intenso é um som para nossos ouvidos?
5. Por que ouvimos o som provocado por um raio um tempo depois de vermos sua luz?

2.1.3 Exercícios propostos com questões do Enem

1. A Figura 5 apresenta o gráfico da intensidade, em decibéis (dB) de uma onda emitida por um alto-falante, que está em repouso, e medida por um microfone em função da frequência da onda para diferentes distâncias: 3 mm, 25 mm, 51 mm e 60 mm.

Figura 8. Gráfico nível de intensidade sonora



Fonte: Enem

A seguir as faixas do espectro de frequência sonora para o modelo de alto-falante utilizado neste experimento.

Figura 9. Espectro sonoro e a relação tonal



Fonte: Enem

Relacionando as informações presentes nas figuras 8 e 9, como o nível de intensidade sonora percebida é afetado pelo aumento da distância do microfone ao alto-falante?

- a) Aumenta na faixa das frequências médias.
- b) Diminui na faixa das frequências agudas.
- c) Diminui na faixa das frequências graves.**
- d) Aumenta na faixa das frequências médias altas.
- e) Aumenta na faixa das frequências médias baixas.

2. Um garoto está brincando de sacudir uma corda, produzindo uma onda transversal que se propaga por ela. Ele repara que, ao produzir uma oscilação completa a cada segundo, a distância entre duas cristas sucessivas é de 10 cm. Se o garoto dobrar a frequência com que produz a onda, qual será a velocidade de propagação da onda e comprimento de onda?

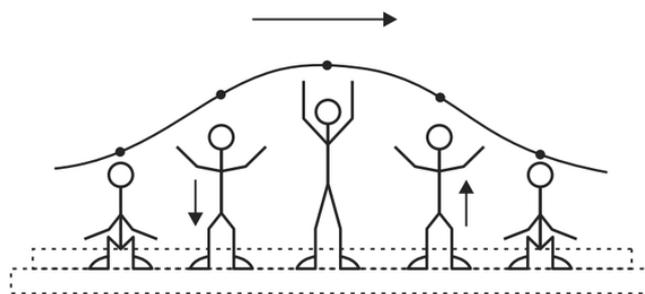
- a) 10 cm/s e 10 cm
- b) 10 cm/s e 20 cm
- c) 10 cm/s e 5 cm
- d) 20 cm/s e 10 cm**
- e) 20 cm/s e 20 cm

3. Quando adolescente, as nossas tardes, após as aulas, consistiam em tomar às mãos o violão e o dicionário de acordes de Almir Chediak e desafiar nosso amigo Hamilton a descobrir, apenas ouvindo o acorde, quais notas eram escolhidas. Sempre perdíamos a aposta, ele possui o ouvido absoluto. O ouvido absoluto é uma característica perceptual de poucos indivíduos capazes de identificar notas isoladas sem outras referências, isto é, sem precisar relacioná-las com outras notas de uma melodia. No contexto apresentado, a propriedade física das ondas que permite essa distinção entre as notas é a:

- a) Frequência**
- b) Intensidade
- c) Forma da onda
- d) Amplitude
- e) Velocidade de propagação

4. Uma manifestação comum das torcidas em estádios de futebol é a ola mexicana. Os espectadores de uma linha, sem sair do lugar e sem se deslocarem lateralmente, ficam de pé e se sentam sincronizados com os da linha adjacente. O efeito coletivo se propaga pelos espectadores do estádio, formando uma onda progressiva, conforme ilustração na figura abaixo:

Figura 10. Ola Mexicana



Fonte: Enem

Calcula-se que a velocidade de propagação desta “onda humana” é 12,5 m/s e que cada período de oscilação contém 16 pessoas, que se levantam e sentam organizadamente distanciadas entre si por 0,8 m. Nessa ola mexicana, a frequência da onda, em hertz, é um valor mais próximo de:

- a) 0,3
- b) 0,5
- c) **1,0**
- d) 1,9
- e) 3,7

3.1 Segundo encontro: TDS e aplicativos

Esse encontro é dividido em duas etapas. Os alunos confeccionam o TDS a partir de um roteiro impresso e logo após estudam o funcionamento dos aplicativos fazendo apenas testes com o Gerador de tom, Medidor de nível de intensidade Sonora e Analisador de Espectro. As medições com registros e análises são atividades do próximo encontro.

Figura 11. Confeção e montagem do TDS



Fonte: Próprio autor

O primeiro teste com aplicativo consiste em fazer um teste auditivo com os alunos. Na caixa **sub test** do aplicativo gerador de tom selecionam-se os limites máximo e mínimo de frequências a serem reproduzidas de forma automática e decrescente, transcorrendo todo espectro auditivo, após a tecla Start ser acionada.

O segundo aplicativo utilizado para testes é o medidor de nível de intensidade sonora **Sound Meter**. O teste consiste em gerar um som, pode ser uma música, e captá-lo com outro smartphone a uma distância de aproximadamente 1 metro e perceber as variações na amplitude do som.

Figura 12. Medição de nível de intensidade sonora



Fonte: Próprio autor

No terceiro teste é feita uma medição e observam-se as características sonoras de um som reproduzido através do TDS com o aplicativo *Spectroid*.

3.2 Terceiro encontro

Na primeira atividade os alunos usam 2 *smartphones* com os quais um gera ondas sonoras enquanto o outro mede o nível de intensidade sonora.

Como sugestão, os alunos podem usar uma tabela durante o experimento para registrarem suas medidas e na sequência responderem perguntas relacionadas ao experimento.

Procedimento para a primeira atividade: Nível de intensidade sonora e comprimento de onda.

1. Um participante encosta o alto-falante do *smartphone* no bocal do TDS e aciona o aplicativo gerador de tom na frequência de 1kHz.
2. Aproximadamente 1 metro à frente outro participante aponta o microfone do outro *smartphone* na direção do TDS e inicia a medição de pressão sonora com o aplicativo decibelímetro, registrando a maior amplitude sonora.
3. As medições devem ser repetidas com as frequências de 2 kHz e 3 kHz e registrando as maiores amplitudes sonoras.
4. Use o botão de controle deslizante do aplicativo gerador de tom e encontre possíveis frequências que reproduzam maior amplitude de pressão sonora.
5. Aplique a equação fundamental da ondulatória considerando a velocidade do som em 343 m/s, para calcular o comprimento de onda das frequências f_1 , f_2 , f_3 e outras possivelmente encontradas ao indicarem maior amplitude sonora.

Tabela 1. Nível de intensidade sonora e comprimento de onda

Frequência	1kHz	2kHz	3kHz
Comprimento de onda (m)			
Nível de intensidade sonora (dB)			

Fonte: Próprio autor.

Após a atividade da tabela os alunos fazem cartazes de cartolina e apresentam os trabalhos conforme a sugestão a seguir:

Figura 13. Modelo de cartaz de apresentação de trabalho.

Título

Cole a tabela aqui

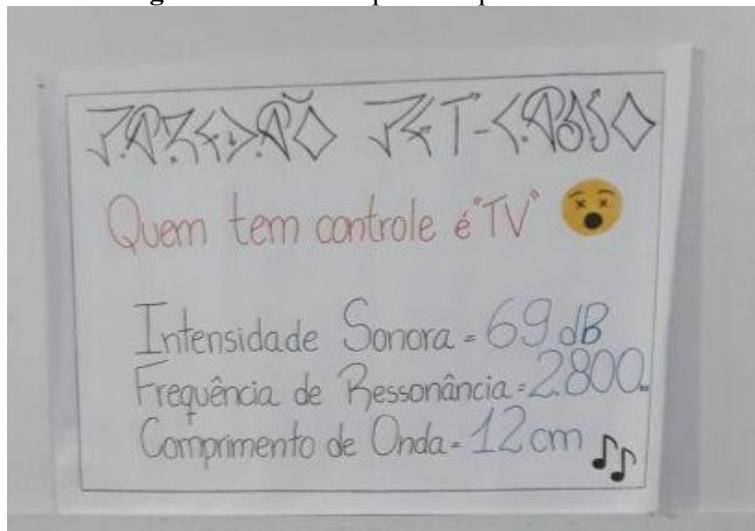
Cole as respostas aqui

Disciplina-professor
Nomes- alunos

Fonte: Próprio autor

Na apresentação os alunos de cada grupo mostrarão os seus trabalhos indicando qual frequência conseguiu maior amplitude e qual o comprimento de onda dessa frequência. Os resultados dos experimentos podem ser mostrados de outra forma, até mesmo por mídias digitais ou outro meio se achar mais adequado.

Figura 14. Cartaz exposto na parede da sala.



Fonte: Próprio autor

3.3 Tubo de Diretividade Sonora de comprimento Variável (TDS-V)

Recursos utilizados:

Dois *smartphones*

Internet

Fita crepe

Régua

Lápis

Três TDS-V pré-montados

O TDS-V é um Tubo de Diretividade Sonora de comprimento Variável que permite encontrar os modos normais das ondas estacionárias no interior do tubo. As ondas estacionárias são formadas com maior ou menor amplitude conforme o comprimento do tubo é alterado. Sabe-se que entre o intervalo de dois pontos de máxima amplitude há meio comprimento de onda da frequência.

Montagem

A montagem é feita do mesmo modo que um TDS de comprimento fixo, apenas acrescenta-se um cano de PVC ao bocal, com espessura menor e comprimento igual ao segmento que vai até a corneta. Para a montagem deste experimento são usados canos de espessuras 25 mm para o conjunto e 20mm para o segmento de variação do comprimento.

Sugestão de perguntas

1. O que acontece se o decibelímetro variar sua distância em relação ao TDS?
2. É possível que a frequência de maior amplitude encontrada tenha algo a ver com o formato geométrico do TDS?
3. Para o TDS de mais de uma “corneta”, A amplitude das frequências varia conforme o TDS se movimenta lateralmente em frente ao sonômetro/decibelímetro?
4. Que tipo de relação encontrou-se entre frequência e comprimento de onda?

Sugestão de atividade extra para análise de harmônicos

No momento em que os TDS atinge maior intensidade sonora, pode-se usar o *Spectroid* e salvar imagens para compará-las a outros gráficos com outras frequências. Nessa atividade é possível perceber frequências múltiplas da fundamental.

APÊNDICE B

Questionário de Avaliação

Questionário de avaliação

Gostaríamos que você respondesse as questões abaixo sobre a sua percepção da qualidade da atividade proposta para ajudar a melhorá-lo. Todos os dados são coletados anonimamente e somente serão utilizados no contexto desta pesquisa de mestrado.

Nome do pesquisador responsável: _____

Local e data: _____

Informações Demográficas	
Instituição:	
Curso:	
Faixa etária:	<input type="checkbox"/> Menos de 18 anos <input type="checkbox"/> 18 a 28 anos <input type="checkbox"/> 29 a 39 anos <input type="checkbox"/> 40 a 50 anos <input type="checkbox"/> Mais de 50 anos
Gênero:	<input type="checkbox"/> Masculino <input type="checkbox"/> Feminino

Por favor, **marque uma opção** de acordo com o quanto você concorda ou discorda de cada afirmação abaixo.

Experiência do Participante					
Afirmações	Marque uma opção conforme sua avaliação				
	Discordo Totalmente	Discordo	Nem discordo, nem concordo	Concordo	Concordo Totalmente
Eu precisei aprender poucas coisas para poder começar a atividade.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Executar as tarefas exigidas foi fácil para mim.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
As instruções sobre o que deve ser feito são claras e compreensíveis.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
A organização do conteúdo me ajudou a estar confiante de que eu iria aprender com essa atividade.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
A atividade é adequadamente desafiadora para mim.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Completar as tarefas de atividade me deu um sentimento de realização.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Me sinto satisfeito com as coisas que aprendi no processo.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Eu pude interagir com outras pessoas durante a atividade.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
A atividade promove momentos de cooperação e/ou competição entre os jogadores.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Eu me senti bem interagindo com outras pessoas durante a atividade.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Eu me diverti com a atividade.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
A atividade é um método de ensino adequado para esta disciplina.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Eu prefiro aprender com essa atividade do que de outra forma (outro método de ensino).	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Percepção da Aprendizagem					
Afirmações	Marque uma opção conforme sua avaliação				
	Discordo Totalmente	Discordo	Nem discordo, nem	Concordo	Concordo Fortemente

			concordo		
A atividade contribuiu para a minha aprendizagem na disciplina.	<input type="checkbox"/>				
A atividade foi eficiente para minha aprendizagem, em comparação com outras atividades da disciplina.	<input type="checkbox"/>				
O conteúdo estudado e desenvolvido (acústica) foi claramente apresentado e objetivado no início do bloco/encontros?	<input type="checkbox"/>				
O método de ensino e os recursos didáticos usados durante as aulas ajudaram e foram suficientes no entendimento do conteúdo?					
As atividades nas aulas foram importantes para o entendimento do conteúdo?					
As atividades que envolvem matemática são compreensíveis?					
As atividades que envolveram apenas conceitos de acústica foram compreendidas?					
As atividades práticas como a da confecção do trabalho com garrafas pet teve importância na compreensão do que foi estudado na teoria?					
O material usado para confeccionar o trabalho era de fácil acesso?					

Cite 3 pontos fortes da atividade:

Dê 3 sugestões para a melhoria da atividade:

Comentários adicionais:

Muito obrigado pela sua contribuição!

Referências Bibliográficas

- [1] BRASIL. Ministério da Educação. PCN+ Ensino Médio: Orientações Educacionais Complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais. Física, MEC-SEMTEC, 2002. Disponível em: http://www.sbfisica.org.br/arquivos/PCN_FIS.pdf
Acessado em 05/02/2019.
- [2] Andrade, M. E. Simulação e modelagem computacional com o software Modellus: aplicações práticas para o ensino de física. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2016.
- [3] Brandão, P.A. Reflexões acerca do uso das novas tecnologias no processo de formação docente para a educação profissional. Anais do III Colóquio Nacional, Formação de professores para a educação profissional, 2015.
Disponível em: <https://ead.ifrn.edu.br/portal/wp-content/uploads/2016/02/Artigo-29.pdf>
Acessado em 05/02/2019.
- [4] VYGOTSKY, Lev. S. Aprendizagem e desenvolvimento na Idade Escolar. In: Linguagem, desenvolvimento e aprendizagem. Vigostky, L. Luria, A. Leontiev, A.N. 11ª. Edição. São Paulo: Ícone, 2010, p. 103-116.
- [5] Mattos, C.R.; Bastos, P.W., Física para uma Saúde Auditiva, XVIII Simpósio Nacional de Ensino de Física, 2009.
Disponível em: <http://www.sbf1.sbfisica.org.br/eventos/snef/xviii/sys/resumos/T0711-1.pdf> Acessado em 08/02/2019
- [6] Silva Jr, R.S; Miltão, M. S. R. O fenômeno acústico e o ensino médio: utilização de instrumentos musicais como incentivo para o ensino de acústica; o caso do cavaquinho. Caderno de física da uefs 13 (02): 2401.1-36, 2015
Disponível em:
http://dfisweb.uefs.br/caderno/vol13n2/s4Artigo1RomualdoMiltao_Acustica.pdf
- [7] Nascimento, M.A. O uso da experimentação como metodologia facilitadora do processo de ensino e aprendizagem de física, CONEDU – V Congresso Nacional de Educação, 2018.
Disponível em:
http://www.editorarealize.com.br/revistas/conedu/trabalhos/TRABALHO_EV117_MD1_SA16_ID5881_17092018192356.pdf
Acessado em 05/02/2019.
- [8] Alonso, K.M. As tecnologias da informação e comunicação e a aprendizagem colaborativa no ensino fundamental. Revista Contrapontos - Eletrônica, Vol. 12 - n. 1-p. 58-67 / jan-abr 2012.
Disponível em: <https://siaiap32.univali.br/seer/index.php/rc/article/view/2350/2196>
Acessado em 05/02/2019.
- [9] Grillo, M.L; Perez, L.R. Física e Música. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2016.
- [10] Mckelvey, J.P; Grotch, H; Física 4, Harbra - Harper & Row do Brasil, São Paulo (1981).

[11] Young , H. D; Freedman ,R. A; Física II – Termodinâmica e Ondas ,12ª Edição, Editora Pearson, 2012.

[Horn 2019] Bjørn Kolbrek “Horn Theory: An Introduction, Part 1”

Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/237136077_Horn_Theory_An_Introduction_Part_1

Acesso em: 11/02/2019

[Google Play 2019] Serviço de distribuição digital de aplicativos da Google

Disponível em: <https://play.google.com/store>

Acesso em 11/02/2019

[Trem Bala 2019] Ana Vilela “Ana Vilela - Trem-Bala [Clipe Oficial]”

Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=sWhy1VcvvgY>

Acessado em 11/02/2019

[Trem 2019] Caio Gasparetto Gamer “trem buzinando”

Disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=Gjg2Evno_2Y&t=18s

Acessado em 11/02/2019

[Enem 2019] Exame Nacional do Ensino Médio

Disponível em: <https://enem.inep.gov.br/>

Acessado em 11/02/2019

[Pet 2019] Giorgio Abrantes “Mini Paredão pra Celular 2 cornetas”

Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=PR2eg-w8t9M&t=4s>

Acessado em 11/02/2019

[Interf. 2019] Orlando Benito Escalona Toro “Interferencia en el agua”

Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=1mPYQ5DVPxQ>

Acessado em 11/02/2019